



UNIVERSIDAD  
NACIONAL  
AUTÓNOMA DE  
NICARAGUA,  
MANAGUA

UNAN - MANAGUA

**Facultad de Ciencias e Ingenierías.**

**Departamento de Tecnología**

**Carrera Ingeniería Geológica**

MONOGRAFÍA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO GEÓLOGO.

DETERMINACIÓN DE LA CONTAMINACIÓN NATURAL POR ARSÉNICO  
EN LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS DEL SECTOR SUR DEL VOLCÁN  
MOMBACHO, GRANADA - NICARAGUA.

Período Enero – Junio 2017.

**Presentado por:**

Br. Luis Gerardo Martínez Sirias.

Br. Kelym Reynaldo Martínez Mena.

Tutor: Msc. Gema Velásquez Espinoza.

Asesor: Ing. José Francisco Ruiz Cordero.

Managua, Diciembre 2017.

## *Dedicatoria*

A Dios: Esta Monografía se la dedicamos primeramente a Dios, por ser nuestra fuente, nuestra mano derecha, nuestro sustento, el que nos ha dado la capacidad, la valentía y la fortaleza para que este sueño se hiciera realidad.

A mis Padres: Oscar Francisco Martínez Fuentes y por la memoria y honra de mi madre querida y amada, María Isabel Sirias Amador, por haberme brindado todo su amor, consejos y apoyo incondicional, para lograr este nuevo alcance en mi vida académica.

A mi Esposa: Amanda Natalia Gómez García, por estar siempre a mi lado dándome su apoyo incondicional como profesional, amiga y esposa en nuestro diario vivir.

A mi hija: Isabel de los Ángeles Martínez Gómez, ya que es la razón para superarme día a día y que tome este ejemplo para que sea una persona de bien.

A mis hermanos y hermanas: Fátima, Wilmer, Marlon, Larry, Miriam, Oscar y Gloria Martínez Sirias, con cariño especial y que Dios les bendiga y llene de muchas bendiciones en sus vidas.

A mis Abuelos: Que con todo su amor y cariño siempre me han alentado con sus palabras para seguir adelante.

A mis tías, tíos y primos: con respeto y cariño especial.

**Luis Gerardo Martinez Sirias.**

## *Dedicatoria*

A DIOS, nuestro creador, guía y centro de nuestra vida; por permitirnos culminar esta nueva etapa en nuestras vidas.

A mis padres.

Ángela Olfania Mena Aguirre y Donald Enrique Martínez Jarquín (q.e.p.d), quienes han sido el pilar que ha sostenido el desarrollo de mi vida, que han hecho todo lo posible por brindarme una educación personal y profesional para forjarnos un futuro mejor. ¡Muchas gracias!

A mi Hermano.

Pedro Antonio, Gracias por tus consejos y muestras de afecto, por motivarme a luchar por alcanzar nuestras metas.

**Kelym Reynaldo Martínez Mena.**

## *Agradecimientos*

A nuestra Tutora Msc. Ing. Gema Velásquez Espinoza, por su valiosa tutoría y tiempo incondicional en la elaboración de la presente investigación.

A nuestro Asesor Ing. José Francisco Ruiz Cordero, por el apoyo y colaboración en el transcurso de la elaboración de nuestra Monografía.

A la Empresa Nicaragüense de Electricidad (ENEL) dirigida por el Ing. Ernesto Martínez Tiffer, por su ayuda en brindar su valiosa información y documentación. Especialmente a la Dirección de Estudios Geotérmicos, Ing. Melba Sú y Ing. Ariel Zúñiga por brindarnos la oportunidad y apoyo para la realización de la presente investigación.

A la Universidad Nacional de Ingeniería (Laboratorios Piensa), por su apoyo y disponibilidad en la realización de análisis de laboratorio.

A nuestros padres, regalos maravillosos que Dios nos ha dado, por su apoyo incondicional, por sus esfuerzos y sacrificios que han hecho por nosotros, para que este sueño hoy sea una realidad, estos títulos de Ingeniero Geólogo también son de ustedes, gracias a su apoyo incondicional.

Nuestro más sincero agradecimiento a todos nuestros amigos que nos brindaron su amistad Muchas Gracias.

A La Universidad Nacional Autónoma De Nicaragua (UNAN-Managua). A los maestros de la Carrera de Geología por su gran labor, por brindarnos sus consejos y conocimientos durante nuestras etapas de formación en el área de las ciencias Geológicas. ¡Muchas Gracias a todos!

## Contenido

<b>1. INTRODUCCIÓN.</b>	1
<b>1.2. ANTECEDENTES.</b>	3
<b>1.3. JUSTIFICACIÓN.</b>	8
<b>1.3. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.</b>	9
<b>1.4. OBJETIVOS.</b>	10
1.4.1. Objetivo general.	10
1.4.2. Objetivos específicos.	10
<b>1.5. HIPÓTESIS.</b>	10
<b>1.6. DESCRIPCIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO.</b>	11
1.6.1. Ubicación geográfica y política administrativa.	11
1.6.2. Los accesos y la red vial de comunicación.	11
1.6.3. Clima.	12
1.6.4. Hidrología.	12
<b>2. MARCO TEÓRICO.</b>	15
2.1. PROPIEDADES QUÍMICAS.	15
2.2. ARSÉNICO EN EL AMBIENTE.	16
2.2.1. Fuentes naturales (fondo geoquímico).	16
2.2.2. Fuentes antropogénicas.	16
2.3. PRESENCIA DE ARSÉNICO EN LAS AGUAS.	17
2.3.1. Forma de ocurrencia: especies acuosas.	17
2.4. ABUNDANCIA Y DISTRIBUCIÓN DE ARSÉNICO EN LAS AGUAS CONTINENTALES SUPERFICIALES.	18
2.4.1. Ríos.	18
2.4.2. Lagos.	19
2.4.3. Agua del mar y estuarios.	19
2.4.3. Origen de arsénico en las aguas.	19
2.4.4. Transporte de arsénico en el agua.	20
2.5. PRINCIPALES MECANISMOS GEOQUÍMICOS DE LIBERACIÓN Y MOVILIZACIÓN DE ARSÉNICO EN LAS AGUAS.	20
2.6. GEOLOGÍA.	22
2.6.1. Contexto Geotectónico Regional.	22
2.6.2. Volcanismo Cuaternario En Nicaragua.	22
<b>3. METODOLOGÍA.</b>	25

3.1. TRABAJO DE GABINETE.....	25
3.1.1 Recopilación bibliográfica. ....	25
3.1.2. Selección para los sitios de Muestras de aguas de estudio.....	26
3.2. TRABAJO DE CAMPO. ....	26
3.2.1. Localización de las muestras. ....	27
3.2.2. Toma de muestras. ....	27
3.2.3. Secuencia de muestreo.....	29
3.3. ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE DATOS. ....	30
3.3.1. Análisis físicos – químicos. ....	30
3.4. MÉTODOS DE ANÁLISIS FÍSICOQUÍMICOS. ....	32
3.4.1. Discusión de análisis Físicos – Químicos. ....	33
3.4.2. Análisis de manifestaciones termales. ....	35
3.4.3. Generación de modelos usando herramienta de interpolación de datos. ....	36
<b>4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....</b>	<b>37</b>
4.1. Calidad de Agua. ....	37
4.1.2. Carácter Hidrogeoquímico de las aguas subterráneas. ....	37
4.1.3 Constituyentes mayoritarios. ....	39
4.1.4. Constituyentes minoritarios. ....	48
4.1.5. Parámetros fisicoquímicos de las aguas subterráneas.....	51
4.2. Representaciones gráficas de calidad de agua de las aguas subterráneas de manantiales y pozos. ....	55
4.2.1. Diagrama de Piper. ....	55
4.2.2. Manifestaciones termales. ....	58
4.2.3. Diagramas de Stiff.....	61
4.3. Especiación de Arsénico. ....	66
4.3.1. Relación de arsénico con otros parámetros de importancia. ....	69
4.4. Determinación de Arsénico en las aguas subterráneas y superficiales en el sector sur del volcán Mombacho. ....	74
4.5. Geología Local.....	76
<b>5. Conclusiones. ....</b>	<b>82</b>
<b>6. Recomendaciones. ....</b>	<b>84</b>
<b>7. Bibliografía. ....</b>	<b>85</b>
<b>8. Anexos ..... </b>	<b>89</b>

## Índice de imágenes.

Figura 1: Mapa de Ubicación del Área de Estudio. ....	14
Figura 2: Especies predominantes de Arsénico. ....	15
Figura 3: Distribución de Arsénico en las aguas. (Tomado de Lilli J., 2002). ....	18
Figura 4: Frente Volcánico Nicaragüense (FVN). ....	23
Figura 5: Diagrama de Piper Hill Langelier. (Tomado de Argueta J., 2016.). ...	33
Figura 6: Ejes de diagrama de Stiff modificado. (Tomado de Argueta J., 2016.). .....	34
Figura 7: Diagrama Eh - pH de especies acuosas de arsénico en el sistema As-O <sub>2</sub> -H <sub>2</sub> O a 25°C y 1 bar de presión total. (Tomado de Lilli J., 2002.).....	34
Figura 8: Diagrama de Piper de las aguas del sector sur del V. Mombacho (pozos Excavados y Perforados). ....	56
Figura 9: Diagrama de Piper de las aguas del sector sur del V. Mombacho (Manantiales y Lagunas). ....	56
Figura 10: Diagrama ternario Cl-SO <sub>4</sub> -HCO <sub>3</sub> de Gigenbach 1991 (Tcsh). ....	58
Figura 11: Diagrama de Na-K-Mg de Gigenbach (Tnkm). ....	59
Figura 12: Diagrama de Na-K / Mg-Ca, Gigenbach y Goguel 1989 (Xmckn). ....	60
Figura 13: Diagrama de Stiff del manantial San José Mombacho. ....	62
Figura 14: Diagrama de Stiff pozo excavado San José Mombacho. ....	62
Figura 15: Diagrama de Stiff del Mtal. Nac. Río Brujo. ....	62
Figura 16: Diagrama de Stiff pozo excavado comarca Aguas Agrias. ....	62
Figura 17: Diagrama de Stiff Mtal. Termal Hacienda Mecatepe. ....	63
Figura 18: Diagrama de Stiff del Mtal. Termal Las Plazuelas. ....	63
Figura 19: Diagrama de Stiff Lago de Nicaragua (sector casa de tejas). ....	64
Figura 20: Diagrama de Stiff Laguna Verde. ....	64
Figura 21: Diagrama de Stiff Laguna Verde. ....	64
Figura 22: Diagrama de Stiff pozo perforado Comarca Aguas Agrias. ....	64
Figura 23: Diagrama de Stiff pozo excavado San Luis de Manares. ....	65
Figura 24: Diagrama de Stiff Vertiente 2 Georgino Andrade. ....	65
Figura 25: Diagrama de Purbaix Sector Sur del volcán Mombacho. ....	67
Figura 26: Diagrama de Arsénico vs temperatura. ....	69
Figura 27: Diagrama de Arsénico vs pH. ....	70
Figura 28: Diagrama de Arsénico vs Potencial Redox (Eh). ....	71
Figura 29: Diagrama de Arsénico vs Conductividad Eléctrica (µS/cm). ....	72
Figura 30: Diagrama Arsénico vs Cloro. ....	74
Figura 31: Concentraciones de Arsénico en manantiales del sector sur del volcán Mombacho. ....	75
Figura 32: Concentraciones de Arsénico en manantiales del sector sur del volcán Mombacho. ....	75

## Índice de Fotos.

Foto 1: Pozo excavado - Comarca Santa Julia. ....	27
Foto 2: Manantial termal Las Plazuelas. El SPA. ....	27
Foto 3: Muestreo de aguas para análisis de determinación de arsénico.....	30
Foto 4: Mediciones In situ de parámetros físicos y toma de muestra de agua..	30

## Índice de Tablas.

Tabla 1: Número de muestras colectadas. ....	29
Tabla 2: Balance iónico de las muestras analizadas.....	31
Tabla 3: Métodos de Análisis Físico - Químico de las muestras de agua. ....	32
Tabla 4: Parámetros Físico – Químicos. ....	38
Tabla 5: Ión Bicarbonato lagunas y manantiales.....	39
Tabla 6: Ión Bicarbonato en pozos.....	39
Tabla 7: Concentraciones Iones de cloruro lagunas y manantiales. ....	41
Tabla 8: Concentraciones Iones cloruro en pozos.. ....	41
Tabla 9: Concentración Ión Sulfato lagunas y manantiales.....	42
Tabla 10: Concentración Ión Sulfato en Pozos.. ....	42
Tabla 11: Ión Calcio lagunas y manantiales.....	44
Tabla 12: Ión Calcio en pozos. ....	44
Tabla 13: Ión Magnesio lagunas y manantiales.....	45
Tabla 14: Ión Magnesio pozos ....	45
Tabla 15: Ión Sodio pozos.....	46
Tabla 16: Ión Sodio lagunas y manantiales.....	46
Tabla 17: Ión Potasio lagunas y manantiales.....	47
Tabla 18: Ión Potasio pozos.....	47
Tabla 19: Constituyentes minoritarios lagunas y manantiales.....	50
Tabla 20: Constituyentes minoritarios pozos. ....	50
Tabla 21: Parámetros físicos pozos.....	54
Tabla 22: Parámetros físicos lagunas y manantiales ....	53
Tabla 23: Geotermómetros Mtal. Termales. ....	61
Tabla 24: Resultados de análisis de Arsénico y parámetros de interés.. ....	75

## Índice de Anexos.

Anexo I: Inventario de pozos y mantiales sector sur del volcán Mombacho..	90
Anexo II: Metodología de analisis fisicoquimico laboratorio de geoquimica...	93
Anexo III: Resultado fisiquimico del sector sur del volcán mombacho..	112
Anexo IV: Mapa inventario de pozos y manantiales sector sur del Volcán Momabacho.....	113
Anexo V: Mapa geologico sector sur del volcán mombacho.....	114
Anexo VI: Mapa de contornos Temperatura - Conc. de Arsénico.....	115
Anexo VII: Mapa de contornos pH - Conc. de Arsénico.....	116
Anexo VIII: Mapa de contornos C E - Conc. de Arsénico.....	117
Anexo IX: Mapa de Contorno Cloro - Conc. de Arsénico.....	118
Anexo X: Fichas de campo sector sur volcán Mombacho.....	119
Anexo XI: Resultados de análisis químico de Arsénico para aguas subterranas y superficiales sector sur del volcán Mombacho.....	128

### **Siglas y Abreviaturas.**

**CE:** Conductividad Eléctrica.

**Eh:** Potencial Redox – oxido reducción

**mg/l:** Miligramos por litros.

**µg/l:** Microgramos por litros.

**ppm:** Partes por millón.

**T (°C):** Temperatura en grados Celsius.

**GPS:** Sistema de Posicionamiento Global.

**PE:** Pozo Excavado.

**PP:** Pozo Perforado.

**NE:** Nivel Estático.

**m.s.n.m:** Metros Sobre el Nivel del Mar.

**OMS:** Organización Mundial de la Salud.

**CAPRE:** Comité Coordinador Regional de Instituciones de Agua Potable y Saneamiento.

**RNVM:** Reserva Natural Volcán Mombacho.

**FVAC:** Frente Volcánico de América Central.

**STD:** Solidos Totales Disueltos.

**Km<sup>2</sup>:** Kilómetro Cuadrado.

**NTON:** Norma Técnica Obligatoria Nicaragüense.

**CAPS:** Comités de Aguas Potable y Saneamiento.

**Analito:** Componente Químico (Elemento químico u Ión).

**Zona de outflow:** Característica de zonas de manantiales calientes, fumarolas y Zonas de alteración de baja temperatura.

**As:** Arsénico

**Mtal:** Manantial.

**Ter:** Termal.

**Hda:** Hacienda.

**C:** comarca.

**Vert:** Vertiente.

**Conc:** Concentración

**FUNCOC:** Fundación Nicaragüense para la Concervación, Fundación Cocibolca.

**OLADE:** Organización Latinoamericana de Energía.

**µs/cm:** Micro siemens / Centímetro.

## RESUMEN

Uno de los problemas ambientales y de salud de gran preocupación en Nicaragua, es la concentración natural de arsénico en las aguas subterráneas de consumo humano. El área de investigación se encuentra ubicada en el sector sur de la Reserva Natural volcán Mombacho, tiene una extensión de 90 km<sup>2</sup>, comprende 10 comunidades que administrativamente pertenecen al municipio de Nandaime, jurisdicción del departamento de Granada. Para evaluar la calidad del agua que consumen y usan los pobladores, se analizaron 37 muestras de agua, recolectadas de pozos excavados, pozos perforados, manantiales, lagunas y una muestra del lago de Nicaragua.

Además se les realizaron análisis de parámetros fisicoquímicos (temperatura, Eh, pH, conductividad, sólidos totales disueltos, sodio, potasio, calcio, magnesio, litio, hierro total, cloruros, sulfatos, carbonatos, bicarbonatos, flúor, boro, fosfato, nitrato, ácido sulfhídrico, sulfato, sílice total), efectuados en el Laboratorio de Geoquímica de Empresa Nicaragüense de Electricidad, la determinación de arsénico, se realizó en los Laboratorios Ambientales Piensa de la Universidad Nacional de Ingeniería – UNI.

La especie de arsénico detectada en las aguas del área bajo estudio se identificó como arsenatos con un estado de oxidación (V), encontrando los mayores valores en los Mtal. Termales ubicados en la reservas Lagunas de Mecatepe y Río Manares, presentan concentraciones anómalas de 20 a 94 µg/l, el contenido de arsénico supera el valor admisible para consumo humano de 10 µg/l. La principal fuente de arsénico identificada en el sector sur del volcán Mombacho la constituyen las descargas geotermales ubicadas en el área, las cuales están asociadas a la existencia de un recurso geotermal.

Se cotejaron los resultados fisicoquímicos y metales pesados (Arsénico) obtenidos con los indicadores de calidad de aguas de las normas CAPRE, OMS y NTO N09003-99, las muestras de aguas que se recolectaron en los CAPS que actualmenten distribuyen el recurso agua a la población cumplen con los requisitos establecidos y pueden ser consideradas aptas para el consumo humano, las aguas proveniente de manantiales termales ubicados en el área de la reserva Lagunas de Mecatepe y Río Manares los resultados indican que no son aptas para consumo humano por que presentan concentraciones anómalas de analitos.

Los resultados obtenidos permiten disponer de la información necesaria para conocer la calidad fisicoquímica del agua que actualmente están consumiendo los pobladores del sector sur del volcán Mombacho.

## 1. INTRODUCCIÓN.

Los efectos tóxicos del Arsénico se conocen desde la antigüedad y su consecuencia sobre la salud ha sido estudiada desde el siglo XIX, concluyendo con la fijación de normas de tolerancia para dicho elemento que varían según los países (Bocanegra, et al., 2002). El problema de contaminación con Arsénico de las aguas naturales ha sido extensamente discutido durante los últimos años debido a sus afectos adversos en la salud de los humanos.

Un considerable número de recursos hídricos han sido identificados con concentraciones que exceden el estándar de 10 µg/l, dado por la OMS<sup>1</sup>. A pesar que los registros de las fuentes de agua superficial y agua subterránea son incompletos, la mayor parte de Arsénico presente en los acuíferos es de origen natural. Por ejemplo, las aguas geotermales adquieren el Arsénico primordialmente por sus prolongados tiempos de contacto con los estratos, los cuales fueron sometidos a un gradiente térmico anómalo (altas temperaturas), que podría promover la disolución y lixiviación de las rocas que contienen minerales de Arsénico. Se conoce que las rocas arsenicales tales como: rejalgar (AsS), oropimente (As<sub>2</sub>S<sub>3</sub>), arsenopirita (FeAsS), entre otras. Cuando entran en contacto con las fuentes geotermales pueden ser disueltas, promoviendo el incremento de arsénico en la fase acuosa (Cumbal y Aguirre., 2006).

El Arsénico asociado con aguas termales ha sido reportado en varias partes del mundo, incluyendo Estados Unidos, Japón, Nueva Zelanda, Francia, Dominica, Bulgaria, Chile, Nicaragua y Argentina. También se han identificado grandes concentraciones de arsénico en aguas termales residuales en el drenaje principal de campos termales, por ejemplo: Wairakei en Nueva Zelanda reportando valores próximos a 3800 µg/l (Robinson et al., 1995), otro ejemplo importante son las aguas termales del Parque Nacional de Yellowstone que contienen valores superiores a 2830 µg/l de arsénico, (Ball et al; 1998, 2002; Nimick et al., 1998). Altas concentraciones de arsénico también han sido encontradas en las aguas termales del sistema El Tatio en la Región de

---

<sup>1</sup> Directrices para la Calidad del Agua Potable, OMS. Génova 1993.

Antofagasta, Chile, Queirolo. Donde se han reportado concentraciones hasta de 45,000 µg/l, (Ellis y Mahon, 1977).

Uno de los problemas ambientales y de salud de gran preocupación en Nicaragua, es la concentración natural de arsénico en las aguas subterráneas de consumo humano, como las encontradas en las regiones noroeste y suroeste del país próximas a áreas mineralizadas, que se localizan a lo largo de la estructura tectónica de la Depresión de Nicaragua (Graben) (Estrada, F, 2002). En el área del volcán Mombacho, se han desarrollado investigaciones con el fin de comprobar la existencia de un recurso geotermal para su explotación comercial.

Tomando en cuenta lo antes mencionado la presente investigación se centrará en que la contaminación natural por arsénico en las aguas del área podría asociarse a la existencia del recurso geotermal, representando dicho recurso la principal fuente de aportación de arsénico en las aguas subterráneas utilizadas para el consumo humano.

Dado lo anterior, el objetivo general de este trabajo fue determinar la presencia de arsénico en los acuíferos de la zona y para cumplir con este objetivo se plantearon los siguientes objetivos específicos: Definir la calidad físico - química de las aguas subterráneas y superficiales del área, además de establecer las especies predominantes de Arsénico en el agua subterránea basadas en mediciones temperatura (T °C), conductividad eléctrica (EC), pH, Eh y finalmente determinar la concentración de arsénico total en las aguas subterráneas y superficiales del área.

## 1.2. ANTECEDENTES.

En Nicaragua, a partir de la década de los setenta se han realizado muchos estudios en el área de interés, enfocados a diversos propósitos: prospección geotérmica, geológicos estructurales, vulnerabilidad geológica, contaminación de acuíferos por metales pesados, de estos pueden citarse:

**Agencia Internacional de Energía Atómica (AIEA). 1976:** "Proyecto Regional de Transferencia para el Desarrollo de la Energía Geotérmica y su Manejo Ambiental". Evaluó los campos geotérmicos Mombacho y Tipitapa por medio de técnicas químicas e isotópicas, determinando que las aguas se encuentran con un moderado componente clorurado – sódico, para el área sur del Volcán Mombacho.

**IECO – LAHMEYER., (1980):** "Inventario de Recursos Geotérmicos", incluido en el "Plan Maestro de Desarrollo Eléctrico 1997 – 2000, Nicaragua". Ejecutó estudios geológicos, geoquímicos, geofísicos e hidrogeológicos en el área de interés geotérmico Masaya – Granada – Nandaime.

**OLADE., (1981):** "Estudio de Reconocimiento de los Recursos Geotérmicos de la República de Nicaragua". Clasificó el volcán Mombacho como un estrato volcán que ha producido importantes coladas de lavas de composición variable (andesitas – andesitas basálticas), con intercalaciones de depósitos piroclásticos, a menudo con carácter freatomagmático más antiguos.

**ELC – ElectroConsult., (1982):** Realizó investigaciones geocientíficas de superficie, incluidas dentro del "Estudio de Pre–factibilidad del Área Geotérmica Masaya – Granada – Nandaime". Ejecutó estudios geológicos, geoquímicos, geofísicos lo que permitió identificar un área de 70 km<sup>2</sup> que se ubica entre Catarina, Diriomo, Volcán Mombacho y La Laguna de Apoyo en la parte Sur, en la cual existe una probabilidad alta de la existencia de uno o más sistemas geotérmicos de alta entalpia.

**Hradecký., (1987):** Realizó estudio del Volcán Mombacho y sus alrededores, en el cual elaboró un mapa geológico a escala 1:50,000 en donde se plantean rasgos estructurales y petroquímicos que abarca: Volcán Mombacho, parte de

Granada – Nandaime y parte de la zona Volcánica Zapatera, la cual está situada al lado Sureste.

**Hradecký., (1998):** Estudio geológico "Riesgo Natural y Vulnerabilidad Geológica en el Área de Masaya y Granada". Incluye la parte Oeste del volcán Mombacho. Como resultados de los estudios se publicaron Mapas Geológicos a escala 1:100,000, Mapas del desarrollo geodinámico y del riesgo geológico en escala 1:50,000 y con su metodología correlacionan los trabajos de la etapa anterior. Se realizaron dataciones radiométricas para diferenciar la edad de las rocas.

**Comisión Nacional de Energía., (2001):** "Evaluación del área de Masaya – Granada – Nandaime" el área está incluida en el "Plan Maestro Geotérmico de Nicaragua". Se elaboró un plano (mapa) geológico – estructural y vulcanológico del área, en el cual se hace énfasis de estructuras de fallas, zonas de deslizamientos, flujos volcánicos y las diversas unidades litológicas determinadas en reconocimientos de campo.

**Empresa Nicaragüense de Electricidad - ENEL., (2001):** Informe Geoquímico Preliminar de las Áreas de Prospección Geotérmica: Mombacho – Tipitapa, se efectuaron análisis químicos de los manantiales del sector sur del volcán Mombacho (Las Plazuelas, Laguna Blanca, laguna verde, Laguna de Jirón, Laguna Santa Isabel). Se determinó que las aguas someras calientes al Noreste y Sureste del volcán Mombacho son calentadas por vapor de agua, según los análisis químicos son del tipo sodio – cloruradas, lo cual indica que son de origen geotermal.

**UNI-PIDMA., (2002):** "Evaluación rápida de la contaminación por Arsénico y metales Pesados de las aguas Subterráneas de Nicaragua". Con el objetivo de correlacionar las concentraciones de arsénico, plomo y flúor en aguas subterráneas, asociadas a estructuras mineralizadas o alteradas hidrotermalmente en los lineamientos tectónicos paralelos a la depresión de Nicaragua. Incidencia del Arsénico en Aguas Subterráneas, región noroeste y suroeste de Nicaragua, periodo de monitoreo 2001 – 2002, Como resultado del estudio se identificaron 5 áreas focales anómalas que están por encima del valor

máximo admisible de arsénico 10 µg/l: (El Zapote, Santa Rosa del Peñón, La Cruz de la India, Cerro Mina de Agua, Kinuma, El Mojón y Las Pilas).

**UNICEF., (2002):** "Contribución al estudio de cinco Zonas contaminadas Naturalmente por Arsénico en Nicaragua" El objetivo del estudio era correlacionar la concentración en las aguas subterráneas de Arsénico, Plomo y Flúor con estructuras mineralizadas o alteradas hidrotermalmente en los alineamientos tectónicos paralelos a la depresión de Nicaragua e identificar las áreas contaminadas. Un total de 106 mediciones de campo y muestras de agua subterránea fueron realizadas en pozos perforados, pozos excavados y manantiales próximos a estructuras mineralizadas hidrotermalmente. La determinación de Arsénico total y Plomo total fue realizada con un espectrofotómetro de masa (AAS) en el laboratorio privado LAQUISA. El Flúor fue analizado con un electrodo específico en el laboratorio de PIDMA a nivel nacional, el estudio ejecutado en 2002 (PIDMA-UNI, 2002) demostró que 5.7% de los puntos de abastecimiento de agua tienen valores de Arsénico total por encima del valor máximo admisible de 10 µg/l. Se encontró en las zonas de estudio una contaminación por Arsénico en 22 puntos de agua subterránea sobre los 77 puntos muestreados. Por lo tanto, la prevalencia de contaminación por Arsénico total aumenta hasta 28% en estas zonas.

**Pilato M., (2004):** Estudio Geológico con énfasis en peligrosidad por inestabilidad de laderas del volcán Mombacho. En el estudio se identificó cuatro unidades Geomorfológicas caracterizadas según su origen lo que facilitó la elaboración de un mapa Geomorfológico que sirvió como base para definir las unidades Litoestratigráficas y Estructural. Con el estudio Geológico realizado en el área del volcán Mombacho se logró proponer un arreglo Estructural del área, en términos cualitativos. Se identificaron las zonas de mayor influencia por inestabilidad de laderas en las direcciones N - NE y S - SW, perpendiculares a la dirección principal de eje volcánico regional. Por lo que las posibles zonas de altos grados de peligrosidad por deslizamientos y desprendimientos de rocas están reflejadas por pendientes mayores de 35%, rocas basálticas en contacto con arcillas, disposición estratigráfica intercalada de lávicos y piroclastos, rocas basálticas meteorizadas en contacto con arcillas, determinando que la actual

área de mayor susceptibilidad a los peligros de inestabilidad se encuentra al oeste de la antigua zona de avalancha.

**Avellán D., (2004):** Estudio Geológico de la parte Norte del Volcán Mombacho y las Isletas de Granada. En este estudio se definió cuatro unidades geomorfológicas diferenciadas según su origen, en base a las observaciones realizadas se elaboró un mapa Geomorfológico definiendo las unidades Litoestratigráficas y Estructural. Se hizo énfasis en la descripción petrográfica y mineralógica de las rocas presentes en el sitio de interés. A partir de los estudios realizados en el campo se identificaron los posibles factores condicionantes para el desarrollo del colapso de la ladera Noreste, se realizó una evaluación de la peligrosidad geológica o grado de amenaza de la zona. Estimando la magnitud de la avalancha en base al parámetro masa o volumen que se deslizó, calculado a partir de la longitud de la superficie de rotura, anchura de superficie de rotura y profundidad máxima estimada de la superficie de rotura. En un volumen total de 5, 512, 500,000 m<sup>3</sup> de material deslizado.

**Thomas Shea et al., (2007):** "Contraste de los Mecanismos del emplazamiento de avalancha de escombros en Volcán Mombacho (Nicaragua), proporcionada por el análisis estructural y de facies " ("Emplacement mechanisms of contrasting debris avalanches at Volcán Mombacho (Nicaragua), provided by structural and facies analysis"). Resultado de este estudio se definió tres colapsos: Colapsos en el Flanco NE (Las Isletas), Colapso del Flanco S (El cráter), colapso SE (La Danta), los cuales se desarrollaron en eventos diferentes. Los materiales de los eventos son similares, exceptuando el grado de alteración y la cantidad del material removido en cada colapso. Determinado que los eventos (Lahares), no estaban relacionados a una actividad volcánica, sino a un movimiento debido al sistema de fallas normales que afectan la estructura del volcán, a las altas pendientes y a fenómenos de alteración hidrotermal que se presenta en el área.

**K.Garofalo et al., (2007):**"Gases fumarólicos en el volcán Mombacho; Presencia de especies magmáticas gaseosas y su implicación para vigilancia volcánica. ("Fumarolic Gases at Mombacho Volcano Nicaragua; presence of Magmatic Gas Species and Implication for Volcanic Surveillance" Este se enfocó en el cráter Sur del volcán Mombacho, se efectuaron análisis geoquímicos e isotópicos. Como resultado de los análisis se observó que la composición química e

**Determinación de la Contaminación Natural por Arsénico en las Aguas Subterráneas del Sector Sur del Volcán Mombacho, Granada - Nicaragua.**

isotópica de los fluidos indica que este sistema volcánico, aunque no ha experimentado eventos eruptivos en el último siglo, puede ser considerado activo y eventualmente peligroso.

**Nathan D. Stansell., (2013):** "Radiocarbono de edades para el momento de avalanchas de escombros en el Volcán Mombacho Nicaragua". ("Radiocarbon ages for the timing of debris avalanches at Mombacho Volcano Nicaragua"). Determinó las edades de radio carbón de las avalanchas: Norte (Las Isletas) ocurrido entre 140 – 345 A.D; Sur (El Cráter) ocurrió entre 270 – 650 A.D.

### 1.3. JUSTIFICACIÓN.

El Arsénico presente en acuíferos explotados para consumo humano es un componente no deseado, debido a sus efectos nocivos en la salud humana, los cuales son ampliamente reconocidos por la Organización Mundial de la Salud (OMS). Los “humanos” estamos expuestos al Arsénico debido a su presencia en el agua para uso potable.

En el caso específico de Latinoamérica la mayoría de los volcanes andinos presentan Arsénico en sus descargas de aguas, las cuales se mezclan con los acuíferos superficiales (Hannah R. Farnfield et al., 2012).

En Nicaragua, se han realizado pocos estudios donde se caractericen las fuentes hídricas para la identificación de metales pesados, entre ellos el lago Xolotlán (Lacayo, M, Cruz, A Lacayo, J., Calero S. & Fomsgaard, I 1992), laguna de Asososca (Cruz A., Fomsgaard I & Lacayo J., 1994). Y la distribución de la contaminación natural por Arsénico en las aguas subterráneas de la subcuenca suroeste del Valle de Sébaco, Matagalpa (Altamirano, M., 2005).

Parte de la población que habita en el sur del volcán Mombacho no cuenta con un sistema de abastecimiento de agua potable, mientras que otra parte de la población se abastece con sistemas comunales (CAPS). Con esta investigación propuesta, se pretende identificar si el sistema geotermal existente en el área está afectando de manera directa el recurso hídrico, que es utilizado para consumo humano, siendo la principal fuente de aportación de Arsénico.

La posible existencia de un sistema geotermal y las condiciones geológicas del área del volcán Mombacho favorecen a procesos de lixiviación de sustancias (minerales), que pueden aportar concentraciones de compuesto anómalos en las aguas. Para cada compuesto hay rangos tolerables o admisibles para el organismo humano y de acuerdo a las concentraciones presentes indican el grado de peligrosidad en el medio ambiente y la salud humana. Por las razones anteriores se debe comprobar o descartar la existencia de Arsénico en las comunidades: Aguas Agrias, Mecatepe, San Luis de Manares, El Guacal, Georgino Andrade, San José de Mombacho, Santa Rosa, Las Colinas, El Limonal, Santa Margarita. Al realizae esta determinación será posible brindar a la población una información más certera de la calidad del agua que consumen.

### 1.3. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.

Considerando la amplia ocurrencia de Arsénico y el riesgo que éste representa a la salud, principalmente en las aguas de consumo humano, es importante desarrollar conocimiento sobre los procesos de ocurrencia y los que controlan su movilidad tanto en sistemas naturales (acuíferos y río), como de ingeniería (plantas de tratamiento de agua, redes de distribución). Este conocimiento es fundamental para evaluar el impacto de actividades antropogénicas o cambios geoquímicos naturales en la distribución de Arsénico en dichos sistemas.

Los estudios químicos de las aguas superficiales realizadas en el área han sido orientados a prospección geotérmica, éstos han evidenciado la posible existencia de un sistema geotermal en volcán Mombacho. Comunidades de la zona sur consumen agua, provenientes de fuentes subterráneas que podrían estar contaminadas por Arsénico, por tanto es necesario determinar la presencia del mismo y si los niveles que alcanzan superan el nivel permisible para prevenir daños a la salud.

## 1.4. OBJETIVOS.

### 1.4.1. Objetivo general.

Determinar la presencia de Arsénico en los acuíferos de la zona sur del Volcán Mombacho influenciados por la presencia de un sistema geotérmico asociado a dicho volcán.

### 1.4.2. Objetivos específicos.

- ✚ Definir la calidad físico - química de las aguas subterráneas y superficiales del área.
- ✚ Establecer las especies predominantes de Arsénico en el agua subterránea basadas en mediciones de pH y Eh.
- ✚ Determinar la concentración de arsénico total en las aguas subterráneas y superficiales.

## 1.5. HIPÓTESIS.

Existe un recurso geotermal en volcán Mombacho, el cual puede considerarse como la fuente primaria de arsénico de las aguas subterráneas en el sector sur del volcán.

## 1.6. DESCRIPCIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO.

### 1.6.1. Ubicación geográfica y política administrativa.

La Reserva Natural Volcán Mombacho, (RNVM) descrita y decretada en Septiembre de 1983 no aparece soportada por coordenadas precisas ni mapeada oficialmente, sin embargo el decreto # 1320 (Gaceta Diario Oficial, 1983), refiere a la creación de la RNVM a partir de una cota de protección a partir de los 850 m.s.n.m.

Está ubicada en el departamento de Granada, específicamente los municipios de Granada, Diriomo y Nandaime, en la región Pacífico Sur del país. Longitudinalmente se ubica a 50 km de Managua y a 10 km de la ciudad de Granada. Geográficamente la RNVM se ubica en el cuadrante con coordenadas 1307690 Norte y 613330 Este, con una extensión territorial de aproximadamente 578 hectáreas, abarcando toda el área por encima de los 850 msnm como límites de la RNVM. El área incluye principalmente tierras agrícolas muy poco pobladas, en su mayoría con cultivos de café, maíz y sorgo. (Plan de manejo RNVM, 2006).

El área de investigación se encuentra ubicada en el sector sur en la Reserva Natural volcán Mombacho, tiene una extensión de 90 km<sup>2</sup>, (Ver figura 1). Se ubica dentro de las coordenadas UTM: E - 609000, N – 1305000, E – 622000, N – 1305000, E- 609000, N – 1298000, E – 622000, N -1298000. Contendida en la hoja topográfica Isla Zapatera número 3051-III a escala 1:50,000 del INETER, 2004.

### 1.6.2. Los accesos y la red vial de comunicación.

La principal vía de acceso a La Reserva Natural volcán Mombacho es la carretera panamericana: Granada - Nandaime y Managua - Rivas, de igual manera el área cuenta con carretera de revestimiento de todo tiempo Guanacaste – Casa de Tejas y el Manchón – Santa Ana – Dolores; cuenta una gran cantidad de caminos y trochas de todo tiempo. Originalmente estos caminos servían principalmente para sacar la cosecha cafetalera, pero a la vez facilita la extracción de productos y más recientemente para el acceso de turistas. (Plan de manejo RNVM, 2006).

### 1.6.3. Clima.

El clima predominante en las faldas del volcán Mombacho es tropical seco; se observan dos estaciones muy diferenciadas. La de lluvias, desde mayo hasta noviembre, y la seca, que abarca el resto de año. En las cumbres, el contraste entre ambas estaciones no es tan marcado, porque existe una humedad constante producto de la condensación que se produce sobre la cubierta vegetal a partir de los 800 m de altura. Esto mantiene el verdor y la humedad permanente que son característicos de las nebli-selvas. El promedio de precipitación pluvial de los últimos dos años en el área de la Estación Biológica Mombacho, es de 2,000 mm anuales. Los meses más lluviosos han sido junio con 483 mm, septiembre con 404 mm y octubre con 315 mm. La temperatura promedio es de 23°C, la más baja en Diciembre con 9 °C. El clima es húmedo y frío, con chubascos eventuales casi constantes y de corta duración (Atwood, 1984).

### 1.6.4. Hidrología.

Los acuíferos más importantes del país se localizan en las formaciones cuaternarias de la planicie de León – Chinandega, meseta de Carazo y la depresión Nicaragüense, compuesta por la cordillera volcánica del Pacífico que es donde se presentan elevadas tasas de recarga, originadas en su mayor parte por la infiltración de las aguas de lluvia. Las áreas de descarga se encuentran a lo largo de la planicie costera de los lagos Cocibolca y Xolotlán y en las costas del Océano Pacífico (FUNCOC, 2003).

La Reserva Natural volcán Mombacho, se encuentra como parte de la Cuenca Río San Juan N° 69. (Constitución de la República de Nicaragua, Ley del Agua N°620.) Comprendida dentro de una sub cuenca hidrográfica y dos micro cuencas; Los ríos Brujo, el Arroyo y el nacimiento de cuatro manantiales que irrigan laderas bajo. En estos se destacan la presa de Pancasán, que abastece únicamente a la Hacienda Santa Elisa y un nacimiento más abajo que abastece a Cecilia, San Joaquín, El Refugio, San Emilio y La Luz; El manantial del Túnel, dentro de la Hacienda Las Flores que abastece a El Progreso, La Trinidad, Santa Ana, Santa Teresa, La Asunción y La Esperanza. En la parte Norte se encuentran dos corrientes que abastecen a San José, La Locura y las Ruinas del Hotelito y finalmente más abajo se encuentran los nacientes que abastecen

**Determinación de la Contaminación Natural por Arsénico en las Aguas Subterráneas del Sector Sur del Volcán Mombacho, Granada - Nicaragua.**

a El Chipote, Cutirre y en la finca La Calera se ubican dos ojos de agua que mantienen las necesidades de la propiedad (FUNCOC, 2006).

El volcán Mombacho posee un significativo recurso hídrico superficial, producto del nacimiento de una serie de manantiales y quebradas distribuidas en su mayor proporción en la parte Noreste y Sureste. En esta región y debido a la topografía y particularidades hídricas se encuentran incluidos los nacimientos de las fuentes de agua más importantes dentro de los límites de la Reserva, para proteger la cobertura forestal que facilita la recarga de los acuíferos (FUNCOC, 2006).

Determinación de la Contaminación Natural por Arsénico en las Aguas Subterráneas del Sector Sur del Volcán Mombacho, Granada - Nicaragua.

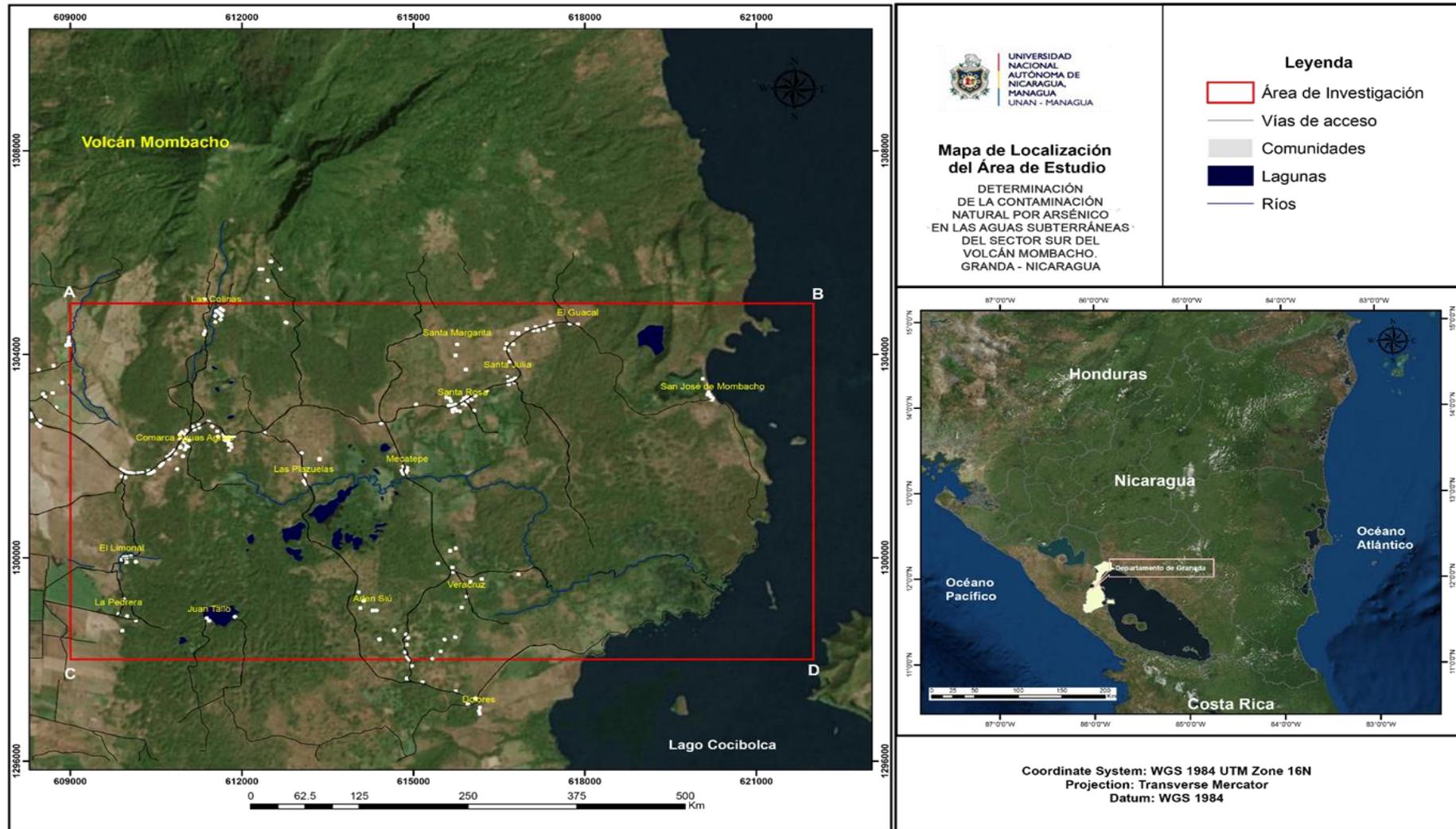


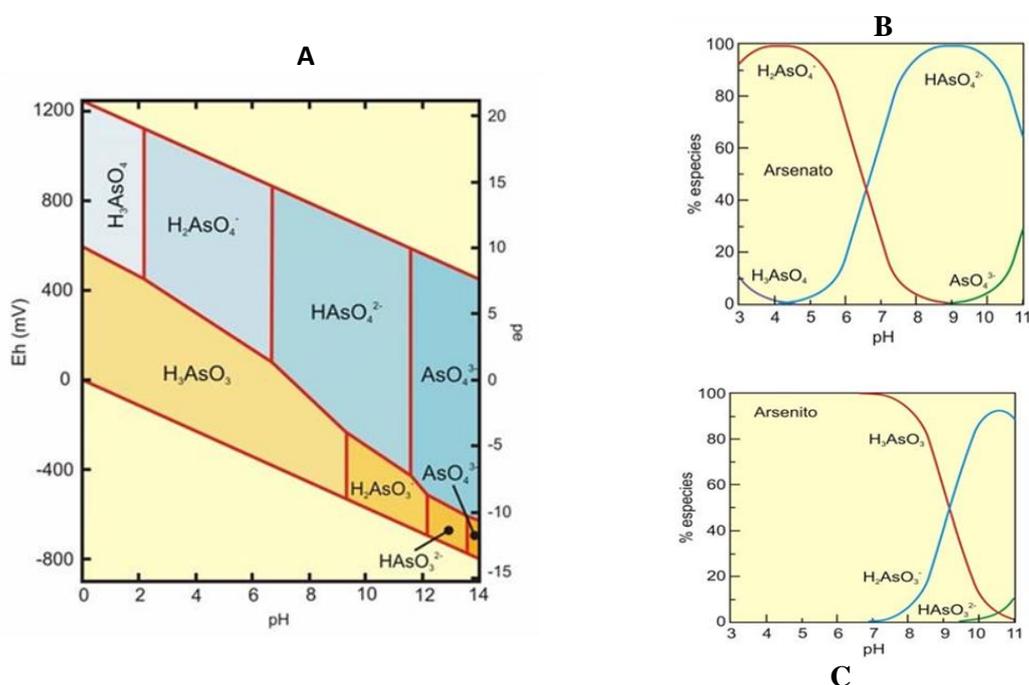
Figura 1: Mapa de Ubicación del Área de Estudio.

## 2. MARCO TEÓRICO.

### 2.1. PROPIEDADES QUÍMICAS.

El arsénico es un elemento químico perteneciente al grupo V - A de la tabla periódica, su símbolo químico es "As", su peso atómico es 74,92 y su número atómico es 33, en su forma natural es un sólido de aspecto gris metálico y pertenece al grupo de los metaloides, elementos con propiedades intermedias entre metales y no metales.

Figura 2: Especies predominantes de Arsénico.



- Especiación del arsénico en función del pH - Eh en el sistema As-O<sub>2</sub>-H<sub>2</sub>O a 25°C y 1 bar;
- Especiación química del arsenito y
- Especiación química del arseniato. Obtenido de Smedley and Kinniburgh (2002).

Los estados de oxidación del As más comunes son -3, 0, +3 y +5. Las arseninas ( $AsH_3$ ) y las metilarsinas ( $CH_3AsH_2$ ) corresponden con el estado de oxidación -3 y son inestables en condiciones oxidantes. El arsénico elemental se forma por la reducción de los óxidos de arsénico. El arsénico con número de oxidación +3, se produce en las actividades de fundición, puede ser oxidado catalíticamente o por bacterias a pentaóxido de arsénico,  $As^{+5}$  o ácido ortoarsénico,  $H_3AsO_4$ . Generalmente el arsénico se suele unir covalentemente con la mayoría de metales y no metales, puede formar parte de moléculas orgánicas estables (Barán, 1995).

## 2.2. ARSÉNICO EN EL AMBIENTE.

### 2.2.1. Fuentes naturales (fondo geoquímico).

Las fuentes de origen natural engloban aquellas que implican el aporte sin intervención humana significativa, la concentración de As en suelos suele estar por debajo de 40 ppm y el fondo geoquímico depende de las distintas litologías, cuya concentración de arsénico varía de una a otra. Son especialmente altos los valores de arsénico en determinadas litologías ricas en arsenopirita (FeAsS), donde la concentración de As puede alcanzar más de 10,000 ppm (1%). En estas zonas podría existir riesgo tanto para la salud como para el ecosistema, por lo que habría que aplicar medidas de gestión del emplazamiento si fuesen necesarias. En algunos emplazamientos, la actividad volcánica también puede ser otra fuente importante de arsénico (Fitz y Wenzel, 2002).

### 2.2.2. Fuentes antropogénicas.

La producción mundial de arsénico se estima entre 75 y 100 mil toneladas anuales (Adriano, 2001). Las principales actividades humanas fuentes de As son la minería, la siderurgia, la agricultura, la silvicultura, las plantas de tratamiento de combustibles fósiles, los desechos urbanos y la ganadería (Adriano, 2001). En los procesos de minería y siderurgia el arsénico se presenta frecuentemente como un subproducto con poco mercado, lo que ocasiona que se convierta en residuo. Se presentan concentraciones elevadas de As en las cercanías de los escombros mineros (hasta 3% As), que decrece rápidamente con la distancia a dichos escombros. La formulación de numerosos plaguicidas, fungicidas y biácidos utilizados para controlar enfermedades en cultivos tanto agrícolas como forestales solían contener As (Lepp, 1981). A su vez, algunos fertilizantes pueden suponer un aporte de arsénico al suelo (Matschullat, 2000).

Los residuos urbanos que derivan en la obtención de lodos de depuradora y compost, que son usados ocasionalmente como enmiendas orgánicas de suelos, pueden contener arsénico en cantidades variables. Por último, los combustibles fósiles contienen también concentraciones de arsénico que pueden provocar a largo plazo un enriquecimiento en la zona afectada por los gases originados en la combustión. Todo ello provoca una liberación del elemento al ambiente y puede enriquecer los suelos en As.

## 2.3. PRESENCIA DE ARSÉNICO EN LAS AGUAS.

### 2.3.1. Forma de ocurrencia: especies acuosas.

El arsénico en las aguas naturales se encuentra disuelto como oxianiones en su estado de oxidación trivalente  $As^{+3}$  o pentavalente  $As^{+5}$  y están controlados fundamentalmente por las condiciones redox (potencial redox, Eh) y el pH. De hecho, el arsénico es un elemento singular entre los metaloides pesados y elementos formadores de oxianiones por su sensibilidad a moverse en los valores de pH típicos de las aguas subterráneas (pH 6,5 - 8,5). Como aproximación, y sin tener en cuenta otros factores como contenido en materia orgánica, en condiciones oxidantes, el estado  $As^{+5}$  predomina sobre  $As^{+3}$  encontrándose fundamentalmente como  $H_2AsO_4^-$  a valores de pH bajos (inferiores a 6.9), mientras que a pH más alto, la especie dominante es  $HAsO_4^{2-}$  (en condiciones de extrema acidez, la especie dominante será  $H_3AsO_4$ , mientras que en condiciones de extrema basicidad, la especie dominante será  $AsO_4^{3-}$ ) (Figs. 2a y 2(B)). En condiciones reductoras a pH inferior a 9.2, predominará la especie neutra (Figs. 2a y 2(C)) (Brookins, 1988; Yan et al., 2000).

Factores como la concentración de determinados elementos, también controlan la especiación de arsénico y por tanto su movilidad. Por ejemplo, en presencia de concentraciones altas de azufre, predominan las especies acuosas de azufre y arsénico. Si en ese caso se establecen condiciones reductoras y ácidas, precipitarán sulfuros de arsénico (oropimente  $As_2S_3$ , y realgar  $AsS$ ) (Smedley y Kinniburgh, 2002).

En general, la forma pentavalente del arsénico  $As^{+5}$  tiende a predominar frente a la forma trivalente  $As^{+3}$  en las aguas superficiales, más oxigenadas que las aguas subterráneas. La arsenopirita ( $FeAsS$ ), el oropimente ( $As_2S_3$ ) y el realgar ( $AsS$ ) se encuentran dentro de los más comunes sulfuros de As, ocurriendo principalmente en depósitos hidrotermales y magmáticos. Estas formas minerales poseen amplia relevancia ambiental, pues se considera que la disolución de sulfuros de As gobierna la presencia de este contaminante tanto en aguas geotermales como subterráneas (Pokrovski et al., 2002; Smedley y Kinniburgh, 2002).

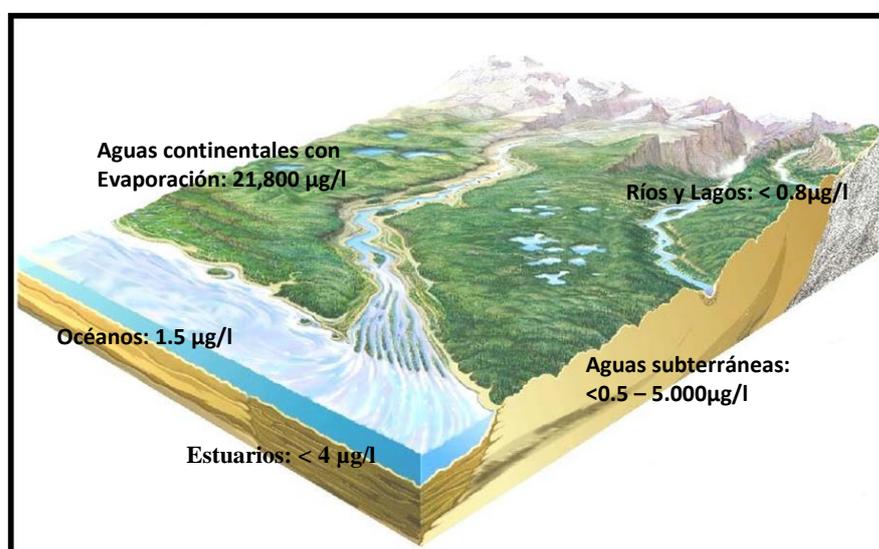
## 2.4. ABUNDANCIA Y DISTRIBUCIÓN DE ARSÉNICO EN LAS AGUAS CONTINENTALES SUPERFICIALES.

### 2.4.1. Ríos.

Los valores de fondo de contenido de arsénico en ríos son relativamente bajos, en general, inferiores a  $0,8 \mu\text{g/l}$  (ver Figura 3); aunque pueden variar dependiendo de factores como recarga (superficial y subterránea), litología de la cuenca, drenaje de zonas mineralizadas, clima, actividad minera y vertidos urbanos o industriales. En relación a procesos asociados con la circulación geotermal, en el área de Waikato (Nueva Zelanda) se han observado concentraciones en el rango  $28 - 36 \mu\text{g/l}$  (McLaren and Kim, 1995). Se han citado valores de concentración de arsénico de hasta  $370 \mu\text{g/l}$  en zonas de influencia de sistemas geotermales (Río Madison, sistema de Yellowstone, Nimick et al., 1998).

Las corrientes fluviales de zonas mineras o con mineralizaciones muestran contenidos altos de arsénico, generalmente en el rango de  $200 - 400 \mu\text{g/l}$ . En el caso de drenaje ácido de minas, se han citado en la literatura contenidos de arsénico muy variables, en ocasiones extremadamente altos, de hasta  $850.000 \mu\text{g/l}$ . Las concentraciones altas de arsénico en aguas fluviales también pueden ser el resultado de la contaminación por vertidos, que dan lugar a un variado rango de concentraciones dependiendo del tipo de vertido, distancia del foco emisor (Nordstrom y Alpers, 1999).

Figura 3: Distribución de Arsénico en las aguas. (Tomado de Lilli J., 2002).



#### 2.4.2. Lagos.

Los valores de fondo de contenido de arsénico en aguas lacustres no difieren mucho de los observados en ríos, al estar básicamente controlados por los mismos factores, excepto en lo que se refiere a la dinámica del agua. La circulación restringida de agua en los lagos tiene como consecuencia que determinados procesos geoquímicos son facilitados (Smedley y Kinniburgh., 2002).

#### 2.4.3. Agua del mar y estuarios.

Por lo general presenta muy pocas variaciones situándose en torno a 1.5 µg/l (Navarro et al., 1993). Contrastando con esos valores, las concentraciones en medios estuarinos son más variables, como resultados de los aportes de las aguas continentales y variaciones locales de salinidad y gradientes redox, si bien siguen estando en la mayor parte de los casos, no afectados antropogénicamente, por debajo de 4 µg/l (ver Figura 3). En esos ambientes mixtos tienen lugar procesos fisicoquímicos complejos como consecuencia de la mezcla de aguas de distinta naturaleza en cuanto a densidad, temperatura, pH, salinidad, procesos que pueden controlar la entrada de arsénico procedente de tierra firme al mar (por ejemplo, la floculación de coloides formados por óxidos de hierro en la interface agua dulce - agua salada contribuye a reducir el flujo de arsénico al mar (Cullen y Reimer., 1989).

#### 2.4.3. Origen de arsénico en las aguas.

El fenómeno de la existencia de contenidos altos de arsénico de origen natural en las aguas está controlado por tres factores: la fuente primaria de arsénico (geosfera y atmósfera), los procesos de movilización/retención de arsénico en la interacción entre la fase sólida y la fase líquida, y el transporte de arsénico como especie acuosa en el seno del agua. Respecto al primer factor, una de las características comunes en la mayor parte de los acuíferos con contenidos altos de arsénico no asociados a procesos geotermales, ni a depósitos minerales, ni a un origen antropogénico, es que los materiales que forman el acuífero tienen contenidos en arsénico próximos a los valores considerados como contenido medio de fondo (0,5 - 1.0 ppm en areniscas, 13 ppm en arcillas y pizarras, 1 - 1,5 ppm en carbonatos). En otras palabras, contenidos elevados de arsénico en

las aguas subterráneas no se asocia, por lo general, a materiales con contenidos altos de arsénico (BGS y DPHE, 2001; Smedley y Kinniburgh., 2002).

#### 2.4.4. Transporte de arsénico en el agua.

La presencia de elevadas concentraciones de As en el agua subterránea está estrechamente ligada a los fenómenos de transferencia de fase o dilución en el agua, que dependerán del régimen hidrogeológico y paleohidrogeológico del acuífero, así como de las condiciones geoquímicas (condiciones redox, pH, presencia de materia orgánica, iones competitivos con el Arsénico en los sitios de sorción, etc (Litter, et al., 2008).

El tiempo que tarda el arsénico en perderse por flujo depende de varios factores; uno de los más importantes es el tiempo de residencia del agua en el acuífero (a menor tiempo de residencia, mayor tasa de pérdida de arsénico por flujo). Desde el punto de vista geoquímico, el transporte de un elemento químico determinado en el agua está condicionado por la adsorción, ya que ésta produce un retardo en el transporte del elemento en comparación con el propio flujo del agua (Litter, et al. 2008).

La diferencia en la velocidad de transporte en el acuífero para  $As^{+3}$  y  $As^{+5}$  se explica por la estrecha relación entre el transporte de solutos, el grado de adsorción y la naturaleza de las isothermas de adsorción para estas especies arsenicales (Litter, et al., 2008).

#### 2.5. PRINCIPALES MECANISMOS GEOQUÍMICOS DE LIBERACIÓN Y MOVILIZACIÓN DE ARSÉNICO EN LAS AGUAS.

La presencia de elevados niveles de As en agua está directamente relacionada su liberación desde la fase sólida, con fenómenos de transporte y de transferencia a otros medios y a procesos de dilución por mezcla. Esos factores juegan un papel fundamental en la existencia de aguas con contenidos altos de arsénico (Bundschuh, et al., 2008).

Otro factor a tener en cuenta es la naturaleza de las aguas superficiales y subterráneas. Las primeras constituyen sistemas abiertos donde los factores ambientales varían continuamente, mientras que las aguas subterráneas se pueden considerar, en la mayoría de los casos, sistemas semicerrados, donde

las condiciones pueden variar, pero de forma discontinua en el tiempo, permitiendo que el sistema solución - fase sólida pueda reequilibrarse (Bundschuh, et al 2008).

Uno de los problemas fundamentales respecto a las aguas subterráneas y el arsénico radica en que la explotación de aquéllas puede introducir cambios importantes en las condiciones originales del acuífero. Se han informado variaciones temporales de las concentraciones de Arsénico en agua subterránea atribuidas a las variaciones en el régimen de explotación de los pozos (Bundschuh, et al., 2008).

Los principales mecanismos geoquímicos de liberación y movilización de arsénico a las aguas son:

- Oxidación de sulfuros: Es un mecanismo importante sólo localmente y en áreas mineras con abundancia de sulfuros, aunque también puede involucrar piritita autigénica en sucesiones sedimentarias. La oxidación de sulfuros tiene lugar cuando el medio se halla en condiciones oxidantes. El Fe disuelto tiende a precipitar como sulfato de Fe y óxidos y oxihidróxidos de Fe, con readsorción y coprecipitación de As. La readsorción del As hace que el mecanismo de movilización de arsénico por oxidación de piritita no sea considerado un mecanismo eficiente de movilización de arsénico (Bundschuh, et al., 2008).

- Disolución de minerales: los óxidos y oxihidróxidos de Fe y Mn, se disuelven en condiciones fuertemente ácidas. El As presente en ellos, tanto adsorbido como coprecipitado, será movilizado durante la disolución. A diferencia de la desorción, la disolución es eficaz en la movilización de As incorporado en la estructura del mineral (Bundschuh, et al., 2008).

- Desorción a pH elevado bajo condiciones oxidantes: bajo las condiciones aerobias y de pH variable, entre condiciones neutras a ácidas de muchos ambientes naturales, el Arsénico está fuertemente adsorbido a óxidos minerales. La marcada naturaleza no lineal de la isoterma de adsorción para  $As^{+5}$  determina que la cantidad de As adsorbido sea relativamente elevada aun cuando las concentraciones de As disuelto sean bajas. Sin embargo, en condiciones oxidantes, se produce la desorción del As si se alcanzan valores de pH mayores a 8,5. Normalmente, el incremento de pH se produce como consecuencia de los

procesos de meteorización e intercambio iónico, combinado con los efectos de un incremento en salinidad en climas áridos y semiáridos (Bundschuh, et al., 2008).

## 2.6. GEOLOGÍA.

### 2.6.1. Contexto Geotectónico Regional.

La historia geológica y tectónica América Central ha estado estrechamente relacionada con la evolución geodinámica del margen continental del pacífico, el cual actualmente está caracterizado por la subducción de la placa de Cocos bajo la placa del Caribe a una velocidad de 73 – 90 mm año (Dixon 1993; DeMets 2001). El pronunciado ángulo de subducción entre las placas de Cocos y Caribe (65°; Protti et al., 1994), es el principal responsable tanto de la formación del Frente Volcánico de América Central (FVAC), como de la abundante sismicidad cortical somera (<33 km) presente a lo largo de los 25 km de la FVAC (La Femina et al., 2002).

Dentro de los rasgos geotectónicos más característicos de la región está la cadena volcánica del Cuaternario, con 1100 km de longitud, que se extiende desde la frontera México - Guatemala, hasta la parte central de Costa Rica, está constituida por 40 volcanes mayores, lo que representa una gran densidad de volcanes por unidad de distancia, con un “gap” de 175 km entre el volcán Turrialba en Costa Rica, hasta el volcán Barú en Panamá (Bundschuh & Alvarado, 2007).

### 2.6.2. Volcanismo Cuaternario En Nicaragua.

El frente volcánico Nicaragüense corresponde a cerca de 40 volcanes con actividad Cuaternaria que se encuentran dentro de la Depresión de Nicaragua y son parte del FVAC. El frente volcánico se ha venido desplazando hacia el Suroeste desde el Terciario medio (Ehrenborg 1996) hasta llegar a su posición actual hace 8 Ma (Funk et al. 2009). Los centros eruptivos del FVAC están estrechamente espaciados (un promedio de 25 km entre cráteres centrales) y son generalmente pequeños (<30 km<sup>3</sup>). Debido a una segmentación de 20 km del arco, el frente volcánico nicaragüense puede ser dividido en dos diferentes segmentos. El primero abarca 175 km y se extiende desde el Golfo de Fonseca

## Determinación de la Contaminación Natural por Arsénico en las Aguas Subterráneas del Sector Sur del Volcán Mombacho, Granada - Nicaragua.

hasta el volcán Momotombito, en el lago de Managua; y el segundo se extiende por 215 km desde Managua hasta el volcán Madera (ver Figura 4). La zona de desplazamiento entre estos dos segmentos está marcada por el lineamiento Nejapa - Miraflores de rumbo NS, el cual se extiende hacia el Sur desde la península de Chiltepe hasta el flanco Norte del edificio volcánico de Las Sierras. Las cumbres de los volcanes Nicaragüenses son de menor altitud que los volcanes de otras áreas del FVAC, lo que probablemente se relaciona a la posición del frente volcánico a lo largo de la depresión Nicaragüense.

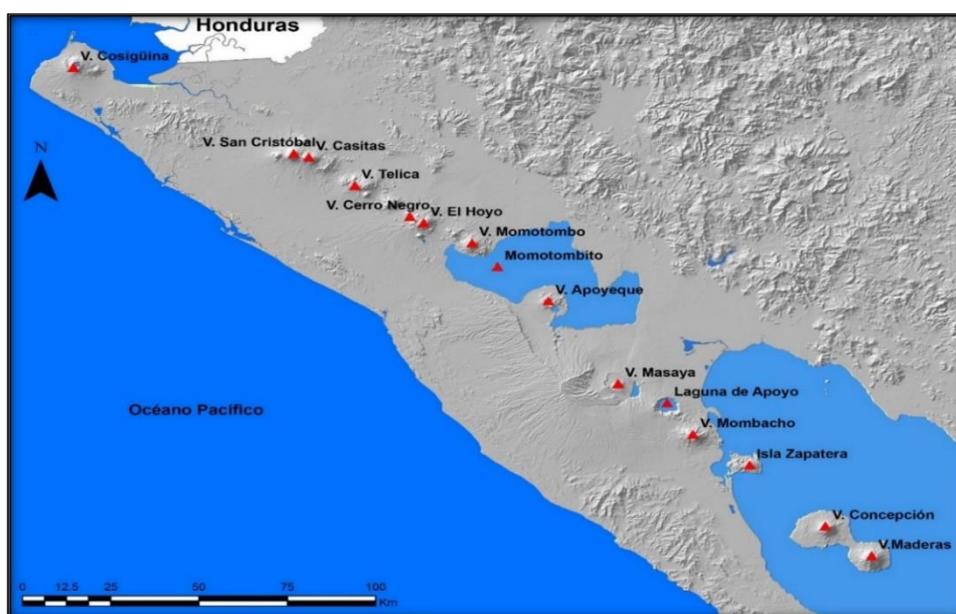


Figura 4: Frente Volcánico Nicaragüense (FVN).

Los volcanes Cuaternarios presentan diferencias geoquímicas y petrológicas en función del tipo de edificio volcánico, siendo posible agruparlos dentro de tres tipos: volcanes escudos, estratovolcanes y complejos ignimbríticos (van Wyk de Vries., 1993).

Escudos – volcánicos: Son generalmente ubicados en proximidad de zonas de fallas transversales a la cordillera volcánica, siendo ellos mismos afectados por importantes fallas. Estos incluyen varios conos y cráteres, a menudo esparcidos en un radio de unos 5 - 15 km desde el centro principal. Su elevación es generalmente modesta y sus laderas son suavemente inclinadas (15 - 20°). Se componen principalmente por lavas en forma de amplias y delgadas coladas que se extienden hasta distancias de 15 km desde el centro del complejo, mientras

que los productos piroclásticos son esencialmente limitados a la zona alrededor de los cráteres (van Wyk de Vries., 1993).

**Estrato – volcanes:** Normalmente alejados de importantes zonas de falla y limitadamente afectados por fallas de origen tectónico. Las deformaciones de estos edificios son en su mayoría atribuibles a fenómenos de inestabilidad gravitatoria. Presentan en general un edificio principal y pocos conos secundarios. Su elevación es mayor que en los escudos volcánicos, alcanzando hasta los 1,700 m.s.n.m. Estos volcanes presentan, en general, una parte superior del cono principalmente compuesta por depósitos piroclásticos y caracterizada por inclinaciones de hasta 30°, y una parte inferior con abanicos de coladas lávicas, depósitos de escombros y de lahar, intercalados con delgadas capas de piroclastos (van Wyk de Vries., 1993).

**Complejos Ignimbríticos:** Relacionados con la evolución de cámaras magmáticas intra - crustales que generan magmas muy diferenciados y erupciones fuertemente explosivas. Se presentan en forma de amplios escudos compuestos por productos piroclásticos (pómez e ignimbritas) y subordinadamente lávicas, de composición variable entre basáltica y dacítica. En estos edificios es frecuente la presencia de amplias calderas (van Wyk de Vries., 1993).

### 3. METODOLOGÍA.

La investigación es de carácter cualitativo y cuantitativo, determinando la calidad del recurso hídrico para el área de trabajo ubicada en el sector sur del volcán Mombacho, comprobando la presencia de Arsénico y el valor de su concentración mediante los análisis químicos. A demás se pretende determinar cuáles sitios tienen la probabilidad de estar contaminados de manera natural con Arsénico y si dicha concentración implica un riesgo para la salud de los habitantes.

La metodología que se utilizó para desarrollar la presente investigación se dividió en 3 etapas diferentes, las que se describen a continuación:

#### 3.1. TRABAJO DE GABINETE.

En esta etapa se recopiló y generó toda la información posible del área y se prepararon las condiciones para proceder con la Etapa de Campo. Las actividades llevadas a cabo durante el trabajo de gabinete fueron:

##### 3.1.1 Recopilación bibliográfica.

Se recopiló toda la información existente, tal como; documentos escritos (artículos científicos, estudios, informes, tesis u otros trabajos), mapas impresos e imágenes que abarcan el área de estudio (fotografías aéreas e imagen satelitales). Luego de obtener la información preliminar, se procedió a la elaboración y diseño del mapa base. Para ello se realizaron las siguientes actividades:

Geo procesamiento: Mediante la interpretación que se realizó con las ortofoto del área de estudio, escala 1:20 000, editadas por INETER en el año 2004 e imágenes de satélite (BaseMap , Arc Gis 10.5) escala 1: 10,000. Se generó información de los elementos de interés como: estructuras geológicas, drenaje y erosión. Para ello, se tomaron en cuenta: tono fotográfico, textura, forma y tamaño de los elementos, topografía, lineamientos y el drenaje.

Usando como base la información altimétrica y mediante el software Global Mapper v16, ArcGis10.3 se generaron los siguientes mapas:

Mapa de curvas de nivel: con las curvas de nivel a escala 1/25,000, se obtuvo un mapa topográfico, el cual brindó una visión de la región estudiada, mostró en forma detallada las características topográficas del terreno.

La información previamente analizada permitió la elaboración de un mapa de la ubicación de los sitios de muestreo donde se identifiquen las características geológicas y topográficas especialmente los lugares donde se realizara la toma de muestra según los parámetros anteriores.

### 3.1.2. Selección para los sitios de Muestras de aguas de estudio.

Realizados los análisis a la información disponible y concluidas las actividades antes mencionadas se llevó a cabo la correlación de toda la información para obtener un mapa geológico, mapa morfo - estructural, mapa de sitios de muestro de aguas para realizar análisis Físico - Químicos y análisis químicos para la determinación de Arsénico del área bajo estudio. El muestreo es del tipo no probabilista, los sitios de muestreo se seleccionaron bajo siguientes criterios:

- De acuerdo a la cantidad de componentes característicos de aguas geotermales (salmuera).
- Temperatura anómala superior a 30° C.
- Cantidad de Boro presentes en el agua.
- Ubicación de los pozos de acuerdo a una distribución representativa de la población del área en estudio.

### 3.2. TRABAJO DE CAMPO.

En ésta fase, se visitó el área de estudio, utilizando como guía el mapa base previamente elaborado. Durante esta etapa se realizaron las siguientes actividades:

Corroboración en campo de la información geológica obtenida del área donde se identifiquen las unidades geológicas aflorantes en el área.

Se procedió a realizar una descripción geológica del área haciendo énfasis en los lugares donde se recolecte la muestra de aguas, permitiendo conocer la caracterización del área.

### 3.2.1. Localización de las muestras.

Inventario de puntos de aguas.

Para el desarrollo del presente trabajo, se realizó un inventario de puntos de aguas, los cuales son un insumo fundamental para llevar a cabo el trabajo planteado. Se monitoreo puntos de aguas comprendidos en un área de 90 km<sup>2</sup>. (Ver Anexo 1 Inventario de pozos y manantiales del Sector Sur del volcán Mombacho).

Como resultados de este inventario se han encontrado un total de 26 pozos de los cuales 25 pozos son excavados y 1 pozo es perforado, la profundidad varía desde los 1.5 m y 55 m; de manera simultánea se cuantificaron los manantiales se encontraron un total de 13 manantiales, se dividen en 6 manantiales termales y 7 manantiales fríos, se identificaron en campo 5 lagunas. No se descarta la existencia demás manantiales debido a la abundante vegetación y a las condiciones de pantano en algunas áreas se hizo difícil el acceso para su reconocimiento (ver Foto 1 y 2).

**Foto 1: Pozo excavado - Comarca Santa Julia.**



Medición de nivel piezométrico y parámetros físicos. Coordenadas UTM 16 P 1303416 / 616546

**Foto 2: Manantial termal Las Plazuelas. El SPA.**



Medición de parámetros físicos. Toma de muestras para análisis físico-químicos. Coordenadas UTM 16 P 1301135 / 613477.

### 3.2.2. Toma de muestras.

En la presente investigación tratamos de predecir el comportamiento de un contaminante no deseado en las aguas de consumo humano como es el arsénico, si la concentración supera las normas internacionales de 10 µg/l, empleamos una estrategia que se suele aplicar en trabajos elaborados en el país bajo el mismo tema de análisis, la estrategia empleada es la no probabilística

(también conocida como selectiva o dirigida). Nos basamos en un criterio previo, el cual fue identificación a través de análisis fisicoquímicos de las aguas definiendo los lugares más propensos a estar contaminados con el elemento arsénico, los cuales nos permitieron orientar el muestreo hacia los puntos de interés y a las fuentes de aguas que están bajo uso de consumo humano en el área bajo estudio.

En el caso de las muestras de agua, la muestra debe ser homogénea y representativa. La toma y conservación de muestras de aguas se lleva a cabo según la naturaleza de los analito a determinar.

Para análisis de cationes: se utilizó envase de polietileno no transparente con una capacidad de 500 ml y 1L, se procedió a enjuagar el embace con la muestra añadiendo hasta la mitad del contenido, se adicionaron 21 gotas de Ácido Nítrico  $\text{HNO}_3$  (1+1) para preservarla y se procedió a llenar el envase en su totalidad. En este caso se toma muestras por duplicados los envases se rotulan y se embalan para su traslado al laboratorio de Geoquímica de ENEL.

Para análisis de Aniones se utilizó envase de polietileno no transparente con una capacidad de 500 ml y 1 L, se procedió a enjuagar el envase con la muestra y posterior se llena en su totalidad, En este caso se toma muestras por duplicados los envases se rotulan y se embalan para su traslado al laboratorio de Geoquímica de ENEL.

Para análisis de pH,  $\text{CO}_3$  y  $\text{HCO}_3$ : se utilizó envases de vidrios transparente con una capacidad de 125 ml, Se enjuaga el envase con la muestra y posteriormente se llena el envase, se etiqueta y se introduce en un termo para ser preservada en frio.

Para análisis Amonio  $\text{NH}_3$ : se toma en envases de vidrio color ámbar de 125 ml, se adicionan con 7 gotas de  $\text{HCl}$  (1+1) para preservación de la muestra; nota: Tomar la muestra si  $T > 50^\circ\text{C}$ .

Para análisis  $\text{SiO}_2$ : se realizó dilución (50 + 50) si la conductividad eléctrica (CE)  $> 1000 \mu\text{S}$ , se utilizó botella plástica color ámbar de 125 ml En el momento de la toma, se efectuaron varios enjuagues con la misma agua a analizar y posteriormente fueron llenados completamente.

**Determinación de la Contaminación Natural por Arsénico en las Aguas Subterráneas del Sector Sur del Volcán Mombacho, Granada - Nicaragua.**

Para el análisis de Arsénico se utilizaron botellas de plástico de 500 ml, las cuales fueron previamente preparadas de acuerdo a los requerimientos establecidos por el método analítico SM: Standard Methods, 21th.2005 – UNI Generador de Hidruros, Utilizando ARSEATOR.

**3.2.3. Secuencia de muestreo.**

Se llevaron a cabo dos fases de muestreo en muestras acuosas.

En la primera fase de muestreo se recolectaron un total de 27 muestras de aguas a las cuales se le realizaron análisis físico – químico, se realizó entre las 7:30 am - 5:00 pm, la recolección de muestras de aguas se llevó a cabo en manantiales y en pozos (excavados y perforados) en el área de interés. Realizando mediciones in situ los siguientes parámetros de campo: pH, conductividad y temperatura. Las muestras fueron colectadas en un lapso de 3 días de campo se contó con el apoyo del personal de la Dirección de Estudios Geotérmicos – ENEL.

La segunda fase de muestreo complementaria a la anterior, se recolectaron un total de 10 muestras de aguas, para realizar análisis químicos determinación de Arsénico, el muestreo se realizó entre las 6:00 am - 2:00 pm, la recolección de muestras de aguas se llevó a cabo en manantiales y en pozos (excavados y perforados) en el área de interés. Realizando mediciones in situ los siguientes parámetros de campo: pH, conductividad, temperatura, y el potencial redox. Las muestras fueron colectadas en un lapso de 1 día.

*Tabla 1: Número de muestras colectadas.*

Muestras	Análisis Físico – Químicos	Análisis Arsénico
Aguas	27	
Aguas		10

La ubicación geodésica de cada uno de los puntos muestreados se registraran mediante sistema de posicionamiento global (GPS), con la finalidad de situar directamente en el mapa las coordenadas UTM obtenidas para cada sitio. Ver anexo No 4. Mapa Inventario de pozos y manantiales sector sur volcán Mombacho 2017.

## Determinación de la Contaminación Natural por Arsénico en las Aguas Subterráneas del Sector Sur del Volcán Mombacho, Granada - Nicaragua.

Durante la toma de muestras de aguas se utilizaron los siguientes equipos para la medición de parámetros de campo: pH-metro: WTW ph 330i Portátil, Conductivímetro: YSI-YSI-63-10water-resistant/temperature/conductivity/salinity meter, ExStik ORP Meter portátil para medición de potencial redox, GPS: Garmin modelo GPSMAP62S, Brújula Brunton, Lupa, Martillo de Geólogo, Sondas piezométrica (Foto No 3 y 4).

**Foto 1: Muestreo de aguas para análisis de determinación de arsénico.**



Ojo de Agua. Manantial Hidrotermal.  
Hacienda Mecatepe. Medición In situ de pH, Eh, CE y toma de muestra de agua.  
Coordenadas UTM 16 P 1301862 / 615266.

**Foto 2: Mediciones In situ de parámetros físicos y toma de muestra de agua.**



Mediciones In situ de parámetros físicos y toma de muestra de agua en Pozo excavado.  
Comunidad: San Juan del Mombacho.  
Coordenadas UTM 16P 1303180 / 616077.

### 3.3. ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE DATOS.

#### 3.3.1. Análisis físico – químicos.

Una vez obtenido los resultados de laboratorio, se determinó la confiabilidad de los mismos mediante la comprobación del porcentaje de error de análisis de laboratorio, por medio de Balance iónico.

El balance iónico: mide la diferencia entre el total de aniones y cationes expresados en mili equivalentes por litro (meq/L), determinados analíticamente. El error del balance iónico, se define según la Ecuación 1, y 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.

**Determinación de la Contaminación Natural por Arsénico en las Aguas Subterráneas del Sector Sur del Volcán Mombacho, Granada - Nicaragua.**

Ecuación 1.

$$\% \text{ error} = \frac{\sum Zm \text{ cationes} - \sum Zm \text{ aniones}}{\sum Zm \text{ cationes} + \sum Zm \text{ aniones}} * 100$$

Se consideró como aceptable un error menor o igual a 10 % máximo aceptable para las muestras (Tabla No 2).

*Tabla 2: Balance iónico de las muestras analizadas.*

### 3.4. MÉTODOS DE ANÁLISIS FÍSICOQUÍMICOS.

Análisis Físico - Químico de las muestras de agua.

Los métodos de análisis llevados a cabo para determinar los parámetros fisicoquímicos y para la determinación de Arsénico han sido los siguientes (Tabla No 3).

*Tabla 3: Métodos de Análisis Físico - Químico de las muestras de agua.*

<b>Análisis Físico - Químico de las muestras de agua</b>	
<b>Análisis</b>	<b>Método</b>
pH	Análisis Potenciométrico de pH.
Conductividad	Conductivímetro YSI model 31 Conductivity Bridge 3403.
Sólidos totales disueltos - STD	Análisis Gravimétrico de STD.
Carbonatos y bicarbonatos	Valoración Potenciométrica de CO <sub>3</sub> y HCO <sub>3</sub> .
Amonio	MétodoIÓN Selectivo de Amonio.
Flúor	MétodoIÓN Selectivo de Flúor.
Boro	Método Valoración Potenciométrica de Bor.
Cloruros	Método Argentométrico del AgNO <sub>3</sub> .
Ácido sulfhídrico	Método Volumétrico del Tiosulfato de Sodio.
Sodio, Magnesio, Calcio, Potasio y Litio	Espectrofotometría de AA Equipo Perkin Elmer 2280.
Sulfatos	Análisis Turbidimétrico de Sulfatos.
Hierro	Análisis Colorimétrico de Hierro Total.
Sílice	Análisis Colorimétrico de SiO <sub>2</sub> Total.
Fosfatos	Análisis Colorimétrico de Fosfatos, Genesys 10'S.
Nitratos	Método Análisis Colorimétrico de Nitratos.
Nitratos	Método Análisis Colorimétrico de Nitratos.
<b>Análisis para la determinación de Arsénico</b>	
Arsénico	SM = Standard Methods, 21th.2005. Generador de hidruros, utilizando ARSENATOR

Ver Anexo No 2. Metodología de Análisis fisicoquímicos Laboratorio de Geoquímica – ENEL.

### 3.4.1. Discusión de análisis Físicos – Químicos.

A partir de los resultados de los análisis físico – químicos, se procedió a determinar las características de las aguas del sector sur del volcán Mombacho, se utilizó como referencia las normas de la OMS, norma CAPRE y Técnicas para el Diseño de Abastecimiento y Potabilización del Agua (NTON 09003 – 99).

Para la clasificación de los tipos de aguas del área bajo estudio se utilizó el Diagrama de Piper Hill Langelier (Figura No. 5), el que consiste en dos diagramas triangulares, uno que recoge la información de concentraciones referente a los cationes  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$  y de manera conjunta la suma de  $\text{Na}^+ + \text{K}^+$ . El otro diagrama resume la información referente a concentraciones de los aniones  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$  y  $\text{Cl}^-$ . La información tanto del diagrama triangular de cationes como de aniones se extrapola en un rombo central que permite clasificar de forma rápida el tipo de agua al que la muestra analizada corresponde. Los datos para ser utilizados deben ser convertidos a fracción molar.

Figura 5: Diagrama de Piper Hill Langelier. (Tomado de Argueta J., 2016.).

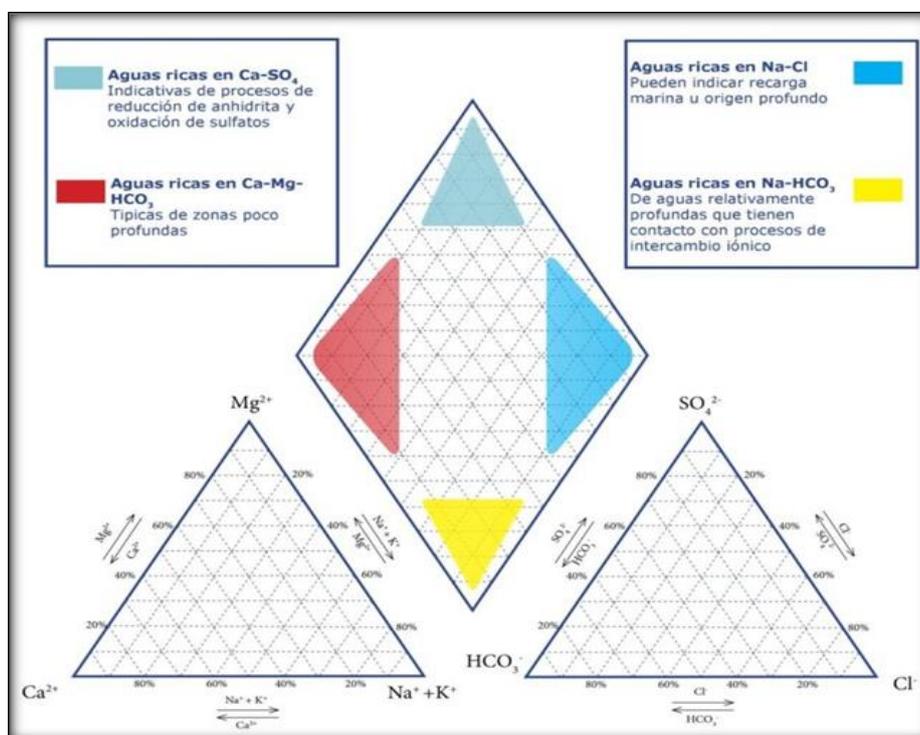
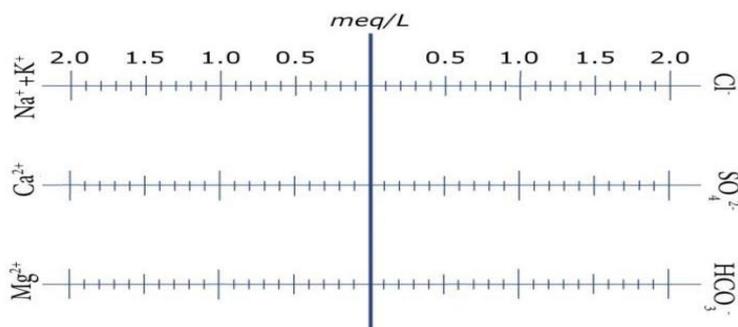


Diagrama de Stiff.

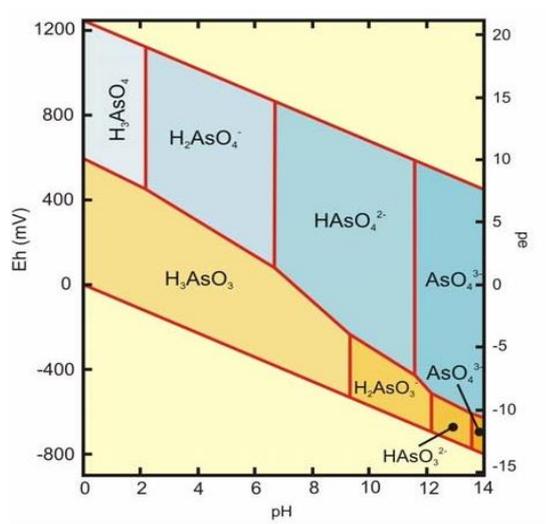
Este diagrama permite, mediante el uso de un esquema representar la composición del agua y de igual manera son utilizados comúnmente para indicar sobre un mapa o en su defecto en un mapa conceptual la caracterización del agua en un punto dado, con la diferencia que únicamente permite la ubicación a lo largo de rectas paralelas de los siguientes iones: En el lado de los cationes, la izquierda del diagrama Sodio ( $\text{Na}^+$ ) o la suma de Sodio Potasio ( $\text{Na}^+ + \text{K}^+$ ), Calcio ( $\text{Ca}^{2+}$ ) y Magnesio ( $\text{Mg}^{2+}$ ); mientras que en el lado de los aniones, lado derecho, el Cloro ( $\text{Cl}^-$ ), Sulfato ( $\text{SO}_4^{2-}$ ) y Bicarbonato ( $\text{HCO}_3^-$ ). En el esquema (Figura No. 6), se utilizan unidades de concentración en meq/L.

Figura 6: Ejes de diagrama de Stiff modificado. (Tomado de Argueta J., 2016.).



La determinación de la especie de Arsénico, se realizó utilizando el diagrama Purbaix: Diagrama Eh-pH de especies acuosas de arsénico en el sistema  $\text{As}-\text{O}_2-\text{H}_2\text{O}$  a  $25^\circ\text{C}$  y 1 bar de presión total (Figura No.7).

Figura 7: Diagrama Eh - pH de especies acuosas de arsénico en el sistema  $\text{As}-\text{O}_2-\text{H}_2\text{O}$  a  $25^\circ\text{C}$  y 1 bar de presión total. (Tomado de Lilli J., 2002.).



### 3.4.2. Análisis de manifestaciones termales.

Se usaron como herramientas los diagramas:

Diagrama ternario Cl-SO<sub>4</sub>-HCO<sub>3</sub> de Giggenbach 1991 (Tcsh): En este diagrama, los rangos de composición están indicados para varios grupos típicos de agua, tales como aguas volcánicas y aguas calentadas por vapor, aguas maduras y aguas periféricas. Las etiquetas de la trama indican asociaciones con diferentes partes de un sistema geotérmico o diferentes tipos de sistemas geotérmicos. Una fuente termal con cloruro significativo, bicarbonato y sulfato moderada mínima es consistente con la salida de un yacimiento geotérmico.

Diagrama de Na-K-Mg de Giggenbach (1988) (Tnkm): Giggenbach fue pionero en las técnicas para la derivación de geoindicadores de Na-K-Mg-Ca. Si sólo son considerados Na-K -Mg, un diagrama triangular se puede utilizar para distinguir entre aguas equilibradas, parcialmente equilibradas (incluyendo aguas mezcladas) y aguas inmaduras.

Diagrama de Na-K / Mg-Ca, Giggenbach y Goguel 1989 (Xmckn). Es un "geoindicador". En el cual se yuxtapone el geotermómetro Na - K con el equilibrio del sistema Mg-Ca. Permite realizar la determinación de la influencia de los procesos de baja temperatura, poco profundos, que tienen una influencia particular sobre el equilibrio aparente Mg - Ca.

Geotermómetros para la estimación de las temperaturas del sistema geotérmico existente en el área.

Básicamente los geotermómetros, son relaciones matemáticas que a partir de datos de concentración química de analitos medidos en superficie (ya sea en fase acuosa o gaseosa) determinan o estiman la temperatura del sistema de origen, basándose en ecuaciones químicas en equilibrio, es decir, reacciones químicas que son función de la temperatura y que se sabe que tuvieron que ocurrir bajo condiciones de reservorio geotérmico. No todas las especies químicas son útiles para este propósito ya que muchos de ellos tienen demasiada interacción química en su recorrido hacia la superficie afectando el análisis que se desea estimar bajo condiciones de reservorio. Las ecuaciones 2 y 3 muestran los geotermómetros de sodio y potasio son analitos que conllevan una historia y huella del sistema profundo.

Las concentraciones en estas ecuaciones deben de ser introducidas en mg/l y la temperatura es estimada en grados centígrados.

$$T_{Na/K} = \frac{1390}{\log \frac{Na}{K} + 1.75} - 273.15$$

Ecuación 2: Geotermómetro Na/K  
Giggenbach 1988

$$T_{Na/K} = \frac{1390}{\log \frac{Na}{K} + 1.699} - 273.15$$

Ecuación 3: Geotermómetro Arnórsson et. al. 2 (1983). Rango de temperatura 25 – 350 °C

### 3.4.3. Generación de modelos usando herramienta de interpolación de datos.

Durante el proceso de análisis e interpretación de los resultados de los análisis químicos, se procedió a realizar una estimación usando una herramienta de interpolación espacial de los datos conocidos para estimar valores desconocidos en otros puntos del área de interés. Se utilizó la base de datos Histórica de muestreo en el área de Masaya – Granada – Nandaime, proporcionada por el Laboratorio de Geoquímica de ENEL, la cual permitió reducir el índice de incertidumbre en algunas áreas donde se carecían de datos para realizar la interpolación.

La herramienta de interpolación seleccionada fue la hipótesis de la variable regionalizada (kriging): el cual es un método geoestadístico, que se fundamenta en las variables regionalizadas y auto correlacionadas en el espacio. Este auto correlación se determina a partir de la elaboración de semivariogramas con los cuales se logra definir el modelo de mejor ajuste, para proceder luego a la interpolación y en el cual se define la distancia máxima o “rango” en donde finaliza la autocorrelación.

Con el uso de este método de interpolación queremos predecir valores desconocidos de los datos observados (analitos) de los sitios analizados. Se esperan generar resultados coherentes con la dinámica de la variable a interpolar, respetando en la medida de lo posible, la información real suministrada; es por esta razón que este método de interpolación fue empleado.

Como resultado obtenido al usar la herramienta de interpolación Kriging, se realizó la interpolación de datos de temperatura, conductividad eléctrica, cloruros, pH. (Ver anexos mapas de Temperatura, Conductividad Eléctrica, Cloruros, pH).

## 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.

### 4.1. Calidad de Agua.

La composición química de las aguas subterráneas puede contemplarse desde diferentes puntos de vista químico, bacteriológico, de metales pesados, etc. En este capítulo de esta investigación se hace referencia a la composición química entendiendo por tal el conjunto de sustancias (generalmente inorgánicas) incorporadas al agua por procesos naturales de las aguas subterráneas.

La composición química inorgánica de las aguas subterráneas del área de estudio fue definida a partir de los análisis de calidad de agua de las muestras recogidas adecuadamente y posteriormente transportada al laboratorio de Geoquímica de la Empresa Nicaragüense de Electricidad (ENEL), laboratorio que cuantificó la calidad fisicoquímica de las aguas subterráneas por medio de la concentración de cada constituyente analizado de los analitos, tanto cationes como aniones.

#### 4.1.2. Carácter Hidrogeoquímico de las aguas subterráneas.

A pesar de la gran variabilidad de los elementos presentes en el agua subterránea y de sus concentraciones (elementos químicos), éstas han sido clasificadas usando la clasificación de Aguas Subterráneas propuestas por (Freeze and Cherry. 1979). Por su frecuencia de aparición y valor de concentraciones decrecientes en constituyentes mayoritarios o fundamentales.

Los principales constituyentes mayoritarios (aniones y cationes) a ser analizados fueron: aniones de Iones de Bicarbonatos y carbonatos ( $\text{HCO}_3^- + \text{CO}_2^-$ ), Iones de Cloruros ( $\text{Cl}^-$ ), Iones de Sulfatos ( $\text{SO}_4^-$ ), Iones de Nitratos ( $\text{NO}_3^-$ ), y cationes de Iones de Calcio ( $\text{Ca}^{++}$ ), Iones de Magnesio ( $\text{Mg}^{++}$ ), Iones de Sodio ( $\text{Na}^+$ ), y Iones de Potasio ( $\text{K}^+$ ).

En la composición fisicoquímica de las aguas subterráneas, estos constituyentes aparecen por lo general en forma iónica (sales casi totalmente disociadas). Con menor frecuencia se presentan en forma molecular parcialmente disociadas o como iones complejos de sustancias orgánicas o inorgánicas.

En Nicaragua han sido adoptadas normas de calidad de agua para el consumo humano las "Normas Regional de Calidad para Agua para el Consumo Humano

(CAPRE)”, recopiladas en la Normas Técnicas para el Diseño de Abastecimiento y Potabilización del Agua (NTON 09003 – 99).

En la página No. 12 de la NTON 09003 – 99, en la Tabla No. 3-3: Parámetros fisicoquímicos, se establecen los valores recomendados y valores máximos admisibles de los principales parámetros fisicoquímicos para aguas subterráneas.

Valores recomendados por la Norma CAPRE – OMS – NTO N09003-99, parámetros físicos – químicos analizados en la zona de estudio.

Tabla No. 4. Los parámetros mostrados en esta tabla se rigen por las normas establecidas que indican el valor recomendado y su valor máximo admisible presentes en el agua.

*Tabla 4: Parámetros Físico – Químicos.*

Parámetros Físico – Químicos			
Parámetro	Unidad	Valor recomendado	Valor máximo admisible
Temperatura	°C	18 a 30	
Concentración			
Iones hidrógeno	Valor pH	6.5 a 8.5 (a)	
Cloruros	mg/l	25	250
Conductividad	µs/cm	400	
Fluoruro	mg/l	0.7	1.5
Sulfatos	mg/l	25	250
Sílice	mg/l		140
Calcio	mg/l CaCO <sub>3</sub>	100	
Boro	mg/l		0.5 (T)
Magnesio	mg/l	30	50
Sodio	mg/l	25	200
Potasio	mg/l		10
Sol. Tot. Dis	mg/l	500	1000
Arsénico	µs/l		10

(a) Las aguas deben ser estabilizadas de manera que no produzcan efectos corrosivos ni incrustantes en las tuberías.

(T): valor de referencia provisional porque el valor de referencia calculado es menor que el que es posible alcanzar mediante métodos de tratamiento prácticos, medidas de protección de las fuentes, etc.

#### 4.1.3 Constituyentes mayoritarios.

A continuación se hace una descripción de cada uno de los principales constituyentes mayoritarios de las aguas subterráneas dentro del área de estudio, se resaltan los valores anómalos usando el color amarillo.

- Iones de Bicarbonatos ( $\text{HCO}_3^-$ ), y Carbonatos ( $\text{CO}_3^{2-}$ ).

El origen de las concentraciones de bicarbonatos se produce de la disolución de rocas de calizas y dolomitas, potenciada por el aporte de  $\text{CO}_2$  y/o ácidos orgánicos o inorgánicos es una de las principales fuentes de carbonatos y bicarbonatos en las aguas subterráneas.

En aguas subterráneas con pH inferior a 8.3 la mayoría de las especies carbonatada dominante es el ión bicarbonato. En estas aguas la concentración de  $\text{HCO}_3^-$  suele variar entre 50 y 400 mg/l, aunque puede alcanzar valores de hasta 800 mg/l.

En la Tabla No. 5 y No. 6; se presentan las concentraciones de iones Bicarbonatos de las muestras de aguas analizadas del sector sur del volcán Mombacho

*Tabla 5: Ión Bicarbonato lagunas y manantiales.*

Muestra	$\text{HCO}_3^-$
San José de Mombacho (Lago)	117
Mtal Hacienda Cutirre.	94
Vertiente 2. Georgino Andrade	231
Mtal San Juan de Mombacho.	165
Mtal El Limón. C Aguas Agrias.	244
Laguna Verde	218
Laguna El Cacho	221
Manantial Laguna Blanca	450
Mtal La Plazuela II. El SPA	576
Mtal Hacienda La Plazuela.	440
Mtal Termal la Plazuela	357
Nacimiento Rio Manares	265
Hacienda Mecatepe. Mtal Ter.	562
Laguna Juan Tallo	196
Nacimiento Rio Brujo	140

*Tabla 6: Ión Bicarbonato en pozos.*

Muestra	$\text{HCO}_3^-$
Comarca Santa Julia. P.E.	280
Santa Julia. P.E.	274
San Juan de Mombacho. P.E.	201
El Limonal. P.E.	181
Comarca Aguas Agrias. P. P.	199
Comarca Aguas Agrias. P.E.	354
Comarca Aguas Agrias. P.E.	50
Comarca San Luis de Manares. P.E.	165
San Luis de Manares. P.E.	772
San Luis de Manares. P.E.	732
San Luis de Manares. P.E.	536
San Luis de Manares. P.E.	800

Los valores de las concentraciones de iones de Bicarbonato ( $\text{HCO}_3^-$ ) dentro del área de estudio. En la NTON 09003 – 99, CAPRE y OMS, no está establecido un límite máximo de referencia, por lo que no se puede afirmar si están o no dentro de los valores máximos admisibles. Según bibliografía las concentraciones de este ión para aguas con un pH de 8.3, registran concentraciones entre 50 – 400 mg/l. En los resultados obtenidos de los análisis las muestras, identificamos concentraciones anómalas en los manantiales termales, las cuales oscilan en un rango de 440 – 576 mg/l, en el sector de San Luis de Manares se registraron valores anómalos en cuatro pozos excavados las concentraciones encontradas oscilan en 536 – 800 mg/l.

➤ Iones de Cloruros ( $\text{Cl}^-$ ).

El ion cloruro ( $\text{Cl}^-$ ) no forma sales de baja solubilidad, no se oxida ni se reduce en aguas naturales, no es adsorbido significativamente, ni entra a formar parte de procesos bioquímicos lo que le da un carácter de trazador casi ideal. Se exceptúan las rocas de evaporitas y rocas de origen marino las rocas por lo poco común que presentan escasa proporción de iones cloruros ( $\text{Cl}^-$ ). Sin embargo dada la elevada solubilidad de sus sales éstos pasan rápidamente a la fase acuosa pudiendo alcanzar concentraciones muy altas.

El rango de concentración usual en las aguas naturales subterráneas, se mantiene por debajo de los 10 mg/l, encontrándose los valores más frecuentes entre 4.96 y 5.45 mg/l. En el área de estudio, todos los valores de concentración de iones cloruros ( $\text{Cl}^-$ ) sobrepasan los 10 mg/l.

Los valores de las concentraciones de iones de Cloruro ( $\text{Cl}^-$ ) dentro del área de estudio algunos manantiales y pozos sobrepasan los valores recomendados que son de 25 mg/l, pero no sobrepasan valores máximos admisibles establecidos por las normas para aguas químicamente potables, la cual no debe exceder los 250 mg/l; El manantial termal ubicado en la hacienda Mecatepe y dos pozos excavados en el área de San Luis de Manares superan el valor máximo admisible.

Ver Tabla No. 7 y No. 8; se presentan las concentraciones de Iones Cloruros de las muestras de aguas analizadas del sector sur del volcán Mombacho.

**Determinación de la Contaminación Natural por Arsénico en las Aguas Subterráneas del Sector Sur del Volcán Mombacho, Granada - Nicaragua.**

*Tabla 7: Concentraciones Iones de cloruro lagunas y manantiales.*

Muestra	Cl <sup>-</sup>
San José de Mombacho (Lago)	32
Manantial Hacienda Cutirre.	13
Vertiente 2. Georgino Andrade	35
Manantial San Juan de Mombacho.	16
Mtal El Limón. C Aguas Agrias.	11
Laguna Verde	16
Laguna El Cacho	15
Manantial Laguna Blanca	73
Manantial La Plazuela II. El SPA	205
Manantial Hacienda La Plazuela.	177
Manantial Termal la Plazuela	178
Nacimiento Rio Manares	13
Hacienda Mecatepe. Mtal Ter	315
Laguna Juan Tallo	12.50
Nacimiento Rio Brujo	16.00

*Tabla 8: Concentraciones Iones cloruro en pozos.*

Muestra	Cl <sup>-</sup>
Comarca Santa Julia. P.E.	51
Santa Julia. P.E.	54
San Juan de Mombacho. P.E.	19
El Limonal. P.E.	11
Comarca Aguas Agrias. P. P.	12
Comarca Aguas Agrias. P.E.	24
Comarca Aguas Agrias. P.E.	35
Comarca San Luis de Manares. P.E.	50
San Luis de Manares. P.E.	99
San Luis de Manares. P.E.	271
San Luis de Manares. P.E.	266
San Luis de Manares. P.E.	58

➤ Sulfatos (SO<sub>4</sub><sup>=</sup>).

El ión sulfato procede del lavado de terrenos formados en ambiente marino de la oxidación de sulfuros que se encuentran ampliamente distribuidos en rocas ígneas y sedimentarias de la descomposición de sustancias orgánicas etc. Sin embargo la disolución de yeso (CaSO<sub>4</sub>2H<sub>2</sub>O) y anhidrita (CaSO<sub>4</sub>) y otros tipos de sulfatos dispersos en el terreno representa frecuentemente el aporte cuantitativamente más significativo de este ión a las aguas subterráneas.

El ión sulfato está sometido a procesos de reducción especialmente en presencia de bacterias y de materia orgánica. En ambientes reductores a pH menor que 7, la forma reducida estable es el H<sub>2</sub>S mientras que en soluciones alcalinas predomina el ión HS. En aguas subterráneas y aguas superficiales dulces, la concentración normal de SO<sub>4</sub><sup>=</sup> puede variar entre 25 y 250 mg/l.

Tabla No. 9 y No. 10; se presentan las concentraciones de Ión Sulfato de las muestras de aguas analizadas del sector sur del volcán Mombacho.

**Determinación de la Contaminación Natural por Arsénico en las Aguas Subterráneas del Sector Sur del Volcán Mombacho, Granada - Nicaragua.**

*Tabla 9: Concentración Ión Sulfato lagunas y manantiales.*

Muestra	SO <sub>4</sub> <sup>=</sup>
San José de Mombacho (Lago)	32
Manantial Hacienda Cutirre.	30
Vertiente 2. Georgino Andrade	40
Manantial San Juan de Mombacho.	58
Mtal El Limón. C Aguas Agrias.	35
Laguna Verde	31
Laguna El Cacho	31
Manantial Laguna Blanca	113
Manantial La Plazuela II. El SPA	58
Manantial Hacienda La Plazuela.	340
Manantial Termal la Plazuela	371
Nacimiento Rio Manares	30
Hacienda Mecatepe. Mtal Ter.	187
Laguna Juan Tallo	29
Nacimiento Rio Brujo	177

*Tabla 10: Concentración Ión Sulfato en Pozos.*

Muestra	SO <sub>4</sub> <sup>=</sup>
Comarca Santa Julia. P.E.	30
Santa Julia. P.E.	41
San Juan de Mombacho. P.E.	69
El Limonal. P.E.	29
Comarca Aguas Agrias. P. P.	30
Comarca Aguas Agrias. P.E.	389
Comarca Aguas Agrias. P.E.	995
Comarca San Luis de Manares. P.E.	406
San Luis de Manares. P.E.	33
San Luis de Manares. P.E.	83
San Luis de Manares. P.E.	102
San Luis de Manares. P.E.	37

Los resultados obtenidos de las concentraciones del ión sulfato dentro del área de estudio se puede concluir que un 81% de las muestras se encuentran bajo valores que se consideran como admisible, el 19 % restante sobrepasan el valor recomendado los lugares identificados como anómalos fueron los manantiales termales las Plazuelas y dos pozos excavados en el sector de la comarca Aguas Agrias registraron valores anómalos de 389 - 995 mg/l, el recurso agua extraído de estos pozos no se utiliza para consumo humano, cabe mencionar que del total del 19% de las muestras anómalas, solo un pozo excavado ubicado en San Luis de Manares es el único en el cual el recurso agua está siendo utilizado para consumo humano.

➤ Ión Nitrato (NO<sub>3</sub><sup>-</sup>).

Los compuestos nitrogenados presentes en las aguas naturales están íntimamente relacionados con el ciclo del nitrógeno. La mayor parte del nitrógeno aparece en forma gaseosa en la atmósfera (78% en volumen) en forma oxidada constituye una relativamente importante fracción en los suelos y sustancias orgánicas. En las rocas sin embargo sólo se presenta como elemento minoritario.

El ión nitrógeno puede aparecer en forma de NH<sub>3</sub>, NH<sub>4</sub><sup>+</sup> y, por oxidación, estas formas reducidas pueden transformarse en N<sub>2</sub> (gas) y finalmente en ión nitrato

(NO<sub>3</sub><sup>-</sup>) que es la forma más usual y estable en que el nitrógeno se presenta en las aguas subterráneas. Los procesos de oxidación-reducción de las especies nitrogenadas en el agua están influenciados por fenómenos biológicos y, en consecuencia los productos finales dependerán del número y tipo de organismos que intervengan en ellos.

El Ion nitrato (NO<sub>3</sub><sup>-</sup>) puede estar presentes en las aguas subterráneas y aguas superficiales como resultado de la disolución de rocas que los contengan o también por la oxidación bacteriana de materia orgánica. Su concentración en aguas subterráneas no contaminadas varía ampliamente aunque no suele sobrepasar los 10 mg/l.

En el área de estudio, los valores encontrados del Ión Nitrato (NO<sub>3</sub><sup>-</sup>) presentan concentraciones entre 0 - 37.97 mg/l, la presencia de este ión en aguas subterráneas de manantiales y de pozos, podríamos afirmar que posiblemente no es de origen natural, si no probablemente por contaminación antrópica es decir originada por actividades humanas. De acuerdo a la OMS se puede considerar como agua apta para consumo humano, debido a no excede el limite permisible de 45 mg/l.

➤ Ión Calcio (Ca<sup>++</sup>).

El ión calcio dentro de las aguas subterráneas suele ser el catión principal en la mayoría de las aguas naturales debido a su amplia difusión en rocas ígneas, sedimentarias y metamórficas. En rocas ígneas aparece como constituyente esencial de los silicatos, especialmente en el grupo de las plagioclasas. En rocas sedimentarias aparece fundamentalmente en forma de carbonato CaCO<sub>3</sub> (calcita y aragonito), CaMg (CO<sub>3</sub>)<sub>2</sub> (dolomita) o de sulfato CaSO<sub>4</sub>.2H<sub>2</sub>O (yeso) o CaSO<sub>4</sub> (anhidrita).

La concentración de Ca<sup>++</sup> varía ampliamente en las aguas subterráneas de agua dulce con concentraciones entre 10 y 250 mg/l.

Los valores de las concentraciones de iones de Calcio (Ca<sup>++</sup>) dentro del área de estudio, un 78 % de las muestras se encuentran dentro de los valores normales establecidos por las normas, que establece que no debe excederse los 100 mg/l.

**Determinación de la Contaminación Natural por Arsénico en las Aguas Subterráneas del Sector Sur del Volcán Mombacho, Granada - Nicaragua.**

Un 22% de las muestras constituidas por los manantiales termales Mecatepe, los termales ubicados en el sector de Las Plazuelas, dos pozos excavados en el área de Aguas Agrias y un pozo excavado en San Luis de Manares superan el valor máximo admisible. El pozo excavado en San Luis de Mares es actualmente utilizado para consumo humano.

Tabla No. 11 y No. 12, se muestra las concentraciones de ión Calcio de las muestras de aguas analizadas del sector sur del volcán Mombacho.

*Tabla 11: Ión Calcio lagunas y manantiales.*

Muestra	Ca <sup>++</sup>
San José de Mombacho (Lago)	20
Manantial Hacienda Cutirre.	18
Vertiente 2. Georgino Andrade	41
Manantial San Juan de Mombacho	35
Mtal El Limón. C Aguas Agrias.	32
Laguna Verde	21
Laguna El Cacho	23
Manantial Laguna Blanca	98
Manantial La Plazuela II. El SPA	116
Manantial Hacienda La Plazuela.	86
Manantial Termal la Plazuela	125
Nacimiento Rio Manares	42
Hacienda Mecatepe. Mtal Ter.	114
Laguna Juan Tallo	22
Nacimiento Rio Brujo	50

*Tabla 12: Ión Calcio pozos.*

Muestra	Ca <sup>++</sup>
Comarca Santa Julia. P.E.	40
Santa Julia. P.E.	41
San Juan de Mombacho. P.E.	38
El Limonal. P.E.	23
Comarca Aguas Agrias. P. P.	19
Comarca Aguas Agrias. P.E.	139
Comarca Aguas Agrias. P.E.	240
Comarca San Luis de Manares. P.E.	89
San Luis de Manares. P.E.	84
San Luis de Manares. P.E.	97
San Luis de Manares. P.E.	106
San Luis de Manares. P.E.	84

➤ Ión Magnesio (Mg<sup>++</sup>).

El ión magnesio es menos abundante que el ión Ca<sup>++</sup> en las aguas subterráneas y aguas superficiales naturales y procede de la disolución de rocas carbonatadas (dolomías y calizas magnesianas), evaporitas y de la alteración de silicatos ferromagnesianos, así como de agua marina. La solubilidad de la magnesita (MgCO<sub>3</sub>) en las aguas subterráneas naturales es mayor que la de la calcita (CaCO<sub>3</sub>) por lo que en condiciones normales el MgCO<sub>3</sub> no precipita directamente de la disolución de modo que para un período dilatado de tiempo puede producirse cierto grado de sobresaturación respecto a los diferentes carbonatos magnésicos.

**Determinación de la Contaminación Natural por Arsénico en las Aguas Subterráneas del Sector Sur del Volcán Mombacho, Granada - Nicaragua.**

Los procesos de intercambio iónico influyen también en las concentraciones de  $Mg^{++}$  en aguas subterráneas. En ellas el  $Mg^{++}$  es retenido con preferencia al  $Ca^{++}$  en suelos y rocas. En aguas dulces naturales el contenido en ión  $Mg^{++}$  de acuerdo a las normas los valores recomendados para aguas de consumo humano se encuentran entre 30 - 50 mg/l.

Los valores de las concentraciones de iones de Magnesio ( $Mg^{++}$ ) dentro del área de estudio, algunos se encuentran fuera de los valores recomendados por las normas, un total del 18 % superara los 30 mg/l, que es el valor recomendado siendo únicamente la Vertiente 2 Georgino Andrade en donde el recurso agua se utiliza para consumo, Incluso el 19 % de los pozos excavados superan (exceden) en los valores máximos admisibles establecidos en 50 mg/l, actualmente los 4 pozos ubicados en San Luis de Manares son los que se utiliza el recurso agua para consumo humano.

En las Tablas No. 13 y No. 14, se muestra las concentraciones de ión Magnesio de las muestras de aguas analizadas del sector sur del volcán Mombacho.

*Tabla 13: Ión Magnesio lagunas y manantiales.*

Muestra	$Mg^{++}$
San José de Mombacho (Lago)	7
Manantial Hacienda Cutirre.	10
Vertiente 2. Georgino Andrade	36
Manantial San Juan de Mombacho	15
Mtal El Limón. C Aguas Agrias.	16
Laguna Verde	14.50
Laguna El Cacho	15
Manantial Laguna Blanca	26
Manantial La Plazuela II. El SPA	35
Manantial Hacienda La Plazuela.	32
Manantial Termal la Plazuela	38
Nacimiento Rio Manares	19.50
Hacienda Mecatepe. Mtal Ter	36
Laguna Juan Tallo	12
Nacimiento Rio Brujo	16

*Tabla 14: Ión Magnesio pozos.*

Muestra	$Mg^{++}$
Comarca Santa Julia. P.E.	20
Santa Julia. P.E.	22
San Juan de Mombacho. P.E.	20
El Limonal. P.E.	12
Comarca Aguas Agrias. P. P.	11
Comarca Aguas Agrias. P.E.	25.90
Comarca Aguas Agrias. P.E.	90
Comarca San Luis de Manares. P.E.	42.90
San Luis de Manares. P.E.	69
San Luis de Manares. P.E.	130
San Luis de Manares. P.E.	50
San Luis de Manares. P.E.	59

**Determinación de la Contaminación Natural por Arsénico en las Aguas Subterráneas del Sector Sur del Volcán Mombacho, Granada - Nicaragua.**

➤ **Ión Sodio (Na<sup>+</sup>).**

Las sales de iones de Na<sup>+</sup> son altamente solubles y tienden a permanecer en solución ya que no se producen entre ellas reacciones de precipitación pluvial como ocurre en el caso del ion Ca<sup>++</sup>. Sin embargo el ion Na<sup>+</sup> puede ser adsorbido en arcillas de elevada capacidad de cambio catiónico y puede ser intercambiado por ión Ca<sup>++</sup> provocando una disminución de la dureza de las aguas (ablandamiento natural). Las concentraciones de ión Na<sup>++</sup> en aguas naturales subterráneas es muy variable raramente sobrepasa 100 o 150 mg/l en aguas dulces normales.

Los valores de las concentraciones de iones de Sodio (Na<sup>+</sup>) dentro del área de estudio para aguas subterráneas un total del 89% de las muestras, se encuentran dentro de los valores normales establecidos por las normas con valores recomendados de 25 mg/l y que establece que no debe sobrepasar los 200 mg/l, como valores de máximos admisibles. Un 11% de las muestra analizadas que constituyen los manantiales termales superan (exceden) en los valores máximos admisibles establecidos en 200 mg/l, siendo esto probablemente originado por aguas por origen de termalismo.

Tablas No. 15 y No. 16, se muestra las concentraciones de ión Sodio de las muestras de aguas analizadas del sector sur del volcán Mombacho.

*Tabla 15: Ión Sodio pozos.*

Muestra	Na <sup>+</sup>
Comarca Santa Julia. P.E.	42
Santa Julia. P.E.	50
San Juan de Mombacho. P.E.	20
El Limonal. P.E.	26
Comarca Aguas Agrias. P. P.	50
Comarca Aguas Agrias. P.E.	37
Comarca Aguas Agrias. P.E.	67
Comarca San Luis de Manares. P.E.	71.70
San Luis de Manares. P.E.	120
San Luis de Manares. P.E.	173
San Luis de Manares. P.E.	185
San Luis de Manares. P.E.	115

*Tabla 16: Ión Sodio lagunas y manantiales*

Muestra	Na <sup>+</sup>
San José de Mombacho (Lago)	29
Manantial Hacienda Cutirre.	11
Vertiente 2. Georgino Andrade	11
Manantial San Juan de Mombacho.	18
Mtal El Limón. C Aguas Agrias.	26
Laguna Verde	40
Laguna El Cacho	42
Manantial Laguna Blanca	150
Manantial La Plazuela II. El SPA	156
Manantial Hacienda La Plazuela.	218
Manantial Termal la Plazuela	213
Nacimiento Rio Manares	22
Hacienda Mecatepe. Mtal Ter.	235
Laguna Juan Tallo	27
Nacimiento Rio Brujo	36

**Determinación de la Contaminación Natural por Arsénico en las Aguas Subterráneas del Sector Sur del Volcán Mombacho, Granada - Nicaragua.**

➤ **Ión Potasio (K<sup>+</sup>)**

El ión Potasio K<sup>+</sup> procede de la meteorización de feldspatos y ocasionalmente de la solubilización de depósitos de rocas evaporitas en particular de sales tipo silvina (KCl) o carnalita.

El ión potasio tiende a ser fijado irreversiblemente en procesos de formación de arcillas y de adsorción en las superficies de minerales con alta capacidad de intercambio iónico; por ello su concentración en aguas subterráneas naturales es generalmente mucho menor que la del ión Na<sup>+</sup>, a pesar de que su contenido en las rocas es por lo común ligeramente inferior a la del ion Na<sup>+</sup>. En aguas subterráneas y superficiales el contenido ion Potasio (K<sup>+</sup>) no suele sobrepasar 10 mg/l. Cantidades de ion Potasio K<sup>+</sup> por encima de 10 mg/l pueden en ocasiones ser indicio de contaminación por vertidos de aguas residuales.

En la Tabla No. 17 y No. 18, se muestra las concentraciones de iones de potasio de las muestras de aguas analizadas del sector sur del volcán Mombacho.

*Tabla 17: Ión Potasio lagunas y manantiales.*

Muestra	K <sup>+</sup>
San José de Mombacho (Lago)	8
Manantial Hacienda Cutirre.	6
Vertiente 2. Georgino Andrade	7
Manantial San Juan de Mombacho.	8
Mtal El Limón. C Aguas Agrias.	10
Laguna Verde	11
Laguna El Cacho	12
Manantial Laguna Blanca	21
Manantial La Plazuela II. El SPA	19
Manantial Hacienda La Plazuela.	54
Manantial Termal la Plazuela	50
Nacimiento Rio Manares	5
Hacienda Mecatepe. Mtal Ter.	32
Laguna Juan Tallo	9
Nacimiento Rio Brujo	15

*Tabla 18: Ión Potasio pozos.*

Muestra	K <sup>+</sup>
Comarca Santa Julia. P.E.	11
Santa Julia. P.E.	11
San Juan de Mombacho. P.E.	10
El Limonal. P.E.	7
Comarca Aguas Agrias. P. P.	9
Comarca Aguas Agrias. P.E.	114
Comarca Aguas Agrias. P.E.	28
Comarca San Luis de Manares. P.E.	18
San Luis de Manares. P.E.	19
San Luis de Manares. P.E.	24
San Luis de Manares. P.E.	28
San Luis de Manares. P.E.	19

Los valores de las concentraciones de iones de Potasio ( $K^+$ ) dentro del área de estudio de acuerdo a las normas solamente hace referencia en cuanto a los límites de los valores máximos establecidos, no debe sobrepasar en los 10 mg/l.

Un 63 % de las muestras analizadas registraron valores de iones de Potasio con concentraciones anómalas constituidas por los manantiales termales, lagunas y pozos los cuales sobrepasan el valor máximo admisible. Cabe resaltar que los pozos excavados en San Luis de Manares y comarca Santa Julia son los que utilizan el recurso agua para consumo.

#### 4.1.4. Constituyentes minoritarios.

➤ El ión Fluoruro ( $F^-$ ).

Su origen puede estar relacionado con la alteración de rocas plutónicas. Su concentración raramente sobre pasa 2 mg/l. El flúor es esencial para la estructura ósea y dental de los animales superiores y el hombre. En contenidos superiores a 1 mg/l puede ser nocivo mientras que si no está presente o su concentración es íntima pueden producirse caries.

Los valores de las concentraciones de iones de Fluoruro ( $F^-$ ) de aguas subterráneas del área de estudio utilizadas para consumo humano se encuentran dentro de los valores normales establecidos por las normas establecidos, para el ión Fluoruro hasta 1.5 mg/l; sin embargo se registró un pozo excavado en la comunidad Aguas Agrias, el cual presento un valor anómalo de 1.93 mg/l.

➤ Hierro Total.

EL Hierro es un elemento esencial para el metabolismo de animales y plantas. En aguas subterráneas suele encontrarse en forma de  $Fe^{+2}$  aunque puede presentarse como  $Fe^{+3}$ . La concentración de este elemento en el agua está controlada por procesos de equilibrio químico como oxidación-reducción, precipitación y disolución de hidróxidos, carbonatos y sulfuros, formación de complejos especialmente con materia orgánica y también por la actividad metabólica de animales y plantas.

Las concentraciones de iones de Hierro (Fe) en las aguas en algunos manantiales y pozos sobrepasan los valores normales establecidos por las

normas, para ión hierro establecidos hasta 0.1 mg/l. Un total del 44% de las muestras analizadas registró concentraciones anómalas dentro de las cuales se tiene que hacer énfasis que las aguas distribuidas en un pozo perforado y dos pozos excavados están consumiendo por los habitantes de las comunidades de Aguas Agrias, El Limonal y San Luis de Manares.

➤ Boro.

Es un elemento minoritario o traza contenido en turmalinas asociadas a pegmatitas, granitos y en pequeñas cantidades en rocas sub volcánicas como los gabros. Los gases volcánicos pueden producir emanaciones en forma de  $\text{BO}_3\text{H}_3$  y  $\text{F}_3\text{B}$ . Las aguas de fumarolas y áreas que recientemente han presentado actividad volcánica, suelen presentar altos contenidos en boro. Asimismo, el boro es indicativo de la existencia de fallas en profundidad. Las concentraciones varían mucho en función de la geología de la zona y de los vertidos de aguas residuales. Se estima que la concentración de boro en el agua de consumo, en la mayor parte del mundo, es de 0,1 a 0,3 mg/l.

Las concentraciones de Boro en un 74 % de las muestras de aguas analizadas registran valores anómalos que sobre pasan las norma establecías de 0.1 mg/l. Los manantiales termales de las Plazuelas, Ojo de aguas Hacienda Mecatepe registran los valores más altos los cuales oscilan entre 1.82 hasta 3.93 mg/l.

➤ Sílice ( $\text{Si}^+$ ).

El origen de la sílice en el agua subterránea es producto de los procesos de hidrólisis de feldespatos y silicatos. Cuando el pH desciende la sílice precipita, por consiguiente el  $\text{CO}_2$  juega un papel muy importante en éste proceso de solubilización. Las rocas carbonatadas contienen muy poca sílice mientras que las plutónicas y volcánicas que pueden llegar a tener hasta 14 veces más que los carbonatos.

La mayoría de las aguas subterráneas presentan concentraciones entre 1 y 140 mg.l-1 en forma de  $\text{SiO}_2$  pudiendo llegar hasta 1000 mg/l en aguas bicarbonatadas sódicas (Custodio & Llamas, 2001).

Las concentraciones Sílice en un 18% de las muestras analizadas sobrepasan los valores normales establecidos por las normas. Las muestras anómalas se

**Determinación de la Contaminación Natural por Arsénico en las Aguas Subterráneas del Sector Sur del Volcán Mombacho, Granada - Nicaragua.**

ubican en los manantiales termales, se pudo constatar en la mayoría de ellos la precipitación de sílice amorfa en los alrededores del área donde se colectó la muestra.

Tablas No. 19 y No. 20, se muestra las concentraciones constituyentes minoritarias de las muestras de aguas analizadas del sector sur del volcán Mombacho.

*Tabla 19: Constituyentes minoritarios lagunas y manantiales.*

Muestra	F	Fe	SiO <sub>2</sub>	B
San José de Mombacho (Lago)	0.32	1.84	3	0.17
Comarca el Guacal. Mtal Hacienda Cutirre. Cooperativa Francisco Javier Hernández	0.18	0.02	78	0.09
Vertiente 2. Georgino Andrade	0.28	0	35	0.26
Mtal San Juan de Mombacho. (Pozo Comunal)	0.28	0	105	0.17
Mtal El Limón. C Aguas Agrias. Coop. Rommel Carrasquilla.	0.3	6.11	99	0.09
Laguna Verde	0.4	0.37	103	0.43
Laguna El Cacho	0.37	0.72	117	0.35
Manantial Laguna Blanca	0.33	0	128	1.04
Manantial La Plazuela II. El SPA	0.37	0	198	1.82
Manantial Hacienda La Plazuela.	0.4	0	195	1.82
Manantial Termal la Plazuela	0.37	0.2	194	2.16
Nacimiento Rio Manares	0.25	0	109	0.09
Ojo de Agua. Hacienda Mecatepe. Mtal Ter.	0.3	1.07	187	3.93
Laguna Juan Tallo	0.33	0.86	74	0.17
Nacimiento Rio Brujo	1.01	0.3	141	0.23

*Tabla 20: Constituyentes minoritarios pozos.*

Muestras	F	Fe	SiO <sub>2</sub>	B
Comarca Santa Julia. P.E.	0.35	0	127	0.43
Santa Julia. P.E.	0.30	0	123	0.43
San Juan de Mombacho. P.E.	0.24	0	114	0.09
El Limonal. P.E.	0.28	0.79	84	0.17
Comarca Aguas Agrias. P. P.	0.36	0.65	94	0.17
Comarca Aguas Agrias. P.E.	0.24	1.14	94	0.09
Comarca Aguas Agrias. P.E.	1.93	0.86	83	0.35
Comarca San Luis de Manares. P.E.	0.26	0.08	112	0.06
San Luis de Manares. P.E.	0.43	0	65	0.87
San Luis de Manares. P.E.	0.55	0	93	2.16
San Luis de Manares. P.E.	0.33	0.44	139	2.42
San Luis de Manares. P.E.	0.48	0.02	79	0.17

#### 4.1.5. Parámetros fisicoquímicos de las aguas subterráneas.

Las aguas subterráneas naturales como consecuencia de su composición química y de acciones naturales externas presenta una serie de propiedades o características fisicoquímicas: color, turbidez, sabor, temperatura, conductividad eléctrica, dureza, etc.

##### ➤ Temperatura.

Para efectos prácticos, puede considerarse que en los acuíferos existe una "zona neutral", de temperatura constante por encima de la cual la influencia térmica más significativa es la de las variaciones diarias o estacionales de la temperatura ambiente. Por debajo de esta zona el factor preponderante es el "gradiente geotérmico" o variación de la temperatura con la profundidad que en áreas continentales se considera normal cuando es de 3° C / 100 m.

La distribución espacial de temperaturas en un acuífero depende de la conductividad térmica e hidráulica del medio de la relación longitud/profundidad de la cuenca, configuración del nivel freático distribución de la temperatura ambiente respecto a las zonas de recarga y descarga, etc.

En cualquier caso la temperatura de las aguas subterráneas es muy poco variable. Sin embargo éste es un parámetro importante en lo que se refiere al control del quimismo de las aguas en particular cuando entre áreas diferentes del acuífero existen notables diferencias de temperatura que pueden influir en la solubilidad de determinadas sustancias.

Las temperaturas de las aguas subterráneas y de algunos manantiales dentro del área de estudio son similares a las temperaturas ambiente. Excepto algunos sitios (manantiales termales), que presentan valores de temperaturas anómalos que probablemente estén asociados a descargas de un sistema geotérmico de alta entalpia, se registraron valores superiores a los 35° C.

##### ➤ Conductividad Eléctrica.

Como consecuencia de su contenido iónico el agua se hace conductora de la electricidad. A medida que la concentración iónica aumenta también hasta cierto límite la conductividad (C.E.) o capacidad de un agua para conducir la corriente eléctrica. La unidad de medida de conductividad es el  $\mu\text{S}/\text{cm}$  (microsiemens/cm).

La variación de temperatura modifica notablemente la conductividad. Para disoluciones diluidas se estima que el aumento de temperatura en 1° C se traduce en un aumento de alrededor del 2% en la conductividad (Custodio & Llamas, 2001). Los valores de conductividad de las aguas subterráneas naturales varían considerablemente. Valores normales en aguas dulces oscilan entre 100 y 1,000  $\mu\text{S}/\text{cm}$ .

Se encontraron manantiales y pozos con altos valores de conductividad eléctrica, que evidencia la presencia de efectos por termalismo. En los pozos excavados se registraron valores de 1150 hasta 2090  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , en manantiales registramos valores de 503 hasta 2170  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , cabe mencionar que los mayores valores se registraron en los manantiales termales ubicados en la Hacienda Las Plazuelas y Hacienda Mecatepe.

➤ Ion hidrógeno (pH).

El potencial de iones de hidrógeno mejor conocido como pH, en las aguas ya sean éstas, superficiales o subterráneas, siendo los valores para aguas neutras  $\text{pH} = 7$ , para aguas ácidas  $\text{pH} < 7$  y para aguas básicas  $\text{pH} > 7$ . El pH aumenta con el aumento de temperatura hasta en un 8 % por lo que debe referirse a la temperatura de medida in situ. Por regla general el pH de las aguas naturales se mantiene entre 6.5 y 8, aunque excepcionalmente puede variar entre 3 y 11.

El 57% de las muestras de las aguas subterráneas dentro del área de estudio se encuentran dentro de los valores normales establecidos por las normas. El 47 % registró valores de pH, los cuales no cumplen con los valores de pH recomendados para aguas de consumo humano.

➤ Sólidos Totales Disueltos.

Los sólidos totales disueltos es la suma de todos los materiales disueltos en el agua. Los límites admisibles recomendables según las normas recomiendan valores mínimos de 500 mg/l y como valores máximo 1000 mg/l para aguas de consumo Humano. Las concentraciones de sólidos totales disueltos en pozos excavado y perforados en el área de estudio se encuentran en el rango de 248 – 1594 mg/l.

En los manantiales monitoreados los rangos oscilan en 78 – 1,292 mg/l. Ver Tabla 21 y 22.

Los valores más altos se encontraron en los manantiales termales debido a que estas aguas al presentar gradiente térmico anómalo y característica de fluidos de circulación profunda lixivien minerales de las rocas que conforman el acuífero (reservorio); en el área de San Luis de Manares los pozos presentan valores que sobrepasan el valor recomendado y admisible, se puede inferir que estas aguas están siendo afectadas por proceso de mezclas con aguas al estar en contacto con las descargas del sistema geotérmico. Los valores de STD en pozos y manantiales cuyas aguas están siendo utilizadas para el consumo humano los valores se encuentran dentro los establecidos por las normas internacionales y locales.

➤ **Potencial redox.**

El potencial redox es una medida de la actividad de los electrones. Está relacionado con el pH y con el contenido de oxígeno. Es análogo al pH ya que el pH mide la actividad de protones y el potencial redox mide la de los electrones (Custodio & Llamas, 2001). Esta característica se monitoreo solo en 10 sitios, ya que los datos se utilizarían de manera análoga en el análisis de contaminación de arsénico, los valores registrados se encuentran en el rango de 146 mV hasta los 227 mV.

En tabla No. 21 y No. 22, se muestra los parámetros físicos de las aguas subterráneas y superficiales de manantiales y/o de pozos.

*Tabla 21: Parámetros físicos pozos.*

Muestras	Cond. ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ )	T °C	pH	STD
Comarca Santa Julia. P.E.	606	31	6.24	412
Santa Julia. P.E.	597	29	6.50	398
San Juan de Mombacho. P.E.	468	29	5.90	406
El Limonal. P.E.	303	28	6.49	248
Comarca Aguas Agrias. P. P.	426	33	7.20	306
Comarca Aguas Agrias. P.E.	1150	28	7.07	746
Comarca Aguas Agrias. P.E.	1807	28	5.53	1594
Comarca San Luis de Manares. P.E.	1250	32	7.51	920
San Luis de Manares. P.E.	1454	30	6.94	788
San Luis de Manares. P.E.	2090	33	6.94	1158
San Luis de Manares. P.E.	1894	35	6.19	1094
San Luis de Manares. P.E.	1360	30	7.20	726

**Determinación de la Contaminación Natural por Arsénico en las Aguas Subterráneas del Sector Sur del Volcán Mombacho, Granada - Nicaragua.**

*Tabla 22: Parámetros físicos lagunas y manantiales.*

Muestra	Cond. ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ )	T °C	pH	STD
San José de Mombacho (Lago)	320	28	8.1	174
Comarca el Guacucal. Manantial Hacienda Cutirre. Cooperativa Francisco Javier Hernández	204	30	6.8	78
Vertiente 2. Georgino Andrade	606	31	6.02	360
Manantial San Juan de Mombacho. (Pozo Comunal)	503	29	6.38	366
Mtal El Limón. C Aguas Agrias. Coop. Rommel Carrasquilla.	407	29	6.1	260
Laguna Verde	448	31	8.6	288
Laguna El Cacho	474	31	8.5	326
Manantial Laguna Blanca	653	32	6.1	310
Manantial La Plazuela II. El SPA	1481	40	5.9	876
Manantial Hacienda La Plazuela.	1867	56	6.63	1250
Manantial Termal la Plazuela	1560	50	6.5	1080
Nacimiento Rio Manares	523	28	5.99	298
Ojo de Agua. Hacienda Mecatepe. Mtal ter.	2170	50	6.27	1292
Laguna Juan Tallo	346	28	8.59	138
Nacimiento Rio Brujo	635	48	6.4	458

#### 4.2. Representaciones gráficas de calidad de agua de las aguas subterráneas de manantiales y pozos.

Se hicieron representaciones gráficas de los principales iones de la calidad de las aguas superficiales y subterráneas del área de estudio para hacer una caracterización hidroquímica. A continuación se detallan algunos de los gráficos obtenidos.

##### 4.2.1. Diagrama de Piper.

Los diagramas de Piper son una de las gráficas más utilizadas, en él 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).

Está formado por dos triángulos equiláteros, donde se representan los cationes y aniones mayoritarios. Los vértices del triángulo de cationes son  $\text{Ca}^{++}$ ,  $\text{Mg}^{++}$  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 clasificación del carácter hidrogeoquímico o tipo de agua, según la geoquímica o génesis, se ha realizó con la valoración de los iones mayores, o macro elementos presentes en el agua, donde las concentraciones iónicas deben superar el 50% de miliequivalentes por 100, para formar parte del tipo hidrogeoquímico dominante, obtenidas a partir de la representación del Diagrama de Piper.

Figura No. 8 de Piper de aguas subterráneas pozos Mombacho; Figura No. 9 diagramas de Piper de aguas de manantiales del Sector Sur del volcán

## Determinación de la Contaminación Natural por Arsénico en las Aguas Subterráneas del Sector Sur del Volcán Mombacho, Granada - Nicaragua.

Figura 8: Diagrama de Piper de las aguas del sector sur del V. Mombacho (pozos Excavados y Perforados).

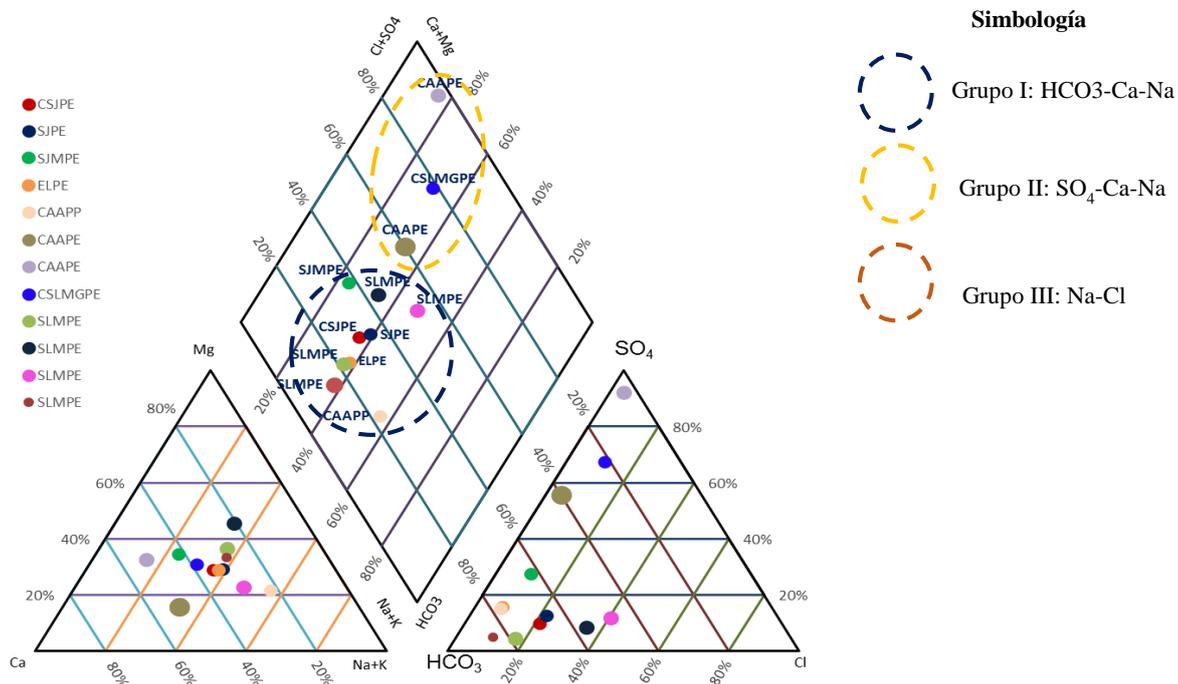
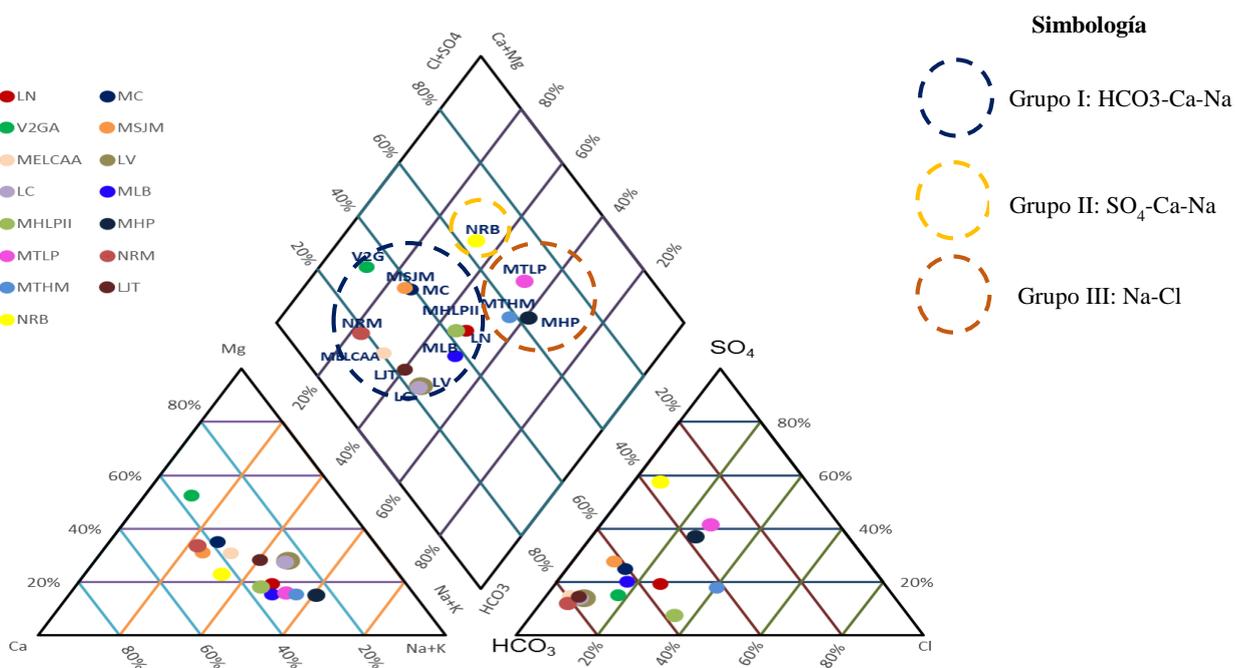


Figura 9: Diagrama de Piper de las aguas del sector sur del V. Mombacho (Manantiales y Lagunas).



En los diagramas de Piper (Figura No. 8 y Figura 9), los tipos de aguas que se identificaron en el sector sur del volcán Mombacho son tres:

El primer grupo constituido por las muestras (Laguna el Cacho, Laguna Verde, Laguna Juan Tallo, Mtal. El Limón C. Aguas Agrias, Nac. Río Manares, Vert .2 Georgino Andrade, Mtal. San José Mombacho, Mtal. Cutirre, Mtal. Hda. Las Plazuelas II, Lago de Nicaragua, Mtal. Laguna Blanca, C. Aguas Agrias PE, San José Mombacho PE [2], San Luis de Manares PE [4], C. San José de Mombacho PE, El Limonal PE, C. Aguas Agrias PP) son aguas predominantemente del tipo bicarbonatadas cálcicas sódicas ( $\text{HCO}_3 - \text{Ca} - \text{Na}$ ) típicas de zonas poca profundidad donde prevalece el anión de bicarbonato y los cationes de calcio y sodio.

El segundo grupo constituido por las muestras (Nac. Río Brujo, C. San José Mombacho Guachipilín PE, C. Aguas Agrias PE [2], se pueden clasificar como aguas sulfatadas cálcicas sódica ( $\text{SO}_4 - \text{Ca} - \text{Na}$ ), donde prevalece los aniones de sulfatos, cationes de calcio y el tercer grupo constituidos por las muestras Mtal. Hda .Las Plazuelas, Mtal. Ter. Hda. Mecatepe Mtal. Hda. Las Plazuelas se pueden clasificar en sodio cloruradas ( $\text{Na} - \text{Cl}$ ).

La naturaleza o génesis de este tipo aguas subterráneas, puede interpretarse para las aguas que son del tipo bicarbonatadas cálcicas sódicas, que son aguas subterráneas que realizan un corto tiempo de tránsito o recorrido desde su área de recarga en la parte topográficamente altas hasta su área de descarga en las costas del lago de Nicaragua, las aguas que son del tipo sulfatadas cálcicas sódicas son de origen por efectos de termalismo, las aguas que son del tipo sodio cloruradas suelen estar relacionadas con procesos de circulación más profunda que las de los otros tipos y corresponde a acuíferos relacionados con las rocas del basamento regional.

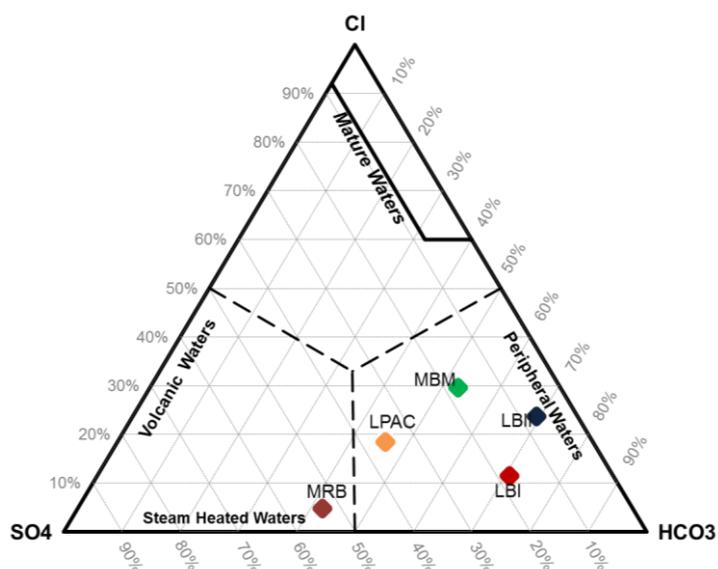
Para el caso de las aguas del tipo bicarbonatadas cálcicas sódicas, el corto tiempo de tránsito en su recorrido dentro del sub suelo, no permite una mayor evolución de la naturaleza geoquímica a través del intercambio catiónico, es decir, un mayor enriquecimiento de los iones predominantes.

#### 4.2.2. Manifestaciones termales.

La mayoría de las técnicas geoquímicas son utilizadas con confianza únicamente en fluidos con un rango composicional limitado. Particularmente la composición de las aguas cloruradas neutras entrega información relevante de las condiciones físico-químicas del reservorio, porque son producto final del equilibrio entre agua y roca

Utilizamos el diagrama ternario Cl-SO<sub>4</sub>-HCO<sub>3</sub> de Gigenbach 1991, el cual permite identificar muchos tipos de aguas termales pueden ser distinguidas: aguas maduras, aguas periféricas, aguas vapor calentado y aguas volcánicas. Este diagrama nos permitió definir la clasificación de la naturaleza de las aguas de las muestras termales Hacienda Las plazuelas, Hacienda Mecatepe y el nacimiento del Rio Brujo (Ver figura 10).

Figura 10: Diagrama ternario Cl-SO<sub>4</sub>-HCO<sub>3</sub> de Gigenbach 1991 (Tcsh).



Según el diagrama ternario, se identificó que las muestras Mtal Laguna Blanca (LBI), Mtal SPA Laguna Blanca (LBII), Las Plazuelas Mtal. Ter. Aguas Calientes (LPAC), Mtal Borbollón Mecatepe (MBM): son aguas periféricas someras de pH ácido a neutro, altos contenidos de HCO<sub>3</sub>. Estas aguas regularmente son manantiales superficiales, en los cuales el gradiente geotérmico anómalo generalmente influye en su temperatura.

## Determinación de la Contaminación Natural por Arsénico en las Aguas Subterráneas del Sector Sur del Volcán Mombacho, Granada - Nicaragua.

La muestra Mtal Río Brujo (MRB): muestran una tendencia a aguas sulfatadas calentadas por vapor. Evidencian por su pH ácido – neutro lo que infiere que se produce una oxidación de  $H_2S$  en estado vapor.

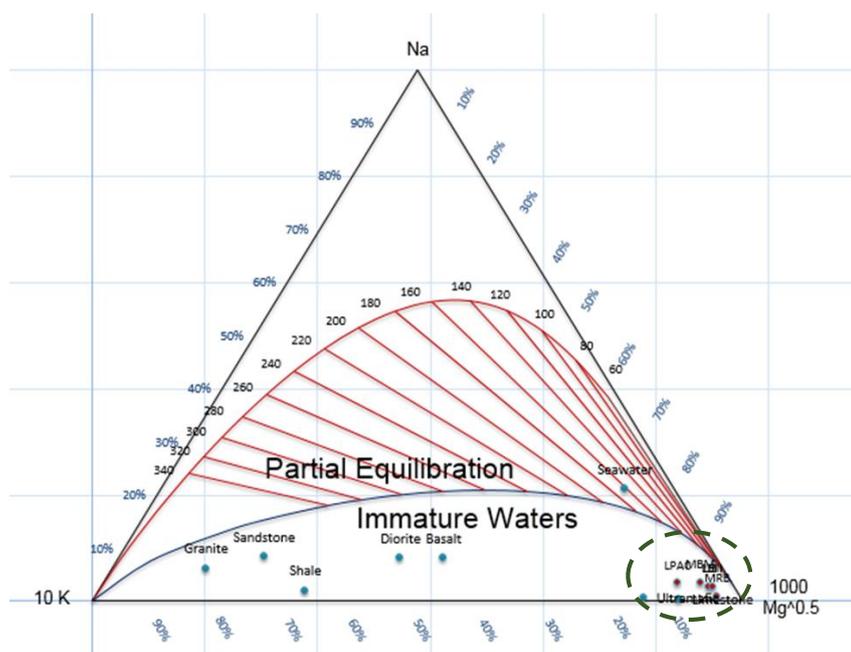
Geotermometría.

Los distintos geotermómetros aplicados a aguas termales sólo son válidos para rangos de composicionales limitados. Por ejemplo: los geotermómetros iónicos son aplicables sólo para aguas con pH neutro y donde el anión principal sea el  $Cl^-$  (Giggebanbach, 1988). Por esta razón, cualquier interpretación de las aguas termales será mejor una clasificación inicial.

Una primera clasificación se realizó usando el diagrama de aniones mayores ( $Cl$ ,  $HCO_3$  y  $SO_4$ ) propuesto por Giggenbach, esta clasificación permitió interpretar los procesos que ha tenido el fluido geotermal en su ascenso y también de proveniencia de éstos.

Ver Figura No 11: Al igual que en el diagrama (Figura 10), las muestras Mtal Laguna Blanca (LBI), Mtal SPA Laguna Blanca (LBII), Las Plazuelas Mtal. Ter. Aguas Calientes (LPAC), Mtal Borbollón Mecatepe (MBM) y Mtal Río Brujo (MRB), se encuentran en la zona de aguas inmaduras, las cuales pertenecen a aguas someras o superficiales.

Figura 11: Diagrama de Na-K-Mg de Gigenbach (Tnkm).

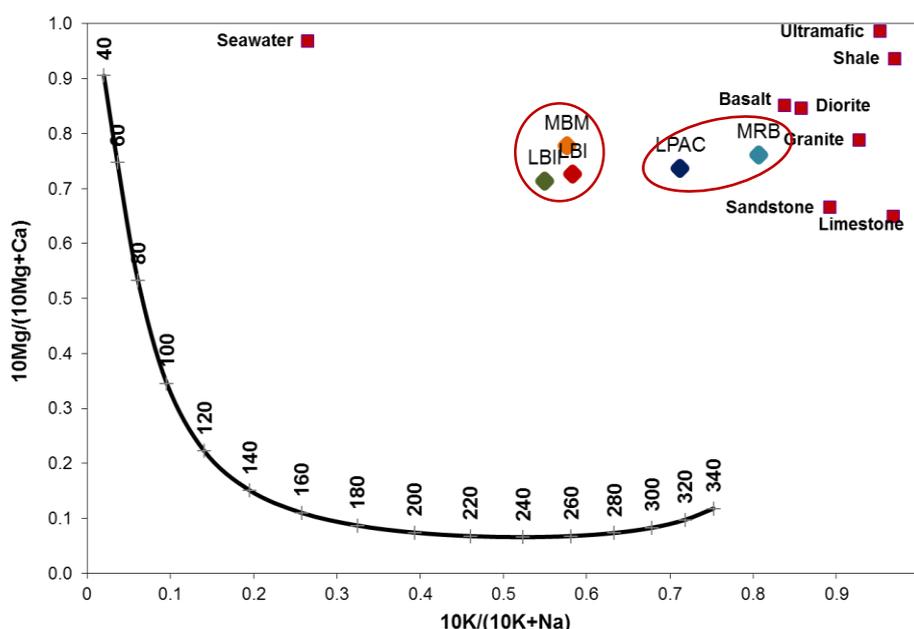


**Determinación de la Contaminación Natural por Arsénico en las Aguas Subterráneas del Sector Sur del Volcán Mombacho, Granada - Nicaragua.**

Debido a que ninguna de las muestras de aguas se acerca a una temperatura de equilibrio, no se utilizó el geotermómetro de Na-K-Mg para estimar una temperatura específica y sólo lo consideraremos para evaluar el equilibrio en el posible reservorio existente.

Las muestras del grupo I: constituidas por Mtal Laguna Blanca (LBI), Mtal SPAII Laguna Blanca (LBII), Mtal Borbollón Mecatepe (MBM), presentan una tendencia a una posible dilución de rocas del tipo basalto, arenisca, calcita etc. Es posible inferir una temperatura en estas muestras en el rango de 240 - 260°C. Las muestras del grupo II: constituidas por Mtal. Ter. Aguas Calientes Las Plazuelas (LPAC), Mtal. Río Brujo (MRB). Es posible inferir una temperatura en estas muestras en el rango de 320 - 340°C, de manera análoga podemos decir que las aguas aun no alcanzan el equilibrio agua – roca.

Figura 12: Diagrama de Na-K / Mg-Ca, Giggenbach y Goguel 1989 (Xmckn).



La temperatura específica calculada del reservorio se empleó haciendo uso de geotermómetros de Na-K de Giggenbach 1988 y Anórsson 1983. Oscilan entre 216° C y 261° C, la cual se podría asumir como la temperatura del posible reservorio geotérmico, también se obtuvieron resultados de temperaturas entre los 310 y 361° C, se deben validarse los resultados obtenidos de la técnica aplicada geotermetría de líquidos usando la técnica de geotermómetros de gases para la validación de los resultados (Tabla No. 23).

**Determinación de la Contaminación Natural por Arsénico en las Aguas Subterráneas del Sector Sur del Volcán Mombacho, Granada - Nicaragua.**

*Tabla 23: Geotermómetros Mtal. Termales.*

Lugar	Geotermómetro Na/K Giggensbach 1988	Geotermómetro Na/K Arnorsson 1983
Laguna Blanca.	261	232
Manantial Las Plazuelas II. El Spa.	249	216
Hacienda Las Plazuelas Manantial termal.	317	310
Ojo de agua. Hacienda Mecatepe Mant. Termal.	258	229
Nacimiento del Rio Brujo.	351	361

#### 4.2.3. Diagramas de Stiff.

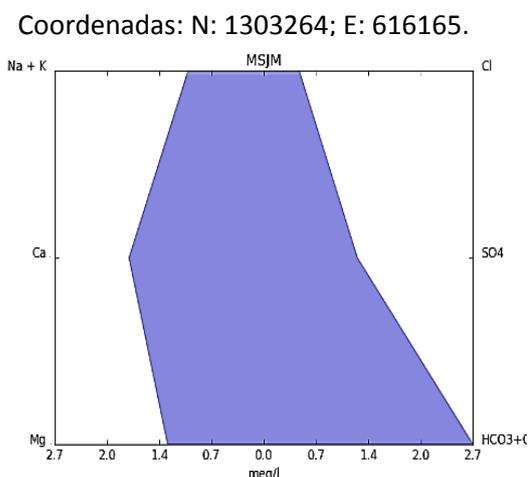
Los diagramas de Stiff son una aplicación muy común para representar la química de los recursos hídricos. En un diagrama de Stiff las concentraciones de los componentes principales representados en miliequivalentes por litro (meq/l) son representados para una muestra. El perfil de los cationes es representado a la izquierda y los aniones a la derecha.

El diagrama permite la comparación rápida de muchos componentes de la calidad del agua entre muchas muestras, mediante la comparación de las formas de los polígonos generados. Las Figuras No.13 hasta No. 24 muestran las representaciones de los diagramas de Stiff de las muestras de aguas de manantiales y de pozos.

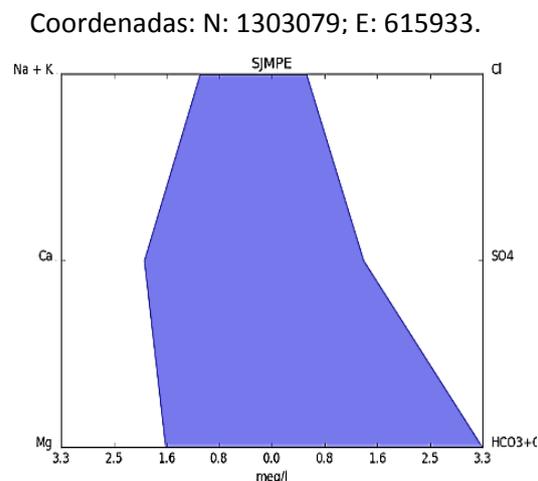
El resultado de los diagramas de Stiff para los lugares (C. San José de Mombacho PE, El Limonal PE, C. Guacucal Mtal. Hda. Cutirre Coop. Francisco Javier Hernández, Laguna El Cacho, Laguna Juan Tallo, Mtal. El Limón C. Aguas Agrias, Mtal. San José de Mombacho, Nac. Río Manares, San José de Mombacho PE), corresponden a una morfología de hexágonos irregulares, existiendo una mayor elongación del lado izquierdo del hexágono, que es representativo de la parte catiónica de los análisis, siendo mayor la mineralización para el ión Calcio ( $\text{Ca}^{++}$ ) y ión Bicarbonato ( $\text{HCO}_3^-$ ). Se pueden clasificar como aguas tipo bicarbonatadas cálcicas (Figura 13 y 14):

**Determinación de la Contaminación Natural por Arsénico en las Aguas Subterráneas del Sector Sur del Volcán Mombacho, Granada - Nicaragua.**

*Figura 13: Diagrama de Stiff del manantial San José de Mombacho.*



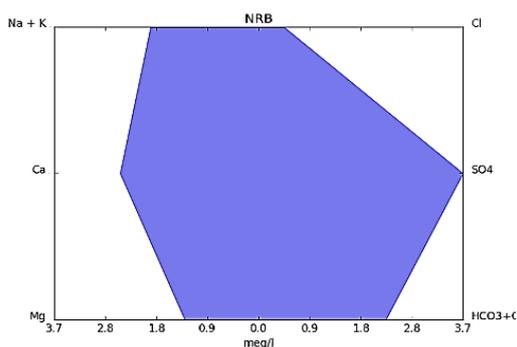
*Figura 14: Diagrama de Stiff pozo excavado San José de Mombacho.*



El resultado de los diagramas de Stiff para los lugares (C. Aguas Agrías PE [2], C. San Luis de Manares Guachipilín PE, Mtal Hda Las Plazuelas, Nac Río Brujo), corresponden a una morfología de hexágonos irregulares, existiendo una mayor elongación del lado izquierdo y derecho del hexágono, que es representativo de la parte catiónica y aniones de los análisis, siendo mayor la mineralización para el ión Calcio ( $\text{Ca}^{++}$ ) y ión Sulfato ( $\text{SO}_4^{2-}$ ). Se pueden clasificar como aguas tipo sulfatadas cálcicas.

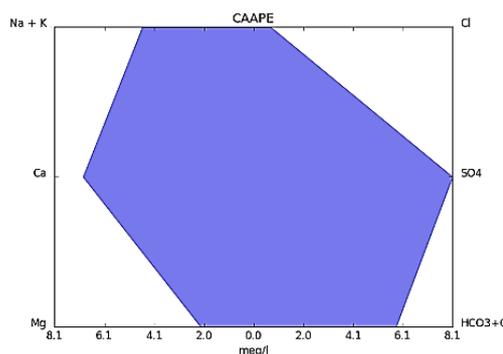
*Figura 15: Diagrama de Stiff del Mtal. Nac. Río Brujo.*

Coordenadas: N: 1307614; E: 612186.



*Figura 16: Diagrama de Stiff pozo excavado comarca Aguas Agrías.*

Coordenadas: N: 1302240; E: 610986.



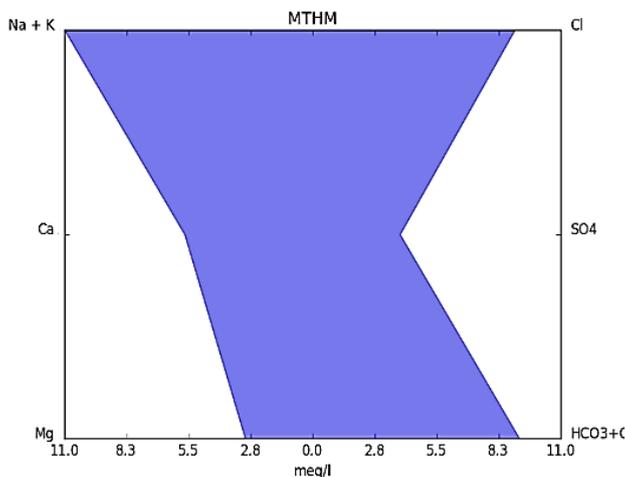
El resultado de los diagramas de Stiff para los lugares (Mtal. Ter. Hda. Mecatepe), corresponden a una morfología de hexágonos irregulares, existiendo una mayor elongación del lado izquierdo y derecho del hexágono, que es representativo de la parte catiónica y aniones de los análisis, siendo mayor la

**Determinación de la Contaminación Natural por Arsénico en las Aguas Subterráneas del Sector Sur del Volcán Mombacho, Granada - Nicaragua.**

mineralización para el ión Sodio ( $\text{Na}^+$ ) y ión Cloruro ( $\text{Cl}^-$ ). Se pueden clasificar como aguas tipo Cloruradas sódicas.

*Figura 17: Diagrama de Stiff Mtal. Termal Hacienda Mecatepe*

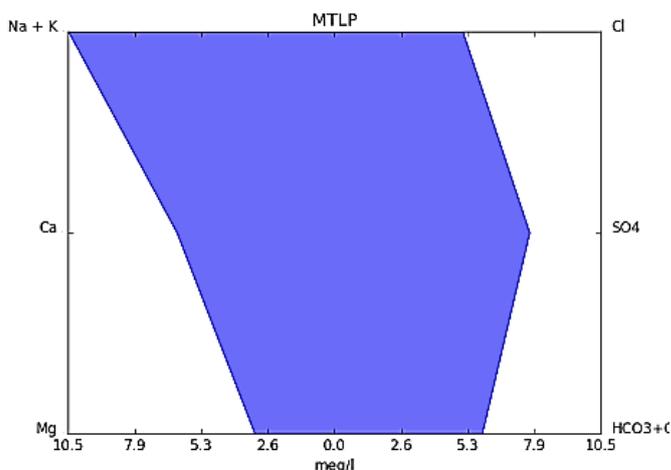
Coordenadas: N: 1301862; E: 615266.



El resultado de los diagramas de Stiff para los lugares (Mat. Ter. Las Plazuelas), corresponden a una morfología de hexágonos irregulares, existiendo una mayor elongación del lado izquierdo y derecho del hexágono, que es representativo de la parte catiónica y aniones de los análisis, siendo mayor la mineralización para el ión Sodio ( $\text{Na}^+$ ) y ión Sulfato ( $\text{SO}_4^{2-}$ ). Se pueden clasificar como aguas tipo Sulfatadas sódicas.

*Figura 18: Diagrama de Stiff del Mtal. Termal Las Plazuelas.*

Coordenadas: N: 1302234; E: 613869.

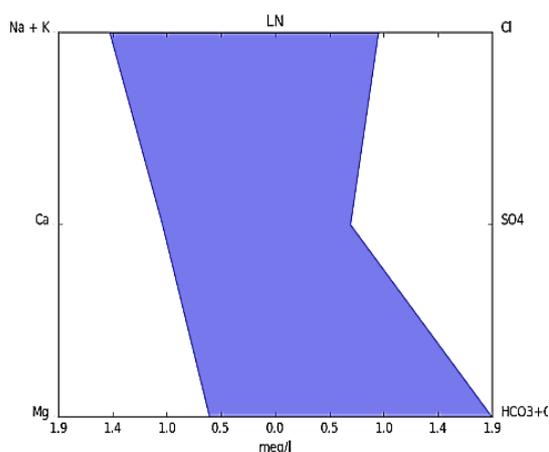


**Determinación de la Contaminación Natural por Arsénico en las Aguas Subterráneas del Sector Sur del Volcán Mombacho, Granada - Nicaragua.**

El resultado de los diagramas de Stiff para los lugares (Lago de Nic, Laguna Verde, Mtal. Laguna Blanca, Comarca Aguas Agrias PP, Laguna el Cacho), corresponden a una morfología de hexágonos irregulares, existiendo una mayor elongación del lado izquierdo y derecho del hexágono, que es representativo de la parte catiónica y aniones de los análisis, siendo mayor la mineralización para el ión Sodio ( $\text{Na}^+$ ) – Potasio ( $\text{K}^+$ ) y ión Bicarbonato ( $\text{HCO}_3^-$ ). Se pueden clasificar como aguas tipo Bicarbonatadas sódicas.

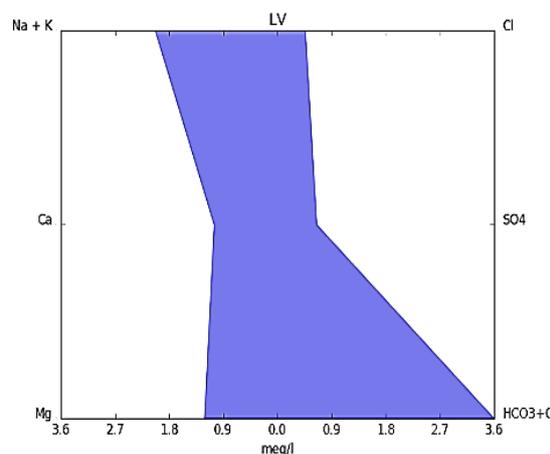
*Figura 19: Diagrama de Stiff Lago de Nicaragua (sector casa de tejas).*

Coordenadas: N: 1303184; E: 620275.



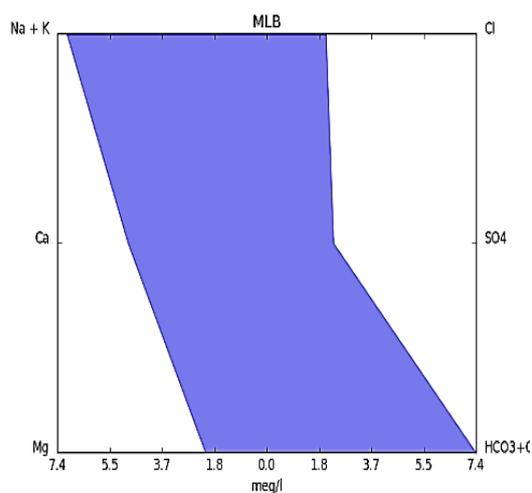
*Figura 20: Diagrama de Stiff Laguna Verde.*

Coordenadas: N: 1300365; E: 612938.



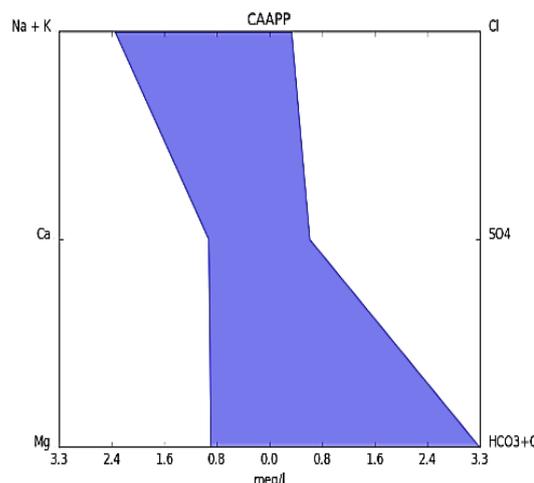
*Figura 21: Diagrama de Stiff del Mtal Termal Laguna Blanca.*

Coordenadas: N: 1301023; E: 613274.



*Figura 22: Diagrama de Stiff pozo perforado Comarca Aguas Agrias.*

Coordenadas: N: 1301640; E: 609791.

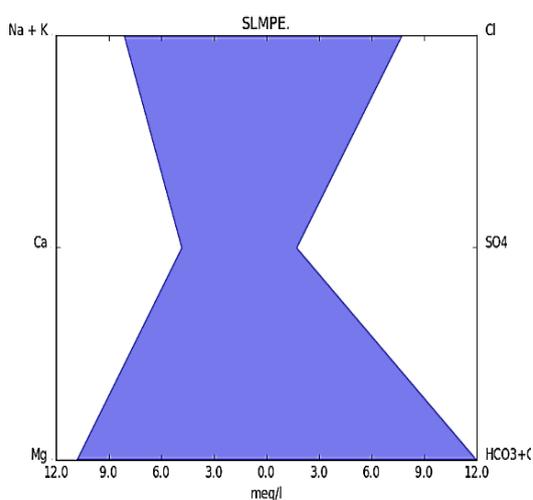


**Determinación de la Contaminación Natural por Arsénico en las Aguas Subterráneas del Sector Sur del Volcán Mombacho, Granada - Nicaragua.**

El resultado de los diagramas de Stiff para los lugares (V2GA, SLMPE), corresponden a una morfología de hexágonos irregulares, existiendo una mayor elongación del lado izquierdo y derecho del hexágono, que es representativo de la parte catiónica y aniones de los análisis, siendo mayor la mineralización para el ión Magnesio ( $Mg^{++}$ ) y ión Bicarbonato ( $HCO_3^-$ ). Se pueden clasificar como aguas tipo Bicarbonatadas magnésicas.

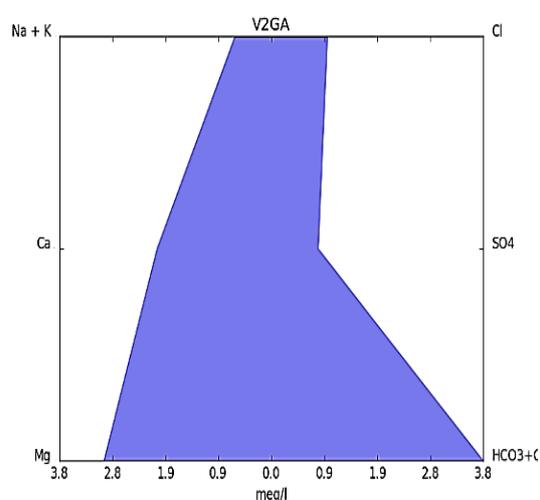
*Figura 23: Diagrama de Stiff pozo excavado San Luis de Manares.*

Coordenadas: N: 1300001; E: 615442.



*Figura 24: Diagrama de Stiff Vertiente 2 Georgino Andrade.*

Coordenadas: N: 1303344; E: 616367.



#### 4.3. Especiación de Arsénico.

Al inicio de este estudio no se estaba claro del origen natural u antropogénico del Arsénico en las aguas del sector Sur del volcán Mombacho, se formuló la hipótesis de que la existencia de un sistema geotermal era la principal fuente, según información de casos estudiados a nivel internacional y algunos locales, se tenían fuertes sospechas que algunos lugares podían presentar altos valores de arsénico por lo que se procedió a determinar los niveles de arsénico en el área del sector sur del volcán Mombacho, y determinar si la existencia de un sistema geotermal es la principal fuente de aporte de manera natural de este metaloide. La premisa para el muestreo de arsénico y otras parámetros era que existe el sistema geotérmico en el área, por lo que procedimos al muestreo de agua subterránea y superficiales del acuífero presente al sur y sector este hacia el Lago de Nicaragua.

En situaciones naturales el Arsénico, se puede encontrar en cuatro estados de oxidación: el estado (-III), el estado metálico (0), y el estado (III) y (V). El Arsénico disuelto en las aguas naturales está principalmente en los estados inorgánicos pentavalente As (V) o trivalente As (III).

El potencial redox (Eh) y el pH son los parámetros más importantes que controlan la especiación del Arsénico, o sea su estado de oxidación. Bajo condiciones oxidantes, las especiaciones pentavalentes As (V) son estables con un pH creciente:  $\text{H}_2\text{AsO}_4^-$  es dominante cuando el pH es menos de 6.9 aproximadamente. Con un pH superior a 6.9,  $\text{HAsO}_4^{2-}$  predomina. En condiciones reductoras, As (V) es reducido en As (III) y las especiaciones trivalentes As (III) predominan.

La distribución de los estados de oxidación del Arsénico en función del pH y del Eh a una temperatura de 25° C y bajo una presión de 1 atmósfera es presentada en el diagrama de Pourbaix.

Los resultados obtenidos de las mediciones en campo, se logró obtener que la especiación de Arsénico está presente en condiciones oxidantes (Eh > 400 mV) con un pH entre 5.9 – 8.3 por lo tanto se identificó que la especie pentavalente es la predominante. El predominio de Arsénico (V) es confirmado efectivamente en el diagrama de Purbaix pH – Eh (Figura No. 25). En los lugares Manantial

Determinación de la Contaminación Natural por Arsénico en las Aguas Subterráneas del Sector Sur del Volcán Mombacho, Granada - Nicaragua.

termal Las Plazuelas El Spa II (MTLP II), Manantial termal Laguna Blanca (MLB), Ojo de agua Hacienda Mecatepe manantial termal (HMMT) y San Luis de Manares pozo excavado (SLMPE) predomina la especie pentavalente  $\text{H}_2\text{AsO}_4^-$ , Mientras que en los lugares Manantial termal Las Plazuelas Aguas Caliente (MTLP), Manantial San José de Mombacho Pozo Comunal (MSJMPC) la especie pentavalente predominante es  $\text{HAsO}_4^{2-}$ .

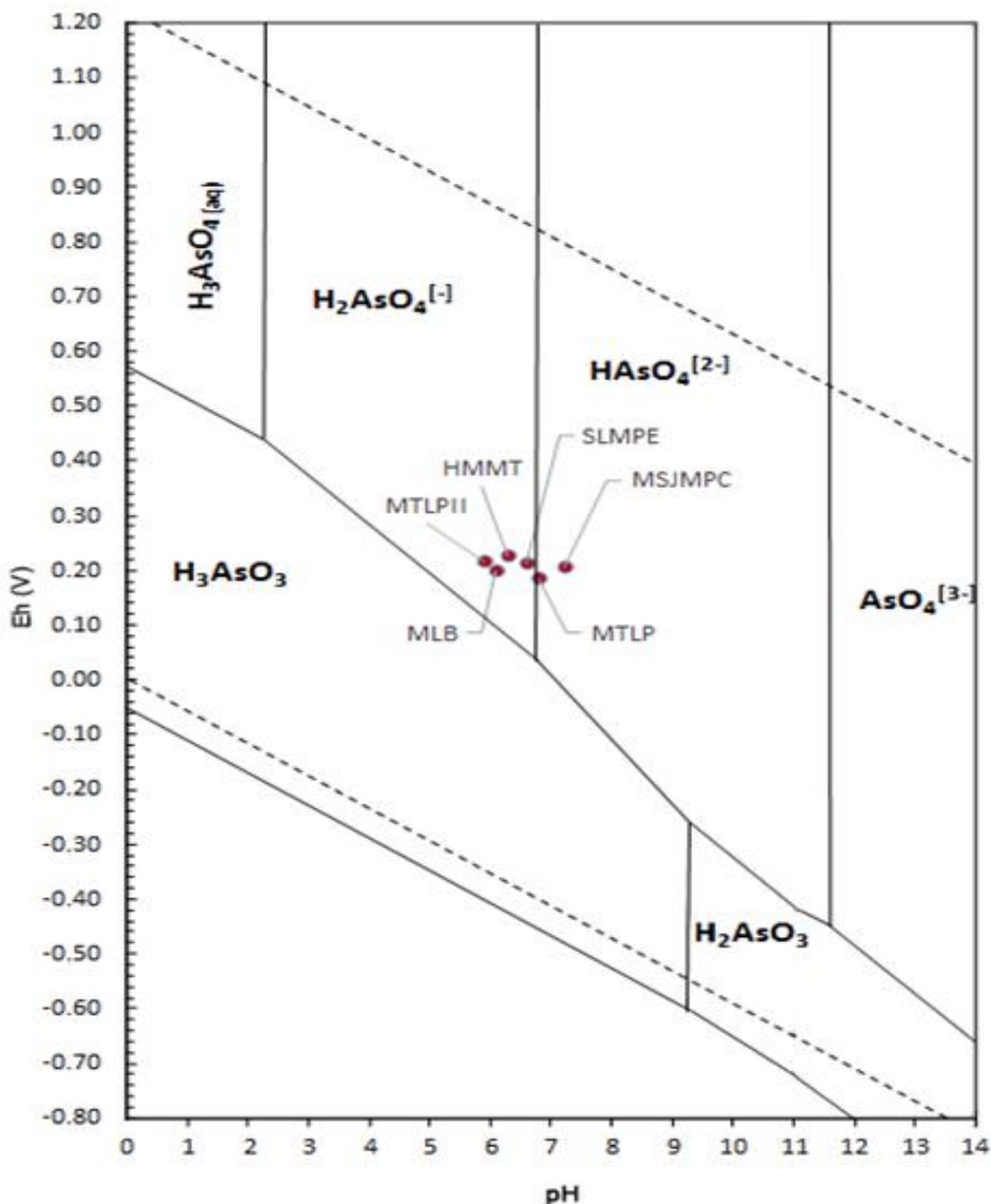


Figura 25: Diagrama de Pourbaix Sector Sur del volcán Mombacho.

**Determinación de la Contaminación Natural por Arsénico en las Aguas Subterráneas del Sector Sur del Volcán Mombacho, Granada - Nicaragua.**

Los lugares que presentan problemas de contaminación de Arsénico (Niveles de Arsénico por encima de la norma de 10 µg/l) son: Los manantiales termales de La Hacienda Las Plazuelas (Laguna Blanca, El Spa II, Termal (aguas calientes), Ojo de agua Mecatepe, las concentraciones se encuentran entre los valores de 20 hasta 94 µg/l, se hizo una observación debido que el área de San Luis de Manares se registró un pozo excavado con un valor de 11 µg/l, este valor anómalo se cree que puede estar influenciado por la zona descarga (outflow) del sistema geotérmico en estudios de prospección geotérmica anteriores la ubican en la zona de Las Plazuelas y Mecatepe. El área de San Luis de Manares está ubicada en el área de periferia de dicha zona de descarga (outflow) por lo que se estarían produciendo procesos de mezclas con las aguas de descarga geotérmicas.

Los lugares conocidos como El Limonal, Comarca Aguas Agrias (Pozo perforado), Lago de Nicaragua (sector Casa de Tejas), San José de Mombacho y Represa Las Colinas (abastecimiento comunal de la comunidad Las Colinas) se registraron valores < 1 – 4 µg/l, los cuales no exceden el límite establecido de 10 µg/l en la normas, se podrían considerar como aptas para el consumo humano.

#### 4.3.1. Relación de arsénico con otros parámetros de importancia.

##### Relación del Arsénico y Temperatura en Celsius.

La temperatura es un parámetro físico de mucha importancia, ya que de ella dependen muchas reacciones químicas. Los valores de temperatura en la zona considerada como zona de descarga del sistema geotermal en el área de estudio se registraron temperaturas en el rangos de 31 a 51°C, los cuales coinciden con las concentraciones anómalas de arsénico. En los restantes puntos monitoreados las temperaturas oscilan en 29 – 33°C, bajo estos rangos de temperatura se registraron valores de arsénico entre <1 – 4 µg/l (Figura No. 26).

Los valores más altos de temperatura se encuentran manantiales de Las Plazuelas (laguna Blanca El SPA II, manantial termal Las Plazuelas (aguas calientes), Hacienda Mecatepe (manantial termal) y represa las colinas. Cabe resaltar que en la represa las colinas es una obra de toma de agua, se registró un valor de temperatura de 40° C, pero la concentración de arsénico registrada fue de <1 µg/l, un punto a resaltar que la toma de agua en el sector de la represa es un punto de convergencia de aguas una con características de manantiales termales los que son afectados por fumarolas activas las que se encuentran en la una de zona de alteración hidrotermal muy fuerte donde registran valores de temperatura de hasta 100° C y un nacimiento de un río se registran temperaturas por el orden de 46.4° C.

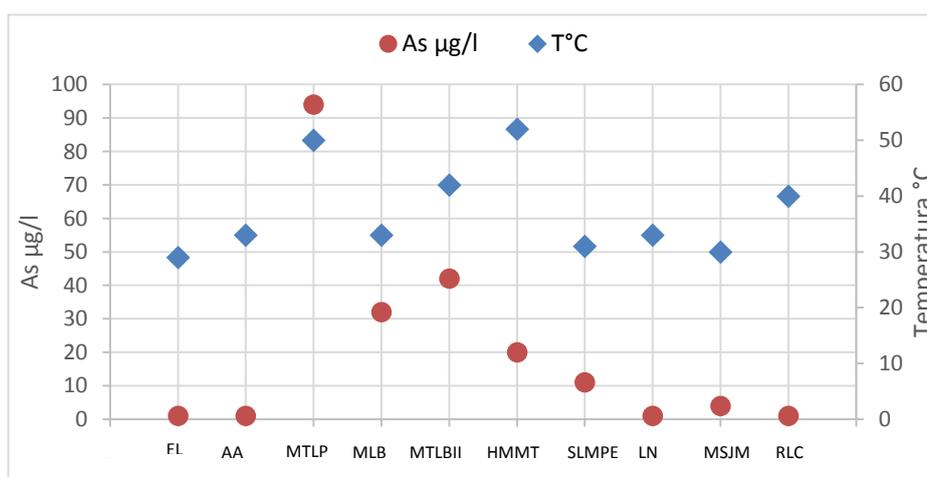


Figura 26: Diagrama de Arsénico vs temperatura.

## Determinación de la Contaminación Natural por Arsénico en las Aguas Subterráneas del Sector Sur del Volcán Mombacho, Granada - Nicaragua.

Se usó la base de datos de análisis fisicoquímicos del área la que fue proporcionada por el laboratorio de Geoquímica de ENEL, lo que permitió elaborar mapa de contornos utilizando la herramienta geo estadística (Kriging), solo del área de descarga (outflow) y sus alrededores, el modelo permitió comparar la distribución de la temperatura y la concentración del metaloide (Arsénico). Ver Anexo No 6.

### Relación del Arsénico y pH.

Los valores de pH en las muestras analizadas oscilan entre 5.9 a 8.3 unidades de pH respectivamente (Figura 27). Se registró el mayor valor de pH en el Lago de Nicaragua siendo 8.3, el valor más bajo de pH 5.9, se identificó en El Manantial Las Plazuelas El SPAII. Los rangos de pH en los manantiales termales oscilan en 5.9 y 6.8 pueden clasificarse como aguas acidas. Siendo estos lugares los que presentan concentraciones mayores al límite establecido de 10  $\mu\text{g/l}$ .

Los valores de pH registrados en los pozos excavado, pozo perforado, represa Las Colinas y el Lago de Nicaragua oscilan entre 6.49 – 8.3 unidades de pH, se pueden clasificar como aguas neutras – acidas. Los valores de Arsénico obtenidos se encuentran por debajo del límite establecido para consumo humano. Cabe resaltar que el pozo excavado ubicado en la comunidad de San Luis de Manares se registró un valor de 11  $\mu\text{g/l}$  con un pH de 7.2, pero como se mencionó anteriormente esa anomalía puede estar relacionada con procesos de mezclas con el acuífero geotérmico y superficial del área (Figura 27).

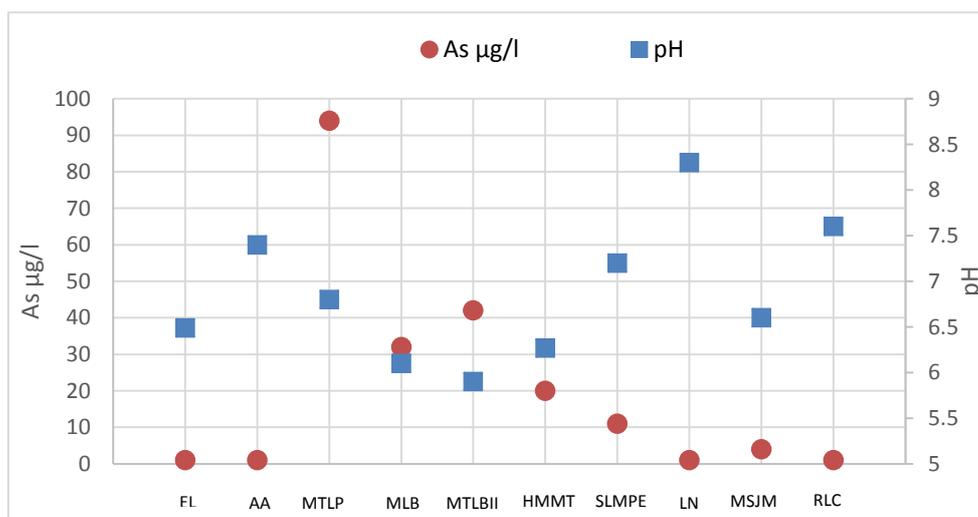


Figura 27: Diagrama de Arsénico vs pH.

## Determinación de la Contaminación Natural por Arsénico en las Aguas Subterráneas del Sector Sur del Volcán Mombacho, Granada - Nicaragua.

Se usó la base de datos de análisis fisicoquímicos del área la que fue proporcionada por el laboratorio de Geoquímica de ENEL, lo que permitió elaborar un mapa de contornos utilizando la herramienta geo estadística (Kriging) solo del área de descarga (outflow) y sus alrededores, el modelo permitió comparar la distribución de ión hidrogeno y la concentración del metaloide (Arsénico). Ver Anexo No 7.

Relación Arsénico y potencial redox.

El Eh es un parámetro que debe determinarse siempre que se pueda en el campo, pequeños cambios en las condiciones ambientales pueden producir cambios en su valor (Custodio & Llamas, 2001).

Los valores de potencial redox en el área de estudio oscilan entre 148 a 227 mV. Valores de Eh entre 185 y 227, fueron registrados en los manantiales termales los coinciden con las concentraciones anómalas de arsénico con valores de 20 a 94  $\mu\text{g/l}$ , cuyos valores sobrepasan la normativa permisible por la normas internacionales de 10  $\mu\text{g/l}$  (Figura 28).

Valores de Eh (mV) registrados en los pozos excavados y perforados, represa Las Colinas y el Lago de Nicaragua oscilaron en 148 – 213 mV, se registraron valores de Arsénico < 1 – 4  $\mu\text{g/l}$ , los cuales se pueden considerar como admisible para el consumo humano.

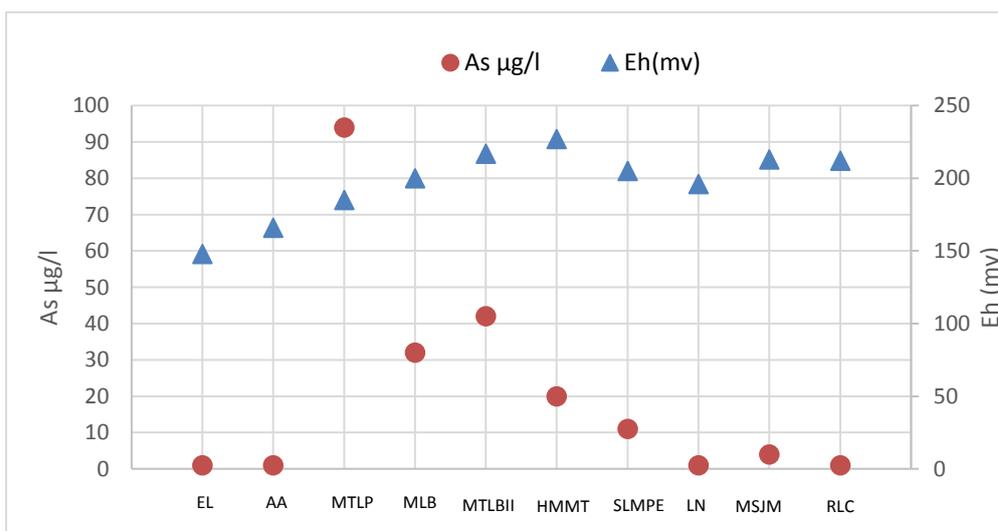


Figura 28: Diagrama de Arsénico vs Potencial Redox (Eh).

### Relación Arsénico y Conductividad eléctrica.

La conductividad de una muestra de agua depende de la presencia de iones y de su concentración total, es también un indicador de la totalidad de sólidos disueltos en el agua.

La representación de los datos de conductividad en función del contenido de Arsénico para las muestras del sector sur del volcán Mombacho (Figura No. 29), el grafico permitió identificar que los valores anómalos de arsénico coinciden con los valores de conductividad eléctrica más altos los que oscilan 653 – 2175  $\mu\text{S}/\text{cm}$ . se pueden inferir que las aguas subterráneas que presentan valores anómalos de arsénico entre 11 – 94  $\mu\text{g}/\text{l}$ , estas son mineralizadas con sustancias que son aportadas por la descargas del sistema geotérmico.

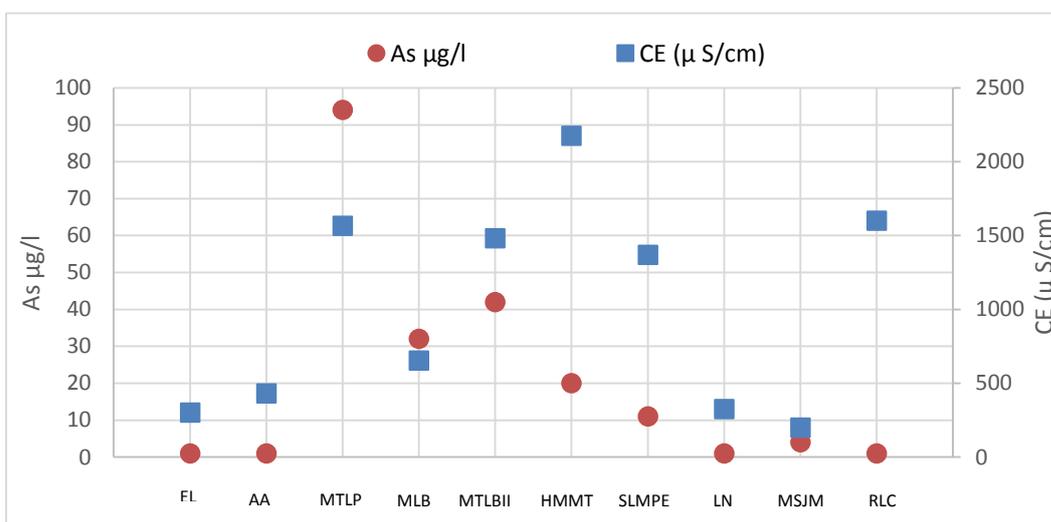


Figura 29: Diagrama de Arsénico vs Conductividad Eléctrica ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ ).

Se usó la base de datos de análisis fisicoquímicos del área la que fue proporcionada por el laboratorio de Geoquímica de ENEL, lo que permitió elaborar mapa de contornos utilizando la herramienta geo estadística (Kriging), solo del área de descarga (outflow) y sus alrededores, el modelo permitió comparar la distribución de la Conductividad Eléctrica y la concentración del metaloide (Arsénico). Ver Anexo No 8.

Relación cloruros (Cl<sup>-</sup>) vs Arsénico (As).

La concentración de Arsénico en los fluidos termales principalmente será dependencia de las fuentes termales en profundidad y la posterior evolución de hidro-química del fluido a lo largo de vía de ascenso a la superficie. El arsénico en los fluidos geotérmicos se deriva principalmente por lixiviación de la roca huésped.

Los resultados (Figura No. 30) se muestran las concentraciones de arsénico con valores de 0.001 hasta 0.094 mg/l, los valores anómalos se presentan en fluidos térmicos (zona de outflow) que se ha identificado en la zona de estudio un total de cuatro muestras de aguas termales exceden los límites de agua potable de las normas internacionales para As (10 µg/l), se registró un pozo excavado en San Luis de manares con una concentración de As de 11 mg/l, eso se podría deber a un proceso de mezclas entre aguas termales y el acuífero subterráneo del área.

La estrecha asociación geotérmica entre Cl y As medida en la concentración se ha confirmado para la mayoría de campos geotérmicos. Por ejemplo, se identificaron las tendencias lineales entre As y Cl en aguas geotérmicas Yellowstone (Stauffer R. y Thompson J, 1984). Según los resultados observados en (Figura No. 30), la concentración de arsénico medida tiende a incrementarse con el aumento de cloruro de manera similar se observó un comportamiento análogo en la gráfica de Temperatura vs Arsénico.

Se usó la base de datos de análisis fisicoquímicos del área la que fue proporcionada por el laboratorio de Geoquímica de ENEL, lo que permitió elaborar mapa de contornos utilizando la herramienta geo estadística (Kriging), solo del área de descarga y sus alrededores, el modelo permitió comparar la distribución de ión Cloruro y la concentración del metaloide (Arsénico). Ver Anexo No 9.

**Determinación de la Contaminación Natural por Arsénico en las Aguas Subterráneas del Sector Sur del Volcán Mombacho, Granada - Nicaragua.**

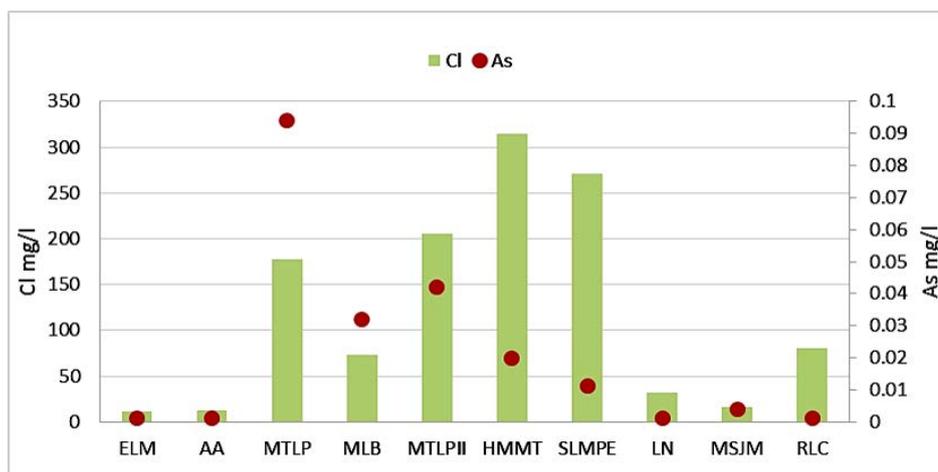


Figura 30: Diagrama Arsénico vs Cloro.

**4.4. Determinación de Arsénico en las aguas subterráneas y superficiales en el sector sur del volcán Mombacho.**

Sobre un total de 10 muestras analizadas, las concentraciones de arsénico registradas en las muestras de agua en pozos excavados, perforado y manantiales termales extraídas del área de estudio (Figura 31), permite observar que en los distintos manantiales termales analizados los valores registrados superan el máximo permitido de 10  $\mu\text{g/l}$ , encontrado los mayores niveles de arsénico en el Manantial termal Las plazuelas con 94  $\mu\text{g/l}$  y Manantial Las Plazuelas II El SPA con 42  $\mu\text{g/l}$ , en la hacienda Las plazuelas se ubicaron un total de 30% de las muestras analizadas presentaron concentraciones superiores a las máximas permitidas. Los valores de la muestra analizada para la zona de Mecatepe tiene un comportamiento similar, los valores medios superan el máximo permitido, registrándose una concentración de 20  $\mu\text{g/l}$ , en el área de comunidad de San Luis de Manares registró un concentración de 11  $\mu\text{g/l}$ , el cual supera el valor admisible para consumo humano.

El 50% restante de las muestras analizadas en el área de estudio los valores encontrados están por el orden de 4 – (<1)  $\mu\text{g/l}$ , lo que se puede considerar como valores aptos para el consumo humano (Figura No. 32), Se presentan los resultados de análisis de arsénico y parámetros de interés en Tabla No.24.

**Determinación de la Contaminación Natural por Arsénico en las Aguas Subterráneas del Sector Sur del Volcán Mombacho, Granada - Nicaragua.**

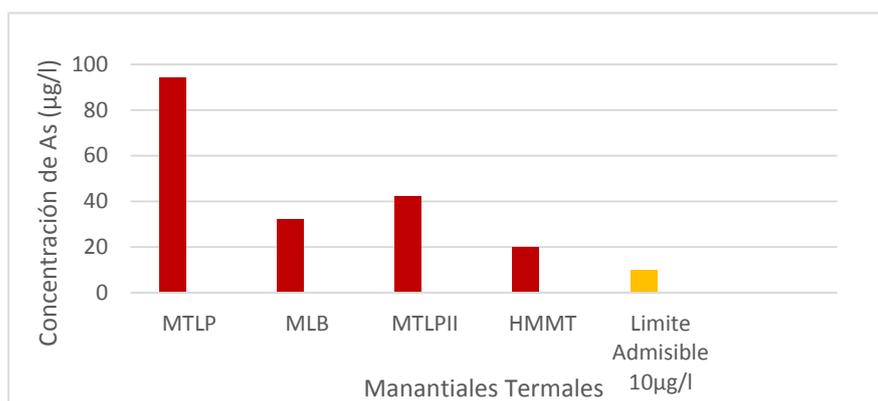


Figura 31: Concentraciones de Arsénico en manantiales del sector sur del volcán Mombacho.

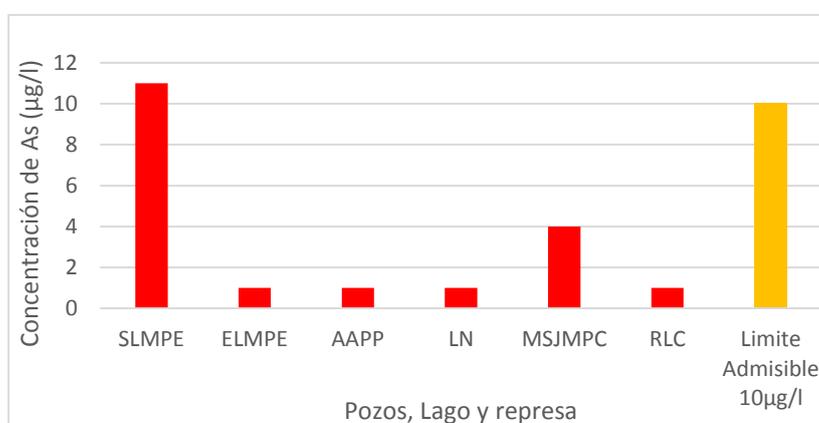


Figura 32: Concentraciones de Arsénico en manantiales del sector sur del volcán Mombacho.

Lugar	Norte	Este	Elvación (msnm)	T°C	Eh(mv)	pH	CE (µS/cm)	As µg/l
El Limonal. PE	1299876	609761	100	29	148	6.49	300	<1
Aguas Agrias. PP	1301640	609791	100	33	166	7.4	430	<1
Mtal. termal Las Plazuelas	1302230	613875	58	50	185	6.8	1565	94
Mtal Laguna Blanca	1301023	613274	68	33	200	6.1	653	32
Mtal Las Plazuelas II EL SPA	1301135	613477	61	42	217	5.9	1481	42
Hacienda Mecatepe. Mtal Termal	1301862	615266	48	52	227	6.27	2175	20
San Luis de Manares. PE	1299718	615671	51	31	205	7.2	1370	11
Lago de Nicaragua	1303458	620455	38	33	196	8.3	325	<1
Mtal. San Juan del Mombacho. PC	1303264	616165	72	30	213	6.6	200	4
Represa Las Colinas	1307578	612183	730	40	212	7.6	1600	<1

Tabla 24: Resultados de análisis de Arsénico y parámetros de interés.

#### 4.5. Geología Local.

Como parte de la investigación realizamos un reconocimiento geológico del área con una extensión de 90 km<sup>2</sup>. Utilizamos como información base la expuesta en la tesina de grado presentada por Pilato M., 2004. Se realizó la interpretación en base a ortofotomapas, fisiografía del mapa topográfico y geomorfología, permitiendo generar un mapa base del área, posteriormente llevamos a cabo un levantamiento de campo de la estratigrafía y tectónica local del sector.

El volcán Mombacho está dentro del segmento volcánico SE de la cadena volcánica del pacífico, y es un estrato volcán caracterizado por la actividad de tipo básica y efusiva con predominio de secuencias volcánicas (coladas de lavas y depósitos piroclásticos tipo escorias y cenizas) seguidas por depósitos recientes (deluviales, coluviales y aluviales).

Los depósitos de lavas ocupan una buena parte de sus pendientes, así como la parte superior de este coloso. Algunas fracturas se presentan radiales a las estructuras circulares, y conos adventicios que depositaron materiales piroclásticos.

El periodo de actividad del volcán Mombacho esta datado en edad Cuaternario al Reciente (Hradecký., 1998), y según el único dato histórico encontrado estuvo en actividad en el año 1570, encontrándose todavía en la fase fumarólica.

Según levantamientos de columnas Litoestratigráficas locales realizadas en la zona llana al SO del área se observaron depósitos de pómez correlacionables con las pómez definidas en el trabajo de Hradecký (1998).

La delimitación y el trazado de las diferentes litologías están definidas en una secuencia Litoestratigráficas caracterizada en tres unidades desde la más antigua hasta la más reciente.

Unidad depósitos piroclásticos.

Se ubican en la parte NE del área. Estos depósitos alcanzan un espesor de 25 m. Se identificaron: aglomerados y tobas aglomeráticas de bloques y cenizas gruesas. En las orillas del Lago se distinguen los cráteres de explosión Charco Muerto y El Zancudiento y al oeste una estructura semicircular Laguna de Pichicha.

Cráter de explosión Laguna de Pichincha, se encuentra bordeado por depósitos de aglomerados, del tamaño de grano grueso que pasan hasta brechas y bloques conteniendo fragmentos angulares y subangulares de basalto.

Unidad Mombacho.

En esta unidad se enmarcan los productos propios del estrato volcán, y por ende constituyen la mayoría de rocas que lo conforman, ocupa la mayor parte de sus pendientes incluyendo la cima del volcán Mombacho. Los flujos lávicos están bien definidos y se logra observar superposición en los estratos lo que indica que este volcán tuvo más de una erupción. Estos depósitos también se encuentran en las paredes del cráter en herradura del flanco sur del Mombacho así como también los depósitos piroclásticos cubren parte de las pendientes, abarcando también las áreas menos altitud.

a. Lava basáltica escoréacea (Qvle).

Está caracterizada por flujos de lavas escoréaceas del tipo basáltico olivínico que bajan por la pendiente del SO del volcán y subyacen tanto a lavas basálticas en bloques, como a la lava basáltica fisural ubicadas en la misma dirección extendiéndose en un área de 2.4 km<sup>2</sup> con un espesor promedio de 7 m.

La roca posee textura vesicular, lo que indica viscosidad moderada y rica en volátiles, con bastantes plagioclasas y olivinos. La coloración varía desde negro en la parte más fresca hasta gris oscuro en la más meteorizada, aunque los óxidos de hierro le dan muchas veces una coloración roja.

Acompañados de escorias gris oscuro, que se intercalan entre cada evento efusivo de los flujos lávicos individuales y que en algunos lugares es sustituida por toba lapillica amarilla, afloran en las paredes de los cráteres de la cumbre del volcán.

b. Lava basáltica en bloques (Qvlb).

Está representada por flujos lávicos de diferentes eventos efusivos, que fueron depositados, y que al enfriarse adoptaron una disposición en bloques. Estas lavas se extienden en un área total de 2.42 km<sup>2</sup> aproximadamente, y adoptan el patrón de la topografía preexistente. Estos ocupan todo el flanco SE y en menor proporción el flanco SO del volcán.

Los flujos de lava en bloques del flanco SO del volcán con un espesor de 30 m, sobreyacen a las lavas escoriaáceas, y se extienden por un área de 2.3 km<sup>2</sup> con dirección SO a partir del cráter del noroeste, siendo el flujo más largo de 3 km de longitud y ancho máximo 900 m.

c. Lavas andesita basáltica. Qv1a.

Compuesta por flujos de lava andesita basáltica. Está localizado al E del área de estudio y al SE del volcán. Presenta una extensión aproximadamente 15.6 km<sup>2</sup>, y se encuentra coincidiendo con los cerros poco escarpados en el sector de Casa de Tejas, presentados como lomos de obstrucción. En algunos casos se identificaron bloques de 0.5 – 2 m, presentan textura afanítica – fanerítica, presenta un grado de alteración moderada.

Material de caída.

Representada por material de caída tipo escorias y tobas de cenizas, que afloran al oeste y suroeste del área en estudio, cubriendo un área total de 4.5 km<sup>2</sup>.

Están compuestos por depósitos de tobas de cenizas, que se encuentran al suroeste, cubren un área de 13 km<sup>2</sup>. Los espesores de estos depósitos varían hasta 13 cm y se extienden hasta la Ciudad de Nandaime y sus alrededores, la toba aflora sobre suelos Holocénicos que están bien definidos en la parte circundante del área de estudio. Según Hradecký (1998) las tobas son de composición andesítica y dacítica.

Unidad depósitos recientes.

Los materiales de esta unidad forman parte de los depósitos más recientes, producidos por la acción geodinámica externa (meteorización, erosión, transporte y depositación) sobre los productos volcánicos en zonas topográficamente más altas. Cubre un área total de aproximadamente 41 km<sup>2</sup> con un espesor promedio de 10 m. Y según la morfología y el tipo de material encontrado se ha dividido en tres sub-unidades descritas a continuación:

a. Depósito Aluvial (Qal).

Estos materiales están depositados a lo largo de los cauces y sus orillas, y en zonas de abanicos aluviales, los cauces cortan a la geomorfología de campo de escorias y peniplanicie.

Estos depósitos cubren un área aproximadamente de 19 km<sup>2</sup> y con espesores de hasta 6 m. Corresponde a la parte superficial de la secuencia estratigráfica están constituidos por sedimentos finos recientes, y rodados de rocas de diferentes tamaños. Estos sedimentos fueron producto de la meteorización y erosionados de los productos volcánicos situados a sus alrededores.

b. Depósito de avalancha (Qvda)

Está representado principalmente por material epiclástico, formados a partir del colapso del flanco sur del Mombacho, en el área bajo estudio representan un depósito 34 km<sup>2</sup> aproximadamente. El rasgo más típico es la presencia de varios montículos en la superficie distribuidos a lo largo de todo el trayecto de la avalancha principalmente en la zona plana, con pequeñas lagunas entre estos, alcanzando dimensiones hasta de 170x30 m.

Dentro del material arrastrado, se presentan bloques subangulares de 4 m, dentro de una matriz de disposición caótica. También decrece el tamaño de los megabloques y aumenta el material fino con la distancia.

#### 4.6 Geología Estructural.

Las estructuras como fallas y fracturas no pudieron ser comprobadas en campo (por excesiva vegetación o por no tener una expresión morfológica visible a la escala de campo). Se infirieron sistemas de fallas con dirección preferenciales NE, NW, N-S; las cuales se trazaron en el mapa geológico como líneas continuas. Siendo las estructuras ubicada en el sector NE, se infiere la circulación de fluidos de alta temperatura.

A consecuencia de eso, es posible que estructuras importantes como depresiones volcano tectónica no tengan ninguna expresión en superficie. A pesar de estas limitaciones, con la ayuda de las herramientas antes mencionada se lograron identificar diferentes estructuras tales como:

Falla Comprobada: se ubica en el extremo E del área de estudio denominada falla del Rio Brujo. Con una dirección preferencial de 10°NE.

Lineamientos Fotogeológicos: se localizan en el extremo SW y NE con dirección preferencial hacia el NE entre 30° y 57°. Y otros en dirección N-S en la parte N del área de investigación. Sistema de fracturas con dirección N – S, se ubican en sector de la Laguna Pichicha en la parte sureste del volcán.

Estructura semicirculares: estas estructuras corresponden a los sitios denominados Laguna La Pichicha, Charco Muerto y El Zancudiento. La Laguna La Pichicha tiene una apariencia circular con un diámetro de 700 m de largo y 500 m de ancho.

Estructura semicircular del el Zancudiento y Charco Muerto parte de su morfología ha sido afectada producto de la erosión lacustre se infiere diámetros aproximados de 800m y 1600 m respectivamente. En esta área se identificaron diversos indicadores cinemáticos como zonas de relevo, fracturas, estructuras conjugadas y sigmoides característicos los que están afectando los depósitos piroclásticos de composición basáltica

Lineamiento fotogeológico con dirección NE-SW, los rasgos estructurales que permiten identificarlo es el alineamiento de las lagunas Laguna Juan Tallo, Laguna Verde, Laguna Blanca y manantiales termales.

Avalancha de escombros: fue producto de la geodinámica externa lo que permitió este escenario típico en zonas volcánicas. Dentro del área de investigación se cubrió un total de 34 km<sup>2</sup> aproximadamente un 35% del área estudiada. Ver anexo No 5. Mapa geológico Sector sur del Volcán Mombacho

**Manifestaciones Geotérmicas.**

De acuerdo a los registros históricos y el trabajo de campo realizado se identificaron manifestaciones termales en el área Sureste en el lugar conocido La reserva Lagunas de Mecatepe y el Pancasan (Hda El Cráter).

En el cráter de volcán están representada por zonas fumarólicas siendo las más importantes las ubicadas en la parte sur llamada Pancasan – El Cráter, se realizaron mediciones de temperatura obteniendo valores de 94.8 – 100°C. En zonas de descarga de vapor registramos valores de hasta 150°C, producto de la

**Determinación de la Contaminación Natural por Arsénico en las Aguas Subterráneas del Sector Sur del Volcán Mombacho, Granada - Nicaragua.**

circulación de los fluidos de alta temperatura ha originado un amplia zona de alteración, las rocas presentan un alto grado de alteración pervasiva hace difícil identificar o definir el tipo de roca original algunas están alteradas a arcillas, también se observó depósitos de sulfatos y azufre nativo en el área.

Al SE están representado por una serie de manantiales que coinciden con un alineamiento de dirección NE – SW, siendo los más representativos los ubicados en el área de Laguna Blanca, se registró en el rango de los 32 – 50° C, se observaron depósitos de carbonatos de calcio y sílice. En el área conocida como Mecatepe se registraron temperaturas de 45°C, se observaron depósitos de carbonatos de calcio y sílice amorfa.

Ver anexos No 10. Fichas de campo sector sur del Volcán Mombacho.

## 5. Conclusiones.

Dentro de las 27 muestras analizadas provienen: 1 de pozo perforado, 1 represa comunal, 11 de manantiales, 11 de pozos excavados, 2 Lagunas y 1 muestras del Lago de Nicaragua (Sector Casa de Tejas). Las 37 muestras se distribuyeron en un total de 10 comunidades que conforman el área bajo estudio.

Los parámetros fisicoquímicos evaluados fueron: pH, conductividad, temperatura, potencial redox, sólidos totales disueltos, bicarbonatos, calcio, magnesio, sodio, potasio, litio, hierro total, sulfatos, sílice, boro, cloruros, fosfatos, ácido sulfhídrico, flúor, nitratos y arsénico.

Al cotejar los resultados de las 37 muestras con la Norma CAPRE, Norma OMS y NTON 09003-99, y considerando aquellos parámetros que tienen mayor significado como indicadores de contaminación concluimos lo siguiente:

Se identificaron tres grupos de aguas los cuales fueron: bicarbonatadas cálcicas sódicas, lo que infiere que estas aguas están relacionadas con acuíferos superficiales; aguas sulfatadas cálcicas sódicas, este tipo de agua está posiblemente asociado a procesos de oxidación de sulfuros o se asocian a agua calentadas por vapor y aguas sodio cloruras las cuales son típicas de sistemas geotérmicos profundos.

Los resultados obtenidos del análisis de las muestras de los manantiales fríos y calientes, indican que las aguas provenientes de manantiales termales no son aptas para el consumo humano debido a que sobre pasan los valores permisibles establecidos por las normas antes mencionas.

Los pozos excavados en sector de San Luis de Manares presentan concentraciones anómalas de los parámetros fisicoquímicos, esto puede ser posible a procesos de mezclas que posiblemente se estén desarrollandopor la cercanía del área con la zona de descarga (outflow) del sistema geotermal.

El recurso agua que se distribuyen por medio de los centros de abastecimiento comunal (CAPS) ubicados en el sector sur del volcán Mombacho son aptos para el consumo humano, eso se pudo verificar al hacer el estudio a detalle de los resultados fisicoquímicos obtenidos.

**Determinación de la Contaminación Natural por Arsénico en las Aguas Subterráneas del Sector Sur del Volcán Mombacho, Granada - Nicaragua.**

De acuerdo a los valores de pH y Eh medidos in situ y usando el diagrama de Eh - pH, el arsénico se encuentra como arsenatos con un estado de oxidación (V); En el 60 % de las muestras de aguas representadas por 4 manantiales termales, 1 pozo pozos excavado, según los resultados obtenidos en el diagrama de Pourbaix, no se encontró la especie de arsénico como arsenito (III), siendo esto de gran importancia, ya que esta especie del arsénico más tóxica y móvil.

Los resultados de los análisis químicos para determinación de arsénico permitió la comprobación de nuestra hipótesis, las mayores concentraciones de arsénico encontrados en el área de sector sur del volcán Mombacho, se encuentran en la zona descarga (outflow) del sistema geotérmico, siendo el manantial termal Las Plazuelas (aguas calientes), el que se registró un valor de 94 µg/l. Se logró comprobar que los manantiales que están siendo influenciados por procesos de termalismo exceden el valor de las normas establecidas de 10 µg/l.

Las aguas que están siendo consumidas por la población del sector sur presentan concentraciones de arsénico, las que están muy por debajo del valor establecido por las normas internacionales y nacionales. Un resultado que puede considerarse anómalo se ubica en el sector de San Luis de Manares, en un pozo excavado registró una concentración de 11 µg/l, este resultado al igual que los análisis fisicoquímicos nos pueden indicar que el área antes mencionada posiblemente se estén desarrollando procesos de mezclas entre el acuífero y la zona de descarga (outflow) del sistema geotérmico.

En términos generales, podemos concluir que al cotejar los resultados fisicoquímicos con las normas O.M.S., Norma CAPRE y NTON 09003 – 99, la calidad de aguas subterráneas del área de estudio algunas son óptima y apta para consumo humano (potable), pero los manantiales termales y algunos pozos excavados en el sector de la comarca Aguas Agrias, no son óptimos para consumo humano y evidencia la presencia de termalismo.

## **6. Recomendaciones.**

De acuerdo a los resultados obtenidos se recomienda la ampliación de las redes de distribución de agua potable hacia sectores que no poseen el recuso. En la presente investigación no se realizaron análisis microbiológicos por lo que se considera un insumo muy importante para determinar el índice de calidad de agua se recomienda realizar dicho análisis a los CAPS existentes en el área.

Realizar monitoreo permanente en la comunidad San Luis de Manares para determinar certeramente que la población no se encuentra en riesgo por el consumo de arsénico.

Instruir a la población por parte de las autoridades correspondiente: MINSA, ENACAL y Alcaldía Municipal, sobre las mejores prácticas del uso del recurso agua, selección y ubicación para la perforación de pozos y de su extracción.

Realizar un estudio hidrogeológico en el área que permitan determinar las variables hidráulicas del manto de agua, permitiendo definirse también la dirección del flujo subterráneo, las áreas de mayor aptitud para la captación, etc. De ese modo asegurar la sustentabilidad del acuífero, tanto en rendimiento como en calidad del recurso.

## 7. BIBLIOGRAFÍA.

**Avellán, D., 2004.** Estudio Geológico de la parte Norte del Volcán Mombacho y las Isletas de Granada. Tesis de Grado. Universidad Nacional Autónoma de Nicaragua – Unan - Managua.

**Altamirano, M., 2005.** Distribución de la contaminación natural por arsénico en las aguas subterráneas de la sub - cuenca suroeste del Valle de Sébaco, Matagalpa – Nicaragua”. Tesis de Maestría, Centro para la Investigación en Recursos Acuáticos de Nicaragua (CIRA / UNAN).

**Alsina C, M., 2013.** Arsénico en el Campo Geotérmico de El Tatio: Especiación en Sínteres y Comunidades Microbianas. Tesis Doctoral. Pontificia Universidad Católica de Chile. U Chile.

**Atwood, J. 1984.** A floristic Study of Volcano Mombacho department of Granada, Nicaragua. MISSOURI BOTANICAL GARDEN. 14 pp.

**Bunduschuh, J. & Alvarado, G.E., (2007).** “Central America: geology, resources, and hazards. Vol. 1”, London, Taylor & Francis, (eds.) p. 663.

**Barragne, P., 2004.** Contribución al estudio de cinco zonas contaminadas naturalmente por arsénico en Nicaragua. UNICEF, Managua, Nicaragua.

**CAPRE, 1994.** (Comité Coordinador regional de Instituciones de agua potable y Saneamiento de Centroamérica, Panamá y República Dominicana). Normas de Calidad de Agua para Consumo Humano. Primera edición. San José Costa Rica 23 paginas.

**Castro, M., 2006.** Presencia de arsénico en el agua de bebida en América Latina y su efecto en la salud pública. Congreso.

**Comisión Nacional de Energía., 2001.** “Plan Maestro Geotérmico de Nicaragua” Volumen X Evaluación del área de Masaya – Granada – Nandaime. 222 páginas.

**Custodio, E. y Llamas, R., 2001.** Hidrológica Subterránea. Segunda Edición, tomo I y II. Ediciones Omega, S.A. Barcelona, España. 2100 p. 2 tomos). Omega, 2350 pp.

**Cullen, W.R., Reimer, K.J., 1989.** Arsenic speciation in the environment. *Chem. Rev.*, 89,713 -764.

**Denyer, P., (2008).** “Geología y Geotectónica de América Central y el Caribe”. Apdo. 214-2060 UCR, Costa Rica.

**DeMets C., 2001.** A new estimate for present-day Cocos-Caribbean plate motion: Implications for slip along the Central American volcanic arc: *Geophysical Research Letters*, v. 28, no. 21, p. 4043–4046, doi: 10.1029/2001GL013518.

**Espinoza B, T. y Espinoza B, L., 2005.** Impacto de la minería en la calidad del agua en la microcuenca del Río Artiguas. Énfasis en metales pesados. Tesis de grado. Universidad Centroamericana – UCA.

**ENEL., 2010.** Reconocimiento Geoquímico de Nicaragua. Base de Datos. Empresa Nicaragüense de Electricidad. DEG – Laboratorio de Geoquímica.

**Freeze, R. A., J. A. Cherry (1979).** *Groundwater*. Prentice-Hall, 604 pp.

**Fitz, W.J., Wenzel, W.W., 2002.** Arsenic transformations in the soil-rhizosphere-plant system: fundamentals and potential application to phytoremediation. *Journal of Biotechnology* 99: 259-278.

**Fundación Nicaragüense para la Conservación, fundación Cocibolca (FUNCOC), 2003.** Plan de Manejo de la Reserva Natural Volcán Mombacho. Aprobado por el Ministerio del Ambiente y Recursos Naturales, Managua, Nicaragua. USAID. 189 pp.

**Fundación Nicaragüense para la Conservación, fundación Cocibolca (FUNCOC), 2006.** Plan de Manejo de la Reserva Natural Volcán Mombacho. Aprobado por el Ministerio del Ambiente y Recursos Naturales, Managua, Nicaragua. USAID. 168 pp.

**Guatemala H, J., 2007.** Caracterización de la estela de contaminación del basurero La Joya en Granada, Nicaragua. Tesis de Maestría, Centro para la Investigación en Recursos Acuáticos de Nicaragua (CIRA / UNAN).

**Gómez C, Alina., 2011.** “Impacto de la ingesta de agua contaminada con arsénico en la salud de la población de comunidades rurales del territorio N° 2 del municipio de Telica, León”.

**Hannah R. Farnfield, Andrea L. Marcilla, Neil I. Ward, 2012.** Arsenic speciation and trace element analysis of the volcanic río Agrío and the geothermal waters of Copahue, Argentina, *Science of The Total Environment*, Volume 433, 1 September 2012, Pages 371-378.

**Hodgson, G., (2000).** Introducción al Léxico Estratigráfico de Nicaragua.

**Hodgson, G. (2002).** Geología Histórica de Nicaragua.

**INETER, 2004.** Hojas topográficas; Granada, isla Zapatera Números 3051-III, 3051-IV.

**La Femina P., Dixon T., and Strauch W., 2002.** Bookshelf faulting in Nicaragua: *Geology*, v.30, p. 751–754, doi: 10.1130/0091-7613(2002)030<0751:BFIN>2.0.CO; 2

**Lillo, J., 2002.** Peligros geoquímicos: arsénico de origen natural en las aguas.

**Lorca M, X., 2005.** Análisis de (As, Ca, F, Fe, Mn y Mg) en aguas minerales y termales de la novena y décima regiones de Chile. Tesis de grado. Valdivia Chile 84 paginas.

**Matschullat, J., 2000.** Arsenic in the geosphere – a review. *Science of the Total Environment* 249: 297-312.

**McLaren, S.J. & Kim, N.D. (1995).** Evidence for a seasonal fluctuation of arsenic in New Zealand's longest river and the effect of treatment on concentrations in drinking water. *Environ. Pollut*, 90, 67–73.

**Ministerio de Energía y Minas (MEM). 2009.** Perspectivas Geotérmicas de la Laguna de Apoyo y El Volcán Mombacho. Informe de campo. Ministerio de energía y minas. Dirección de Recursos Energéticos Renovables – Dirección de Geotermia.

**Ministerio de Energía y Minas (MEM). 2009.** Resumen Técnico - Ambiental del Área Geotérmica Volcán Mombacho. Ministerio de energía y minas. Dirección de Recursos Energéticos Renovables – Dirección de Geotermia.

**Moreno J, E., 2010.** Recuperación de suelos mineros contaminados por arsénico mediante biotecnologías. Tesis Doctoral. Universidad Autónoma de Madrid. Madrid España 224 paginas.

**Navarro,M., Sanchez, M. ,Lopez, H.,L opez,M.C.,1993.** Arsenic contamination levels inwaters, soils, and sludges in southeast Spain. Bull. Environ. Contam. Toxicol.50, 356-362.

**Nimick, D.A., Moore, J.N., Dalby, C.E. & Savka, M.W. (1998).** The fate of geothermal arsenic in the Madison and Missouri Rivers, Montana and Wyoming. Water Resource Res., 34, 3051–3067.

**Nordstrom,D.K.,Alpers,C.N.,1999.** Negative pH, efforescent mineralogy, and consequences for environmental restoration at the Iron Mountain Superfund Site,California. Proc.Nat.Acad.Sci.,USA , 96, 3455-3462.

**PIDMA/UNICEF., 2002.** Puntos de abastecimiento de agua contaminada por arsénico y plomo identificados en Nicaragua en julio del 2002. En UNICEF. El arsénico y metales pesados en aguas de Nicaragua. (CD).

**Pilato, M., 2004.** Estudio Geológico con énfasis en peligrosidad por inestabilidad de laderas del volcán Mombacho. Tesis de Grado. Universidad Nacional Autónoma de Nicaragua. UNAN - Managua.

**Powell, T. (2000).** A review of Exploration Gas Geothermometry. Universidad de Stanford, California.

**Powell, T., y Cumming, W. (2010).** Spreadsheets for Geothermal Water and Gas Geochemistry. Universidad de Stanford, California.

**Rodríguez G, M., 2008.** Impacto del turismo en la composición y diversidad de especies vegetales en los senderos El Cráter y El Puma de la Reserva Natural Volcán Mombacho, Granada, Nicaragua.

**Smedley, P. y Kinniburgh, D., 2002.** A review of the source, Behaviour and distribution of arsenic in natural waters. CFTA - Universidad de Palermo Italia.

**van Wyk de Vries, B. 1993.** Tectonics and magma evolution of Nicaraguan volcanic systems, Ph.D. thesis, Open Univ., Milton Keynes, U. K.

# Anexos

Anexo No 1. Inventario de Pozos y Manantiales sector sur del Volcán Mombacho 2017.

**Determinación de la Contaminación Natural por Arsénico en las Aguas Subterráneas del Sector Sur del Volcán Mombacho, Granada - Nicaragua.**

Anexo No 2. Metodología de Análisis fisicoquímicos Laboratorio de Geoquímica – ENEL.

Anexo No 3. Resultados fisicoquímicos de las aguas del Sector Sur del Volcán Mombacho 2017; en miligramos / litros.

Anexo No 4: Mapa de inventario de pozos y manantiales - Sector Sur del Volcán Mombacho.

**Anexo No 5. Mapa Geológico sector Sur del Volcán Mombacho.**

**Anexo No 6. Mapa de Contornos Temperatura - Concentración de Arsénico.**

**Anexo No 7. Mapa de Contornos pH - Concentración de Arsénico.**

**Anexo No 8. Mapa de Contornos Conductividad Eléctrica ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ ) – Concentración de Arsénico.**

**Anexo No 9. Mapa de Contornos Cloro - Concentración de Arsénico.**

**Anexo No 10. Fichas de campo sector sur del Volcán Mombacho.**

**Anexo 11. Resultados de Análisis químico de Arsénico para aguas subterráneas y superficiales sector sur del volcán Mombacho.**