



UNIVERSIDAD DE PANAMÁ  
VICERRECTORÍA DE INVESTIGACIÓN Y POSTGRADO  
PROGRAMA DE MAESTRÍA EN CIENCIAS QUÍMICAS

DESARROLLO DE UNA METODOLOGÍA ANALÍTICA PARA LA  
DETERMINACIÓN DE TRAZAS DE SULFATOS EN AGUAS Y SU APLICACIÓN  
EN LA CARACTERIZACIÓN HIDROQUÍMICA DEL ACUÍFERO URBANO DE LA  
CIUDAD DE PENONOMÉ Y SUS ALREDEDORES

POR

AURA DEL CARMEN JOHNSON BATISTA

TESIS PRESENTADA COMO REQUISITO PARA OPTAR POR EL GRADO DE  
MAESTRÍA EN CIENCIAS QUÍMICAS CON ESPECIALIZACIÓN EN QUÍMICA  
ANALÍTICA

PANAMÁ, REPÚBLICA DE PANAMÁ

2018

A



Título de la Tesis:

**“Desarrollo de un metodología analítica para la determinación de Trazas de sulfatos en aguas y su aplicación en la caracterización Hidroquímica del Acuífero Urbano de la ciudad de Penonomé y sus alrededores”**

**TESIS**

Sometida para optar al título de Maestría en Ciencias Química con Especialización en Química Analítica.

Vicerrectoría de Investigación y Postgrado

Facultad de Ciencias Naturales, Exactas y Tecnología

APROBADO POR:

**Dr. Orlando Leone**  
Presidente

**Dra. Denis Vega**  
Miembro

**Dra. Maritza Bravo**  
Miembro

REFRENDADO POR:

**REPRESENTANTE DE LA VICERRECTORÍA  
DE INVESTIGACIÓN Y POSTGRADO**

FECHA:

31 ENE 2019

Donde se pare el autor

\_\_\_\_\_

## **DEDICATORIA**

Con mucho amor, a Dios Padre Todopoderoso, a mi esposo y, en especial, a mis hijos Diomedes Alberto y Yeniseh Del Carmen

## AGRADECIMIENTO

En primer lugar quiero agradecer a Dios, el Gran Maestro, por ser mi luz y mi guía durante toda mi existencia, por concederme la salud, la sabiduría y la fuerza de voluntad para culminar con éxito este trabajo

Quiero expresar mi infinito agradecimiento al profesor Orlando Leone por su sabia orientación, su paciencia, los conocimientos transmitidos y por todo el tiempo dedicado durante el desarrollo de esta investigación. Dios lo bendiga grandemente

Al Dr. Juan A. Jaén por sus atinados consejos y su valiosa gestión como director inicial del programa de maestría, mi eterno agradecimiento

Al personal encargado del laboratorio del Centro de Investigaciones con Técnicas Nuclearés (CITEN) y del laboratorio de Absorción Atómica de la Vicerrectoría de Investigación y Postgrado de la Universidad de Panamá, por facilitarme sus instalaciones y equipos para la realización de este trabajo

Igualmente al profesor Pedro Salinas, a los licenciados Ricardo Cañón, Jafeth Cárdenas y Arianne Pineda, por su apoyo durante las giras y en el laboratorio

De manera muy especial quiero agradecer a mi esposo por su paciencia, comprensión, sacrificio y sobre todo por ser una parte tan importante en mi vida

Finalmente quiero hacer extensivo mi agradecimiento a mis hijos, hermanos, demás familiares y amigos que me brindaron su ayuda irrestricta

## INDICE GENERAL

|  | Página |
|--|--------|
| DEDICATORIA  | ii     |
| AGRADECIMIENTO   | iii    |
| ÍNDICE GENERAL   | iv     |
| ÍNDICE DE CUADROS  | viii   |
| ÍNDICE DE FIGURAS  | xi     |
| ABREVIATURAS Y ACRÓNIMOS EMPLEADOS   | xiii   |
| RESUMEN  | 1      |
| SUMMARY  | 2      |
| I INTRODUCCIÓN GENERAL   | 3      |
| Antecedentes   | 7      |
| Estudios hidroquímicos en las aguas de las áreas de Penonomé, Antón y<br>Punta Chame | 9      |
| Problemática del análisis de sulfatos en muestras de aguas de la zona de<br>estudio  | 10     |
| Objetivo general   | 13     |
| Objetivos específicos  | 13     |
| II MARCO TEÓRICO   |        |
| 2.1 Las aguas subterráneas   | 17     |
| 2.1.1 Generalidades  | 16     |

|                 |  |    |
|-----------------|--|----|
| 2 1 2           | Clasificación  | 21 |
| 2 1 3           | Contaminación antropogénica  | 22 |
| 2 1 4           | Caracterización, balance iónico, relación entre iones y otros<br>parámetros                            | 23 |
| 2 1 4 1         | Caracterización  | 23 |
| 2 1 4 2         | Balance iónico   | 26 |
| 2 1 4 3         | Relaciones entre iones y otros parámetros  | 29 |
| 2 2             | Técnicas analíticas de análisis de sulfatos  | 29 |
| III METODOLOGIA |  |    |
| 3 1             | Área de estudio y selección de estaciones de muestreo  | 36 |
| 3 1 1           | Localización geográfica y características fisiográficas  | 36 |
| 3 1 2           | Selección de estaciones de muestreo  | 41 |
| 3 2             | Procedimiento de muestreo y análisis de campo  | 44 |
| 3 2 1           | Procedimiento de muestreo  | 44 |
| 3 2 2           | Análisis de campo  | 45 |
| 3 3             | Calibración del material gravimétrico y de cristalería   | 46 |
| 3 4             | Metodología de análisis de sulfatos  | 47 |
| 3 4 1           | Desarrollo del método analítico utilizado  | 47 |
| 3 4 1 1         | Preconcentración de la muestra empleando intercambio iónico<br>(aniónico) Selección del mejor eluyente | 48 |
| 3 4 1 2         | Determinación del mejor agente orgánico modificador de la<br>solubilidad del sulfato de bario          | 50 |

|  |    |
|--|----|
| 3 4 1 3 Determinación del mejor método de lectura absorbancia vs nefelometría                      | 50 |
| 3 4 2 Validación del método propuesto  | 53 |
| 3 5 Metodología analítica de los otros parámetros químicos   | 53 |
| 3 5 1 Técnicas empleadas para cada parámetro   | 53 |
| 3 5 2 Estudio de validaciones realizadas   | 54 |
| IV RESULTADOS Y DISCUSIÓN  |    |
| 4 1 Resultado de la validación del método  | 56 |
| 4 1 1 Acondicionamiento de la columna Selección del mejor eluyente                                 | 56 |
| 4 1 2 Selección del mejor agente orgánico modificador de la solubilidad del sulfato de bario       | 59 |
| 4 1 3 Comparación del mejor método de lectura Absorbancia-nefelometría                             | 60 |
| 4 2 Resultados analíticos de sulfatos  | 61 |
| 4 2 1 Significancia de la inclusión del sulfato en el balance iónico                               | 65 |
| 4 3 Resultados de los otros parámetros analíticos  | 72 |
| 4 4 Resultados estadísticos de las tres giras y caracterización de las aguas de la zona de estudio | 76 |
| 4 4 1 Comparación de los resultados de sulfatos en las tres giras                                  | 76 |
| 4 4 2 Comparación de todos los parámetros en la primera gira                                       | 79 |
| 4 4 3 Caracterización de las aguas analizadas del sector de Penonomé                               | 84 |

|     |                                |    |
|-----|--------------------------------|----|
| V   | CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES |    |
| 5 1 | Conclusiones                   | 87 |
| 5 2 | Recomendaciones                | 88 |
| VI  | REFERENCIA BIBLIOGRÁFICA       | 89 |
|     | ANEXOS                         | 96 |

## ÍNDICE DE CUADROS

| No. de cuadro | Título  | Página |
|---------------|---|--------|
| Cuadro 1      | Datos de medición de sulfatos en análisis preliminares<br>(diciembre, 2012)   | 12     |
| Cuadro 2      | Error aceptable en balance iónico, según conductividad  | 28     |
| Cuadro 3      | Error aceptable en balance iónico, según sumatoria de aniones   |        |
| Cuadro 4      | Código de identificación y georeferencia de las estaciones de muestreo  | 44     |
| Cuadro 5      | Técnicas analíticas empleadas para el análisis de los distintos parámetros en aguas de ríos y pozos de Penonomé                                   | 54     |
| Cuadro 6      | Resultados de turbiedad de patrones de sulfato en columna de intercambio aniónico empleando HCl 5,0 M como eluyente                               | 56     |
| Cuadro 7      | Resultados de turbiedad de patrones de sulfato en columna de intercambio aniónico empleando NaCl 5,0 M como eluyente                              | 57     |
| Cuadro 8      | Resultados de la concentración de sulfato (ppm) extraído con NaCl 5,0 M en las primeras fracciones  | 57     |
| Cuadro 9      | Parámetros estadísticos de la curva de calibración con los datos obtenidos para los patrones de sulfatos extraídos con NaCl 0,5 M en resina Dowex | 59     |
| Cuadro 10     | Resultados analíticos de los patrones de sulfatos con las soluciones acondicionadoras (con diferentes alcoholes)                                  | 59     |

|           |   |    |
|-----------|---|----|
| Cuadro 11 | Resultados estadísticos con los distintos alcoholes, empleando lectura por nefelometría y absorbancia | 60 |
| Cuadro 12 | Concentración de sulfatos en las aguas muestreadas del río Zaratí                                     | 64 |
| Cuadro 13 | Resultados del balance iónico sin sulfatos, primera gira (Diciembre, 2012)                            | 66 |
| Cuadro 14 | Resultados del balance iónico con sulfatos, primera gira (Diciembre, 2012)                            | 67 |
| Cuadro 15 | Resultados del balance iónico sin sulfatos, segunda gira (Agosto, 2012)                               | 68 |
| Cuadro 16 | Resultados del balance iónico con sulfatos, segunda gira (Agosto, 2012)                               | 69 |
| Cuadro 17 | Resultados del balance iónico sin sulfatos, tercera gira (Diciembre, 2013)                            | 70 |
| Cuadro 18 | Resultados del balance iónico con sulfatos, tercera gira (Diciembre, 2013)                            | 71 |
| Cuadro 19 | Datos de temperatura, pH, conductividad eléctrica y turbiedad de las muestras de agua analizadas      | 73 |
| Cuadro 20 | Resultados de concentración de aniones en las tres giras  | 74 |
| Cuadro 21 | Resultados de concentración de cationes en las tres giras   | 75 |
| Cuadro 22 | Resumen estadístico de los datos de sulfatos obtenidos en las tres giras                              | 76 |

|              |  |     |
|--------------|--|-----|
| Cuadro 23    | Resultado de contraste múltiple de rango de sulfatos de las tres giras                               | 77  |
| Cuadro 24    | Resultados de análisis de varianza de las tres giras para sulfatos                                   | 77  |
| Cuadro 25    | Resumen de análisis estadístico de los distintos parámetros fisicoquímicos de la primera gira        | 79  |
| Cuadro 26    | Resultados de la prueba de comparaciones múltiples   | 80  |
| Cuadro 27    | Variables que presentaron correlación significativa a un nivel de confianza del 95 %                 | 82  |
| Cuadro 28    | Resultados de la prueba de componentes principales para todos los parámetros                         | 83  |
| Cuadro A-1 1 | Parámetros estadísticos obtenidos con los patrones (1 0, 0 5 y 0 1 ppm)                              | 97  |
| Cuadro A-1 2 | Parámetros estadísticos obtenidos con los patrones analizados, empleando 2-metoxietanol Nefelometría | 97  |
| Cuadro A-1 3 | Parámetros estadísticos obtenidos con los patrones analizados, empleando 2-metoxietanol Absorbancia  | 98  |
| Cuadro A-1 4 | Parámetros estadísticos obtenidos con los patrones analizados, empleando isopropanol Nefelometría    | 98  |
| Cuadro A-1 5 | Parámetros estadísticos obtenidos con los patrones analizados, empleando isopropanol Absorbancia     | 99  |
| Cuadro A-1 6 | Parámetros estadísticos obtenidos con los patrones analizados, empleando etanol Nefelometría         | 99  |
| Cuadro A-1 7 | Parámetros estadísticos obtenidos con los patrones analizados, empleando etanol Absorbancia          | 100 |
| Cuadro A-1 8 | Correlaciones de Pearson de los parámetros analizados  | 101 |

## ÍNDICE DE FIGURAS

| <b>No. de figura</b> | <b>Título</b>   | <b>Página</b> |
|----------------------|---|---------------|
| Figura 1             | El agua subterránea como parte del ciclo hidrológico  | 17            |
| Figura 2             | Distribución global del agua  | 18            |
| Figura 3             | Agua subterránea para uso agrícola  | 20            |
| Figura 4             | Diagrama de Stiff típicos   | 24            |
| Figura 5             | Esquema del diagrama de Piper   | 26            |
| Figura 6             | Localización del área de estudio  | 36            |
| Figura 7             | Toma de agua de la planta potabilizadora del IDAAN, río Zaratí                                    | 37            |
| Figura 8             | Mapa de pendiente de la cuenca del río Zaratí, con la ayuda del modelo digital                    | 39            |
| Figura 9             | Modelo digital de terreno de la cuenca del Zaratí   | 40            |
| Figura 10            | Vista panorámica del cauce del río Zaratí   | 41            |
| Figura 11            | Mapa de localización de las estaciones de muestreo  | 43            |
| Figura 12            | Sonda multiparamétrica YSI-556  | 46            |
| Figura 13            | Columna de intercambio iónico empleada  | 49            |
| Figura 14            | Vortex marca Heiolph tipo TEAX top, empleado para permitir la formación completa de los cristales | 51            |
| Figura 15            | Turbidímetro marca OAKTON empleado en la medición   | 52            |
| Figura 16            | Espectrofotómetro UV/visible Hach DR2800  | 52            |

|           |   |    |
|-----------|---|----|
| Figura 17 | Curva de calibración obtenida con los patrones  | 58 |
| Figura 18 | Variación de los niveles de sulfato por estación de muestreo  | 65 |
| Figura 19 | Gráfico de cajas y bigotes de la data de sulfatos de las tres giras   | 78 |
| Figura 20 | Diagrama de comparaciones múltiples para los diferentes parámetros físicoquímicos determinados en las muestras de agua colectadas en la primera gira (LSD al 95,0 % de confianza) | 81 |
| Figura 21 | Diagrama cajas y bigotes de los distintos parámetros físicoquímicos determinados en las muestras de agua primera gira   | 81 |
| Figura 22 | Diagrama de componentes principales para los diferentes parámetros físicoquímicos analizados en la muestras de agua (primera gira)  | 84 |
| Figura 23 | Diagrama de Piper obtenido de los datos de muestras de aguas (primera gira) del sector de Penonomé y alrededores  | 85 |

## ABREVIATURAS Y ACRÓNIMOS EMPLEADOS

| <b>Abreviatura/acrónimo</b> | <b>Significado</b>                                   |
|-----------------------------|--|
| IMTA                        | Instituto Mexicano de Tecnología del Agua            |
| ANAM                        | Autoridad Nacional del Ambiente                      |
| ETESA                       | Empresa de Transmisión Eléctrica, S A                |
| MINSA                       | Ministerio de Salud                                  |
| IDAAN                       | Instituto de Acueductos y Alcantarillados Nacionales |
| CITEN                       | Centro de Investigaciones con Técnicas Nucleares     |
| ESI (ISE)                   | Electrodos Selectivo de Iones                        |
| STD                         | Sólidos totales disueltos                            |
| LD                          | Límite de detección                                  |
| LQ                          | Límite de cuantificación                             |
| CVm                         | Coefficiente de variación de la pendiente            |
| CE                          | Conductividad eléctrica                              |
| meq/L                       | Miliequivalentes por litro                           |
| $\mu\text{S/cm}$            | Microsiemens por centímetro                          |
| m s n m                     | Metros sobre el nivel del mar                        |
| AR                          | Reactivo analítico                                   |

## RESUMEN

Estudios preliminares realizados en muestras de aguas en el sector de Penonomé determinaron que los niveles de sulfatos estaban principalmente por debajo de 1,0 ppm, por lo que se decidió desarrollar un método analítico de trazas de sulfatos para poder caracterizar las aguas del área y determinar variaciones estadísticas en los niveles de sulfatos entre temporadas. Se hicieron ensayos preliminares con técnicas espectroscópicas de absorción molecular y nefelometría. Aunque ambas presentaron prácticamente los mismos límites de detección (LD) por encima de 1,0 ppm, la nefelométrica presentó mayor sensibilidad por lo que se decidió modificar y optimizar esta técnica para poder medir las concentraciones de sulfato en el área de interés. Se realizaron ensayos con diferentes solventes no acuosos y se preconcentró la muestra utilizando resina de intercambio aniónico, lográndose desarrollar un método analítico para sulfatos con un límite de detección de 0,5 ppm, lo que permitió caracterizar hidroquímicamente el sector de Penonomé y determinar variaciones estadísticas en diferentes temporadas. La prueba de significancia para el balance iónico indicó que hay diferencia entre el balance iónico con sulfato y el balance iónico sin sulfato al 95 % de confianza. Además se observa que el error disminuye de 2,3 % a 0,94 % para la primera gira utilizada para caracterizar el acuífero. De acuerdo a la caracterización hidroquímica, las muestras del área de estudio fueron tipificadas mayoritariamente como Na-Ca-HCO<sub>3</sub> (79%), encontrándose un pequeño porcentaje de aguas Na-Ca-Mg-HCO<sub>3</sub>. De acuerdo al tratamiento de correlaciones de Pearson, el sulfato no presenta correlación significativa con los otros parámetros, lo que indica que su comportamiento es independiente de éstos. El análisis de componentes principales corrobora este hecho en donde el SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> no se muestra agrupado.

## SUMMARY

Preliminary studies fulfilled on water samples in the Penonomé sector determined that the sulphate levels were mainly below 1,0 ppm, so it was decided to develop an analytical method for traces of sulphate to characterize the waters of the area and determine statistical variations in sulfate levels between seasons. Preliminary tests were performed with spectroscopic molecular absorption and nephelometry techniques. Although both had practically the same detection limits (LD) above 1,0 ppm, the nephelometric showed greater sensitivity, so it was decided to modify and optimize this technique in order to measure sulfate concentrations in the area of interest. Tests were carried out with different non-aqueous solvents and the sample was preconcentrated using anion exchange resin, developing an analytical method for sulfates with a detection limit of 0,5 ppm, which allowed to characterize the Penonomé sector hydrochemically and to determine statistical variations in different seasons. The significance test for the ionic balance indicated that there is a difference between the ionic balance with sulfate and the ionic balance without sulfate at 95 % confidence. It is also observed that the error decreases from 2,3% to 0,94 % for the first tour used to characterize the aquifer. According to the hydrochemical characterization, the samples from the study area were typified mainly as Na-Ca-HCO<sub>3</sub> (79%), with a small percentage of water characterized as Na-Ca-Mg-HCO<sub>3</sub>. According to Pearson's correlation treatment, sulfate does not show significant correlation with the other parameters, which indicates that its behavior is independent of them. The analysis of main components corroborates this fact where SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> is not shown grouped with the others parameters.

# **I. INTRODUCCIÓN GENERAL**

El interés sobre las aguas subterráneas ha venido aumentando en los ambientes técnicos y científicos de todo el mundo y de forma muy especial en los últimos años. La razón es el uso creciente que se hace de ellas para satisfacer las necesidades de abastecimiento, riego e industria (Sauquillo, 1994)

Debido al descenso progresivo de la disponibilidad de recursos hídricos como consecuencia, principalmente, del crecimiento de la población y de la contaminación de aguas superficiales, sumados a la variabilidad climática que incide sobre la distribución espacial y temporal del agua, se ha venido incrementando la necesidad de realizar estudios de aguas subterráneas (Custodio & Llamas, 1996)

Considerando que la gestión del recurso hídrico supone una acción integrada que implica el servicio de profesionales de distintas áreas, la química analítica se perfila como una de las ramas indispensables para este propósito

Uno de los principales objetivos perseguidos por la química analítica es la incesante búsqueda de métodos de análisis más rápidos, selectivos y sensibles. No obstante, en la práctica, aunque no es imposible, resulta muy difícil encontrar métodos analíticos que combinen estas tres cualidades y, en general, alguna de ellas debe ser sacrificada en beneficio de las otras. En algunas áreas, más que su sensibilidad, la velocidad del proceso suele condicionar las características del método empleado, tal como sucede en el análisis industrial, por ejemplo. Por el contrario, en otras áreas, la necesidad de determinar sustancias en cantidades muy pequeñas puede suponer el empleo de métodos muy lentos, tediosos o muy costosos, pero que llenan el cometido para el cual han sido diseñados. Tal es el caso de algunos métodos de análisis de ciertos parámetros en aguas, los cuales han cobrado cada vez más importancia debido a que las

cuestiones ambientales referidas al recurso hídrico son una de las preocupaciones más importantes en el mundo actual. Este interés se fundamenta en el hecho de que el agua es uno de los recursos naturales de mayor importancia para el desarrollo de la vida en el planeta por los múltiples beneficios que brinda, pero la presión demográfica, el ritmo de desarrollo económico, la urbanización y la contaminación están ejerciendo una presión sin precedentes sobre este recurso renovable pero finito, sobre todo en regiones áridas y semiáridas (Díaz et al, 2005)

La problemática del agua se vincula con tres aspectos básicos, su cantidad, calidad y su disponibilidad para los distintos usos. Estos aspectos están directamente relacionados, ya que la disponibilidad del agua para un uso determinado se puede ver afectada, si la cantidad o calidad del recurso se altera gravemente. En general, el deterioro de la calidad del agua se produce por contaminación, es decir, por la adición de agentes contaminantes que generan diversas alteraciones de las características químicas, físicas y biológicas del recurso (IMTA, 2012). En este sentido, el desarrollo de métodos analíticos para el análisis de aguas ha sido objeto de interés y de una ardua e incesante tarea por parte de los químicos analíticos.

Hasta hace pocos años, bastaba analizar los iones más abundantes y ciertos parámetros físicos en las muestras de aguas subterráneas para conocer su idoneidad para los diversos usos requeridos. Sin embargo, la progresiva contaminación de los acuíferos debido a la actividad humana con la consecuente existencia de constituyentes químicos en concentraciones altas, bajas y a nivel de trazas en estas fuentes de aguas, ha puesto a punto el desarrollo de metodologías analíticas capaces de cuantificarlos.

La posibilidad de aplicar metodologías precisas, no sólo para elementos mayoritarios sino también para minoritarios con mayor fiabilidad, ha hecho que la Química Analítica se convierta en una rama clave para otras áreas como la hidroquímica e hidrogeoquímica, permitiendo a éstas, el aporte de información valiosa sobre las concentraciones de los constituyentes químicos de las aguas naturales y también sobre el origen y distribución de las aguas subterráneas, así como de los procesos fisicoquímicos que la afectan

Tomando en cuenta que los procesos físico-químicos que tienen lugar en el contacto agua-roca e, incluso, entre dos aguas de diferente composición, responden a la búsqueda de equilibrios iónicos, a veces complejos, su estudio requiere una sólida formación química, no habitual en el hidrogeólogo clásico, por lo que la hidrogeoquímica se manifiesta como una ciencia claramente multidisciplinar en la que la colaboración del químico analítico es absolutamente imprescindible y cuyas condiciones básicas de trabajo son un muestreo representativo y una metodología analítica precisa y fiable, incluyendo el tratamiento y almacenamiento de las muestras

Actualmente la preocupación sobre los usos del agua y las reservas de agua en nuestro país justifican la necesidad de realizar estudios sobre caracterización hidroquímica de las distintas fuentes y reservorios de agua dulce

La caracterización hidroquímica de las aguas implica la determinación de ciertos parámetros fisicoquímicos y biológicos mediante métodos de análisis fiables que permitan una gestión integrada del recurso. Igualmente, para llevar a cabo la interpretación sobre el origen y la historia del agua, se requieren de los datos de tales parámetros fisicoquímicos tales como temperatura, pH, conductividad y potencial de

óxido-reducción, se precisa conocer la concentración de los iones mayoritarios sodio ( $\text{Na}^+$ ), potasio ( $\text{K}^+$ ), calcio ( $\text{Ca}^{2+}$ ), magnesio ( $\text{Mg}^{2+}$ ), bicarbonatos ( $\text{HCO}_3^-$ ), sulfatos ( $\text{SO}_4^{2-}$ ), cloruros ( $\text{Cl}^-$ ) y nitratos ( $\text{NO}_3^-$ ), se obtienen argumentos adicionales a partir del conocimiento de la presencia de compuestos minoritarios, trazas, compuestos microbiológicos, orgánicos y volátiles (Santa *et al*, 2008)

### **Antecedentes**

Si se toma en cuenta la importancia que revisten las aguas subterráneas para el equilibrio de los ecosistemas, la atención que éstas han tenido, en comparación con las aguas superficiales, ha sido escaso, quizás por el hecho de que los impactos que estas puedan tener no son tan visibles o lo son a un plazo más largo. Los estudios técnicos y científicos sobre su funcionamiento son relativamente recientes.

En Panamá la situación no es diferente, pues según ANAM (2011), con relación al agua subterránea, la información existente es muy limitada y reciente, ya que hasta el año 1999, la Empresa de Trasmisión Eléctrica, S A (ETESA), elaboró el primer mapa hidrogeológico de la República de Panamá, el cual permitió, sobre una base topográfica y geológica, indicar las principales características hidrogeológicas del país, brindar información de carácter local, como la ubicación de pozos y otras obras de ingeniería, relacionadas con los recursos hídricos, suministrar un mínimo de indicaciones provisionales en espera del establecimiento de investigaciones más detalladas, la preparación de mapas a mayor escala, e iniciar la conformación de un banco de datos hidrogeológicos.

De toda la información hidroquímica, los datos más completos son los referentes al total de sólidos disueltos (SDT), los cuales fueron utilizados para elaborar el mapa temático, Distribución del Total de Sólidos Disueltos de las Aguas Subterráneas en la República de Panamá, el cual aparece en el Mapa Hidrogeológico de Panamá. Los datos utilizados para la elaboración de este mapa temático, se obtuvieron de análisis químicos efectuados en aguas de manantiales y de pozos con profundidades inferiores a 65 m (ETESA, 1999)

En cuanto a estudios hidroquímicos recientes en Panamá, puede mencionarse el que inicia La Autoridad Nacional del Ambiente (hoy Ministerio de Ambiente) desde el año 2002, mediante el monitoreo de 95 ríos a nivel nacional, a través de 519 puntos de monitoreo, durante las temporadas seca y lluviosa, en 35 cuencas hidrográficas priorizadas. Los noventa y cinco ríos fueron seleccionados por su importancia en el desarrollo socioeconómico de la región (como el abastecimiento de agua potable, uso recreativo y el uso para descargar aguas residuales, entre otros), los puntos de monitoreo se determinaron conforme a la parte alta, media y baja del cauce de los ríos que fueron monitoreados.

El río Matasnillo (provincia de Panamá) fue objeto de estudio por Leone *et al* (2017), quienes aplicando polarografía de pulso diferencial y redisolución anódica, determinaron concentraciones Zn, Cd, Pb y Cu en las aguas de algunos puntos de la cuenca baja. Aunque las concentraciones encontradas de los metales pesados mencionados no exceden las norma panameña ni la legislación española, evidencian aportes de actividades antropogénicas que pueden significar riesgos en cauces naturales.

### **Estudios hidroquímicos en las aguas de las áreas de Penonomé, Antón y Punta Chame.**

Específicamente en las áreas de Penonomé, Antón y Punta Chame se han realizado algunos estudios hidroquímicos. Al respecto cabe mencionar el estudio de la intrusión salina del acuífero costero de Punta Chame (Salinas 2012). Se destaca el trabajo de Cañón (2012), quien desarrolló una investigación en el acuífero de la comunidad de Antón con la finalidad de caracterizar la calidad del agua y obtener la línea base del mismo. Igualmente, Cárdenas (2014), contribuyó a la caracterización de aguas de pozos y ríos de este acuífero, en un estudio de validación de dos métodos electroquímicos, empleando electrodos selectivos de cloruro y calcio.

En la Vicerrectoría de Investigación y Postgrado se encuentran registrados informes de investigación en esta región tales como el de Caballero *et al* (2013), quienes aplicaron el método geoelectrico a la exploración de las aguas subterráneas de Panamá, Caballero *et al* (2014), trabajaron en el Estudio Preliminar Del Acuífero de la Población de Antón. Sobresale también el estudio desarrollado por Leone *et al* (2014) referido a la Caracterización y Determinación de la Línea Base de las Propiedades Físico-Químicas del Acuífero de Antón, Parte B. Este mismo acuífero fue escenario de otro estudio de validación de métodos electroquímicos para la determinación de potencial redox (Eh), pH (ISE) y amonio (ISE) en el que analizaron muestras de aguas de pozos y ríos del área (González, 2015). Por su parte, Pineda (2015), también analizó aguas de pozos del sector de Antón, en estudios de validación de métodos electroquímicos (ISE) y espectroscopía (FES) para sodio y potasio.

Las aguas de pozos del sector de Chame fueron objeto de análisis, en otro estudio de validación de métodos tanto electroquímicos (utilizando electrodos selectivos de nitrato, bromuro, fluoruro) como métodos fotométricos de nitratos y fosfatos. Este estudio incluyó además las aguas del acuífero de Antón.

#### **Problemática del análisis de sulfatos en muestras de aguas en la zona de estudio:**

En el sector de Penonomé y sus alrededores existen más de 40 pozos, los cuales son administrados por el Instituto de Acueductos y Alcantarillados (IDAAN) y el Ministerio de Salud (MINSA) y han permitido obtener algunos datos de línea base. Por medio de muestreos de algunos pozos, se han obtenido características excelentes en cuanto a la calidad de agua, pero se desconocen las características hidroquímicas en general y la litología del acuífero urbano de la ciudad de Penonomé (IDAAN, 2010), por lo que se hace imperativa esta investigación para caracterizar hidroquímicamente los diferentes cuerpos de agua.

En la determinación de los distintos parámetros que se incluyen en esta investigación, resulta conveniente implementar métodos que permitan el análisis del ion sulfato a niveles trazas, ya que, pese a que es considerado uno de los iones mayoritarios de las aguas subterráneas, su comportamiento puede desviarse significativamente del teórico predecible, en base a los principios de su disolución, por su tendencia a formar iones complejos con el sodio y el calcio y a incorporarse a procesos geológicos. De allí que, el contenido en sulfatos de las aguas naturales es muy variable y puede ir desde muy pocos miligramos por litro hasta cientos de miligramos por litros. En aguas dulces, la concentración normal de sulfatos puede variar entre 2,0 y 150 mg/L. No obstante, las

aguas prístinas del área de estudio contienen bajas concentraciones de iones, pues estudios preliminares realizados han demostrado que los niveles de sulfato están por debajo de un ppm. Como parte de los proyectos de investigación que desarrolla la universidad de Panamá en el Centro de Investigación con Técnicas Nucleares (CITEN), se realizó un primer intento para cuantificar las concentraciones de este ion en las muestras de aguas obtenidas del área de estudio mediante diferentes métodos disponibles. Para tal efecto se trabajó primero con el Kit HACH que emplea el sistema de cubetas test LCK basado en el principio del método turbidimétrico y medición fotométrica automática. Con este primer ensayo, no se logró determinar las concentraciones de sulfatos en las muestras, ya que las mismas se encontraban por debajo del rango establecido para el kit (40-150 mg/L). Mejores resultados se obtuvieron, por triplicado, empleando el método turbidimétrico convencional con el empleo de patrones para la curva de calibración y medición fotométrica. Sin embargo, muchas muestras estuvieron por debajo del límite de detección, tal como se muestra en el cuadro 1.

Los resultados obtenidos justifican la necesidad de desarrollar una metodología que permita determinar las bajas concentraciones de sulfatos y poder incorporar estos datos a la base de datos del modelaje de las aguas subterráneas. Es importante destacar que, las concentraciones de un ion específico, por muy pequeñas que sean, en estudios hidroquímicos, afectan el balance iónico si se toma en cuenta el hecho de que el agua subterránea es una sustancia neutra, por lo cual la sumatoria de las aportaciones de carga de todos los iones disueltos debe ser igual a cero o tender a cero (en caso real).

Cuadro 1 Datos de medición de sulfatos en análisis preliminares (diciembre, 2012)

| No. | LOCALIZACIÓN           | KIT HACH           |      |      | TURBIDIMÉTRICO<br>(CONVENCIONAL) |      |      |
|-----|------------------------|--------------------|------|------|----------------------------------|------|------|
|     |                        | Sulfatos<br>(mg/L) |      |      | Sulfatos<br>(mg/L)               |      |      |
|     |                        | 1                  | 2    | 3    | 1                                | 2    | 3    |
| 1   | Río Juajaca (M-1)      | < LD               | < LD | < LD | 1,5                              | 1,8  | 1,5  |
| 2   | Río Juajaca (M-2)      | < LD               | < LD | < LD | 2,3                              | 2,0  | 2,0  |
| 3   | Río la (M-3)           | < LD               | < LD | < LD | 2,0                              | 1,9  | 1,9  |
| 4   | Sra Him (M-4)          | < LD               | < LD | < LD | 2,2                              | 2,0  | 2,0  |
| 5   | B-1                    | < LD               | < LD | < LD | 2,9                              | 3,2  | 3,2  |
| 6   | Ecológico              | < LD               | < LD | < LD | < LD                             | 1 0  | < LD |
| 7   | Cristo Rey (B14)       | < LD               | < LD | < LD | < LD                             | < LD | < LD |
| 8   | Del Prado              | < LD               | < LD | < LD | < LD                             | < LD | < LD |
| 9   | La Inmaculada (B16)    | < LD               | < LD | < LD | 2,0                              | 2,1  | 2,4  |
| 10  | Centenario             | < LD               | < LD | < LD | < LD                             | < LD | < LD |
| 11  | B10                    | < LD               | < LD | < LD | 2,2                              | 2,3  | 1,9  |
| 12  | Villa Bonita           | < LD               | < LD | < LD | < LD                             | < LD | < LD |
| 13  | Guayacanes 2A          | < LD               | < LD | < LD | < LD                             | < LD | < LD |
| 14  | Carmen Conte Lombardo  | < LD               | < LD | < LD | 2,0                              | 1,8  | 2,2  |
| 15  | Chigoré 2              | < LD               | < LD | < LD | < LD                             | 1,1  | < LD |
| 16  | Las Lomas #6           | < LD               | < LD | < LD | < LD                             | < LD | < LD |
| 17  | Dos Bocas              | < LD               | < LD | < LD | 2,3                              | 2,0  | 2,4  |
| 18  | Estadio #1             | < LD               | < LD | < LD | < LD                             | < LD | < LD |
| 19  | Ángel María Herrera #2 | < LD               | < LD | < LD | 5,0                              | 4,7  | 4,9  |
| 20  | Junta Sonadora         | < LD               | < LD | < LD | 4,9                              | 4,5  | 5,2  |
| 21  | Guayacanes 1B-Criadero | < LD               | < LD | < LD | 2,1                              | 2,0  | 2,0  |
| 22  | Uvero                  | < LD               | < LD | < LD | 2,7                              | 2,7  | 2,3  |
| 23  | Guayacanes 1- Criadero | < LD               | < LD | < LD | < LD                             | 1,1  | < LD |
| 24  | Guayacanes 2B          | < LD               | < LD | < LD | < LD                             | < LD | < LD |
| 25  | El MIVI #10            | < LD               | < LD | < LD | 4,8                              | 4,9  | 4,5  |

&lt; LD Por debajo del límite detectable

Basado en estos antecedentes en este trabajo de investigación se plantean los siguientes objetivos

**Objetivo general:**

Desarrollar un método de análisis que permita determinar concentraciones de sulfatos a niveles de sub-ppm para caracterizar hidroquímicamente las aguas subterráneas y superficiales del acuífero urbano de la ciudad de Penonomé y sus alrededores

**Objetivos específicos**

- Determinar el mejor agente orgánico modificador de la solubilidad del sulfato de bario con la finalidad de disminuirla
- Desarrollar un método de preconcentración del sulfato utilizando columna intercambiadora de aniones
- Validar el método de análisis químico desarrollado en cuanto a sensibilidad, límite de detección (LD) y precisión
- Determinar el efecto del sulfato en el balance iónico
- Caracterizar hidroquímicamente el área de estudio
- Determinar variaciones significativas de los niveles de sulfato y la hidroquímica del área, entre temporadas

Para el logro de estos objetivos se propone la preconcentración de la muestra empleando columna de intercambio iónico (aniónico), variación de la naturaleza y concentración del agente orgánico modificador de la solubilidad del sulfato y la selección del mejor método de lectura de sulfatos (comparando absorbancia vs nefelometría)

La metodología aquí desarrollada, una vez validada (en cuanto a sensibilidad, LD y precisión), se aplica al análisis de sulfatos en las aguas del acuífero de Penonomé y sus alrededores, con el fin de completar la data que permita su caracterización hidroquímica, para lo cual también se miden otros parámetros utilizando metodologías analíticas convencionales ya validadas. Igualmente este estudio persigue determinar el efecto del sulfato en el balance iónico y determinar variaciones significativas de los niveles de sulfato y la hidroquímica del área, entre temporadas.

Esta tesis presenta un segundo capítulo en el que se desarrolla el marco teórico, producto de una ardua revisión bibliográfica respecto al tema, un tercer capítulo en el que se describe la metodología utilizada y la parte experimental. Luego se presentan en el cuarto capítulo, los resultados con su respectiva discusión con base a los análisis estadísticos. Finalmente las conclusiones y recomendaciones fundamentadas en los resultados obtenidos.

## **II. MARCO TEÓRICO**

## **2.1. Las aguas subterráneas:**

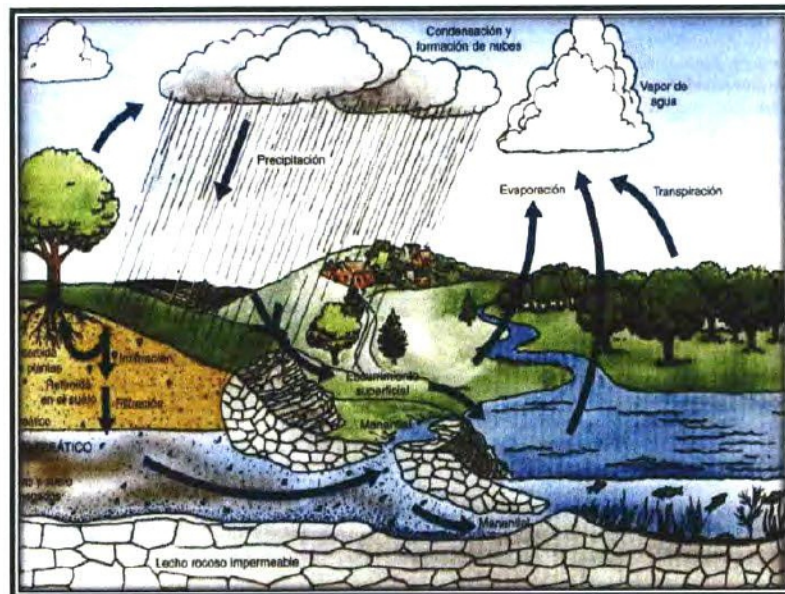
### **2.1.1. Generalidades:**

El agua subterránea es el agua existente bajo la superficie del terreno. En concreto, es aquella situada bajo el nivel freático y que está saturando completamente los poros y fisuras del terreno. Este agua fluye a la superficie de forma natural a través de manantiales, áreas de rezume, cauces fluviales, o bien directamente al mar. Puede también dirigirse artificialmente a pozos, galerías y otros tipos de captaciones. Se renueva de modo constante por la naturaleza, merced a la recarga. Esta recarga procede principalmente de las precipitaciones, pero también puede producirse a partir de escorrentía superficial y cursos superficiales de agua (sobre todo en climas áridos), de acuíferos próximos o de retornos de ciertos usos (López-Geta, et al 2009)

De acuerdo con un informe de la UNESCO (2014), no toda el agua de lluvia fluye hacia los ríos, una gran parte es absorbida por el suelo como infiltración. Parte de esta agua permanece en las capas superiores del suelo, y vuelve a los cuerpos de agua y a los océanos como descarga de agua subterránea. Otra parte del agua subterránea encuentra aperturas en la superficie terrestre y emerge como manantiales de agua dulce. El agua subterránea que se encuentra a poca profundidad, es tomada por las raíces de las plantas y transpirada a través de la superficie de las hojas, regresando a la atmósfera. Otra parte del agua infiltrada alcanza las capas más profundas de suelo y recarga los acuíferos (roca subsuperficial saturada), los cuales almacenan grandes cantidades de agua dulce por largos períodos de tiempo. Cuando la intensidad de la precipitación excede a la capacidad de infiltración de un suelo se produce escorrentía superficial. Ésta y la

escorrentía subterránea constituyen la escorrentía total, que va a confluir a los ríos para terminar en lagos o en el mar.

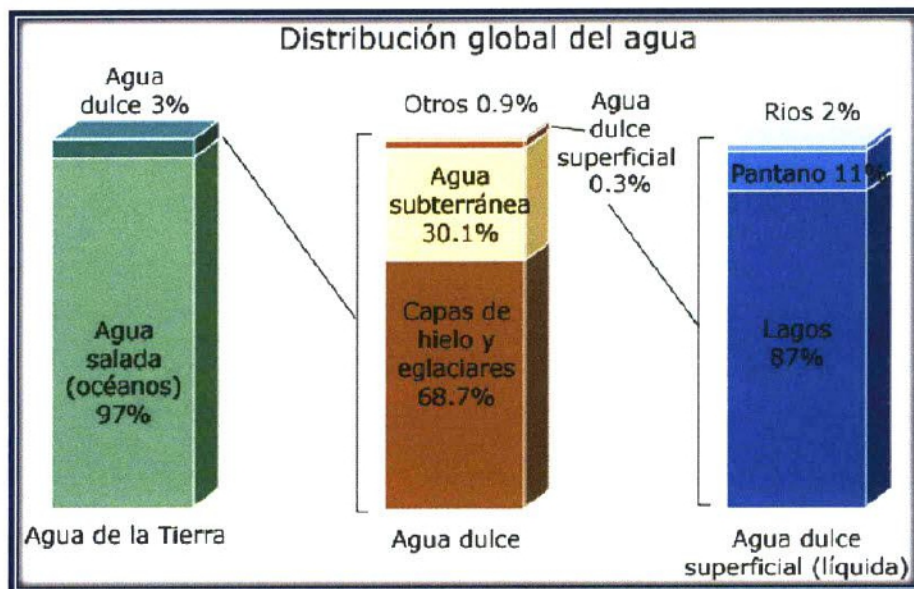
De lo anterior se desprende que, el agua subterránea es una parte integral del ciclo hidrológico (Figura 1), pues este supone el constante movimiento del agua, tanto en la superficie de la Tierra, como por encima y debajo de la misma (López-Geta *et al.*, 2009).



**Fig. 1.** El agua subterránea como parte del ciclo hidrológico: El agua dulce de la Tierra se reaprovisiona cuando el vapor de agua entra a la atmósfera por transpiración vegetal y evaporación, libre de sales y otras impurezas que quedan abajo. Obsérvese que cuando el agua vuelve al suelo, sigue tres vías. (Fuente: Nebel & Wright, 1999)

La disponibilidad de agua dulce es baja y su distribución en el mundo es variable. A escala global, el agua subterránea es la fuente más importante de agua dulce para la

sociedad (Ordóñez, 2011). El informe antes mencionado de la UNESCO, indica que las aguas subterráneas representan una fracción importante de la masa de agua presente en todo el mundo, con un volumen mucho más importante que la masa de agua retenida en lagos o circulante por los continentes. El agua subterránea representa cerca de un tercio de casi un uno por ciento del agua de la Tierra, tal como se muestra en la figura 2.



**Fig. 2.** Distribución global del agua: Obsérvese que, del total de agua de la Tierra, alrededor de un 97 por ciento, es agua salada. Del agua dulce total, un 68,7 por ciento está confinada en los glaciares y la nieve, mientras que aproximadamente el 30 por ciento del agua dulce está en el suelo. (Fuente: UNESCO, 2014 )

El agua subterránea se desplaza muy lentamente por los acuíferos. Su velocidad media normal puede variar entre unos pocos decímetros, a algunos centenares de metros

al cabo del año. En acuíferos kársticos puede alcanzar velocidades similares a la de las corrientes superficiales (López-Geta, *et al* 2009)

El agua subterránea cumple una función ambiental en la naturaleza por su contribución a los caudales de ríos, manantiales, lagos, humedales y estuarios, tiene un papel importante en muchos procesos geológicos y es un solvente activo por lo que el flujo subterráneo actúa como vehículo en el transporte de contaminantes o en el control de la intrusión de aguas salinas (Custodio 2001, Younger 2007). Tienen una gran importancia en el mantenimiento de los equilibrios ambientales. Son elementos fundamentales en los aportes hídricos a los humedales, lagunas y otros entornos naturales singulares.

Pocas actividades humanas pueden concebirse sin que en ellas se use y se consuma agua. Desde la remota antigüedad el agua subterránea ha sido una base atractiva para asentamientos humanos, actividades agrícolas y establecimientos industriales (Custodio *et al*, 2008). De este recurso depende el suministro de grandes ciudades y zonas rurales, actividades industriales y más de la tercera parte del riego. Aunque se han utilizado desde hace mucho tiempo, su aprovechamiento ha tenido un aumento importante en las últimas décadas y ha sido un factor clave para el desarrollo en algunos países. Incluso, según Ordóñez (2011), para muchas zonas e industrias resulta el único recurso económica-mente disponible. Para los agricultores, constituye una posibilidad para aumentar individualmente sus recursos de agua, permitiéndoles solucionar problemas locales debido a que suministran caudales imprescindibles para el abastecimiento de extensas áreas de riego de alta productividad (Figura 3).

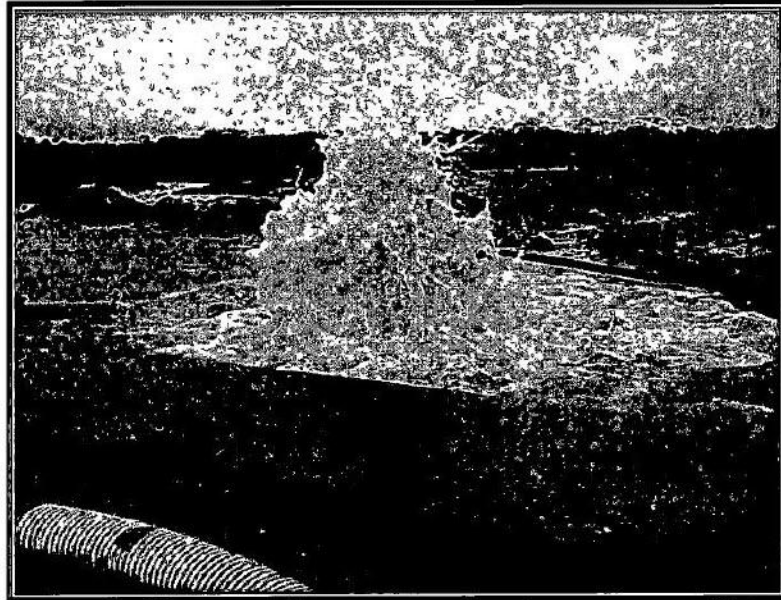


Fig 3 Agua subterránea para uso agrícola

Los constituyentes del agua subterránea tienen su origen en el contacto entre el agua y los diversos sólidos, líquidos y gases presentes en el medio, que se produce durante su trayecto en el área de recarga hasta la de descarga. De acuerdo con la concentración, los constituyentes en las aguas subterráneas se dividen en mayoritarios ( $>5$  mg/L), minoritarios (0,01-5,0 mg/L) y trazas ( $< 0,01$  mg/L). Ocasionalmente, la concentración de los constituyentes minoritarios y trazas en el agua, puede exceder la de los mayoritarios. Los constituyentes principales son los iones  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ , y en algunos casos los iones  $\text{NO}_3^-$  y  $\text{CO}_3^{2-}$  (Díaz *et al*, 2005)

La calidad de las aguas subterráneas se expresa mediante un conjunto de valores relativos o parámetros físicos, químicos y biológicos, de los que se han establecido límites admisibles o tolerables en función del uso previsto del recurso. La utilización de valores guía, límites tolerables y valores máximos admisibles es relativamente reciente.

Considerando el medio hídrico subterráneo como un sistema dinámico, la calidad en un punto determinado será el resultado del efecto combinado de las condiciones del entorno y de la evolución de dicho sistema ante acciones externas (Varela, 1993).

La composición química de las aguas subterráneas es el resultado de la combinación de las características propias del agua que, provenientes de la lluvia o de fuentes superficiales, entra al acuífero y las reacciones que se presentan con el medio mientras ésta circula a través del suelo y durante su almacenamiento en la roca (Appelo y Postma, 2005).

### **2.1.2. Clasificación**

Según Custodio y Llamas (1976), las aguas subterráneas se pueden clasificar atendiendo a diversos parámetros, los cuales son de interés cuando se estudian las mismas. De acuerdo a su mineralización se distinguen las siguientes clases: aguas dulces (hasta 1 250 ppm), salobres (1 250 ppm-10 000 ppm), saladas (10 000 – 100 000 ppm) y salmueras (más de 100 000 ppm). Según la dureza total se pueden encontrar aguas blandas (3 meq/L), aguas de dureza media (7 meq/L), aguas duras (12 meq/L) y aguas muy duras (> 12 meq/L). Otro de los parámetros de clasificación es de acuerdo a los iones abundantes. Esta clasificación, que es de gran importancia porque permite

identificar tanto los procesos como el origen del agua, incluye cuatro tipos básicos de aguas subterráneas

- Ca-SO<sub>4</sub> (aguas sulfatadas cálcicas) típico en aguas subterráneas y drenaje en minas de yeso
- Ca-HCO<sub>3</sub> (aguas bicarbonatadas cálcicas) típicas en aguas profundas recién molidas
- Na-Cl (cloradas sódicas) típico de las aguas subterráneas y aguas marinas antiguas de gran profundidad
- Na-HCO<sub>3</sub> (aguas bicarbonatadas sódicas) típico en aguas subterráneas frescas y profundas que están influenciadas por intercambio iónico

### 2.1.3 Contaminación antropogénica

La contaminación del agua subterránea aporta componentes indeseables en concentraciones apreciables en unos casos y bajas en otros, con su consecuente toxicidad o inutilidad para determinados usos (Gelsi, 2011)

El agua superficial está más expuesta a la contaminación y generalmente es mucho más cara, por el tratamiento que necesita para su potabilización, que la subterránea. Por ello, en la mayoría de los países desarrollados, que se caracterizan por optimizar los usos de los recursos naturales, el empleo de agua subterránea para consumo humano, supera apreciablemente al del agua superficial (Gelsi, 2011)

A diferencia de lo que ocurre con las aguas superficiales, la detección de la contaminación y la evaluación de sus efectos presentan mayores dificultades en el caso de las aguas subterráneas. En el caso de las primeras, el problema se resuelve una vez controlada la fuente de contaminación, en general, fácilmente identificable. En las aguas subterráneas, la degradación de la calidad se advierte con frecuencia cuando el proceso contaminante ha afectado a amplias zonas del acuífero. La adopción de medidas correctoras, costosas y de eficiencia no siempre satisfactorias, se hace más complicada por la complejidad de la evolución del contaminante en el terreno y la consiguiente dificultad para establecer un diagnóstico de las relaciones causa-efecto en el citado proceso. En contrapartida, en aguas subterráneas, el poder depurador del terreno, puede reducir a niveles aceptables el deterioro de la calidad del agua. Esto constituye un factor positivo de protección natural (Varela, 1993).

#### **2.1.4 Caracterización, balance iónico, relación entre iones y otros parámetros:**

##### **2.1.4.1. Caracterización:**

Para el estudio e interpretación de datos derivados de análisis hidroquímicos, comúnmente se utilizan una serie de diagramas que vienen incorporados en software como Aquachem y Diagrammes. Los diagramas de Piper y de Stiff, son ampliamente empleados en estudios de caracterización hidroquímica.

El diagrama de Stiff consiste en una gráfica compuesta por tres ejes horizontales, cada uno de ellos uniendo un catión y un anión. Todos los cationes se disponen al costado

izquierdo del diagrama, y los aniones al derecho. Siempre el  $\text{Na}^+$  se confronta con el  $\text{Cl}^-$ , el  $\text{Ca}^{2+}$  con el  $\text{HCO}_3^-$  y el  $\text{Mg}^{2+}$  con el  $\text{SO}_4^{2-}$  (a veces también se pueden mostrar otros dos iones, como el  $\text{Fe}^{2+}$  contra el  $\text{NO}_3^-$ ). Todos los ejes horizontales están a la misma escala (lineal) y las concentraciones están dadas en meq/L. Dos características sobresalen en este tipo de diagrama: por un lado permite visualizar claramente diferentes tipos de agua (cada una con una configuración particular) y, en forma simultánea, permite dar idea del grado de mineralización, según ancho de la gráfica (Stiff, 1951). La figura 4 muestra algunas apreciaciones de este diagrama que caracterizan varios tipos de aguas.

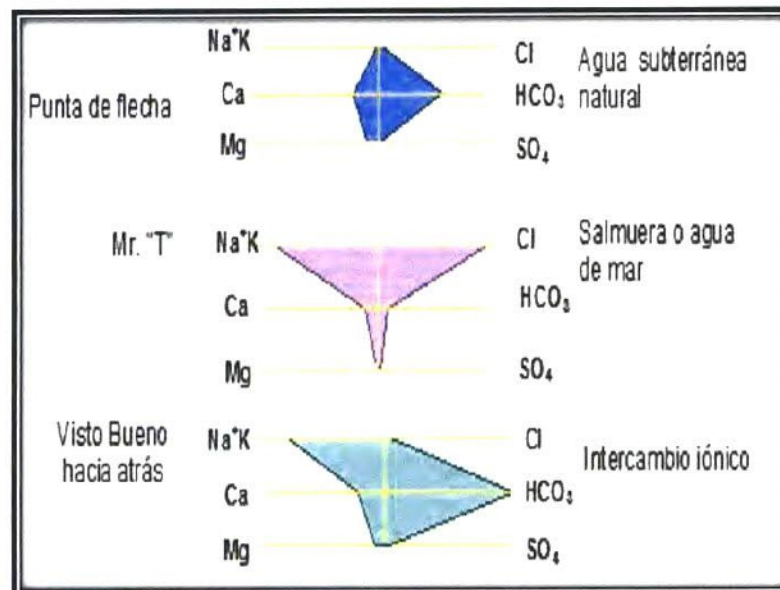


Fig. 4. Diagrama de Stiff típicos. Fuente: [http://www.gwp.org/Global/GWPSAm\\_Files/Publicaciones/Varios/Aguas\\_Subterraneas.pdf](http://www.gwp.org/Global/GWPSAm_Files/Publicaciones/Varios/Aguas_Subterraneas.pdf)

El diagrama de Piper es una gráfica en la que se incluyen aniones y cationes en forma simultánea. Este gráfico permite representar muchos análisis sin dar origen a confusiones. Las aguas geoquímicamente similares quedan agrupadas en áreas bien definidas (Custodio 1965, en Custodio y Llamas, 2001)

Está formado por dos triángulos equiláteros, donde se representan los cationes y aniones mayoritarios. Los vértices del triángulo de cationes son  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$  y  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ . Los vértices del triángulo de aniones son  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{Cl}^-$  y  $\text{HCO}_3^-$ . Los datos de los diagramas triangulares se proyectan en un rombo central en el que se representa la composición del agua deducida a partir de aniones y cationes. Las concentraciones de los iones dadas en meq/L se expresan como porcentaje con respecto a la suma de aniones y cationes respectivamente. En cada triángulo se reúnen solo tres aniones y tres cationes. A cada vértice le corresponde el 100% de un anión o catión. La figura 5, muestra un esquema del diagrama de Piper empleado para caracterizar las aguas (Custodio 1965, en Custodio y Llamas, 2001)

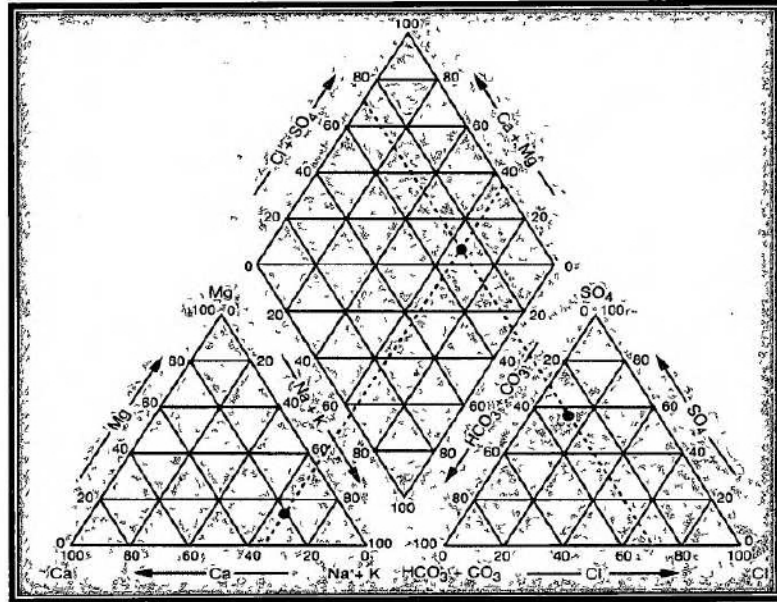


Fig 5 Esquema del diagrama de Piper

#### 2.4.1.2. Balance iónico:

Para hacer las clasificaciones y determinar la calidad del agua, se debe hacer primero, una evaluación del análisis químico para verificar la consistencia de los análisis realizados en el laboratorio. Esto se realiza mediante un balance iónico (electroneutralidad) y la verificación de relaciones entre algunos iones y parámetros, los cuales indican que la muestra de agua fue analizada correctamente y los resultados son confiables (Gómez, 2010).

El balance iónico mide la diferencia entre el total de aniones y cationes expresados en mili equivalentes por litro (meq/L), determinados analíticamente.

De acuerdo con Esteve *et al* (2012), una condición básica que debe cumplirse es que el agua debe ser eléctricamente neutra y por tanto debe verificarse que

$$\Sigma \text{cationes}(\text{meq/L}) = \Sigma \text{aniones}(\text{meq/L})$$

Lo anterior significa que la exactitud de un análisis de iones mayoritarios puede ser estimada a partir de las diferencias en el balance eléctrico, ya que la suma de cargas positivas y negativas en el agua debería ser igual

Otra forma de contrastar los resultados, según Esteve *et al* (2012), es si la conductividad eléctrica es menor a 2000  $\mu\text{S/cm}$  ( $\text{CE} < 2000 \mu\text{S/cm}$ ), aplicando

$$\Sigma \text{cationes}(\text{meq/L}) = \Sigma \text{aniones}(\text{meq/L}) = \frac{\text{CE}}{100}$$

El error del balance iónico hace parte de un requerimiento mínimo que debe hacerse dentro de la evaluación del análisis químico, para establecer la confiabilidad de los resultados del laboratorio y se define según la ecuación

$$\text{Error} (\%) = \frac{\Sigma \text{cationes} - \Sigma \text{aniones}}{\Sigma \text{cationes} + \Sigma \text{aniones}} \times 100$$

Los rangos de error para aceptar o no el análisis de una muestra de agua, dependen del valor de conductividad eléctrica, CE (Custodio y Llamas, 1976), o de la sumatoria de aniones (Crites y Tchobanoglous, 2000). Los cuadros 2 y 3 presentan los valores para cada criterio respectivamente

Cuadro 2 Error aceptable en balance iónico, según la conductividad, según Custodio & Llamas (1976)

|   |          |          |         |         |         |
|---|----------|----------|---------|---------|---------|
| Conductividad eléctrica ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ ) | 50       | 200      | 500     | 2 000   | >2 000  |
| Error aceptable (%)                                 | $\pm 30$ | $\pm 10$ | $\pm 8$ | $\pm 4$ | $\pm 4$ |
| <i>Fuente Gomez (2010)</i>                          |          |          |         |         |         |

Cuadro 3 Error aceptable en balance iónico, según sumatoria de iones, según Crites y Tchobanoglous (2000)

| $\Sigma$ aniones (meq/L)   | Error aceptable (%) |
|----------------------------|---------------------|
| 0-3                        | $\pm 0,2$           |
| 3-10                       | $\pm 2$             |
| 10-800                     | $\pm 5$             |
| <i>Fuente Gomez (2010)</i> |                     |

Estos valores suelen ser conservadores, y por lo tanto, se acepta un valor máximo en el error del balance iónico de 10 %

En la actualidad los laboratorios acreditados para trabajar con aguas subterráneas tanto para la investigación como para la administración hídrica deben demostrar que son capaces de realizar análisis con errores inferiores al 20%

De lo anterior se deduce que no es conveniente utilizar análisis químicos con errores mayores al 10% en un estudio hidroquímico cuyo objetivo es deducir el funcionamiento del acuífero en base a pequeñas diferencias de composición de origen

natural las cuales pueden ser del mismo orden de magnitud, o incluso inferior, al error analítico

#### 2.1.4.3. Relaciones entre iones y otros parámetros:

Las relaciones entre iones y otros parámetros son relaciones que se evalúan para complementar un criterio de aceptación o rechazo de un análisis químico de una muestra de agua. Las relaciones son las siguientes (Gómez, 2010)

- La relación  $\frac{K}{Na + K}$  debe ser menor al 20 %
- La relación  $\frac{Mg}{Ca + Mg}$  debe ser menor al 40 %
- La relación  $\frac{Ca}{Ca + SO_4}$  debe ser mayor al 50 %
- La relación  $\frac{Na}{Na + Cl}$  debe ser mayor al 50 %
- La relación entre los sólidos totales disueltos (STD) y la conductividad eléctrica (CE) debe ser  $0,55 < \frac{STD_{medido}}{CE} < 0,75$
- La relación entre la CE y el total de cationes debe ser  $90 < \frac{CE}{\sum_{cationes} \left(\frac{mg}{L}\right)} < 110$

#### 2.2. Técnicas analíticas de análisis de sulfatos:

En concreto, según Wilson *et al* (2007), los métodos de análisis del ion sulfato en aguas se han desarrollado de acuerdo a tres líneas básicas

- La precipitación del mismo como sal insoluble, principalmente con bario, con la inmediata estimación cuantitativa, que puede ser en forma directa sobre la masa del precipitado (gravimetría) o en forma indirecta (turbidimetría) Esta línea ha sido la de mayor aplicación por ser siempre la más fiable, pero presenta el inconveniente que implica más tiempo
- El desarrollo y evaluación de electrodos selectivos a iones (ESI) que permiten medir la concentración del ion en forma directa o indirecta Esta línea presenta una elevada velocidad de respuesta, con el inconveniente de que requiere de un personal idóneo, específicamente entrenado tanto en la fabricación como en el uso de los ESI
- La separación del anión por métodos cromatográficos, para luego determinar su concentración mediante cualquiera de los métodos anteriores u otros Esta línea presenta un intervalo de cuantificación muy limitado y requiere de intercambiadores específicos, así como de un equipo de mayor costo

La elección de uno u otro procedimiento dependen del ente que llevará a cabo el análisis y del cliente que lo requiere, según el propósito, costo, rapidez y fiabilidad del mismo

En los últimos años se ha desarrollado una serie de métodos analíticos y equipos electrónicos novedosos para el monitoreo de las aguas subterráneas y superficiales naturales de distintos países, en lugares de interés económico tales como ríos, embalses, pozos y otras fuentes donde es necesario el control de otros indicadores y factores físicoquímicos que permiten su caracterización (Fagundo *et al* , 2006)

La necesidad de un método práctico y confiable para la determinación de sulfatos ha polarizado la atención de los investigadores. Esta necesidad justifica los múltiples intentos para desarrollar métodos exactos.

De acuerdo con Severiche y González (2012), la determinación de ion sulfato en aguas es una de las metodologías analíticas más discutidas que se conoce en el ámbito científico-técnico del análisis de aguas, principalmente, por las desventajas que presentan los métodos que son aceptados internacionalmente (gravimétrico, turbidimétrico y cromatográfico).

El primer método de análisis cuantitativo del ion sulfato en aguas fue presentado por Kolthoff (1919). Desde entonces hasta la última publicación oficial en 1998 por la *Standard Methods for Examination of Water and Wastes*, no han ocurrido cambios sustanciales en este procedimiento, y esto se ha debido, principalmente, a dos cuestiones básicas: el limitado número de reacciones verdaderamente cuantitativas del ion  $\text{SO}_4^{2-}$  y la diversidad de estados de oxidación del azufre (Wilson *et al*, 2007).

No obstante se ha trabajado incesantemente en el desarrollo y modificación de metodologías para la determinación de sulfatos en aguas naturales. En tal sentido, además del primer método cuantitativo al cual se hizo referencia, Johnson y Nishita (1952), desarrollaron hace algún tiempo un método denominado de reducción-destilación, el cual involucra la descomposición de la muestra liberando sulfuro de hidrógeno. Las muestras, sin tratamiento preliminar, son añadidas en forma seriada a la solución de reducción (mezcla ácida) en ebullición, liberando sulfuro de hidrógeno, el cual es recogido en una solución antioxidante para luego ser determinado.

colorimétricamente El autor hace referencia a la interferencia de nitrato en el proceso de reducción

Por su parte, Tabatabai (1974), reportó una metodología combinada de turbidimetría-nefelometría como técnica de cuantificación de la turbiedad con la que se disminuyen los límites de detección Sin embargo, los niveles de detección alcanzados (1,0 ppm) no son lo suficientemente bajos para poder cuantificar el ion sulfato en las muestras con concentraciones trazas

Con el devenir del tiempo, para la determinación del ion sulfato en aguas, se han desarrollado otros métodos que incluyen métodos espectrofotométricos y colorimétricos (Michael *et al*, 1974, Adamski y Villard, 1975, Colovos *et al*, 1976, Brooks y Murphy, 1981, Hori *et al*, 1988, Kim y Purnendu, 1991), turbidimétricos (Coleman *et al*, 1972, Verduyn y Derouane, 1974, Van Staden, 1982 y Krug *et al*, 1983), gravimétricos (APHA/ AWWA/ WPCF, 1980 y Malcolm *et al*, 1986) También se destacan las investigaciones en el campo de titulaciones complejométricas (APHA/ AWWA/ WPCF, 1980) o cromatografía iónica (Littlejohn y Chang, 1981, Mosko, 1984, Okada y Kuwamoto, 1985, Gorham y Detenbeck, 1986, Hoffmann *et al*, 1986) Estas técnicas presentan algunos inconvenientes como la presencia de coloración en las muestras a analizar, la demora que implica el análisis o el elevado costo de los equipos Algunas de las técnicas mencionadas son aplicables a extractos acuosos

Una modificación al método presentado por Johnson y Nishita fue desarrollada usando un electrodo selectivo al ion sulfuro como detector La investigación es realizada

con considerables cantidades de solución reductora y solución antioxidante, y no hace referencia a la interferencia del ion nitrato (Porter y Runnacles, 1977)

Otros investigadores han utilizado también el método de reducción-destilación, pero han analizado posteriormente el sulfuro utilizando diferentes técnicas (Siemer, 1980, Srinavasa *et al*, 1988, Wood y Marr, 1988, Aleixo *et al*, 1988)

También, Ledo de Medina *et al* (1993), reportaron una metodología para el mejoramiento de la técnica descrita por Porter y Runnacles para la determinación de sulfatos mediante potenciometría con electrodo selectivo. El método se basa en la reducción de sulfato a sulfuro de hidrógeno, el cual es detectado con un electrodo selectivo al ion sulfuro. El procedimiento involucra la optimización de los volúmenes de reactivos (tanto de solución reductora de sulfato como de la solución antioxidante de sulfuro) y el estudio de la interferencia de nitrato. Se determinó que el ion nitrato interfiere en el análisis de sulfato, dependiendo del tiempo de almacenamiento de la mezcla de reducción.

Por otro lado, la técnica de aniones por HPLC iónica ha sido reportada con gran éxito en aplicaciones acuosas y bajos niveles de sensibilidad aunque en el orden de los ppm (Trujillo *et al*, 2009, Zhou *et al*, 1994, Moliner, 2005, Bruzzoniti *et al*, 2008)

En la literatura especializada se indican varios métodos para la determinación analítica del ion sulfato (APHA-AWWA-WPCF, 1998). Comercialmente existen equipos analíticos que determinan rutinariamente la concentración de sulfatos basados en la solubilidad del  $\text{BaSO}_4$  y la cuantificación de la turbiedad generada, por espectroscopía de

absorción, sin embargo los niveles de detección son del orden de los 10 ppm, por encima de los valores esperados en las muestras de estudio

### **III. METODOLOGÍA**

### 3.1. Área de estudio y selección de estaciones de muestreo

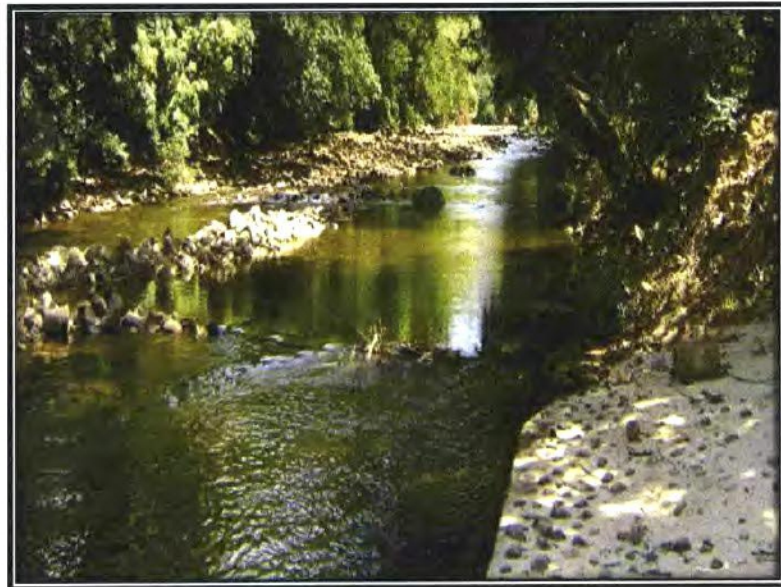
#### 3.1.1. Localización geográfica y características fisiográficas:

La zona de estudio se encuentra enclavada en el distrito de Penonomé, provincia de Coclé, República de Panamá, la cual aparece identificada con azul punteada en fondo celeste en la figura 6.



Fig. 6. Localización del área de estudio (zona azul punteada en fondo celeste)

La investigación se centra en la cuenca del río Zaratí, la cual es de gran importancia pues abastece la planta potabilizadora local que provee de agua al distrito de Penonomé y sus alrededores (Figura 7). Es considerada una subcuenca que forma parte de la cuenca del Río Grande (Cuenca 134), con un área de drenaje de 163,8 Km<sup>2</sup>, una elevación máxima de 1173 m.s.n.m. y una población aproximada de 30 000 habitantes, dedicados principalmente a la actividad agrícola, ganadera, avicultura, porcicultura y a la producción de artesanías. La evapotranspiración potencial de la cuenca se encuentra entre 1 200 mm (parte más baja de la cuenca) y de 1 300 mm, parte más alta de la cuenca (ANAM, 2011).



**Fig. 7.** Toma de agua de planta potabilizadora del IDAAN, río Zaratí.  
(Fuente, ANAM,2011 PNGIRHRP)

La cuenca del Río Zaratí, está limitada al este por las divisorias de agua de la cuenca del Río de Antón, al oeste por las divisorias de agua de la cuenca del Río Coclé del Sur, al sur por el distrito de Coclé y el Coco, al norte con las divisorias de agua del Río Maricas que es afluente del Río Coclé del Sur (Diccionario Geográfico de Panamá, 1974)

Topográficamente, en la cuenca del río Zaratí se encuentran altitudes en la parte superior de 1070 m s n m , la cual corresponde a la divisoria de la cordillera, en la parte intermedia que comprende parte de Churuquita Chica y Churuquita Grande las altitudes oscilan entre 200 y 300 m s n m , en la parte urbana de la cuenca donde se encuentra la ciudad de Penonomé las alturas oscilan entre 60 y 85 m s n m y en la parte más baja de la cuenca suelen encontrarse con altura de 20 y 30 m s n m El río Zaratí tiene una cota aproximada de 975 m s n m en la parte más alta y 20 m s n m en la parte donde se une con el río Coclé del Sur, para formar parte del Río Grande El área de la cuencas de aproximadamente 138 km<sup>2</sup> (ANAM, 2011)

A partir de la distribución de las formaciones y estructuras geológicas más importantes se puede dividir el área de estudio en dos regiones parte alta y parte baja de la cuenca En ocasiones se hace referencia a la parte central como el área límite entre las dos La parte alta de la cuenca está comprendida por los poblados de Pajonal, Membrillo, Alto de la Estancia, Alto México, El Águila, Turega, Boquerón, Camito Oajaca, Sofre y Loma Grande La parte baja abarca los poblados de Monte Grande, El Mosquitero, El Potrero, La Negrita, El Cocal, Sonadora, Chigoré, Santa Cruz, Ciudad de Penonomé, Las Lomas, Cerro Gordo y el Silencio (Leone y Salinas, 2015)

La topografía de la sub-cuenca del Río Zaratí es ligeramente ondulada. En su parte alta muestra un relieve montañoso con pendiente bien pronunciada por encima de los 45 a 75 grados, el cual facilita la erosión del suelo en la época de lluvia por la gran inestabilidad de las laderas de las montañas y colinas (Figura 8). En la parte media baja la pendiente se encuentran entre 15 a 30 grados, donde ya empieza a disminuir la velocidad de las aguas del río y en la parte baja es prácticamente de llanura de 0 a 14 grados.(Leone y Salinas, 2015)

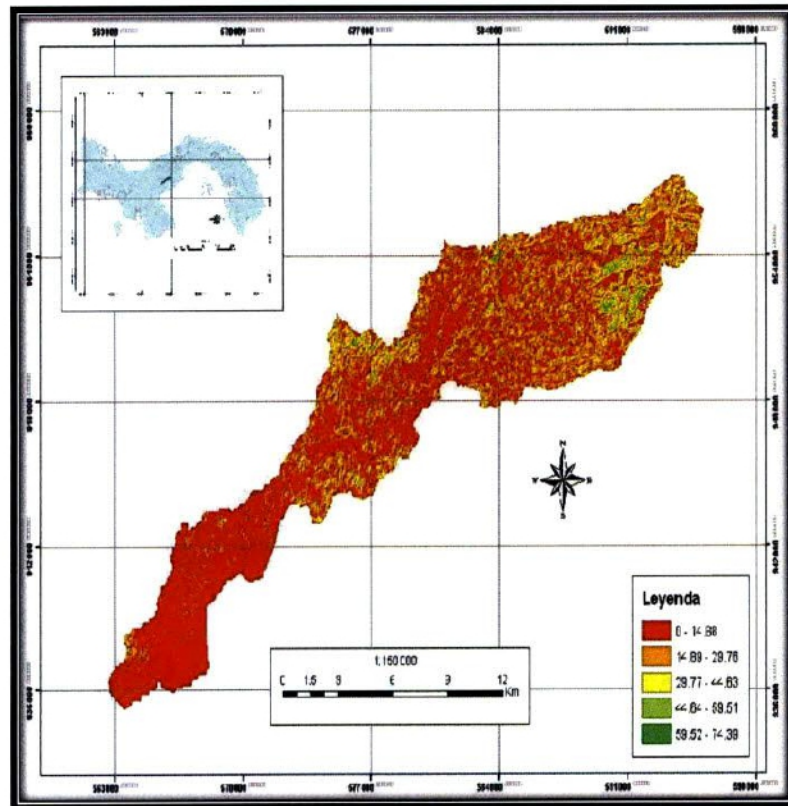


Fig. 8. Mapa de pendiente de la cuenca del río Zaratí, con la ayuda del modelo digital del terreno.

La topografía del área está constituida por montañas bajas cuyos cerros presentan elevaciones de 700 a 1050 m.s.n.m., colinas y planicies que descienden sobre el nivel del mar, las extensas planicies llegan a tener de 20 a 50 m.s.n.m. Esto puede observarse el modelo digital de terreno de la Figura 9 (Leone y Salinas, 2015)

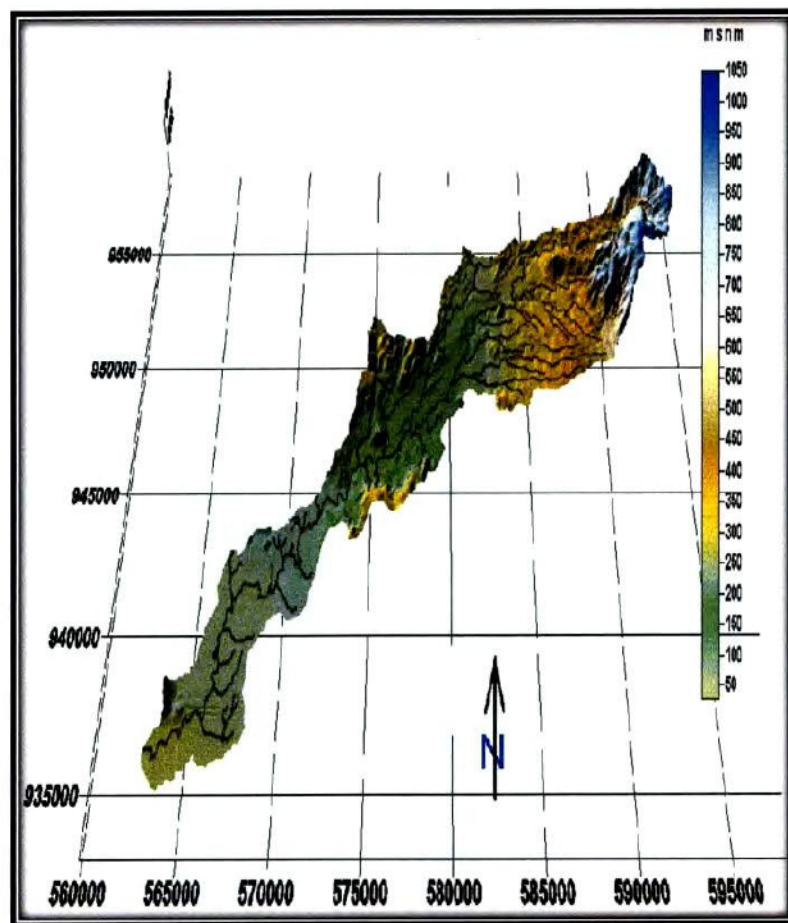


Fig. 9. Modelo Digital de Terreno de la Cuenca del Zarati

Las altas montañas con pendiente superiores a  $40^\circ$  las cuales se encuentran a los lados de la ribera del Río en la parte alta de la cuenca, favorecen el escurrimiento superficial y subterráneo que se da durante las precipitaciones. Esto puede apreciarse en la figura 10, la cual muestra una vista panorámica de la cuenca desde la parte alta hacia la parte media; en ella se aprecian las pequeñas colinas a lo largo del descenso del Río (Leone y Salinas, 2015)



**Fig. 10.** Vista panorámica del cauce del Río Zaratí

### **3.1.2. Selección de estaciones de muestreo:**

Para el estudio se tomaron en consideración las aguas superficiales de lugares

estratégicos a lo largo de la cuenca y las aguas subterráneas de algunos de los pozos administrados por el Instituto de Acueductos y Alcantarillados Nacionales (IDAAN), éstos últimos situados en la parte alta, media y baja

La selección de algunas fuentes de aguas superficiales se hizo con la finalidad de tener ideas de su comportamiento químico y analizar su relación con las aguas subterráneas

Durante el estudio se realizaron tres campañas o giras de muestreo, entre diciembre del 2012 y diciembre de 2013, incluyendo la estación seca y la lluviosa a fin de determinar las variaciones de los distintos parámetros en las mismas

Para la toma de las muestras de aguas se ubicaron 15 estaciones de muestreo, de las cuales cuatro fueron localizados en diferentes puntos a lo largo de la cuenca del río Zaratí (aguas superficiales de algunos de sus afluentes) y 10 correspondían a pozos (fuentes subterráneas) existentes en el área de estudio, localizados en comunidades de la parte alta, media y baja de la cuenca. Los pozos muestreados están bajo la administración del Instituto de Acueducto y Alcantarillados Nacionales (IDAAN) como parte de los pozos empleados para el consumo y abastecimiento de los habitantes de la ciudad de Penonomé y alrededores. La figura 11 muestra un mapa de la localización de estas estaciones de muestreo y en el cuadro 4 se indica la ubicación georeferencial de las mismas

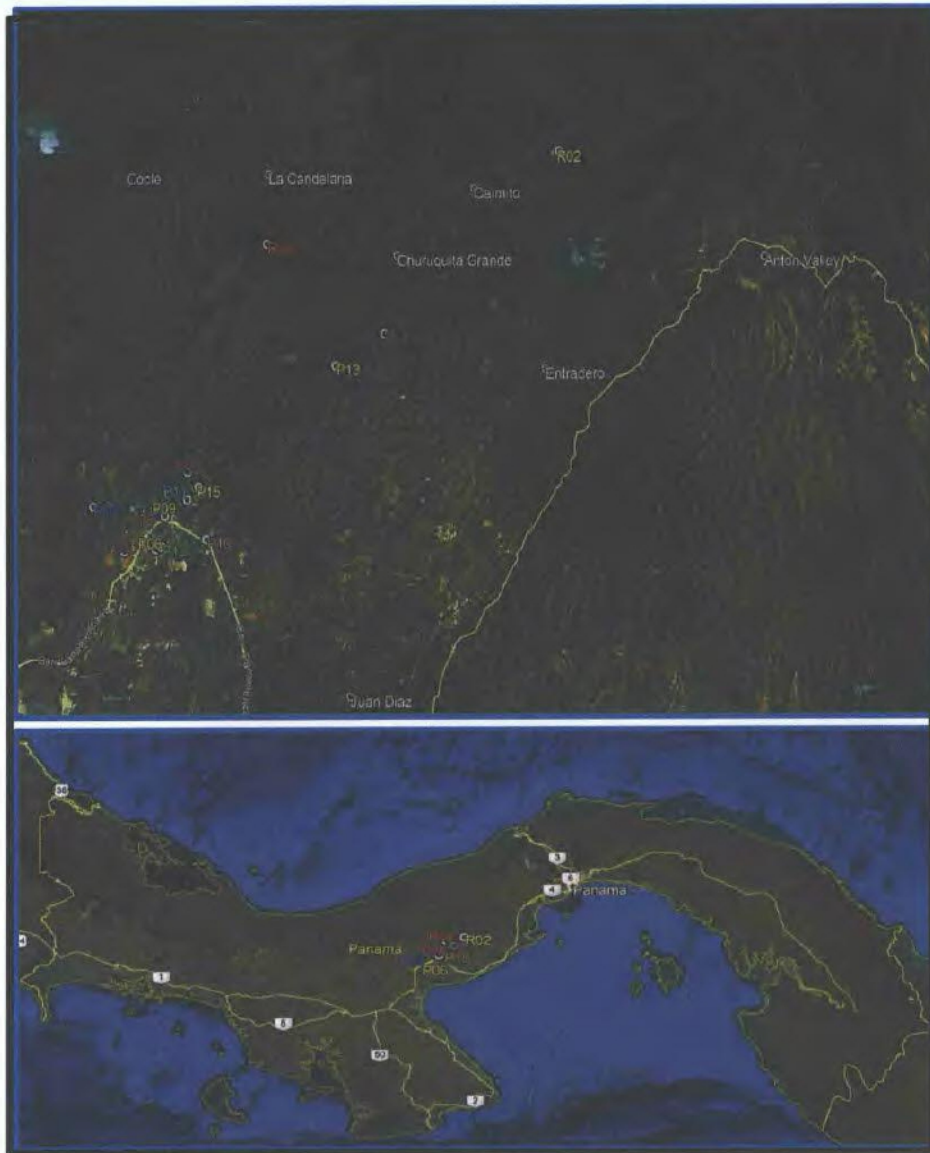


Fig. 11. Mapa de localización de las estaciones de muestreo

Cuadro 4 Código de identificación y georeferencia de las estaciones de muestreo

| ID   | LOCALIZACION             | LONGITUD<br>(grados decimales) | LATITUD<br>(grados decimales) | PROFUNDIDAD<br>(m) | ALTITUD<br>(m) |
|--|--------------------------|--------------------------------|-------------------------------|--------------------|----------------|
| R-01   | Río Juajaca<br>(M-1)     | -80 2079                       | 8 6358                        | -                  | 278            |
| R-02   | Río Juajaca<br>(M-2)     | -80 2090167                    | 8 63545                       | -                  | 267            |
| R-03   | Río La<br>Angostura      | -80 3819                       | 8 51978333                    | -                  | 81             |
| R-04   | Sra Him<br>(M-4)         | -80 3184                       | 8 56051667                    | -                  | 115            |
| P-05   | B1                       | -80 3549333                    | 8 51675                       | 25                 | 96             |
| P-06   | Ecológico                | -80 3582833                    | 8 5062                        | 25                 | 87             |
| P-07   | Cristo Rey               | -80 34665                      | 8 53081667                    | 25                 | 105            |
| P-08   | Del Prado                | -80 3696333                    | 8 5054                        | 25                 | 80             |
| P-09   | La Inmaculada<br>(B16)   | -80 3466833                    | 8 522                         | 25                 | 98             |
| P-10   | Centenario               | -80 3393167                    | 8 5093                        | 25                 | 93             |
| P-11   | El Encanto<br>(B10)      | -80 34255                      | 8 52606667                    | 25                 | 105            |
| P-12   | Villa Bonita             | -80 3559667                    | 8 50693333                    | 25                 | 98             |
| P-13   | Guayacanes<br>2A         | -80 29185                      | 8 56521667                    | 25                 | 155            |
| P-14   | Carmen Conte<br>Lombardo | -80 2734                       | 8 5755                        | 25                 | 189            |
| P-15   | Chigoré 2                | -80 3435667                    | 8 52576667                    | 25                 | 98             |
| <b>Observación</b> El negativo indica longitud oeste |                          |                                |                               |                    |                |

### 3.2. Procedimiento de muestreo y análisis de campo:

#### 3.2.1. Procedimiento de muestreo

Para la toma y el almacenamiento de las muestras de aguas, tanto subterráneas como superficiales, se emplearon botellas de polietileno con capacidad de 500 mL, las cuales

primero fueron lavadas tres veces con el agua del correspondiente punto de muestreo. Luego se procedió a la toma de las muestras, que fueron almacenadas sin burbujas de aire y resguardada de luz a una temperatura de 4° C con pH inferior a 2. Las muestras se tomaron en partida doble para evitar contratiempos en caso de fuese necesario repetir análisis o por cualquier accidente fortuito que ocurriese.

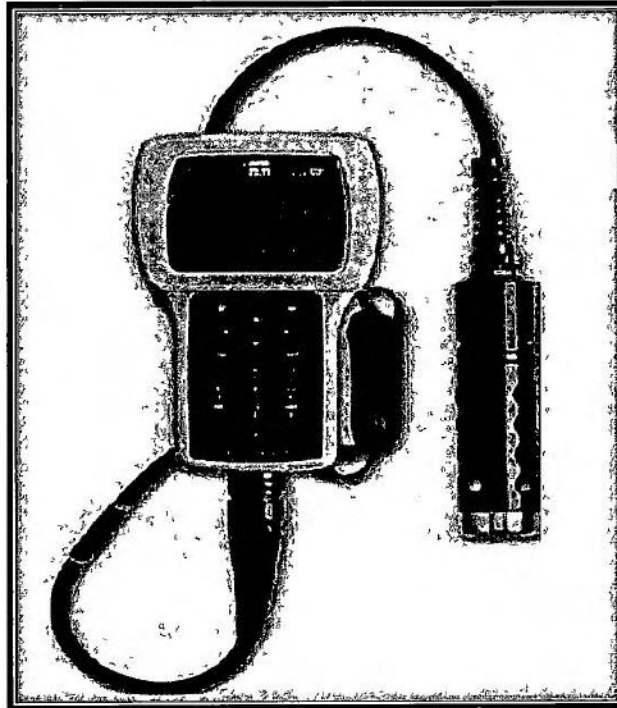
Una vez tomadas todas las muestras, fueron transportadas hasta el laboratorio del Centro de Investigaciones con Técnicas Nucleares (CITEN) de la Universidad de Panamá, en donde posteriormente se realizaron las determinaciones químicas de laboratorio, por lo que fue necesario conservarlas en refrigeración para evitar modificaciones de sus características químicas.

### **3.2.2. Análisis de campo.**

Paralelamente al muestreo del agua subterránea se realizaron distintas determinaciones fisicoquímicas in situ, que incluyeron la medición de temperatura, pH, conductividad eléctrica y alcalinidad.

La temperatura del agua se midió en °C con un termómetro digital y verificada con la sonda multiparamétrica YSI-556 (Figura 12). El resto de las mediciones in situ se realizaron con la misma sonda multiparamétrica, la cual a través de sus sensores medía simultáneamente la temperatura (con una precisión de  $\pm 0,15$  ° C y un rango de medida de -5 ° C a 45 ° C), el pH (con una precisión de  $\pm 0,2$  unidades y rango de medida de 0 a

14 unidades) y la conductividad eléctrica con precisión de  $\pm 0,5 \%$  de la lectura (0,001 mS/cm) y rango de 0 a 200 mS/cm



**Fig 12** Sonda Multiparametrica YSI-556

### **3.3. Calibración del material gravimétrico y de cristalería**

La calibración de la balanza y de la cristalería usada para medir volúmenes en los análisis durante la investigación fue un trabajo realizado en conjunto con otros investigadores como parte de los proyectos desarrollados en el CITEN (Cañón, 2012, Cárdenas, 2014 y González, 2015)

La calibración de la balanza analítica se realizó utilizando pesas certificadas (modelo 12720-084)

Con el fin de que el agua empleada para lavar la cristalería se mantuviera en equilibrio termodinámico con el ambiente donde se realizó la calibración de la misma, se destinó con anticipación un recipiente con agua destilada exclusivamente para este efecto. Luego se procedió a lavar la cristalería destinada a la medición de volumen, dejándolo secar a temperatura ambiente, para luego proceder a la calibración, para control de la precisión y el error que se introducen en las mediciones.

Se calibraron matraces volumétricos (de 100 mL), probetas, buretas y pipetas serológicas y volumétricas de distinta capacidad. Para ello se determinó la masa de un volumen determinado de agua, medido con el instrumento a calibrar. Luego, empleando la densidad del agua a la temperatura de trabajo en el momento de la calibración, se procedió a calcular el volumen experimental de la masa de agua servida, previamente medida con el instrumento respectivo. El procedimiento se realizó por triplicado y se obtuvo el promedio del volumen experimental, la desviación estándar, el coeficiente de variación y el error relativo para cada uno de los instrumentos a calibrar (Cañón, 2012, Cárdenas, 2014 y González, 2015).

### **3.4. Metodología de análisis de sulfatos:**

#### **3.4.1 Desarrollo del método analítico utilizado**

El análisis de sulfato se realizó aplicando el método turbidimétrico con la modificación que se propone en este trabajo, la cual incluye preconcentración de la

muestra empleando intercambio iónico, una variación en la preparación del reactivo acondicionador que emplea el método rutinario y una comparación del método de lectura por absorbancia vs nefelométrico

### **3.4.1.1 Preconcentración de la muestra empleando intercambio iónico (aniónico):**

#### **Selección del mejor eluyente**

La resina utilizada en este proyecto fue DOWEX 1 (Cl<sup>-</sup>) con matriz de estireno divinilbenceno con grupo funcional trimetilbencilamonio

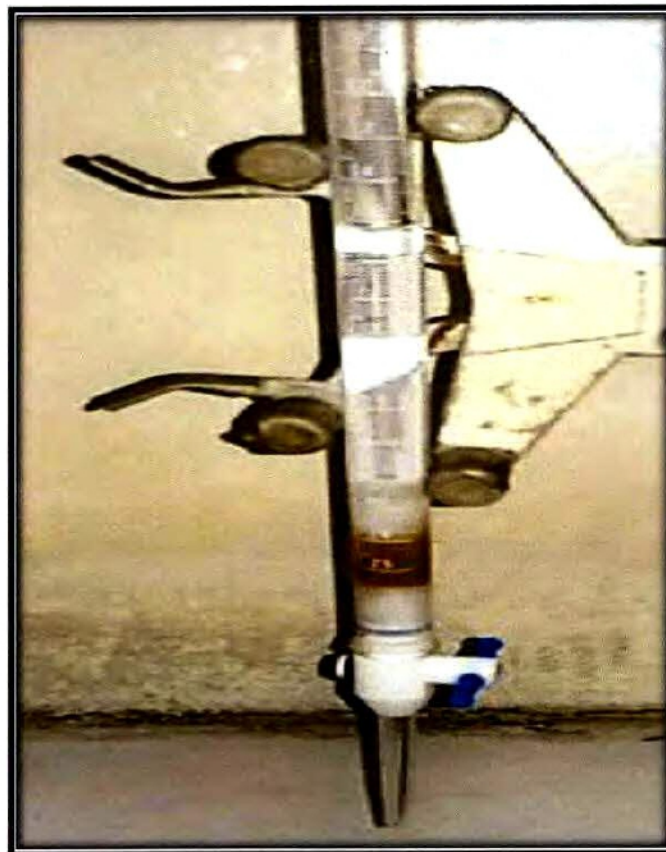
La instalación experimental empleada para la columna de intercambio iónico, se muestra en la figura 13 que consiste en una bureta de 25 mL de vidrio de 1,0 cm de diámetro, en la que se acomodó una delgada capa de lana de vidrio sobre la válvula de paso de teflón. Sobre ésta se colocó un lecho de aproximadamente 2,0 cm de alto de resina húmeda de intercambio aniónico fuerte (12 cm<sup>3</sup>). En la instalación de la columna se procuró que el lecho de la resina quedara compacta, sin burbujas.

Para el acondicionamiento de la columna de intercambio aniónico fue necesario preparar una solución de NaCl 5,0 M (100 mL) y una solución de HCl 5,0 M, para seleccionar entre ambas el mejor eluyente. La resina aniónica fuerte se acondicionó en forma de Cl<sup>-</sup>, pasando una solución de HCl 5,0 M (100 mL) y luego se lavó con agua desionizada hasta pH neutro.

Se preparó una disolución madre de sulfato de 100 mg/L empleando Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> (AR) previamente secado durante una hora a 105 °C. A partir de esta última se obtuvieron patrones de distintas concentraciones de SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> en mg/L (10,0, 7,0, 5,0, 1,0 y 0,5).

**Elusión con NaCl 5,0 M:** Cada estándar de sulfato (100 mL) se hizo pasar lentamente a través de la columna activada en forma de  $\text{Cl}^-$  y se hicieron varias eluciones de la columna consistentes en 10 mL de NaCl 5,0 M.

**Elusión con HCl 5,0 M:** El procedimiento anterior se repitió empleando como eluyente HCl 5,0 M. Las fracciones fueron preparadas para leer el contenido de sulfato eluido.



**Fig. 13.** Columna de intercambio iónico empleada

### **3.4.1.2. Determinación del mejor agente orgánico modificador de la solubilidad del sulfato de bario**

El protocolo a seguir para la determinación de los iones sulfato en disolución requiere la precipitación en medio ácido del sulfato de bario (usando cloruro de bario como agente precipitante) y de un reactivo acondicionador que contiene glicerina y un alcohol con el fin de modificar la viscosidad de la muestra y la constante dieléctrica del medio, permitiendo así que la solubilidad disminuya y el tamaño de los cristales de sulfato de bario sea uniforme permitiendo que la turbidez sea estable por un período de tiempo suficiente para medir la misma

El reactivo acondicionador se preparó de la siguiente manera En un vaso de precipitados se mezclaron 12,0 mL de HCl concentrado, 120 mL de agua destilada y 30 g de NaCl y se agitó hasta disolución total En otro vaso de precipitados se 40 mL del alcohol con 20 mL de glicerina Luego se mezclaron ambas soluciones hasta disolución total Se ensayó con tres alcoholes diferentes 2-metoxietanol, isopropanol y etanol para determinar cuál funcionaba como mejor agente modificador de la solubilidad del sulfato

### **3.4.1.3. Determinación del mejor método de lectura: absorbancia vs nefelometría**

Las fracciones fueron preparadas para leer el contenido de sulfato eluído, de la siguiente manera Se colocaron 10 mL del efluente obtenidos con el patron en un tubo de ensayo con tapa, se le agregaron 2 mL del reactivo acondicionador y una unidad medidora con cristales de cloruro de bario Se mezcló inmediatamente durante un minuto en un vortex (Figura 14) para permitir la formación completa de los cristales Cinco

minutos después de la adición de los cristales de cloruro de bario se invirtió el tubo con el contenido varias veces y se procedió a la lectura nefelométrica de la absorbancia, para seleccionar, entre ambas, la mejor técnica de lectura.



**Fig. 14.** Vortex marca Heidolph tipo REAX top, empleado para permitir la formación completa de los cristales .

Se emplearon para tales lecturas, el turbidímetro marca OAKTON (T-100) que se presenta en la figura 15 y el espectrofotómetro UV/visible Hach DR 2800 que se muestra en la figura 16.



Fig. 15. Turbidímetro marca OAKTON (T-100) empleado en la medición.



Fig. 16. Espectrofotómetro UV/visible Hach DR 2800

### **3.4.2. Validación del método propuesto:**

Los procedimientos para cada uno de los aspectos considerados en el método propuesto se realizaron por triplicado y los resultados fueron sometidos a pruebas estadísticas. Se aplicó regresión lineal, utilizando la hoja de cálculo excel RLIN (Leone, 2017), en la cual se generó la curva de calibración y se obtuvieron parámetros estadísticos como coeficiente de correlación ( $r$ ), límite de detección al 90% (LD 90 %), límite de cuantificación al 90 % (LQ (90 %)), la pendiente ( $m$ ) y el coeficiente de variación de la pendiente, CV ( $m$ )

### **3.5. Metodología analítica de los otros parámetros químicos:**

Además del  $\text{SO}_4^{2-}$ , los otros parámetros químicos que se incluyeron en esta investigación y que se determinaron en el laboratorio fueron los iones considerados como mayoritarios (con excepción del  $\text{HCO}_3^-$ , que fue medido in situ)  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{NO}_3^-$

#### **3.5.1. Técnicas empleadas para cada parámetro:**

La técnica empleada para cada parámetro se indican en el cuadro 5. Los métodos fueron debidamente validados con anterioridad.

Cuadro 5 Técnicas analíticas empleadas para el análisis de los distintos parámetros en aguas de ríos y pozos de Penonomé

| Tipo de Analito | Analito                       | Método   |
|-----------------|-------------------------------|--|
| Aniones         | HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> | Volumétrico - Titulación con H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>          |
|                 | NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>  | Electroquímico Potenciométrico (ISE)                                 |
|                 | Cl <sup>-</sup>               | Volumétrico MOHR   |
| Cationes        | Na <sup>+</sup>               | Espectrofotometría de Emisión Atómica de Llama                       |
|                 | K <sup>+</sup>                | Espectrofotometría de Emisión Atómica de Llama                       |
|                 | Mg <sup>2+</sup>              | Espectrofotometría de Absorción Atómica de Llama (La <sup>3+</sup> ) |
|                 | Ca <sup>2+</sup>              | Espectrofotometría de Absorción Atómica de Llama (La <sup>3+</sup> ) |
| Otros           | pH                            | Electroquímico ISE   |
|                 |                               | Sonda electroquímica   |
|                 | Conductividad Eléctrica       | Electroquímico   |
|                 |                               | Espectrofotométrico HACH   |
|                 | Temperatura                   | Digital  |
| Turbiedad       | Fotométrico nefelométrico     |  |

### 3.5.2. Estudio de validaciones realizadas:

Los métodos analíticos complementarios para el análisis de los otros parámetros físicoquímicos fueron validados en trabajos de investigaciones anteriores como parte del proyecto macro que realiza el CITEN en Hidrología Isotópica (Cañón, 2012, Cárdenas, 2014 y González, 2015)

## **IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN**

#### 4.1. Resultado de validación del método

##### 4.1.1. Acondicionamiento de la columna: Selección del mejor eluyente

Los cuadros 6 y 7 recopilan los resultados obtenidos durante el acondicionamiento de la columna de intercambio iónico en la que cada estándar de sulfato (100 mL) se hizo pasar lentamente a través de la columna activada en forma de  $\text{Cl}^-$  y se hicieron varias eluciones de la columna empleando, por separado, 10 mL de las dos soluciones eluyentes sometidas a prueba  $\text{NaCl}$  5,0 M y  $\text{HCl}$  5,0 M

Cuadro 6 Resultados de turbiedad de patrones de sulfato en columna de Intercambio aniónico empleando  $\text{HCl}$  5,0 M como eluyente

| Concentración del patrón (ppm) | Turbiedad (NTU)   |
|--------------------------------|-------------------|
| 10                             | No hubo turbiedad |
| 7,0                            | No hubo turbiedad |
| 5,0                            | No hubo turbiedad |
| 3,0                            | No hubo turbiedad |
| 1,0                            | No hubo turbiedad |
| 0,50                           | No hubo turbiedad |

En el cuadro 6 se observa que las eluciones con  $\text{HCl}$  5,0 M no resultaron eficaces debido, posiblemente, a que la alta acidez impide la formación de precipitado de  $\text{BaSO}_4$ . Mejores resultados se obtuvieron con el  $\text{NaCl}$  5,0 M como eluyente

El ensayo con  $\text{NaCl}$  5,0 M como eluyente, se realizó con patrones de baja concentración (1,0 ppm, 0,5 ppm y 0,1 ppm). Los datos obtenidos se muestra en el cuadro 7

Cuadro 7 Resultados de turbiedad de patrones de sulfato en columna de intercambio aniónico empleando NaCl 5,0 M como eluyente

| Extracción | PATRONES DE $\text{SO}_4^{2-}$ |                                   |                 |                                   |                 |                                   |
|------------|--------------------------------|-----------------------------------|-----------------|-----------------------------------|-----------------|-----------------------------------|
|            | 1,0 ppm                        |                                   | 0,5 ppm         |                                   | 0,1 ppm         |                                   |
|            | Turbiedad (NTU)                | $[\text{SO}_4^{2-}]$ eluido (ppm) | Turbiedad (NTU) | $[\text{SO}_4^{2-}]$ eluido (ppm) | Turbiedad (NTU) | $[\text{SO}_4^{2-}]$ eluido (ppm) |
| 1          | 12,92                          | 4,91                              | 9,55            | 3,31                              | 6,28            | 1,86                              |
| 2          | 11,52                          | 4,26                              | 8,15            | 2,72                              | 4,37            | 0,980                             |
| 3          | 11,33                          | 4,18                              | 6,03            | 1,74                              | 3,46            | 0,560                             |

Los resultados contemplados en el cuadro 7, indican que la mejor fracción utilizable para el análisis de sulfatos empleando NaCl 5,0 M como eluyente es la primera fracción, con cada uno de los patrones (1,0 ppm, 0,5 ppm y 0,1 ppm) Beneficios adicionales no se obtuvieron con las otras fracciones. Estos resultados, se resumen en el cuadro 8

Cuadro 8 Resultados de concentración de sulfato (ppm) extraído con NaCl 5,0 M en las primeras fracciones

| Concentración del patrón (ppm de $\text{SO}_4^{2-}$ ) | $[\text{SO}_4^{2-}]$ eluido (ppm) |
|---|-----------------------------------|
| 1,0   | 4,910                             |
| 0,50  | 3,310                             |
| 0,10  | 1,860                             |

Con la aplicación de regresión lineal, empleando el programa RLIN en Excel (Leone, 2007) se obtuvo la curva de calibración que se muestra en la figura 16

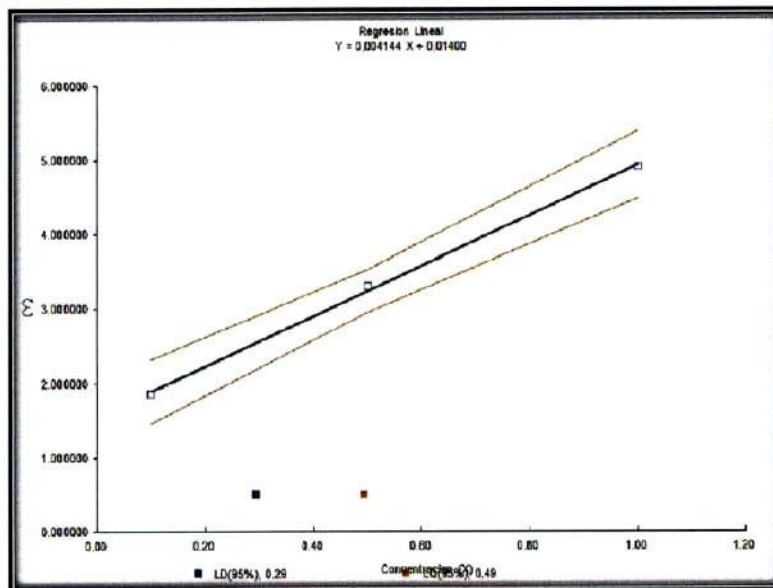


Fig. 17. Curva de calibración de sulfatos obtenida con los patrones.

En el cuadro 9 se muestran los valores obtenidos con los patrones (empleando NaCl 5,0 M como eluyente) de cada uno de los parámetros estadísticos considerados: límite de detección (LD), el límite de cuantificación (LQ), la pendiente de la curva ( $m$ ), coeficiente de variación de la pendiente ( $CV(m)$ ) y el coeficiente de correlación ( $r$ ). Estos parámetros se obtuvieron empleando regresión lineal en Excel (Leone, 2007)

Debido a que con la solución de HCl 5,0 M no hubo precipitación y tomando en cuenta los valores de la pendiente ( $m$ ) y del coeficiente de variación de la pendiente,  $CV(m)$  con los datos obtenidos con el NaCl 0,5 M, se seleccionó esta solución como mejor eluyente, tomando la primera fracción.

Cuadro 9 Parámetros estadísticos de la curva de calibración con los datos obtenidos para los patrones de sulfatos extraídos con NaCl 0,5 M en resina Dowex

| LD (90%)<br>ppm | LQ(90 %)<br>ppm | m    | CV(m) | r        |
|-----------------|-----------------|------|-------|----------|
| 0,15            | 0,27            | 3,38 | 3,57  | 0,999364 |

#### 4.1.2. Selección del mejor agente orgánico modificador de la solubilidad del sulfato de bario

Los resultados obtenidos con los distintos alcoholes ensayados (etanol, 2-metoxietanol e isopropanol) en la preparación del reactivo acondicionador para determinar el mejor agente orgánico modificador de la solubilidad del sulfato de bario se presentan en el cuadro 10

Cuadro 10 Resultados analíticos de los patrones de sulfatos con las soluciones acondicionadoras (con diferentes alcoholes)

| No | Concentracion<br>(mg/L) | Con 2-metoxietanol |             | Con isopropanol   |             | Con etanol        |             |
|----|-------------------------|--------------------|-------------|-------------------|-------------|-------------------|-------------|
|    |                         | Turbidez<br>(NTU)  | Absorbancia | Turbidez<br>(NTU) | Absorbancia | Turbidez<br>(NTU) | Absorbancia |
| 1  | 0                       | 0                  | 0           | 0                 | 0           | 0                 | 0           |
| 2  | 0,50                    | 2,60               | -0,0070     | 1,34              | 0,0020      | 2,18              | -0,0020     |
| 3  | 1,0                     | 5,49               | 0,010       | 2,56              | 0 0070      | 3,27              | 0,0080      |
| 4  | 3,0                     | 7,15               | 0,027       | 5,86              | 0,017 *     | 5,96              | 0,017       |
| 5  | 5,0                     | 10,8               | 0,041       | 8,18              | 0,015       | 9,27              | 0,034       |
| 6  | 7,0                     | 12,5               | 0,045       | 14,8              | 0,053       | 13,6              | 0,051       |
| 7  | 10                      | 24,8               | 0,10        | 23,5              | 0,081       | 22,4              | 0,084       |

Para la selección del mejor agente orgánico modificador se aplicó también regresión lineal a los datos obtenidos con los diferentes alcoholes, empleando el programa RLIN en excel (Leone, 2007) En el anexo 1 se muestran los cuadros completos obtenidos del programa (cuadros A-1 1, A-1 2, A-1 3, A-1 4, A-1 5, A-1 6, A-1 7), para cada una de las validaciones realizadas en la metodología propuesta

Se observa que el menor límite de detección (LD) se obtiene con el etanol, el cual se escogió para la preparación del reactivo acondicionador

#### 4.1.3. Comparación del método de lectura: Absorbancia-nefelometría.

El cuadro 11 muestra el resumen de los datos estadísticos obtenidos con las distintas soluciones acondicionadoras, empleando tanto la lectura de la absorbancia como la nefelométrica

Cuadro 11 Resultados estadísticos con los distintos alcoholes empleando lectura por nefelometría y absorbancia

| <b>NEFELOMETRÍA</b> |                       |          |              |          |
|---------------------|-----------------------|----------|--------------|----------|
| <b>ALCOHOL</b>      | <b>LD (IC)90% ppm</b> | <b>m</b> | <b>CV(m)</b> | <b>r</b> |
| 2-metoxietanol      | 1,72                  | 2,05     | 14,6         | 0,95989  |
| Isopropanol         | 1,02                  | 2,26     | 8,66         | 0,98533  |
| Etanol              | 0,937                 | 2,04     | 7,96         | 0,98758  |
| <b>ABSORBANCIA</b>  |                       |          |              |          |
| <b>ALCOHOL</b>      | <b>LD (IC)90% ppm</b> | <b>m</b> | <b>CV(m)</b> | <b>r</b> |
| 2-metoxietanol      | 1,64                  | 0,010    | 13,9         | 0,96355  |
| Isopropanol         | 1,91                  | 0,0081   | 16,2         | 0,95116  |
| Etanol              | 0,712                 | 0,0086   | 6,04         | 0,99278  |

En cuanto a la sensibilidad, indicada por la pendiente, no hubo casi diferencia en los tres alcoholes para ambas lecturas (absorbancia y nefelometría), pero el etanol mostró menor coeficiente de variación de la pendiente, CV(m) y mayor coeficiente de correlación en la lectura nefelométrica, indicando que etanol es el mejor solvente y la nefelometría la mejor técnica de lectura para las fracciones eluidas de la columna de intercambio aniónico

#### **4.2. Resultados analíticos de sulfatos:**

A partir de estos resultados, se observa que la lectura nefelométrica presenta mejores resultados analíticos que la de absorción por lo que el método analítico recomendado utiliza el etanol (como lo indica el método convencional) y se mide por nefelometría

Con base a los resultados obtenidos, finalmente se propone la siguiente metodología

- Preparación de estándares de sulfatos (10 mg/L, 7,0 mg/L, 5,0 mg/L, 3,0 mg/L, 1,0 mg/L y 0,50 mg/L) a partir de una solución madre de sulfato de sodio de 100 mg/L
- Preparación de la solución acondicionadora de la siguiente manera  
Mezclar 12 mL de HCl concentrado, 120 ml de agua destilada y 30 g de NaCl y se agita hasta disolución total. En otro vaso de precipitados se 40 mL de etanol (alcohol seleccionado) con 20 mL de glicerina. Luego se mezclan ambas soluciones hasta disolución total

- Preparación de la columna de preconcentración Se toma una bureta de 25 mL de vidrio de 1,0 cm de diámetro y se acomoda una delgada capa de lana de vidrio sobre la válvula de paso de teflón. Sobre ésta colocar un lecho de aproximadamente 2,0 cm de alto de resina húmeda de intercambio aniónico fuerte ( $12 \text{ cm}^3$ ) procurando que el lecho de la resina quede compacta, sin burbujas. La resina aniónica fuerte se acondiciona en forma de  $\text{Cl}^-$ , pasando una solución de  $\text{HCl}$  5,0 M (100 mL) y luego se lava con agua desionizada hasta pH neutro. Para el acondicionamiento de la columna de intercambio aniónico se prepara una solución de  $\text{NaCl}$  5,0 M (100 mL) como eluyente.
- Preconcentración y elusión del sulfato en las soluciones estándares
- Preparación del sulfato eluído  
 Colocar 10 mL del efluente de salida obtenidos con el patrón en un tubo de ensayo con tapa, se le agregan 2 mL del reactivo acondicionador y una unidad medidora con cristales de cloruro de bario. Se mezclan inmediatamente durante un minuto en un vortex para obtener la disolución completa de los cristales. Cinco minutos después de la adición de los cristales de cloruro de bario se invierte el tubo con el contenido varias veces y se llena la celda del turbidímetro hasta la marca y se procede a la lectura nefelométrica.
- Se repite el proceso con los otros estándares
- Se repite igualmente el proceso con las muestras

- Utilizando el programa RLIN en Excel se calcula la concentración del sulfato en la muestra

Con los datos obtenidos con los distintos patrones de acuerdo a la metodología final propuesta, se preparó la curva de calibración (empleando RLIN), con la cual se determinó la concentración de sulfatos de las muestras de agua de pozos, aplicándole el mismo procedimiento descrito para los patrones. Los datos obtenidos aparecen en el cuadro 12. Igualmente, en la figura 18 se puede observar la gráfica comparativa del comportamiento de los sulfatos en las tres giras.

Los datos del cuadro 12 muestran solamente uno de los puntos de muestreo (Los Guayacanes 2 A) en el que no se pudo determinar la concentración de sulfatos en la tercera gira, ya que la misma se encontraba por debajo del límite de detección del método desarrollado.

Cuadro 12. Concentración de sulfatos en las aguas muestreadas del río Zarati.

| No. | ID   | LOCALIZACIÓN          | Gira 1                                  | Gira 2                                  | Gira 3                                  |
|-----|------|-----------------------|---|---|---|
|     |      |                       | SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup><br>(mg/L) | SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup><br>(mg/L) | SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup><br>(mg/L) |
| 1   | R-01 | Río Juajaca (M-1)     | 1,6                                     | 0,72                                    | 1,6                                     |
| 2   | R-02 | Río Juajaca (M-2)     | 2,1                                     | 0,80                                    | 3,3                                     |
| 3   | R-03 | Río La Angostura      | 1,8                                     | 2,0                                     | 2,2                                     |
| 4   | R-04 | SraHim (M-4)          | 2,1                                     | 0,79                                    | 2,7                                     |
| 5   | P-05 | B1                    | 3,1                                     | 0,81                                    | 0,67                                    |
| 6   | P-06 | Ecológico             | 1,1                                     | 0,65                                    | 0,63                                    |
| 7   | P-07 | Cristo Rey            | 1,4                                     | 0,67                                    | 0,65                                    |
| 8   | P-08 | Del Prado             | 0,90                                    | 0,66                                    | 0,56                                    |
| 9   | P-09 | La Inmaculada (B16)   | 2,2                                     | 1,5                                     | 0,62                                    |
| 10  | P-10 | Centenario            | 0,80                                    | 0,62                                    | 0,56                                    |
| 11  | P-11 | El Encanto (B10)      | 2,0                                     | 0,68                                    | 0,64                                    |
| 12  | P-12 | Villa Bonita          | 0,50                                    | 0,64                                    | 0,56                                    |
| 13  | P-13 | Los Guayacanes (2A)   | 0,70                                    | 0,60                                    | < LD                                    |
| 14  | P-14 | Carmen Conte Lombardo | 2,0                                     | 0,92                                    | 5,6                                     |
| 15  | P-15 | Chigoré 2             | 0,80                                    | 0,61                                    | 0,56                                    |

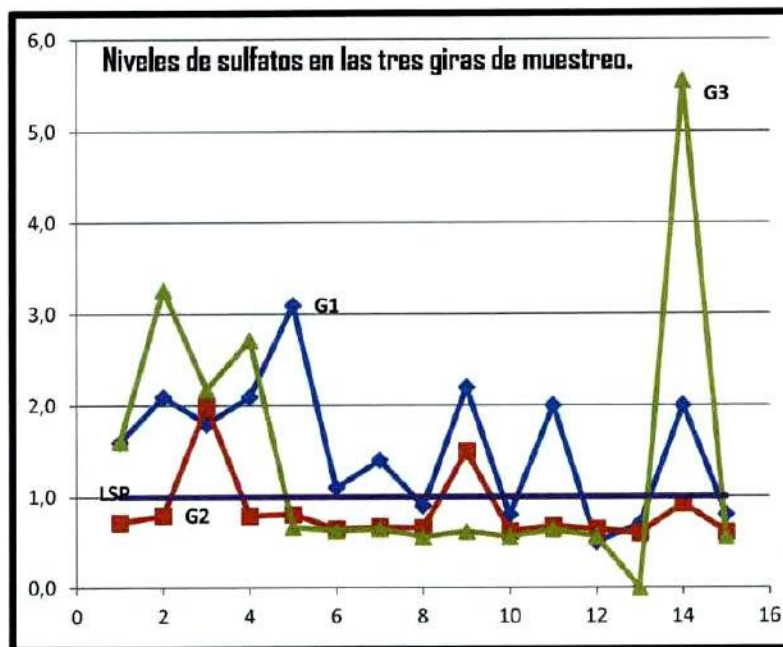


Fig. 18. Variación de los niveles de sulfato por estación de muestreo en las tres giras de muestreo.

#### 4.2.1. Significancia de la inclusión del sulfato en el balance iónico:

Para establecer la confiabilidad de los resultados del método, se recurre al balance iónico. En los cuadros 13, 14, 15, 16, 17 y 18 se presentan los resultados del balance iónico para cada una de las tres giras (con y sin las concentraciones de sulfatos), obtenidos con el programa STATGRAPHICS Centurion XV.

Cuadro 13 Resultados del balance iónico sin sulfatos, primera gira (2012)

| No. | MUESTRA                        | CATIONES<br>TOTALES<br>(meq/L) | ANIONES<br>TOTALES<br>(meq/L) | DIFERENCIA<br>(meq/L) | IONES<br>TOTALES<br>(meq/L) | %           | %<br>ABSOLUTO |
|-----|--------------------------------|--------------------------------|-------------------------------|-----------------------|-----------------------------|-------------|---------------|
| 1   | Río Juajaca (M-1)              | 0,639                          | 0,576                         | 0,0627                | 1,21                        | 5,16        | 5,16          |
| 2   | Río Juajaca (M-2)              | 0,648                          | 0,511                         | 0,136                 | 1,16                        | 11,7        | 11,7          |
| 3   | Río La Angostura               | 1,03                           | 0,913                         | 0,121                 | 1,95                        | 6,20        | 6,20          |
| 4   | Sra Him (M-4)                  | 1,01                           | 0,818                         | 0,193                 | 1,83                        | 10,6        | 10,6          |
| 5   | B1 (Hospital Aquilino Tejeira) | 2,44                           | 2,74                          | -0,296                | 5,19                        | -5,71       | 5,71          |
| 6   | Ecológico                      | 1,60                           | 1,60                          | -0,000376             | 3,19                        | -0,0118     | 0,0118        |
| 7   | Cristo Rey (B14)               | 1,82                           | 1,48                          | 0,336                 | 3,30                        | 10,2        | 10,2          |
| 8   | Del Prado                      | 1,96                           | 1,69                          | 0,265                 | 3,65                        | 7,26        | 7,26          |
| 9   | La Inmaculada (B16)            | 1,60                           | 1 89                          | -0,287                | 3,49                        | -8,20       | 8,20          |
| 10  | Centenario                     | 1,54                           | 1,82                          | -0,277                | 3,37                        | -8,23       | 8,23          |
| 11  | El Encanto (B10)               | 1,79                           | 1,42                          | 0,373                 | 3,21                        | 11,6        | 11,6          |
| 12  | Villa Bonita                   | 1,59                           | 1,52                          | 0,0727                | 3,10                        | 2,34        | 2,34          |
| 13  | Los Guayacanes (2A)            | 1,96                           | 1,92                          | 0,0374                | 3,88                        | 0,964       | 0,964         |
| 14  | Carmen Conte Lombardo          | 1,58                           | 1,74                          | -0,152                | 3,32                        | -4,58       | 4,58          |
| 15  | Chigoré 2-El Puente (B-14)     | 1,63                           | 1,81                          | -0,172                | 3,44                        | -4,99       | 4,99          |
|     |                                |                                |                               |                       | <b>Error→</b>               | <b>2,29</b> | <b>6,52</b>   |

Cuadro 14 Balance iónico con sulfato, primera gira (Diciembre, 2012)

| No. | MUESTRA                        | CATIONES<br>TOTALES<br>(meq/L) | ANIONES<br>TOTALES<br>(meq/L) | DIFERENCIA<br>(meq/L) | IONES<br>TOTALES<br>(meq/L) | %            | %<br>ABSOLUTO |
|-----|--------------------------------|--------------------------------|-------------------------------|-----------------------|-----------------------------|--------------|---------------|
| 1   | Río Jujaca (M-1)               | 0,639                          | 0,609                         | 0,0293                | 1,25                        | 2,35         | 2,35          |
| 2   | Río Jujaca (M-2)               | 0,648                          | 0,555                         | 0,0924                | 1,20                        | 7,68         | 7,68          |
| 3   | Río La Angostura               | 1,03                           | 0,951                         | 0,0832                | 1,98                        | 4,19         | 4,19          |
| 4   | Sra Him (M-4)                  | 1,01                           | 0,862                         | 0,150                 | 1,87                        | 7,99         | 7,99          |
| 5   | B1 (Hospital Aquilino Tejeira) | 2,44                           | 2,81                          | -0,361                | 5,25                        | -6,87        | 6,87          |
| 6   | Ecológico                      | 1,60                           | 1,62                          | -0,0233               | 3,22                        | -0,724       | 0,724         |
| 7   | Cristo Rey (B14)               | 1,82                           | 1,51                          | 0,307                 | 3,33                        | 9,22         | 9,22          |
| 8   | Del Prado                      | 1,96                           | 1,71                          | 0,246                 | 3,67                        | 6,71         | 6,71          |
| 9   | La Inmaculada (B16)            | 1,60                           | 1,94                          | -0,332                | 3,54                        | -9,39        | 9,39          |
| 10  | Centenario                     | 1,54                           | 1,84                          | -0,294                | 3,38                        | -8,68        | 8,68          |
| 11  | El Encanto (B10)               | 1,79                           | 1,46                          | 0,332                 | 3,25                        | 10,2         | 10,2          |
| 12  | Villa Bonita                   | 1,59                           | 1,53                          | 0,0623                | 3,11                        | 2,00         | 2,00          |
| 13  | Los Guayacanes (2A)            | 1,96                           | 1,94                          | 0,0229                | 3,90                        | 0,587        | 0,587         |
| 14  | Carmen Conte Lombardo          | 1,58                           | 1,78                          | -0,194                | 3,36                        | -5,77        | 5,77          |
| 15  | Chigoré 2-El Puente (B-14)     | 1,63                           | 1,82                          | -0,188                | 3,46                        | -5,44        | 5,44          |
|     |                                |                                |                               |                       | <b>Error→</b>               | <b>0,939</b> | <b>5,85</b>   |

Cuadro 15 Resultados del balance iónico sin sulfato, segunda gira (agosto, 2013)

| No.           | MUESTRA                        | CATIONES<br>TOTALES<br>(meq/L) | ANIONES<br>TOTALES<br>(meq/L) | DIFERENCIA<br>(meq/L) | IONES<br>TOTALES<br>(meq/L) | %           | %<br>ABSOLUTO |
|---------------|--------------------------------|--------------------------------|-------------------------------|-----------------------|-----------------------------|-------------|---------------|
| 1             | Río Juajaca (M-1)              | 0,547                          | 0,396                         | 0,151                 | 0,942                       | 16,0        | 16,0          |
| 2             | Río Juajaca (M-2)              | 0,727                          | 0,506                         | 0,221                 | 1,23                        | 17,9        | 17,9          |
| 3             | Río La Angostura               | 0,904                          | 1,07                          | -0,169                | 1,98                        | -8,55       | 8,55          |
| 4             | Sra Him (M-4)                  | 0,964                          | 0,736                         | 0,228                 | 1,70                        | 13,4        | 13,4          |
| 5             | B1 (Hospital Aquilino Tejeira) | 2,94                           | 3,11                          | -0,170                | 6,04                        | -2,82       | 2,82          |
| 6             | Ecológico                      | 1,93                           | 1,67                          | 0,259                 | 3,61                        | 7,17        | 7,17          |
| 7             | Cristo Rey (B14)               | 1,10                           | 0,861                         | 0,242                 | 1,96                        | 12,3        | 12,3          |
| 8             | Del Prado                      | 1,83                           | 1,45                          | 0,379                 | 3,28                        | 11,6        | 11,6          |
| 9             | La Inmaculada (B16)            | 0,859                          | 1,35                          | -0,487                | 2,21                        | -22,1       | 22,1          |
| 10            | Centenario                     | 1,88                           | 1,55                          | 0,336                 | 3,43                        | 9,79        | 9,79          |
| 11            | El Encanto (B10)               | 2,01                           | 2,25                          | -0,243                | 4,26                        | -5,70       | 5,70          |
| 12            | Villa Bonita                   | 1,40                           | 1,25                          | 0,150                 | 2,65                        | 5,67        | 5,67          |
| 13            | Los Guayacanes (2A)            | 1,43                           | 0,750                         | 0,683                 | 2,18                        | 31,3        | 31,3          |
| 14            | Carmen Conte Lombardo          | 1,62                           | 0,599                         | 1,03                  | 2,22                        | 46,1        | 46,1          |
| 15            | Chigoré 2-El Puente (B-14)     | 1,98                           | 1,93                          | 0,0437                | 3,91                        | 1,12        | 1,12          |
| <b>Error→</b> |                                |                                |                               |                       |                             | <b>8,88</b> | <b>14,1</b>   |

Cuadro 16 Resultados del balance iónico con sulfato, segunda gira (agosto, 2013)

| No. | MUESTRA                       | CATIONES<br>TOTALES<br>(meq/L) | ANIONES<br>TOTALES<br>(meq/L) | DIFERENCIA<br>(meq/L) | IONES<br>TOTALES<br>(meq/L) | %           | %<br>ABSOLUTO |
|-----|-------------------------------|--------------------------------|-------------------------------|-----------------------|-----------------------------|-------------|---------------|
| 1   | Río Juajaca (M-1)             | 0,547                          | 0,411                         | 0 136                 | 0,957                       | 14,2        | 14,2          |
| 2   | Río Juajaca (M-2)             | 0,727                          | 0,523                         | 0 204                 | 1,25                        | 16,3        | 16,3          |
| 3   | Río La Angostura              | 0,904                          | 1,12                          | -0 211                | 2,02                        | -10,4       | 10,4          |
| 4   | Sra Hum (M-4)                 | 0,964                          | 0,753                         | 0 212                 | 1,72                        | 12,3        | 12,3          |
| 5   | B1 (Hospital Aquilino Tejera) | 2,94                           | 3,12                          | -0 187                | 6,06                        | -3,09       | 3,09          |
| 6   | Ecológico                     | 1,93                           | 1,69                          | 0 245                 | 3,62                        | 6,77        | 6,77          |
| 7   | Cristo Rey (B14)              | 1,10                           | 0,875                         | 0 228                 | 1,98                        | 11,5        | 11,5          |
| 8   | Del Prado                     | 1,83                           | 1,46                          | 0 366                 | 3,29                        | 11,1        | 11,1          |
| 9   | La Inmaculada (B16)           | 0,859                          | 1,38                          | -0 518                | 2,24                        | -23,2       | 23,2          |
| 10  | Centenario                    | 1,88                           | 1,56                          | 0 323                 | 3,44                        | 9,38        | 9,38          |
| 11  | El Encanto (B10)              | 2,01                           | 2,27                          | -0 257                | 4,28                        | -6,01       | 6,01          |
| 12  | Villa Bonita                  | 1,40                           | 1,26                          | 0 137                 | 2,66                        | 5,14        | 5,14          |
| 13  | Los Guayacanes (2A)           | 1,43                           | 0,763                         | 0 671                 | 2,20                        | 30,5        | 30,5          |
| 14  | Carmen Conte Lombardo         | 1,62                           | 0,618                         | 1 01                  | 2,24                        | 44,9        | 44,9          |
| 15  | Chigoré 2-El Puente (B-14)    | 1,98                           | 1,94                          | 0 0310                | 3,92                        | 0,791       | 0,791         |
|     |                               |                                |                               |                       | <b>Error→</b>               | <b>8,01</b> | <b>13,7</b>   |

Cuadro 17 Resultados del balance iónico sin sulfato, tercera gira (diciembre, 2013)

| No.           | MUESTRA               | CATIONES<br>TOTALES<br>(meq/L) | ANIONES<br>TOTALES<br>(meq/L) | DIFERENCIA<br>(meq/L) | IONES<br>TOTALES<br>(meq/L) | %           | %<br>ABSOLUTO |
|---------------|-----------------------|--------------------------------|-------------------------------|-----------------------|-----------------------------|-------------|---------------|
| 1             | Rio juajaca (M-1)     | 0,705                          | 0,532                         | 0,173                 | 1,24                        | 14,0        | 14,0          |
| 2             | Rio juajaca (M-2)     | 0,756                          | 0,592                         | -0,164                | 1,35                        | 12,2        | 12,2          |
| 3             | Río La angostura      | 1,24                           | 1,25                          | -0,00360              | 2,49                        | -0,145      | 0,145         |
| 4             | Sra Him (M-4)         | 0,878                          | 0,650                         | 0,227                 | 1,53                        | 14,9        | 14,9          |
| 5             | B1                    | 2,40                           | 2,38                          | 0,0217                | 4,79                        | 0,453       | 0,453         |
| 6             | Ecológico             | 1,88                           | 1,99                          | -0,116                | 3,87                        | -3,00       | 3,00          |
| 7             | Cristo Rey            | 2,02                           | 2,18                          | -0,159                | 4,21                        | -3,78       | 3,78          |
| 8             | Del Prado             | 1,97                           | 2,01                          | -0,0390               | 3,98                        | -0,980      | 0,980         |
| 9             | La Inmaculada (B16)   | 1,86                           | 1,83                          | 0,0344                | 3,69                        | 0,932       | 0,932         |
| 10            | Centenario            | 1,86                           | 1,95                          | -0,0901               | 3,81                        | -2,36       | 2,36          |
| 11            | El Encanto (B10)      | 2,08                           | 2,06                          | 0,0167                | 4,15                        | 0,404       | 0,404         |
| 12            | Villa Bonita          | 1,79                           | 1,67                          | 0,117                 | 3,46                        | 3,37        | 3,37          |
| 13            | Guayacanes 2A         | 1,68                           | 1,51                          | 0,176                 | 3,19                        | 5,51        | 5,51          |
| 14            | Caïmen Conte Lombardo | 2,12                           | 1,87                          | 0,251                 | 3,98                        | 6,30        | 6,30          |
| 15            | Chigore 2             | 1,94                           | 1,84                          | 0,104                 | 3,78                        | 2,74        | 2,74          |
| <b>Error→</b> |                       |                                |                               |                       |                             | <b>3,37</b> | <b>4,74</b>   |

Cuadro 18 Resultados del balance iónico con sulfato, tercera gira (diciembre, 2013)

| No.           | MUESTRA               | CATIONES<br>TOTALES<br>(meq/L) | ANIONES<br>TOTALES<br>(meq/L) | DIFERENCIA<br>(meq/L) | IONES<br>TOTALES<br>(meq/L) | %           | %<br>ABSOLUTO |
|---------------|-----------------------|--------------------------------|-------------------------------|-----------------------|-----------------------------|-------------|---------------|
| 1             | Río juajaca (M-1)     | 0,705                          | 0,566                         | 0,139                 | 1,27                        | 11,0        | 11,0          |
| 2             | Río juajaca (M-2)     | 0,756                          | 0,660                         | 0,0959                | 1,42                        | 6,77        | 6,77          |
| 3             | Río La angostura      | 1,24                           | 1,29                          | -0,0490               | 2,54                        | -1,93       | 1,93          |
| 4             | Sra Him (M-4)         | 0,878                          | 0,707                         | 0,171                 | 1,58                        | 10,8        | 10,8          |
| 5             | B1                    | 2,40                           | 2,40                          | 0,00775               | 4,80                        | 0,161       | 0,161         |
| 6             | Ecologico             | 1,88                           | 2,01                          | -0,129                | 3,88                        | -3,33       | 3,33          |
| 7             | Cristo Rey            | 2,02                           | 2,20                          | -0,172                | 4,22                        | -4,09       | 4,09          |
| 8             | Del Prado             | 1,97                           | 2,02                          | -0 0507               | 3,99                        | -1,27       | 1,27          |
| 9             | La Inmaculada (B16)   | 1,86                           | 1,84                          | 0,0214                | 3,70                        | 0,580       | 0,580         |
| 10            | Centenario            | 1,86                           | 1,96                          | -0,102                | 3,82                        | -2,66       | 2,66          |
| 11            | El Encanto (B10)      | 2,08                           | 2,08                          | 0,00342               | 4,16                        | 0,0822      | 0,0822        |
| 12            | Villa Bonita          | 1,79                           | 1,68                          | 0,105                 | 3,47                        | 3,02        | 3,02          |
| 13            | Guayacanes 2A         | 1,68                           | 1,51                          | 0,176                 | 3,19                        | 5,51        | 5,51          |
| 14            | Carmen Conte Lombardo | 2,12                           | 1,98                          | 0,135                 | 4,10                        | 3,30        | 3,30          |
| 15            | Chigore 2             | 1,94                           | 1,85                          | 0,0920                | 3,79                        | 2,43        | 2,43          |
| <b>Error→</b> |                       |                                |                               |                       |                             | <b>2,02</b> | <b>3,80</b>   |

Se observa que el error del balance iónico disminuyó al incluir la data de los sulfatos. En la primera gira, el error disminuyó del 2,29 % al 0,939 % (cuadros 13 y 14), en la segunda se observa una disminución del 8,88 % al 8,01 % (cuadros 15 y 16), mientras que en la tercera disminuyó del 3,37 % al 2,02 % (cuadros 17 y 18). En lo que se refiere al error absoluto, en la primera gira disminuyó del 6,52 % al 5,85 % (cuadros 13 y 14), en la segunda se observa una disminución del 14,1 % al 13,7 % (cuadros 15 y 16), mientras que en la tercera disminuyó del 4,74 % al 3,80 % (cuadros 17 y 18). En términos generales, estos resultados se consideran aceptables ya que se encuentran por debajo del 10 % que es el valor teórico aceptable (con excepción del error absoluto en la segunda campaña), lo que indica que en el proceso analítico se ha cuantificado razonablemente la mayor parte de los solutos totales disueltos que están en forma iónica.

Estos resultados demuestran que las concentraciones de sulfatos en las aguas analizadas, pese a encontrarse en cantidades trazas (sub-ppm), influyen de manera significativa en el balance iónico, el cual es de suma importancia en la caracterización hidroquímica, cuyo objetivo es deducir el funcionamiento del acuífero con base a pequeñas diferencias de composición de origen natural y le confiere confiabilidad a los análisis de laboratorio.

#### **4.3. Resultados de los otros parámetros analíticos**

Los datos obtenidos para los demás parámetros físico-químicos en las tres giras, se muestran en los cuadros 19, 20 y 21.

Cuadro 19 Datos de temperatura, pH, conductividad eléctrica y turbiedad de las muestras de agua analizadas

| No | ID   | LOCALIZACION        | T (°C) | T (°C) | T (°C) | pH   | pH   | pH   | CE (mS/cm) | CE (mS/cm) | CE (mS/cm) | Turbiedad (NTU) | Turbiedad (NTU) | Turbiedad (NTU) |
|----|------|---------------------|--------|--------|--------|------|------|------|------------|------------|------------|-----------------|-----------------|-----------------|
|    |      |                     | 1      | 2      | 3      | 1    | 2    | 3    | 1          | 2          | 3          | 1               | 2               | 3               |
| 1  | R-01 | Río Juajaca (M-1)   | 23,6   | 26,4   | 24,3   | 7,20 | 7,79 | 7,93 | 45,0       | 44,0       | 47,0       | 3,90            | 4,56            | 3,93            |
| 2  | R-02 | Río Juajaca (M-2)   | 23,3   | 25,7   | 25,2   | 7,06 | 7,31 | 7,80 | 56,0       | 64,0       | 63,0       | 9,30            | 9,06            | 8,30            |
| 3  | R-03 | Río La Angostura    | 25,4   | 25,9   | 26,5   | 7,76 | 6,18 | 7,52 | 97,0       | 68,0       | 100        | 9,81            | 195             | 12,1            |
| 4  | R-04 | Sra Him (M-4)       | 24,7   | 25,6   | 26,7   | 7,80 | 7,10 | 7,84 | 90,0       | 91,0       | 60,0       | 9,50            | 10,4            | 8,91            |
| 5  | P-05 | B1                  | 28,9   | 28,4   | 28,1   | 6,65 | 6,39 | 6,15 | 284        | 324        | 247        | 0,350           | 0,480           | 0,0200          |
| 6  | P-06 | Ecologico           | 29,6   | 29,2   | 28,7   | 6,58 | 6,60 | 6,78 | 176        | 177        | 181        | 0,120           | 0,200           | 0,0100          |
| 7  | P-07 | Cristo Rey          | 29,6   | 29,4   | 28,9   | 6,74 | 7,41 | 6,45 | 193        | 193        | 196        | 0,0700          | 0,0300          | 0,0500          |
| 8  | P-08 | Del Prado           | 29,2   | 30,1   | 29,0   | 6,71 | 7,01 | 6,97 | 175        | 199        | 191        | 0,0300          | 0,240           | 0,550           |
| 9  | P-09 | La Inmaculada (B16) | 27,9   | 26,2   | 27,2   | 6,39 | 5,54 | 6,16 | 176        | 89,0       | 180        | 0,0800          | 0,720           | 0,0500          |
| 10 | P-10 | Centenario          | 29,3   | 27,5   | 28,8   | 6,56 | 6,31 | 7,28 | 175        | 179        | 180        | 0,0100          | 0,0200          | 0,0200          |
| 11 | P-11 | El Encanto (B10)    | 28,4   | 28,0   | 27,5   | 6,37 | 6,13 | 6,15 | 206        | 208        | 213        | 0,110           | < LD            | 0,130           |
| 12 | P-12 | Villa Bonita        | 29,6   | 29,6   | 28,6   | 6,86 | 7,28 | 6,73 | 160        | 162        | 158        | 0,200           | 0,330           | 0,240           |
| 13 | P-13 | Los Guayacanes (2A) | 28,4   | 27,5   | 28,1   | 6,37 | 6,26 | 6,56 | 213        | 114        | 157        | 0,0100          | < LD            | 0,200           |
| 14 | P-14 | Carmen C Lombardo   | 28,3   | 27,3   | 27,6   | 6,50 | 6,34 | 6,06 | 176        | 180        | 134        | 3,80            | 4,15            | 3,12            |
| 15 | P-15 | Chigore 2           | 28,7   | 27,8   | 28,3   | 6,45 | 6,05 | 6,33 | 171        | 175        | 186        | 0,0400          | 0,0500          | 0,0900          |

Cuadro 20 Resultados de concentración de aniones en las tres giras

| No | ID   | LOCALIZACION        | ALCALINIDAD                             |   |   | Cl <sup>-</sup><br>(mg/L) | Cl <sup>-</sup><br>(mg/L) | Cl <sup>-</sup><br>(mg/L) | NO <sub>3</sub> <sup>-</sup><br>(mg/L) | NO <sub>3</sub> <sup>-</sup><br>(mg/L) | NO <sub>3</sub> <sup>-</sup><br>(mg/L) | SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup><br>(mg/L) | SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup><br>(mg/L) | SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup><br>(mg/L) |
|----|------|---------------------|---|---|---|---------------------------|---------------------------|---------------------------|--|--|--|---|---|---|
|    |      |                     | HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup><br>(mg/L) | HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup><br>(mg/L) | HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup><br>(mg/L) |                           |                           |                           |  |  |  |   |   |   |
|    |      |                     | 1                                       | 2                                       | 3                                       | 1                         | 2                         | 3                         | 1                                      | 2                                      | 3                                      | 1                                       | 2                                       | 3                                       |
| 1  | R-01 | Rio Juajaca (M-1)   | 30,0                                    | 14,0                                    | 26,8                                    | 2,85                      | 4,40                      | 2,70                      | 0,246                                  | 2,60                                   | 1,00                                   | 1,60                                    | 0,720                                   | 1,61                                    |
| 2  | R-02 | Rio Juajaca (M-2)   | 30,0                                    | 20,7                                    | 30,5                                    | 0,594                     | 4,30                      | 2,70                      | 0,189                                  | 2,80                                   | 1,00                                   | 2,10                                    | 0,800                                   | 3,27                                    |
| 3  | R-03 | Rio La Angostura    | 48,0                                    | 20,1                                    | 41,0                                    | 4,44                      | 24,3                      | 5,70                      | 0,0840                                 | 3,60                                   | 25,7                                   | 1,80                                    | 2,00                                    | 2,18                                    |
| 4  | R-04 | Sra Him (M-4)       | 42,0                                    | 20,7                                    | 34,4                                    | 4,45                      | 11,2                      | 2,60                      | 0,277                                  | 5,00                                   | 0,800                                  | 2,10                                    | 0,790                                   | 2,72                                    |
| 5  | P-05 | B1                  | 123                                     | 97,0                                    | 111                                     | 17,0                      | 42,9                      | 13,4                      | 15,2                                   | 19,0                                   | 11,5                                   | 3,10                                    | 0,810                                   | 0,670                                   |
| 6  | P-06 | Ecologico           | 90,0                                    | 53,1                                    | 101                                     | 2,24                      | 25,8                      | 9,00                      | 3,62                                   | 4,70                                   | 5,50                                   | 1,10                                    | 0,650                                   | 0,630                                   |
| 7  | P-07 | Cristo Rey          | 90,0                                    | 29,3                                    | 125                                     | 0,316                     | 12,7                      | 4,10                      | < LD                                   | 1,40                                   | 1,10                                   | 1,40                                    | 0,670                                   | 0,650                                   |
| 8  | P-08 | Del Prado           | 90,0                                    | 61,0                                    | 111                                     | 7,46                      | 15,0                      | 5,60                      | 0,387                                  | 1,70                                   | 2,00                                   | 0,900                                   | 0,660                                   | 0,560                                   |
| 9  | P-09 | La Inmaculada (B16) | 93,0                                    | 6,10                                    | 88,5                                    | 7,74                      | 42,7                      | 8,20                      | 9,15                                   | 2,60                                   | 9,00                                   | 2,20                                    | 1,50                                    | 0,620                                   |
| 10 | P-10 | Centenario          | 105                                     | 50,6                                    | 102                                     | 2,16                      | 22,4                      | 5,80                      | 2,48                                   | 5,20                                   | 6,70                                   | 0,80                                    | 0,620                                   | 0,560                                   |
| 11 | P-11 | El Encanto (B10)    | 78,0                                    | 47,0                                    | 91,5                                    | < LD                      | 44,9                      | 14,2                      | 8,62                                   | 13,4                                   | 10,2                                   | 2,00                                    | 0,680                                   | 0,640                                   |
| 12 | P-12 | Villa Bonita        | 90,0                                    | 53,7                                    | 95,8                                    | 0,433                     | 12,4                      | 2,80                      | 1,77                                   | 1,20                                   | 1,40                                   | 0,500                                   | 0,640                                   | 0,560                                   |
| 13 | P-13 | Los Guayacanes (2A) | 90,0                                    | 29,3                                    | 75,9                                    | 11,0                      | 6,10                      | 6,30                      | 8,58                                   | 6,10                                   | 5,20                                   | 0,700                                   | 0,600                                   | < LD                                    |
| 14 | P-14 | Carmen C Lombardo   | 90,0                                    | 9,76                                    | 92,5                                    | 6,75                      | 13,0                      | 7,00                      | 4,34                                   | 4,50                                   | 9,50                                   | 2,00                                    | 0,920                                   | 5,560                                   |
| 15 | P-15 | Chigore 2           | 96,0                                    | 48,2                                    | 95,2                                    | 6,88                      | 37,5                      | 7,60                      | 2,39                                   | 5,20                                   | 4,00                                   | 0,800                                   | 0,610                                   | 0,560                                   |

Cuadro 21 Resultados de concentración de cationes obtenidas en las tres giras

| No | ID   | LOCALIZACIÓN        | Na <sup>+</sup> | Na <sup>+</sup> | Na <sup>+</sup> | K <sup>+</sup> | K <sup>+</sup> | K <sup>+</sup> | Ca <sup>2+</sup> | Ca <sup>2+</sup> | Ca <sup>2+</sup> | Mg <sup>2+</sup> | Mg <sup>2+</sup> | Mg <sup>2+</sup> |
|----|------|---------------------|-----------------|-----------------|-----------------|----------------|----------------|----------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|
|    |      |                     | (mg/L)          | (mg/L)          | (mg/L)          | (mg/L)         | (mg/L)         | (mg/L)         | (mg/L)           | (mg/L)           | (mg/L)           | (mg/L)           | (mg/L)           | (mg/L)           |
|    |      |                     | 1               | 2               | 3               | 1              | 2              | 3              | 1                | 2                | 3                | 1                | 2                | 3                |
| 1  | R-01 | Rio Juajaca (M-1)   | 6,57            | 7,13            | 6,60            | < LD           | 0,620          | 0,750          | 5,72             | 3,43             | 5,20             | 0,820            | 0,600            | 1,7              |
| 2  | R-02 | Rio Juajaca (M-2)   | 5,88            | 8,02            | 6,99            | < LD           | 0,740          | 0,890          | 5,84             | 5,24             | 5,24             | 1,22             | 1,19             | 2,0              |
| 3  | R-03 | Rio La Angostura    | 11,3            | 7,47            | 11,6            | 0,650          | 1,84           | 1,78           | 7,98             | 7,70             | 10,1             | 1,55             | 1,80             | 2,3              |
| 4  | R-04 | Sra Him (M-4)       | 11,7            | 12,4            | 5,52            | 0,680          | 1,30           | 0,200          | 7,42             | 5,85             | 8,78             | 1,41             | 1,23             | 2,4              |
| 5  | P-05 | B1                  | 19,2            | 18,5            | 19,2            | 2,54           | 2,30           | 3,30           | 19,9             | 29,2             | 23,0             | 6,72             | 7,50             | 4,1              |
| 6  | P-06 | Ecologico           | 16,9            | 16,8            | 17,0            | 1,80           | 2,44           | 2,60           | 11,1             | 16,6             | 16,0             | 3,17             | 3,80             | 3,3              |
| 7  | P-07 | Cristo Rey          | 18,3            | 13,9            | 18,2            | 1,30           | 1,46           | 2,20           | 13,3             | 4,78             | 17,3             | 4,00             | 2,72             | 3,8              |
| 8  | P-08 | Del Prado           | 20,4            | 15,0            | 20,0            | 1,30           | 1,46           | 2,50           | 15,1             | 17,0             | 15,5             | 3,40             | 3,60             | 3,2              |
| 9  | P-09 | La Inmaculada (B16) | 17,3            | 5,81            | 17,8            | 2,10           | 1,15           | 2,70           | 11,6             | 8,60             | 15,6             | 2,64             | 1,80             | 2,9              |
| 10 | P-10 | Centenario          | 13,4            | 13,8            | 16,1            | 1,24           | 2,14           | 2,80           | 9,67             | 16,7             | 14,9             | 5,43             | 4,80             | 4,2              |
| 11 | P-11 | El Encanto (B10)    | 16,0            | 13,0            | 16,9            | 2,88           | 2,21           | 3,40           | 14,5             | 20,9             | 19,3             | 3,60             | 4,20             | 3,6              |
| 12 | P-12 | Villa Bonita        | 15,7            | 6,28            | 16,6            | 2,19           | 0,69           | 1,90           | 12,8             | 16,6             | 15,6             | 2,58             | 3,40             | 2,9              |
| 13 | P-13 | Los Guayacanes (2A) | 17,0            | 13,3            | 14,4            | 3,52           | 2,72           | 3,91           | 17,6             | 12,1             | 14,6             | 3,06             | 2,20             | 2,7              |
| 14 | P-14 | Carmen C Lombardo   | 13,9            | 19,9            | 18,0            | 1,09           | 2,10           | 2,80           | 11,8             | 10,2             | 19,1             | 4,38             | 2,38             | 3,7              |
| 15 | P-15 | Chigore 2           | 15,9            | 16,8            | 17,1            | 2,00           | 2,44           | 3,00           | 13,12            | 17,3             | 17,2             | 2,89             | 3,90             | 3,20             |

**4.4. Resultados estadísticos de las tres giras y caracterización de las aguas de la zona de estudio:**

**4.4.1. Comparación de los resultados de sulfatos en las tres giras**

En la comparación de la data de sulfatos mediante análisis estadístico se obtuvieron los resultados que se muestran en el cuadro 22, en donde se observa que el valor mínimo obtenido de concentración de sulfatos fue de 0,500 en la primera gira mientras que la concentración máxima fue de 5,56 en la tercera gira.

Cuadro 22: Resumen estadístico de los datos de sulfatos obtenidos en las tres giras

| GIRA    | NÚMERO DE MUESTRAS | PROMEDIO | DESVIACIÓN ESTÁNDAR | COEFICIENTE DE VARIACIÓN (%) | MÍNIMO | MÁXIMO |
|---------|--------------------|----------|---------------------|------------------------------|--------|--------|
| Primera | 15                 | 1,54     | 0,731               | 47,5                         | 0,500  | 3,10   |
| Segunda | 15                 | 0,845    | 0,390               | 46,2                         | 0,600  | 2,00   |
| Tercera | 15                 | 1,39     | 1,48                | 107                          | < LD   | 5,56   |
| Total   | 45                 | 1,25     | 0,867               | 66,9                         | < LD   | 5,56   |

La prueba de contraste múltiple de rango obtenida con el programa Statgraphic Centurion XV (cuadro 23) para los datos de sulfatos de las tres giras de Penonomé muestra los datos agrupados marcados con una X. Igualmente en el análisis estadístico, ANOVA (cuadro 24), indica una relación F igual a 2,06 (una relación entre la estimación entre grupos y la estimación dentro del grupo) y un valor P de la prueba F igual a 0,140

( $P > 0,05$ ) Ambas pruebas indican que no hay diferencia estadísticamente significativa entre las medias de sulfatos en las tres giras, en el nivel de confianza del 95 %. Esto se evidencia en la figura 19

Cuadro 23 Resultado de contraste múltiple de rango de sulfatos de las tres giras

| <b>GIRA</b> | <b>NÚMERO DE MUESTRAS</b> | <b>MEDIA</b> | <b>GRUPOS HOMOGÉNEOS</b> |
|-------------|---------------------------|--------------|--------------------------|
| Segunda     | 15                        | 0,845        | X                        |
| Tercera     | 15                        | 1,39         | X                        |
| Primera     | 15                        | 1,54         | X                        |

Cuadro 24 Resultados de Análisis de varianza de las tres giras para sulfatos

| <b>FUENTE</b>    | <b>SUMA DE CUADRADOS</b> | <b>GL</b> | <b>CUADRADO MEDIO</b> | <b>COCIENTE- F</b> | <b>VALOR P</b> |
|------------------|--------------------------|-----------|-----------------------|--------------------|----------------|
| Entre grupos     | 4,02                     | 2         | 2,01                  | <b>2,06</b>        | <b>0,140</b>   |
| Dentro de grupos | 40,9                     | 42        | 0,970                 | -                  | -              |
| Total (Corr)     | 44,9                     | 44        | -                     | -                  | -              |

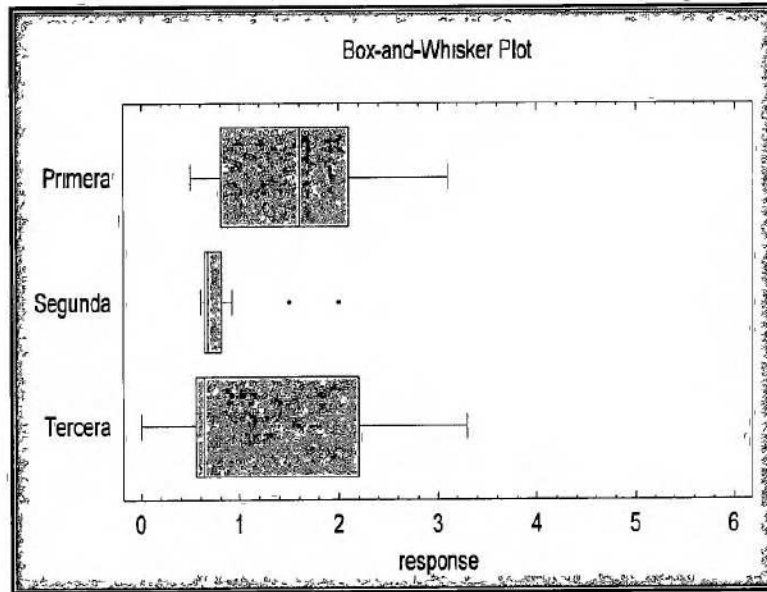


Fig 19 . Grafico de cajas y bigotes obtenido de la data de sulfatos de las tres giras

Al comparar estadísticamente los datos de sulfatos de la primera y segunda gira, se obtuvo un valor P de la prueba F igual a 0,0014, el cual indica que hay una diferencia estadísticamente significativa ( $P < 0,05$ ) entre la primera y segunda gira a un nivel de confianza del 95 %. No obstante, la comparación estadística de la data de sulfatos de la primera y tercera gira mostraron que entre ambas, no hay diferencia significativa para sulfatos a un nivel de confianza del 95 %, pues el valor P de la prueba F obtenido fue de 0,68 ( $P > 0,05$ ). Esto se observa claramente en el diagrama de cajas y bigotes de las tres giras (Figura 19)

#### 4.4.2. Comparación de todos los parámetros en la primera gira:

El resumen del análisis estadístico de los datos de todos los parámetros fisicoquímicos aparece en el cuadro 25, que indica el promedio, la desviación estándar, el coeficiente de variación y los valores máximo y mínimo para cada parámetro

Cuadro 25 Resumen de análisis estadístico de los distintos parámetros fisicoquímicos de la primera gira

| PARAMETRO                     | NUMERO DE MUESTRAS | PROMEDIO | DESVIACION ESTANDARD | COEFICIENTE DE VARIACION (%) | MINIMO | MAXIMO |
|-------------------------------|--------------------|----------|----------------------|------------------------------|--------|--------|
| Ca <sup>2+</sup>              | 15                 | 11,8     | 4,08                 | 34,5                         | 5,72   | 19,9   |
| CE                            | 15                 | 159      | 63,0                 | 39,5                         | 45,0   | 284    |
| Cl <sup>-</sup>               | 15                 | 4,95     | 4,69                 | 94,7                         | < LD   | 17,0   |
| HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> | 15                 | 79,0     | 28,0                 | 35,4                         | 30,0   | 123    |
| K <sup>+</sup>                | 15                 | 1,55     | 1,01                 | 65,3                         | < LD   | 3,52   |
| Mg <sup>2+</sup>              | 15                 | 3,12     | 1,60                 | 51,2                         | 0,820  | 6,72   |
| Na <sup>+</sup>               | 15                 | 14,6     | 4,25                 | 29,0                         | 5,88   | 20,4   |
| NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>  | 15                 | 3,82     | 4,56                 | 119                          | < LD   | 15,2   |
| Turbiedad (NTU)               | 15                 | 2,49     | 3,87                 | 156                          | 0,0100 | 9,81   |
| pH                            | 15                 | 6,80     | 0,466                | 6,86                         | 6,37   | 7,80   |
| SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> | 15                 | 1,54     | 0,732                | 47,5                         | 0,500  | 3,10   |
| T(°C)                         | 15                 | 27,7     | 2,23                 | 8,08                         | 23,3   | 29,6   |
| Total                         | 180                | 26,4     | 49,0                 | 187                          | < LD   | 284,0  |

De la prueba de comparaciones múltiples se obtuvieron los resultados que se indican en el cuadro 26, los cuales muestran que el sulfato se diferencia de ciertos parámetros como CE,  $\text{HCO}_3^-$ , T ( $^{\circ}\text{C}$ ) y parcialmente de  $\text{Na}^+$  y no se diferencia de los otros parámetros,  $\text{K}^+$ , turbiedad (NTU), pH,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{K}^+$ , y  $\text{Ca}^{2+}$  y  $\text{Mg}^{2+}$ . Esto se visualiza mejor en las figuras 20 y 21 que muestran los gráficos obtenidos de las pruebas estadísticas para comparaciones múltiples más frecuentemente utilizadas, mediante el Contraste de la Mínima Diferencia Significativa, LSD (por sus siglas en inglés Least Significant Difference) al 95,0 % de confianza y el diagrama de cajas y bigote, respectivamente.

Cuadro 26 Resultados de la prueba de comparaciones múltiples

| PARÁMETROS               | NÚMERO DE MUESTRAS | MEDIA | GRUPOS HOMOGÉNEOS |
|--------------------------|--------------------|-------|-------------------|
| $\text{SO}_4^{2-}$       | 15                 | 1,54  | X                 |
| $\text{K}^+$             | 15                 | 1,55  | X                 |
| Turbiedad (NTU)          | 15                 | 2,49  | X                 |
| $\text{Mg}^{2+}$         | 15                 | 3,12  | X                 |
| $\text{NO}_3^-$          | 15                 | 3,82  | X                 |
| $\text{Cl}^-$            | 15                 | 4,95  | X                 |
| pH                       | 15                 | 6,80  | X                 |
| $\text{Ca}^{2+}$         | 15                 | 11,8  | X                 |
| $\text{Na}^+$            | 15                 | 14,6  | XX                |
| T ( $^{\circ}\text{C}$ ) | 15                 | 27,7  | X                 |
| $\text{HCO}_3^-$         | 15                 | 79,0  | X                 |
| CE                       | 15                 | 159   | X                 |

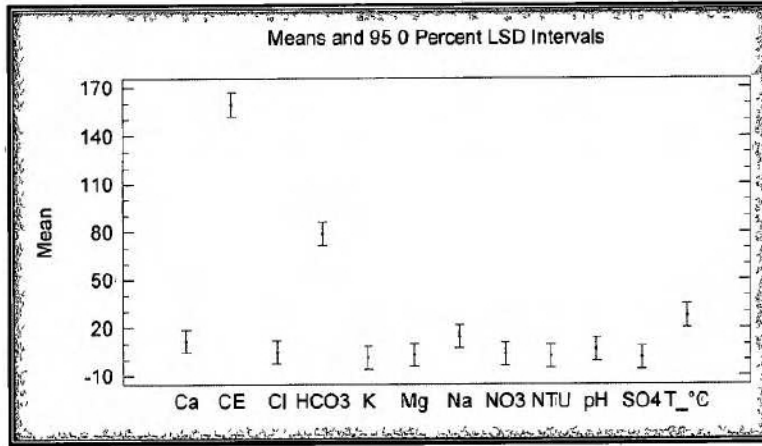


Fig 20 Diagrama de comparaciones multiples para los diferentes parametros fisicoquimicos determinados en las muestras de aguas colectadas en la primera gira (LSD al 95,0 % de confianza)

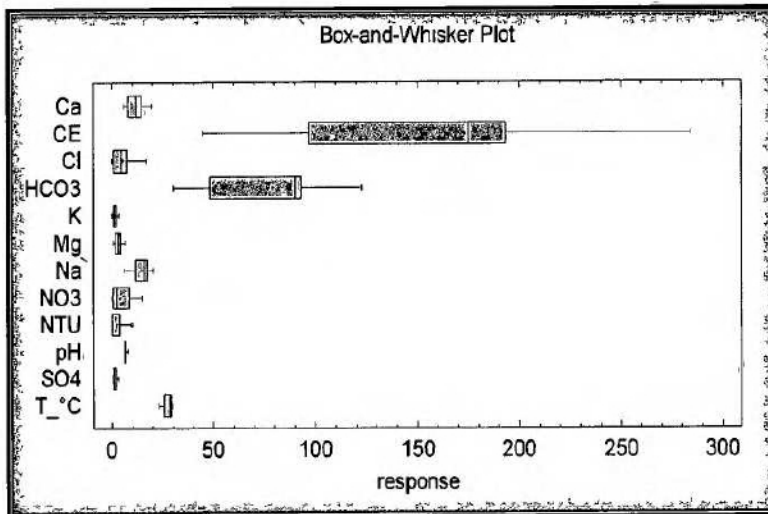


Fig 21 Diagrama de cajas y bigotes de los distintos parametros fisicoquimicos analizados en las muestras de agua (primera gira)

La prueba de Correlación de Pearson con  $p < 0.05$ , para los diferentes parámetros físicoquímicos de la primera gira, aparecen en el cuadro 27. En este cuadro aparecen los parámetros con correlación significativa a un nivel de confianza del 95 %. En el anexo 2 (Cuadro A-1 8) aparecen todas las correlaciones de todos los parámetros.

Cuadro 27 Variables que presentaron correlación significativa a un nivel de confianza del 95 %

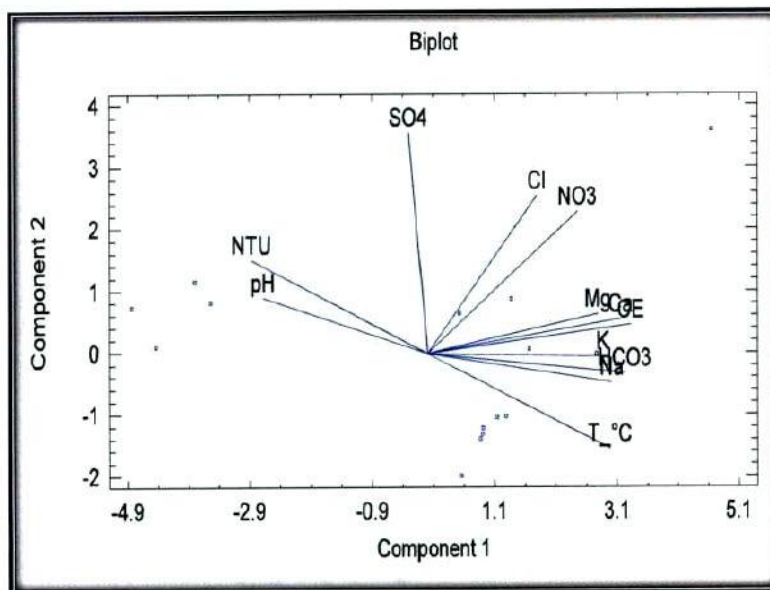
| PAREJA DE VARIABLES                              | PAREJA DE VARIABLES                              | PAREJA DE VARIABLES  | PAREJA DE VARIABLES                             |
|--|--|--|---|
| Ca <sup>2+</sup> y CE                            | CE y HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>               | HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> y Na <sup>+</sup>              | Mg <sup>2+</sup> y NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> |
| Ca <sup>2+</sup> y Cl <sup>-</sup>               | CE y K <sup>+</sup>                              | HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> y NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> | Mg <sup>2+</sup> y NTU                          |
| Ca <sup>2+</sup> y HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> | CE y Mg <sup>2+</sup>                            | HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> y NTU                          | Mg <sup>2+</sup> y pH                           |
| Ca <sup>2+</sup> y K <sup>+</sup>                | CE y Na <sup>+</sup>                             | HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> y pH                           | Mg <sup>2+</sup> y T(°C)                        |
| Ca <sup>2+</sup> y Mg <sup>2+</sup>              | CE y NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>                | HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> y T(°C)                        | Na <sup>+</sup> y NTU                           |
| Ca <sup>2+</sup> y Na <sup>+</sup>               | CE y NTU   | K <sup>+</sup> y Na <sup>+</sup>                             | Na <sup>+</sup> y pH                            |
| Ca <sup>2+</sup> y NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>  | CE y pH  | K <sup>+</sup> y NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>                | Na <sup>+</sup> y T(°C)                         |
| Ca <sup>2+</sup> y NTU                           | CE y T(°C)                                       | K <sup>+</sup> y NTU   | NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> y T(°C)            |
| Ca <sup>2+</sup> y pH                            | Cl <sup>-</sup> y NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>   | K <sup>+</sup> y pH  | NTU y pH  |
| Ca <sup>2+</sup> y T(°C)                         | HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> y K <sup>+</sup>   | K <sup>+</sup> y T(°C)                                       | NTU y T(°C)                                     |
| CE y Cl <sup>-</sup>                             | HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> y Mg <sup>2+</sup> | Mg <sup>2+</sup> y Na <sup>+</sup>                           | pH y T(°C)                                      |

En esta tabla no se muestran correlaciones significativas del sulfato con otros parámetros lo que indica que su comportamiento es independiente de éstos. El análisis de

componentes principales confirma este hecho en donde el  $\text{SO}_4^{2-}$  no se muestra agrupado con ningún otro parámetro (Cuadro 28), lo cual es evidente en la figura 22

Cuadro 28 Resultados de la prueba de componentes principales para todos los parámetros fisicoquímicos

| PARÁMETRO          | COMPONENTE | COMPONENTE |
|--------------------|------------|------------|
|                    | 1          | 2          |
| $\text{Ca}^{2+}$   | 0,332591   | 0,0971684  |
| CE                 | 0,349463   | 0,0810425  |
| $\text{Cl}^-$      | 0,187948   | 0,456063   |
| $\text{HCO}_3^-$   | 0,339872   | -0,0588266 |
| $\text{K}^+$       | 0,301827   | -0,0103036 |
| $\text{Mg}^{2+}$   | 0,293618   | 0,111756   |
| $\text{Na}^+$      | 0,316938   | -0,0854952 |
| $\text{NO}_3^-$    | 0,259168   | 0,410281   |
| NTU                | -0,302689  | 0,270525   |
| pH                 | -0,282824  | 0,159784   |
| $\text{SO}_4^{2-}$ | -0,0320347 | 0,63848    |
| T (°C)             | 0,314414   | -0,279158  |



**Fig. 22** Diagrama de componentes principales para los diferentes parámetros fisicoquímicos analizados en las muestras de agua (primera gira).

#### 4.4.3. Caracterización de las aguas analizadas del sector de Penonomé

Considerando que la zona de muestreo es la misma en las tres campañas, se presenta en la figura 23, el diagrama de Piper obtenido con el programa EASY\_QUIM 5.0\_2012 para las muestras obtenidas en los distintos puntos de muestreo durante el 2012.

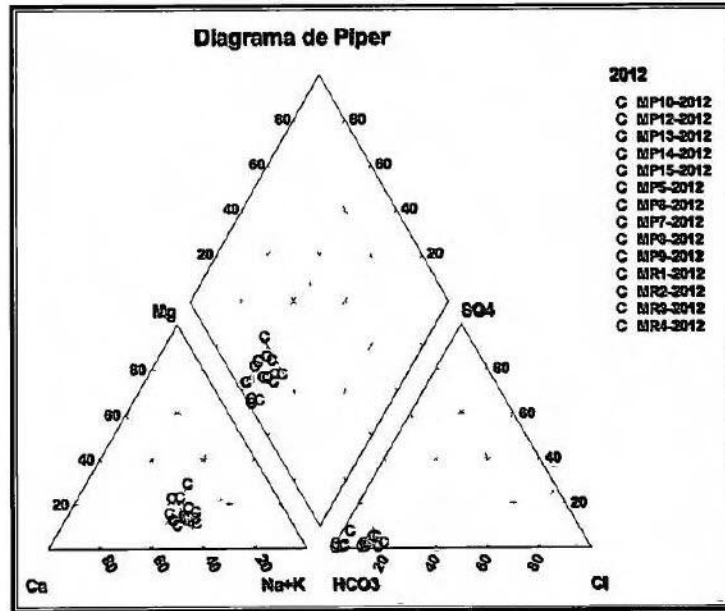


Fig 23 Diagrama de Piper obtenido de los datos de muestras de aguas analizadas (primera gira) del sector de Penonome y alrededores

De acuerdo con el diagrama, en términos generales, las aguas de la zona de estudio son mayoritariamente Na-Ca-HCO<sub>3</sub> (79%), encontrándose un pequeño porcentaje de aguas Na-Ca-Mg-HCO<sub>3</sub>

## **V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

### 5.1. Conclusiones

- Se ha desarrollado un método analítico para la determinación de iones sulfato en concentraciones a nivel de subppm, preconcentrando la muestra, mejorando la solución acondicionadora y utilizando la técnica de lectura nefelométrica
- Se determinó que el mejor acondicionador se obtuvo con el etanol, la preconcentración con la resina aniónica RW DOWEX 1 (Cl<sup>-</sup>) resultó satisfactoria
- Las aguas del acuífero de Penonomé, se encuentran en muy bajos niveles de iones sulfato, confirmando la importancia del método analítico desarrollado
- El estudio del balance iónico confirmó que es necesario incluir el sulfato en el estudio hidroquímico aunque esté en niveles subppm, pues mejora el balance iónico final, al disminuir el porcentaje de error del mismo
- Acorde a los resultados de la prueba Piper, las aguas de la zona de estudio son mayoritariamente Na-Ca-HCO<sub>3</sub> (79%), encontrándose un pequeño porcentaje de aguas Na-Ca-Mg-HCO<sub>3</sub>
- El tratamiento estadístico de varianza permite concluir que no hay diferencia estadísticamente significativa entre las medias del sulfato para las tres giras a un 95 0% de confianza
- La prueba de Pearson del sulfato con otros parámetros indica que su comportamiento es independiente de éstos, pues no hay correlaciones

significativas. El análisis de componentes principales reafirma este hecho en donde el  $\text{SO}_4^{2-}$  no se muestra agrupado con ningún otro.

## 5.2. Recomendaciones:

- Se recomienda la utilización de otras formas de resinas aniónica, débiles y medias, de modo de mejorar la eficiencia en la preconcentración.
- Igualmente se recomienda, la utilización de otros solventes orgánicos con bajas fuerzas iónicas sería recomendable para bajar aún más la solubilidad del sulfato de bario.

## **VI. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

- ADAMSKI, J, y VILLARD, S 1975 Application of the methylthymol blue sulfate method to water and waste-water analysis Anal Chem 47 1191-94
- ALEIXO, L, RATH, S y GODINHO, O 1988 Determination of total sulphur in ethanol by reduction using raney nickel and detection by cathodic stripping voltammetry Analyst 113 1427-29
- APHA, AWWA, WPCF 1980 Standard methods for the examination of water and wastewater, Fifteenth Edition edition American Public Health Association, American Waterworks Association and Water Pollution Control Federation USA Pág 4404-4450
- APHA, AWWA, WPCF 1998 Standard methods for the examination of water and wastewater 20th edition American Public Health Association, American Waterworks Association and Water Pollution Control Federation USA Págs 4204-4210
- APPELO, C A J, POSTMA, D 2005 Geochemistry, groundwater and pollution 2a ed Rotterdam, Balkema Publishers
- AUTORIDAD NACIONAL DEL AMBIENTE (ANAM) 2009 Informe de monitoreo de la calidad del agua en las cuencas hidrográficas de Panamá Compendio de resultados, 2002-2008 Dirección de Protección de la Calidad Ambiental Panamá
- AUTORIDAD NACIONAL DEL AMBIENTE (ANAM) 2011 Plan Nacional de Gestión Integrada de los Recursos Hídricos de Panamá PNGIRHP 2010-2030 Panamá, Panamá
- BROOKS, C y MURPHY, R 1981 Flow injection and photometric determination of sulfate in rain water with methylthymol blue Anal Chem 53 1924-26
- BRUZZONITI, M C, DE CARLO, R M y SARZANINI, C 2008 Determination of sulfonic acids and alkylsulfates by ion chromatography in water Talanta 75(3) 734-739 Department of Analytical Chemistry, University of Torino
- CABALLERO, A, BALLESTEROS, I, LEONE, O, VILLARREAL, J, BAYARD, C, TAPIA, A, JAÉN, J, C, VERGARA, E, BATISTA, J A y ALMAGUER, Y 2013 El método geoelectrico aplicado a la exploración de aguas subterráneas en la República de Panamá V Convención Cubana de Ciencias de la Tierra La Habana
- CABALLERO, A, LEONE, O, JAÉN, J, TAPIA, A, VILLARREAL, J, y BAYARD C 2014 Estudio preliminar del acuífero de la población de Antón Universidad de Panamá VIP 01-00-14-2014-02 Panamá, Panamá

- CAÑÓN M, R E 2012 Análisis de aguas subterráneas del acuífero de Antón Tesis de Licenciatura Facultad de Ciencias Naturales, Exactas y Tecnología Universidad de Panamá Panamá, Panamá
- CÁRDENAS E, J O 2014 Validación de dos métodos electroquímicos utilizando electrodos selectivos de cloruro y calcio, y su aplicación en la caracterización del agua de pozos de Antón Tesis de Licenciatura Facultad de Ciencias Naturales, Exactas y Tecnología Universidad de Panamá Panamá, Panamá
- CRITES, R Y TCHOBANOGLIOUS, G 2001 Tratamiento de Aguas Residuales en Pequeñas Poblaciones Mc Graw Hill Colombia
- COLEMAN, W, SHULTS, W, KELLEY, M y DEAN, J 1972 Turbidimetry via parallel photometric analysis-determination of sulfate Anal Chem 44 103-114
- COLOVOS, G, PANESAR, M y PERRY, E 1976 Linearizing the calibration curve in determination of sulfate by the methylthymol blue method Anal Chem 48 1693-96
- CUSTODIO, E 2001 Effects of groundwater development on the environment Boletín Geológico y Minero, Madrid, 111(6) 107-120
- CUSTODIO, E, y LLAMAS, M 1976 Hidrología subterránea Tomo I 1era edición Editorial Omega Barcelona
- CUSTODIO, E, MANZANO, M y MONTES C 2008 Perspectiva general del papel y gestión de las aguas subterráneas en el Área de Doñana, Sudoeste de España Boletín Geológico y Minero, 119 (1) 81-92
- DICCIONARIO GEOGRÁFICO DE PANAMÁ 1974 Tomo III Editorial Universidad de Panamá 1156 Págs
- EMPRESA DE TRANSMISIÓN ELECTRICA, S A (ETESA) 1999 Mapa hidrogeológico de Panamá Texto explicativo. Panamá
- ESTEVE D, N, PONT C, J y BOLUDA B, N 2009 Problema 1 Estimación de la fiabilidad de un análisis de agua Modelización hidroquímica 9 pág Disponible en [https://rua.ua.es/dspace/bitstream/10045/12874/6/Problema\\_1.pdf](https://rua.ua.es/dspace/bitstream/10045/12874/6/Problema_1.pdf)
- FAGUNDO, J R, GONZÁLEZ, P, FAGUNDO SIERRA, J, ÁLVAREZ, E, SUÁREZ, M, MELIÁN, C, 2006 Application of hidrogeochemical modeling to characterization and water quality control of coastal karst aquifer Rev Environmental Geology, Springer-Verlag, 247-267 La Habana

- GELSI, L 2011 Resumen del trabajo final de master en gestión y auditorías ambientales Buenos Aires, Argentina
- GÓMEZ R, J C 2010 Geología, geofísica, hidrogeoquímica e isótopos, como herramientas para definir un modelo conceptual hidrogeológico, caso de aplicación acuífero costero municipio de Turbo (Cap 5 y 6) Postgrado en Aprovechamiento de Recursos Hídricos Universidad de Colombia Escuela de Geociencias y Medio Ambiente Medellín Disponible en [http://www.bdigital.unal.edu.co/2407/4/71787208\\_2009\\_4.pdf](http://www.bdigital.unal.edu.co/2407/4/71787208_2009_4.pdf)
- GONZÁLEZ S, A R 2015 Validación de métodos electroquímicos de potencial redox (Eh), pH (ISE) y amonio (ISE) y su aplicación a muestras de aguas de pozos y ríos Tesis de Licenciatura Facultad de Ciencias Naturales, Exactas y Tecnología Universidad de Panamá, Panamá
- GORHAM, E y DETENBECK, N 1986 Sulfate in bog waters: a comparison of ion chromatography, with mackereth's cation-exchange technique and a revision of earlier views on cause of bog acidity *J of Ecology* 74 899-903
- HOFFMANN, E, MARKO-VARGA, G, CSIKI, I y JOENSOON, J 1986 A multicolour ion chromatographic determination of nitrate and sulfate in waters containing humic substances *Int J of Environ Anal Chem* 25 161
- HORI, T, SUGIYAMA, M y HIMENO, S 1988 Direct spectrophotometric determination of sulphate ion based on the formation of a blue molybdo-sulphate complex *Analyst* 113 1639-42
- INSTITUTO DE ACUEDUCTOS Y ALCANTARILLADOS NACIONALES (IDAAN) 2010 Boletín Estadístico Panamá
- INSTITUTO MEXICANO DE TECNOLOGÍA DEL AGUA (IMTA) 2012 Programa de hidrología de México Informe Científico México
- JOHNSON, C y NISHITA, H 1952 Microestimation of sulfur in plant materials, soils, and irrigation waters *Anal Chem* 24 736-742
- KIM, S y PURNENDU, K 1991 Simultaneous photometric flow injection determination of sulfide, polysulfide, sulfite, thiosulfate, and sulfate *Anal Chem* 63 427-432
- KOLTHOFF, I, SANDELL, E, MEEHAN, E, BRUKENTEING, S 1919 Análisis de sulfatos en aguas *Chem Abst*, 13(9) 944

- KRUG, F , ZAGATTO, E , REIS, B , BAHIA, O y JACINTHO, A 1983 Turbidimetric determination of sulphate in plant digests and natural waters by flow injection analysis with alternating streams *Anal Chim Acta* 145 179-187
- LEDO DE MEDINA, H , GONZALEZ, G y LOBOS, P 1993 Determinación de sulfato mediante potenciometría con electrodo selectivo *Rev INTERCIENCIA* 19(1) 24-27 Maracaibo, Venezuela
- LEONE, O , BARRAGÁN, L , RAMOS DE L, M y SALINAS, P 2014 Caracterización y determinación de la línea base de las propiedades físico-químicas del acuífero de Antón, Parte B, 2013-2014 Universidad de Panamá VIP Registro VIP-01-04-00-16-2014-25 Panamá, Panamá
- LEONE, O , FUENTES, M V , GÓMEZ, J A y TAPIA, E 2017 Aplicación de la polarografía de pulso diferencial y redisolución anódica en la determinación de metales pesados Zn, Cd, Pb, Cu , en el río Matasnillo (Panamá) *Rev Scientia* 27(1) 53-64
- LEONE, O y SALINAS, P 2015 Determinación de la presencia de nitrógeno en agua subterránea en la cuenca del río Zaratí Estudio de caso Proyecto PAN 7004 Informe Técnico Agencia Internacional de Energía Atómica-Universidad de Panamá, Panamá
- LITTLEJOHN, D y CHANG, S 1986 Determination of nitrogen-sulfur compounds by ion chromatography *Anal Chem* 58 158-160
- LÓPEZ-GETA, J A , FORNÉS A , J M , RAMOS R , G y VILLARROYA G , F 2009 Las aguas subterráneas Un recurso natural del subsuelo 4 ed Instituto Geológico y Minero de España Madrid, España
- MALCOLM, G , BATTERSBY, N , STANLEY, S y BROWN, C 1986 Organic degradation, sulphate reduction and ammonia production in the sediments of loch eil, scotland *Estuarine, Coastal and Shelf Sci* 23 689-704
- MICHAEL, R , WATROUS, R y DJUGLASS, J 1974 Improved methylthymol blue procedure for automated sulfate determinations *Anal Chem* 46 1329-1330
- MOLINER, M Y 2005 Aportaciones de la Química Analítica a la resolución de diversos problemas medioambientales Tesis de Doctorado Universidad de Valencia Server Publicacions, Valencia, España
- MOSKO, J 1984 Automated determination of inorganic anions in water by ion chromatography *Anal Chem* 56 629-633

- NEBEL B J Y WRIGHT R T 1999 Ciencias ambientales Ecología y desarrollo sostenible 6ta edición Prentice Hall México
- OKADA, T y KUWAMOTO, T 1985 Trace determination of Anions by Use of a Back-Flush Method and Large Injection Volumes in Ion Chromatography J of Chromatography 350 317-323
- ORDÓÑEZ, J J 2011 Contribuyendo al desarrollo de una Cultura del Agua y la Gestión Integral de Recurso Hídrico : Aguas Subterráneas-Acuíferos 1era edición Cartilla Técnica Sociedad Geográfica de Lima Lima, Perú 41 págs  
 Disponible en  
[http://www.gwp.org/Global/GWPSAm\\_Files/Publicaciones/Varios/Aguas\\_Subterranéas.pdf](http://www.gwp.org/Global/GWPSAm_Files/Publicaciones/Varios/Aguas_Subterranéas.pdf)
- ORGANIZACIÓN DE LAS NACIONES UNIDAS PARA LA EDUCACIÓN, LA CIENCIA Y LA CULTURA (UNESCO) 2014 Programa Hidrológico Internacional para América Latina y el Caribe (PHI-LAC). Disponible en  
<http://water.usgs.gov/edu/watercyclespanish.html>
- PINEDA N, A D 2015 Validación de los métodos electroquímicos (ISE) y espectroscopía (FES) para Sodio, Potasio y su aplicación en el análisis de agua de pozos Tesis de Licenciatura Facultad de Ciencias Naturales, Exactas y Tecnología Universidad de Panamá Panamá, Panamá
- PORTER, S y RUNNACLES, A 1977 The determination of sulphate in phosphoric acid with a silver/silver sulphide ion - selective electrode Anal Chim Acta 49 449-451
- SALINAS , P, BARRAGÁN, L, LEONE, O, DE LEONE, M, BURKE, G, ORTEGA, M y MARTÍNEZ, D 2012 Estudio preliminar de la contaminación por intrusión salina en el acuífero costero de Punta Chame Universidad de Panamá Código VIP-01-00-00-14-201 0-01
- SANTA A , D P, MARTÍNEZ D y BETANCUR, T 2008 Uso de la hidroquímica e isótopos ambientales para la evaluación de la conexión hidrológica entre el agua subterránea y el humedal ciénaga de Colombia Rev Gestión y ambiente 11(2) 21-38
- SEVERICHE C A Y GONZÁLEZ, H 2012 Evaluación analítica para la determinación de sulfatos en aguas por método turbidimétrico modificado Rev Ing USB Med, 3(2) 6-11
- SIEMER, D 1980 Reduction-distillation method for sulfate determination Anal Chem 52 1971-74

- SRINIVASA, S , SOUNDER, S y SUBRAHMANYAM, J 1988 Determination on sulphide sulphur and total sulphur in lead Analyst 113 313-315
- STIFF, H A 1951 The interpretation of chemical water analysis by means of pattern Jour, Petroleum Technology, 3(10) 15-17
- TABATABAI, M A 1974 A rapid method for the determination of sulfate in water samples Environmental Letters 7(3), 237-243
- TRUJILLO, E , FONSECA, G , GARCÍA, M A Y MÁRTÍNEZ, V 2009 Evaluación de la cromatografía iónica para fomentar su uso en la investigación y estudios de posgrado en ciencias del agua Formación Universitaria 2 (1) 7-16
- VAN STADEN, J 1982 Automated turbidimetric determination of sulphate in surface, ground and domestic waters by flow injection analysis Fresenius Z Fur Anal 310 239-242
- VARELA, M 1993 Calidad y contaminación de las aguas subterráneas en Las aguas subterráneas importancia y perspectivas. Instituto Tecnológico Geominero de España (IGME,) Madrid
- VERDUYN, G y DEROUANE, A 1974 Automatic determination of sulfates by an improved nephelometric method Application to the determination of SO<sub>2</sub> in atmospheric air and sulfates in rain water Atmosph Environ 8 707-715
- WILSON, D , FERNÁNDEZ, A y ZAYAS Y 2007 Desarrollo y validación de un método de valoración amperométrica para la determinación de ion sulfato en muestras de aguas naturales y residuales Rev Cubana de Química Cuba 19(2) 29-33
- WOOD, C y MARR, L 1988 Improvements to the ethylene blue method for the determination of hydrogen sulphide in Air Analyst, 113 1635-1638
- YOUNGER, P L 2007 Groundwater in the environment, an introduction Blackwell Publ Oxford 1-317
- ZHOU, J Y , PROGNON P , DAUPHIN, C , y Hamon, M 1994 HPLC fluorescence Determination of nitrites in water using precolumn derivatization with 4-methyl-7-aminocoumarin Chromatographia 36(1) 1612

## **ANEXOS**

ANEXO I

Cuadros obtenidos con el programa de Regresión Lineal (RLIN), en las validaciones de la metodología propuesta para el análisis de sulfatos

Cuadro A-1.1. Parámetros estadísticos obtenidos con los patrones (1,0; 0,50 y 0,10 ppm)

| n= 3   |             | Fecha: 2015-12-30 |                |           |           |           |          |
|--|-------------|-------------------|----------------|-----------|-----------|-----------|----------|
| Conc(X)  | (Y)         | m                 | ts(m)          | C.V. (m)  | ±IC(m)90% | ±IC(m)95% | ts(rem)  |
| 1.0  | 4.910       | 3.38              | 0.12           | 3.67%     | 0.76      | 1.53      | 0.07696  |
| 0.5  | 3.310       | b                 | ts(b)          | C.V. (b)  | ±IC(b)90% | ±IC(b)95% | CV(m)res |
| 0.1  | 1.860       | 1.557             | 0.078          | 5%        | 0.493     | 0.994     | 2.29%    |
|  |             | r                 | r <sup>2</sup> | t(90%)    | t(95%)    | Xprom     | Yprom    |
|  |             | 0.999363693       | 0.998727791    | 6.31      | 12.71     | 0.533     | 3.4E+00  |
|  |             | LD(X)90%          | LD(X)95%       | LD(Y)90%  | LD(Y)95%  | LD(M)11er |          |
|  |             | 0.15              | 0.29           | 0.27      | 0.49      | 0.063     |          |
| <b>C A L C U L O S D E C O N C E N T R A C I O N (X)</b> |             |                   |                |           |           |           |          |
| (Y)  | Repet.      | Conc. (X)         | ts(X)          | ±I.C. 90% | ±I.C. 95% |           |          |
| 2.170  | 1           | 0.18              | 0.0            | 0.184     | 0.370     |           |          |
| C.V. (X)   | Sxx         | Syy               | Sxy            | Sxy       | Descrip.  |           |          |
| 16.05%   | 0.405656667 | 4.655             | 1.375          |           |           |           |          |

| LD 90 % ppm | LD 90 % ppm | m    | CV (m) | r        |
|-------------|-------------|------|--------|----------|
| 0.15        | 0.27        | 3.38 | 3.6    | 0.999364 |

Cuadro A-1.2. Parámetros estadísticos obtenidos con los patrones analizados empleando 2-metoxietanol : Nefelometría

| n= 6   |             | Fecha: 2017-11-25 METOXI-TURBIDIDAD |                |           |           |           |          |
|--|-------------|-------------------------------------|----------------|-----------|-----------|-----------|----------|
| Conc(X)  | (Y)         | m                                   | ts(m)          | C.V. (m)  | ±IC(m)90% | ±IC(m)95% | ts(rem)  |
| 10.0   | 24.800      | 2.05                                | 0.30           | 14.60%    | 0.64      | 0.83      | 2.45704  |
| 7.0  | 12.470      | b                                   | ts(b)          | C.V. (b)  | ±IC(b)90% | ±IC(b)95% | CV(m)res |
| 5.0  | 10.820      | 1.401                               | 1.661          | 111%      | 3.532     | 4.606     | 23.28%   |
| 3.0  | 7.150       | r                                   | r <sup>2</sup> | t(90%)    | t(95%)    | Xprom     | Yprom    |
| 1.0  | 5.490       | 0.959890318                         | 0.921389423    | 2.13      | 2.77      | 4.417     | 1.1E+01  |
| 0.5  | 2.600       | LD(X)90%                            | LD(X)95%       | LD(Y)90%  | LD(Y)95%  | LD(M)11er |          |
|  |             | 1.721                               | 2.244          | 3.056     | 3.860     | 3.592     |          |
| <b>C A L C U L O S D E C O N C E N T R A C I O N (X)</b> |             |                                     |                |           |           |           |          |
| (Y)  | Repet.      | Conc. (X)                           | ts(X)          | ±I.C. 90% | ±I.C. 95% |           |          |
| 2.170  | 1           | 0.33                                | 1.4            | 3.029     | 3.950     |           |          |
| C.V. (X)   | Sxx         | Syy                                 | Sxy            | Sxy       | Descrip.  |           |          |
| 430.63%  | 67.20833333 | 307.18775                           | 137.9225       |           |           |           |          |

| LD (3σ)ppm | LD (IC) 90 % ppm | m    | CV (m) | r       |
|------------|------------------|------|--------|---------|
| 0.60       | 1.72             | 2.05 | 14.6   | 0.95989 |

Cuadro A-1.3. Parámetros estadísticos obtenidos con los patrones analizados, empleando 2-metoxietanol : Absorbancia

| n= 6                         |        | Fecha: 2017-11-25 METOXI-ABSORBANCIA |                |           |            |            |           |
|------------------------------|--------|--------------------------------------|----------------|-----------|------------|------------|-----------|
| Conc(X)                      | (Y)    | m                                    | ±s(m)          | G.V.(m)   | ±LC(m) 90% | ±LC(m) 95% | ±s(res)   |
| 10.0                         | 0.103  | 0.010                                | 0.00           | 13.88%    | 0.00       | 0.00       | 0.01135   |
| 7.0                          | 0.045  | b                                    | ±s(b)          | G.V.(b)   | ±LC(b) 90% | ±LC(b) 95% | CV(s)/res |
| 5.0                          | 0.041  | -0.008                               | 0.008          | -102%     | 0.016      | 0.021      | 31.10%    |
| 3.0                          | 0.027  | r                                    | r <sup>2</sup> | t(90%)    | t(95%)     | Xprom      | Yprom     |
| 1.0                          | 0.010  | 0.963549638                          | 0.928427902    | 2.13      | 2.77       | 4.417      | 3.7E-02   |
| 0.5                          | -0.007 | LO(X) 90%                            | LO(X) 95%      | LO(X) 90% | LO(X) 95%  | LO(M)ler   |           |
|                              |        | 1.638                                | 2.133          | 2.920     | 3.693      | 3.414      |           |
| CALCULOS DE CONCENTRACION(X) |        |                                      |                |           |            |            |           |
| (Y)                          | Repet  | Conc.(X)                             | ±s(X)          | ±L.C. 90% | ±L.C. 95%  |            |           |
| 2.170                        | 1      | 218.35                               | 29.7           | 63.208    | 82.432     |            |           |
| G.V.(X)                      | Sxx    | Syy                                  | Sxy            | Descr.p.  |            |            |           |
|                              | 13.61% | 67.20833333                          | 0.0071995      | 0.67025   |            |            |           |

| LD (3σ)ppm | LD (IC) 90 % ppm | m    | CV (m) | r       |
|------------|------------------|------|--------|---------|
|            | 1.64             | 0.01 | 13.9   | 0.96355 |

Cuadro A-1-4. Parámetros estadísticos obtenidos con los patrones analizados, empleando isopropanol : Nefelometría

| n= 6                         |        | Fecha: 2017-11-25 ISOPROP-TURBIEDAD |                |           |            |            |           |
|------------------------------|--------|-------------------------------------|----------------|-----------|------------|------------|-----------|
| Conc(X)                      | (Y)    | m                                   | ±s(m)          | G.V.(m)   | ±LC(m) 90% | ±LC(m) 95% | ±s(res)   |
| 10.0                         | 23.900 | 2.26                                | 0.20           | 8.66%     | 0.42       | 0.64       | 1.80570   |
| 7.0                          | 14.840 | b                                   | ±s(b)          | G.V.(b)   | ±LC(b) 90% | ±LC(b) 95% | CV(s)/res |
| 5.0                          | 8.180  | -0.610                              | 1.085          | -178%     | 2.308      | 3.010      | 17.12%    |
| 3.0                          | 5.860  | r                                   | r <sup>2</sup> | t(90%)    | t(95%)     | Xprom      | Yprom     |
| 1.0                          | 2.960  | 0.985333014                         | 0.970881149    | 2.13      | 2.77       | 4.417      | 8.4E+00   |
| 0.5                          | 1.340  | LO(X) 90%                           | LO(X) 95%      | LO(X) 90% | LO(X) 95%  | LO(M)ler   |           |
|                              |        | 1.020                               | 1.331          | 1.898     | 2.424      | 2.130      |           |
| CALCULOS DE CONCENTRACION(X) |        |                                     |                |           |            |            |           |
| (Y)                          | Repet  | Conc.(X)                            | ±s(X)          | ±L.C. 90% | ±L.C. 95%  |            |           |
| 2.170                        | 1      | 1.23                                | 0.8            | 1.733     | 2.289      |            |           |
| G.V.(X)                      | Sxx    | Syy                                 | Sxy            | Descr.p.  |            |            |           |
|                              | 89.30% | 67.20833333                         | 354.1794       | 152.02    |            |            |           |

| LD (3σ)ppm | LD (IC) 90 % ppm | m    | CV (m) | r       |
|------------|------------------|------|--------|---------|
| 0.93       | 1.02             | 2.26 | 8.66   | 0.98533 |

Cuadro A-1.5. Parámetros estadísticos obtenidos con los patrones analizados, empleando isopropanol: Absorbancia

| n= 6                          |        | Fecha: 2017-11-25 ISOPROP-ABSORBANCIA |                  |            |             |             |           |  |
|-------------------------------|--------|---------------------------------------|------------------|------------|-------------|-------------|-----------|--|
| Conc (X)                      | (Y)    | m                                     | ±s(m)            | C.V. (m)   | ±LQ m 90%   | ±LQ m 95%   | ±s(res)   |  |
| 10.0                          | 0.001  | 0.0081                                | 0.00             | 16.23%     | 0.00        | 0.00        | 0.01073   |  |
| 7.0                           | 0.053  | b                                     | ±s(b)            | C.V. (b)   | ±LQ (b) 90% | ±LQ (b) 95% | CV(s) res |  |
| 3.0                           | 0.015  | -0.005                                | 0.007            | -112%      | 0.015       | 0.020       | 36.79%    |  |
| 3.0                           | 0.017  | r                                     | r <sup>2</sup>   | t(90%)     | t(95%)      | Xprom       | Yprom     |  |
| 1.0                           | 0.007  | 0.95116001                            | 0.904705365      | 2.13       | 2.77        | 4.417       | 2.9E-02   |  |
| 0.5                           | 0.002  | LQ(X) 90%                             | LQ(X) 95%        | LQ(X) 90%  | LQ(X) 95%   | LQ M 11er   |           |  |
|                               |        | 1.912                                 | 2.494            | 3.355      | 4.231       | 3.991       |           |  |
| CALCULOS DE CONCENTRACION (X) |        |                                       |                  |            |             |             |           |  |
| (Y)                           | Repet. | Conc. (X)                             | ±s(X)            | ±L.C. 90%  | ±L.C. 95%   |             |           |  |
| 2.170                         | 1      | 269.84                                | 43.1             | 91.641     | 119.511     |             |           |  |
| C.V. (X)                      | Sxx    | Syy                                   | Sxy              | Descr. p.  |             |             |           |  |
|                               | 15.97% | 67.20833333                           | 0.004832833      | 0.84208333 |             |             |           |  |
|                               |        | LD (3σ) ppm                           | LD (IC) 90 % ppm | m          | CV (m)      | r           |           |  |
|                               |        |                                       | 1.91             | 0.0081     | 16.2        | 0.95116     |           |  |

Cuadro A-1.6. Parámetros estadísticos obtenidos para los patrones analizados, empleando etanol: nefelometría

| n= 6                          |        | Fecha: 2017-11-25 ETANOL-TURBIEDAD |                |            |             |             |           |  |
|-------------------------------|--------|------------------------------------|----------------|------------|-------------|-------------|-----------|--|
| Conc (X)                      | (Y)    | m                                  | ±s(m)          | C.V. (m)   | ±LQ m 90%   | ±LQ m 95%   | ±s(res)   |  |
| 10.0                          | 22.490 | 2.04                               | 0.18           | 7.96%      | 0.35        | 0.45        | 1.33333   |  |
| 7.0                           | 13.580 | b                                  | ±s(b)          | C.V. (b)   | ±LQ (b) 90% | ±LQ (b) 95% | CV(s) res |  |
| 5.0                           | 9.270  | 0.414                              | 0.901          | 218%       | 1.918       | 2.499       | 14.12%    |  |
| 3.0                           | 5.960  | r                                  | r <sup>2</sup> | t(90%)     | t(95%)      | Xprom       | Yprom     |  |
| 1.0                           | 3.270  | 0.987678048                        | 0.976310387    | 2.13       | 2.77        | 4.417       | 9.4E+00   |  |
| 0.5                           | 2.180  | LQ(X) 90%                          | LQ(X) 95%      | LQ(X) 90%  | LQ(X) 95%   | LQ M 11er   |           |  |
|                               |        | 0.937                              | 1.223          | 1.754      | 2.243       | 1.987       |           |  |
| CALCULOS DE CONCENTRACION (X) |        |                                    |                |            |             |             |           |  |
| (Y)                           | Repet. | Conc. (X)                          | ±s(X)          | ±L.C. 90%  | ±L.C. 95%   |             |           |  |
| 2.170                         | 1      | 0.86                               | 0.8            | 1.614      | 2.105       |             |           |  |
| C.V. (X)                      | Sxx    | Syy                                | Sxy            | Descr. p.  |             |             |           |  |
|                               | 88.38% | 67.20633333                        | 288.01693      | 137.401667 |             |             |           |  |
|                               |        | LD 90 % ppm                        | LQ 90 % ppm    | m          | CV (m)      | r           |           |  |
|                               |        | 0.94                               | 1.7            | 2.04       | 8.0         | 0.987578    |           |  |

Cuadro A-1.7. Parámetros estadísticos obtenidos con los patrones analizados empleando etanol: absorbancia.

| n= 6                          |             |             |             | Fecha: 2017-11-25 ETANOL-ABSORBANCIA |             |             |          |
|-------------------------------|-------------|-------------|-------------|--------------------------------------|-------------|-------------|----------|
| Conc(X)                       | (Y)         | m           | ±s(m)       | C.V.(m)                              | ±(C) m 90%  | ±(C) m 95%  | ±s(res)  |
| 10.0                          | 0.084       | 0.0086      | 0.00        | 6.04%                                | 0.00        | 0.00        | 0.00425  |
| 7.0                           | 0.051       | b           | ±s(b)       | C.V.(b)                              | ±(C) b) 90% | ±(C) b) 95% | Cv(s)res |
| 5.0                           | 0.034       | -0.008      | 0.003       | -49%                                 | 0.006       | 0.008       | 13.29%   |
| 3.0                           | 0.017       | r           | r2          | t(90%)                               | t(95%)      | Xprom       | Yprom    |
| 1.0                           | 0.008       | 0.992779974 | 0.985612077 | 2.18                                 | 2.77        | 4.417       | 3.2E-02  |
| 0.5                           | -0.002      | LOD(X) 90%  | LOD(X) 95%  | LOD(X) 90%                           | LOD(X) 95%  | LOD(N) (er) |          |
|                               |             | 0.712       | 0.928       | 1.363                                | 1.738       | 1.488       |          |
| CALCULOS DE CONCENTRACION (X) |             |             |             |                                      |             |             |          |
| (Y)                           | Repet.      | Conc.(X)    | ±s(X)       | ±L.C. 90%                            | ±L.C. 95%   |             |          |
| 2.170                         | 1           | 253.45      | 15.1        | 32.011                               | 41.747      |             |          |
| C.V.(X)                       | Sxx         | Syy         | Sxy         | Descrip.                             |             |             |          |
| 5.94%                         | 67.20533333 | 0.605026    | 0.577       |                                      |             |             |          |

| LD (IC) 90 % ppm | m      | CV (m) | r        |
|------------------|--------|--------|----------|
| 0.71             | 0.0086 | 6.0    | 0.099278 |

ANEXO 2

CORRELACIONES DE PERSON ENTRE DISTINTOS IONES Y PARÁMETROS

Cuadro A-1.8: Correlaciones de Pearson de los parámetros analizados

|                                | Ca <sup>2+</sup> | CE              | Cl <sup>-</sup> | HCO <sub>3</sub> <sup>1-</sup> | K <sup>1+</sup> | Mg <sup>2+</sup> | Na <sup>1+</sup> | NO <sub>3</sub> <sup>1-</sup> | NTU             | pH              | SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> |
|--------------------------------|------------------|-----------------|-----------------|--------------------------------|-----------------|------------------|------------------|-------------------------------|-----------------|-----------------|-------------------------------|
| Ca <sup>2+</sup>               |                  | 0.9362<br>(15)  | 0.6286<br>(15)  | 0.8204<br>(15)                 | 0.8467<br>(15)  | 0.7216<br>(15)   | 0.8610<br>(15)   | 0.7188<br>(15)                | -0.7046<br>(15) | -0.6378<br>(15) | -0.0156<br>(15)               |
|                                |                  | 0.0000          | 0.0121          | 0.0002                         | 0.0001          | 0.0024           | 0.0000           | 0.0025                        | 0.0034          | 0.0105          | 0.9560                        |
| CE                             | 0.9362<br>(15)   |                 | 0.5396<br>(15)  | 0.9295<br>(15)                 | 0.8198<br>(15)  | 0.8704<br>(15)   | 0.8736<br>(15)   | 0.7540<br>(15)                | -0.7505<br>(15) | -0.7056<br>(15) | 0.0415<br>(15)                |
|                                |                  | 0.0000          | 0.0379          | 0.0000                         | 0.0002          | 0.0000           | 0.0000           | 0.0012                        | 0.0013          | 0.0033          | 0.8833                        |
| Cl <sup>-</sup>                | 0.6286<br>(15)   | 0.5396<br>(15)  |                 | 0.4710<br>(15)                 | 0.4035<br>(15)  | 0.4609<br>(15)   | 0.4227<br>(15)   | 0.6821<br>(15)                | -0.1923<br>(15) | -0.2131<br>(15) | 0.3473<br>(15)                |
|                                | 0.0121           | 0.0379          |                 | 0.0764                         | 0.1358          | 0.0838           | 0.1165           | 0.0051                        | 0.4923          | 0.4456          | 0.2047                        |
| HCO <sub>3</sub> <sup>1-</sup> | 0.8204<br>(15)   | 0.9295<br>(15)  | 0.4710<br>(15)  |                                | 0.7026<br>(15)  | 0.8728<br>(15)   | 0.8520<br>(15)   | 0.5965<br>(15)                | -0.8167<br>(15) | -0.7373<br>(15) | -0.1487<br>(15)               |
|                                | 0.0002           | 0.0000          | 0.0764          |                                | 0.0035          | 0.0000           | 0.0001           | 0.0189                        | 0.0002          | 0.0017          | 0.5970                        |
| K <sup>1+</sup>                | 0.8467<br>(15)   | 0.8198<br>(15)  | 0.4035<br>(15)  | 0.7026<br>(15)                 |                 | 0.4871<br>(15)   | 0.7330<br>(15)   | 0.7290<br>(15)                | -0.6958<br>(15) | -0.6678<br>(15) | -0.1649<br>(15)               |
|                                | 0.0001           | 0.0002          | 0.1358          | 0.0035                         |                 | 0.0656           | 0.0019           | 0.0020                        | 0.0040          | 0.0065          | 0.5571                        |
| Mg <sup>2+</sup>               | 0.7216<br>(15)   | 0.8704<br>(15)  | 0.4609<br>(15)  | 0.8728<br>(15)                 | 0.4871<br>(15)  |                  | 0.6483<br>(15)   | 0.6074<br>(15)                | -0.6042<br>(15) | -0.5863<br>(15) | 0.1330<br>(15)                |
|                                | 0.0024           | 0.0000          | 0.0838          | 0.0000                         | 0.0656          |                  | 0.0089           | 0.0163                        | 0.0170          | 0.0216          | 0.6367                        |
| Na <sup>1+</sup>               | 0.8610<br>(15)   | 0.8736<br>(15)  | 0.4227<br>(15)  | 0.8520<br>(15)                 | 0.7330<br>(15)  | 0.6483<br>(15)   |                  | 0.4822<br>(15)                | -0.7517<br>(15) | -0.5820<br>(15) | -0.1604<br>(15)               |
|                                | 0.0000           | 0.0000          | 0.1165          | 0.0001                         | 0.0019          | 0.0089           |                  | 0.0687                        | 0.0012          | 0.0228          | 0.5679                        |
| NO <sub>3</sub> <sup>1-</sup>  | 0.7188<br>(15)   | 0.7540<br>(15)  | 0.6821<br>(15)  | 0.5965<br>(15)                 | 0.7290<br>(15)  | 0.6074<br>(15)   | 0.4822<br>(15)   |                               | -0.4534<br>(15) | -0.5506<br>(15) | 0.4609<br>(15)                |
|                                | 0.0025           | 0.0012          | 0.0051          | 0.0189                         | 0.0020          | 0.0163           | 0.0687           |                               | 0.0896          | 0.0334          | 0.0838                        |
| NTU                            | -0.7046<br>(15)  | -0.7505<br>(15) | -0.1923<br>(15) | -0.8167<br>(15)                | -0.6958<br>(15) | -0.6042<br>(15)  | -0.7517<br>(15)  | -0.4534<br>(15)               |                 | 0.8538<br>(15)  | 0.3876<br>(15)                |
|                                | 0.0034           | 0.0013          | 0.4923          | 0.0002                         | 0.0040          | 0.0170           | 0.0012           | 0.0896                        |                 | 0.0001          | 0.1535                        |
| pH                             | -0.6378<br>(15)  | -0.7056<br>(15) | -0.2131<br>(15) | -0.7373<br>(15)                | -0.6678<br>(15) | -0.5863<br>(15)  | -0.5820<br>(15)  | -0.5506<br>(15)               | 0.8538<br>(15)  |                 | 0.2171<br>(15)                |
|                                | 0.0105           | 0.0033          | 0.4456          | 0.0017                         | 0.0065          | 0.0216           | 0.0228           | 0.0334                        | 0.0001          |                 | 0.4370                        |
| SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>  | -0.0156<br>(15)  | 0.0415<br>(15)  | 0.3473<br>(15)  | -0.1487<br>(15)                | -0.1649<br>(15) | 0.1330<br>(15)   | -0.1604<br>(15)  | 0.4609<br>(15)                | 0.3876<br>(15)  | 0.2171<br>(15)  |                               |
|                                | 0.9560           | 0.8833          | 0.2047          | 0.5970                         | 0.5571          | 0.6367           | 0.5679           | 0.0838                        | 0.1535          | 0.4370          |                               |

Cuadro A-1.8. Correlaciones de Pearson de los parámetros analizados (Continuación)

|                               | Ca <sup>2+</sup> | CE      | Cl <sup>-</sup> | HCO <sub>3</sub> <sup>1-</sup> | K <sup>1+</sup> | Mg <sup>2+</sup> | Na <sup>1+</sup> | NO <sub>3</sub> <sup>1-</sup> | NTU     | pH      | SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> |
|-------------------------------|------------------|---------|-----------------|--------------------------------|-----------------|------------------|------------------|-------------------------------|---------|---------|-------------------------------|
|                               | 0.0001           | 0.0002  | 0.1358          | 0.0035                         |                 | 0.0656           | 0.0019           | 0.0020                        | 0.0040  | 0.0065  | 0.5571                        |
| Mg <sup>2+</sup>              | 0.7216           | 0.8704  | 0.4609          | 0.8728                         | 0.4871          |                  | 0.6483           | 0.6074                        | -0.6042 | -0.5863 | 0.1330                        |
|                               | (15)             | (15)    | (15)            | (15)                           | (15)            |                  | (15)             | (15)                          | (15)    | (15)    | (15)                          |
|                               | 0.0024           | 0.0000  | 0.0838          | 0.0000                         | 0.0656          |                  | 0.0089           | 0.0163                        | 0.0170  | 0.0216  | 0.6367                        |
| Na <sup>1+</sup>              | 0.8610           | 0.8736  | 0.4227          | 0.8520                         | 0.7330          | 0.6483           |                  | 0.4822                        | -0.7517 | -0.5820 | -0.1604                       |
|                               | (15)             | (15)    | (15)            | (15)                           | (15)            | (15)             |                  | (15)                          | (15)    | (15)    | (15)                          |
|                               | 0.0000           | 0.0000  | 0.1165          | 0.0001                         | 0.0019          | 0.0089           |                  | 0.0687                        | 0.0012  | 0.0228  | 0.5679                        |
| NO <sub>3</sub> <sup>1-</sup> | 0.7188           | 0.7540  | 0.6821          | 0.5965                         | 0.7290          | 0.6074           | 0.4822           |                               | -0.4534 | -0.5506 | 0.4609                        |
|                               | (15)             | (15)    | (15)            | (15)                           | (15)            | (15)             | (15)             |                               | (15)    | (15)    | (15)                          |
|                               | 0.0025           | 0.0012  | 0.0051          | 0.0189                         | 0.0020          | 0.0163           | 0.0687           |                               | 0.0896  | 0.0334  | 0.0838                        |
| NTU                           | -0.7046          | -0.7505 | -0.1923         | -0.8167                        | -0.6958         | -0.6042          | -0.7517          | -0.4534                       |         | 0.8538  | 0.3876                        |
|                               | (15)             | (15)    | (15)            | (15)                           | (15)            | (15)             | (15)             | (15)                          |         | (15)    | (15)                          |
|                               | 0.0034           | 0.0013  | 0.4923          | 0.0002                         | 0.0040          | 0.0170           | 0.0012           | 0.0896                        |         | 0.0001  | 0.1535                        |
| pH                            | -0.6378          | -0.7056 | -0.2131         | -0.7373                        | -0.6678         | -0.5863          | -0.5820          | -0.5506                       | 0.8538  |         | 0.2171                        |
|                               | (15)             | (15)    | (15)            | (15)                           | (15)            | (15)             | (15)             | (15)                          | (15)    |         | (15)                          |
|                               | 0.0105           | 0.0033  | 0.4456          | 0.0017                         | 0.0065          | 0.0216           | 0.0228           | 0.0334                        | 0.0001  |         | 0.4370                        |
| SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> | -0.0156          | 0.0415  | 0.3473          | -0.1487                        | -0.1649         | 0.1330           | -0.1604          | 0.4609                        | 0.3876  | 0.2171  |                               |
|                               | (15)             | (15)    | (15)            | (15)                           | (15)            | (15)             | (15)             | (15)                          | (15)    | (15)    |                               |
|                               | 0.9560           | 0.8833  | 0.2047          | 0.5970                         | 0.5571          | 0.6367           | 0.5679           | 0.0838                        | 0.1535  | 0.4370  |                               |
| T (°C)                        | 0.7455           | 0.8444  | 0.1751          | 0.9208                         | 0.6891          | 0.7327           | 0.8826           | 0.3599                        | -0.8490 | -0.7078 | -0.3904                       |
|                               | (15)             | (15)    | (15)            | (15)                           | (15)            | (15)             | (15)             | (15)                          | (15)    | (15)    | (15)                          |
|                               | 0.0014           | 0.0001  | 0.5324          | 0.0000                         | 0.0045          | 0.0019           | 0.0000           | 0.1876                        | 0.0001  | 0.0032  | 0.1502                        |