

ESCUELA POLITÉCNICA DEL EJÉRCITO



DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA TIERRA Y LA CONSTRUCCIÓN CARRERA DE INGENIERIA GEOGRAFICA Y DEL MEDIO AMBIENTE

**Distribución , especiación y movilización del arsénico
en las aguas geotermales de la zona centro-norte de
los andes ecuatorianos**

**TESIS DE GRADO PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE
INGENIERO GEÓGRAFO Y DEL MEDIO AMBIENTE**

**Brígida Beatriz Rodríguez Guerrero
Paulina Vallejo Cueva**

FEBRERO 2007

INDICE GENERAL

CAPITULO I

1.1	Introducción	1
1.2	Objetivos	
1.2.1	Objetivo General	2
1.2.2	Objetivos Específicos	2
1.3	Geografía De La Zona Centro Norte De los Andes Ecuatorianos	3
1.3.1	Provincia del Carchi	5
1.3.2	Provincia de Imbabura	6
1.3.3	Provincia de Pichincha	7
1.3.4	Provincia de Cotopaxi	8
1.3.5	Provincia del Tungurahua	9

CAPITULO II

CONCEPTOS FUNDAMENTALES

2.1	El Arsénico	
2.1.1	Arsénico Trivalente, As III	11
2.1.2	Arsénico Pentavalente, As V	12
2.2	Estado Natural del Arsénico	13
2.3	Arsénico en las Aguas Subterráneas	17
2.3.1	Aguas Subterráneas y Geotermales	17
2.3.2	Clasificación de las Aguas Geotermales	17
2.3.3	Composición	18

a) Sustancias que se encuentran disueltas	18
2.3.4 Características Químicas de los Iones	19
2.3.4.1 Aniones	19
a) Ion Cloruro	19
b) Ion Sulfato	19
c) Ion Bicarbonato y Carbonato	19
d) Ion Nitrato	19
e) Fosfatos	20
2.3.4.2 Cationes	20
a) Iones Relacionados con el Fe	20
b) Ion Calcio	20
c) Ion Magnesio	20
d) Ion Arsénico	20
2.4 Movilidad y Transporte del Arsénico	21
2.4.1 Interacción Fase Sólida / Solución	22
a) Adsorción / Desorción	22
b) Precipitación/Disolución	24
2.5 Incorporación del Arsénico al Agua	25
a) Oxidación de Sulfuros	25
b) Disolución de óxidos y oxihidróxidos de Fe y Mn	25
c) Desorción en condiciones alcalinas y oxidantes	25
d) Desorción y disolución promovidos por cambios en las condiciones reductoras.	26
2.6 Toxicidad	26
2.6.1 Dosis	27

2.6.2 Arsénico en el Cuerpo Humano	28
2.6.3 Intoxicación	29
1. Intoxicación Aguda	30
2. Intoxicación Crónica	30
2.7 Marco Regulatorio sobre el Arsénico	32
CAPITULO III	
METODOLOGÍA	33
3.1 Parámetros tomados In Situ	37
3.2 Parámetros Analizados en Laboratorio.	38
a) Separación de Especies Arsenicales	38
b) Determinación de Arsénico Total y As (III)	38
c) Extracción de Arsénico de Sedimentos	39
3.3 Análisis Químicos Complementarios	40
Determinación de Metales	41
3.4 Aspectos Socioambiental	42
CAPITULO IV	
RESULTADOS	
1. Primera Fase	43
Agua	
a) Sedimentos	51
2. Segunda Fase	52
4.1 Fuente Geotermal del Balneario La Calera/Río El Ángel	52
4.1.1 Información Socioambiental	57

4.2 Fuente Geotermal del Balneario Chachimbiro /Queb.Cachiyacu	59
4.2.1 Información Socioambiental	63
4.3 Fuente Geotermal alrededor del volcán Inactivo Ilaló	64
4.3.1 Información Socioambiental	71
4.4 Fuente Geotermal La Merced de Nono / Río Pichán	72
4.4.1 Información Socioambiental	75

CAPITULO V

DISCUSIÓN DE RESULTADOS	77
Aguas Hediondas	77
Aguas Negras	78
Fuente Geotermal El Baño, Cristóbal Colón	78
Balneario Chachimbiro	79
La Merced de Nono	80
La Ciénega	81
Segunda Fase	
a) Balneario El Ángel río El Ángel	81
Efecto Socioambiental	84
b) Fuente Geotermal de Chachimbiro/ Quebrada Cachiyacu	84
Efecto Socioambiental	87
c) Sector del Volcán Ilaló, Río San Pedro y Quebrada Ilaló	88
Efecto Socioambiental	89
d) Fuente Geotermal La Merced de Nono / Río Pichán	90
Efecto Socioambiental	92

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

CONCLUSIONES	93
RECOMENDACIONES	94
MAPAS	95
ANEXOS	106
GLOSARIO	124
BIBLIOGRAFIA	126
SITIOS WEB VISITADOS	128

INDICE DE TABLAS

Tabla 1.1 Composición de la Roca Andesita	4
Tabla 1.2 Composición de la Piedra Pómez	4
Tabla 2.1 Propiedades de las Especies Arsenicales	16
Tabla 2.2 Clasificación de las Aguas Geotermales de acuerdo a la temperatura.	17
Tabla 2.3 Sustancias que se encuentran disueltas en las Aguas Geotermales.	18
Tabla 2.4 Superficie de Adsorción del Arsénico	23
Tabla 2.5 Modelo de Epidemiología	31
Tabla 2.6 Normativas Nacionales e Internacionales de As Total	32
Tabla 3.1 Fuentes Geotermales Analizadas	33
Tabla 3.2 Parámetros In Situs	37
Tabla 3.3 Standard Methods	41
Tabla 4.1 Características Químicas de los sitios muestreados en Carchi.	43
Tabla 4.2 Características Químicas de los sitios muestreados en Imbabura.	44
Tabla 4.3 Características Químicas de los sitios muestreados en Pichincha.	46

Tabla 4.4 Características Químicas de los sitios muestreados en Cotopaxi y Tungurahua.	47
Tabla 4.5 Concentraciones de As _T mayores a 50 µg/L I Fase	48
Tabla 4.6 Concentraciones de Arsénico en los Sedimentos I Fase	51
Tabla 4.7 Parámetros Físicos - Químicos del muestreo en la Fuente Geotermal La Calera / Río El Ángel.	54
Tabla 4.8 Arsénico en Sedimentos del Río El Ángel.	56
Tabla 4.9 Condiciones de Vida del Sector del Río El Ángel.	58
Tabla 4.10 Parámetros Físicos - Químicos del muestreo en la Fuente Geotermal Chachimbiro / Quebrada Cachiyacu.	60
Tabla 4.11 Arsénico en Sedimentos de la Fuente Geotermal Chachimbiro / Quebrada Cachiyacu.	63
Tabla 4.12 Enfermedades más comunes en el Sector de Chachimbiro / Población de Tumbabiro.	64
Tabla 4.13 Parámetros Físicos - Químicos del muestreo en el Sector del volcán Ilaló/ Río San Pedro / Quebrada Ilaló.	66
Tabla 4.14 Arsénico en Sedimentos del Sector del Volcán Ilaló.	70
Tabla 4.15 Parámetros Físicos - Químicos del muestreo en la fuente geotermal La Merced de Nono - Río Pichán.	73
Tabla 4.16 Arsénico en Sedimentos fuente geotermal La Merced de Nono.	75

INDICE DE GRÁFICOS

Gráfico 1.1 Provincia del Carchi.	5
Gráfico 1.2 Provincia de Imbabura.	6
Gráfico 1.3 Provincia de Pichincha.	8
Gráfico 1.4 Provincia de Cotopaxi.	9
Gráfico 1.5 Provincia de Tungurahua.	10
Gráfico 2.1 Especies Arsenicales según el pH.	14
Gráfico 2.2 Especiación del Arsénico según el pH y Eh.	15
Gráfico 3.1 Localización de los Sitios de muestreo.	34
Gráfico 3.2 Localización de los puntos muestreados en el sitio del Río el Ángel.	35
Gráfico 3.3 Localización de los puntos muestreados en el sitio de la Quebrada Cachiyacu.	36
Gráfico 3.4 Localización de los puntos muestreados en el sector del Volcán Inactivo Ilaló.	36
Gráfico 3.5 Localización de los puntos muestreados en la Provincia de Pichincha sector la Merced de Nono.	37
Gráfico 4.1 Concentraciones de As _T menores a 50 µg/L I Fase	48
Gráfico 4.2 Espacialización de las Fuentes Geotermales con Concentraciones menores de 50 ppb.	49

Gráfico 4.3 Sitios muestreados en las provincias del Carchi e Imbabura con concentraciones de As _T mayores a 50 µg/L I Fase.	50
Gráfico 4.4 Sitios muestreados en la provincia de Pichincha con concentraciones de As _T mayores a 50 µg/L I Fase.	50
Gráfico 4.5 Aniones y Cationes presentes en a Fuente Geotermal La Calera / Balneario El Ángel.	53
Gráfico 4.6 Variación de la concentración de As en el Río El Ángel de acuerdo a la distancia desde la fuente geotermal La Calera.	55
Gráfico 4.7 Representación del nivel educativo en la población Mascarilla.	57
Gráfico 4.8 Representación del Uso del Agua del Sector Río El Ángel, Población Mascarilla.	58
Gráfico 4.9 Aniones y Cationes presentes en la fuente principal del Balneario Chachimbiro.	59
Gráfico 4.10 Aniones y Cationes presentes en la fuente de la piscina del Balneario Chachimbiro.	61
Gráfico 4.11 Variación de la concentración de As en la Quebrada Cachiyacu de acuerdo a la distancia desde las fuentes en el balneario Chachimbiro.	61
Gráfico 4.12 Representación del uso del agua del sector de Chachimbiro Quebrada Cachiyacu.	64
Gráfico 4.13 Aniones y Cationes presentes en la fuente geotermal del Balneario La Merced.	65
Gráfico 4.14 Aniones y Cationes presentes en la fuente geotermal del Balneario Ilaló.	67
Gráfico 4.15 Aniones y Cationes presentes en la fuente geotermal del	67

Balneario El Tingo.

Gráfico 4.16 Aniones y Cationes presentes en la fuente geotermal del 68

Balneario Cununyacu.

Gráfico 4.17 Variación de la concentración de As en la Quebrada Ilaló 69
en relación a la distancia desde las fuentes del Balneario La Merced e Ilaló.

Gráfico 4.18: Variación de la concentración de As en el río San Pedro 70
de acuerdo a la distancia.

Gráfico 4.19: Representación del uso del agua – Sector Ilaló. 71

Grafico 4.20: Aniones y cationes presentes en la fuente geotermal 74
La Merced de Nono.

Gráfico 4.21: Representación del uso del agua del Sector del Río Pichán. 76

Gráfico 5.1 a: Correlación As/Cl^- en las fuentes de Chachimbiro. 86

b: Correlación As/Na^+ en las fuentes de Chachimbiro. 86

INDICE DE FOTOGRAFÍAS

Fotografía 3.1 Equipo de Absorción Atómica.	39
Fotografía 4.1 Fuente de Fe en Chachimbiro.	45
Fotografía 4.2 Fuente Geotermal La Calera.	56
Fotografía 4.3 Fuente Geotermal La Merced de Nono.	72
Fotografía 5.1 Fuente Geotermal Aguas Hediondas.	77
Fotografía 5.2 Fuente Geotermal Aguas Negras.	78
Fotografía 5.3 Depósitos de Fe, Fuente Geotermal El Baño.	79
Fotografía 5.4 Depósitos de Fe en la Fuente Geotermal La Merced de Nono.	80
Fotografía 5.5 Materia Orgánica presente en la Fuente Geotermal La Ciénega.	81
Fotografía 5.6 Algas presentes en el Río El Ángel.	83
Fotografía 5.7 Materia Orgánica en el Río El Ángel.	83
Fotografía 5.8 Descarga de las Fuentes Geotermales de Chachimbiro en la Quebrada Cachiyacu.	85
Fotografía 5.9 Materia Orgánica presente en la Quebrada Cachiyacu.	87
Fotografía 5.10 Descarga doméstica en el Río San Pedro.	89
Fotografía 5.11 Materia Orgánica presente en el Río Pichán.	91

Fotografía 5.12 Depósitos de Fe en el Río Pichán.

91

INDICE DE MAPAS

Mapa 1: Mapa de AsTotal de las Fuentes Geotermiales.	96
Mapa 2 : Mapa de As (III) de las Fuentes Geotermiales.	97
Mapa 3 : Mapa de As Total de La Calera - Río El Ángel.	98
Mapa 4: Mapa de As (III) de La Calera - Río El Ángel.	99
Mapa 5 : Mapa de As Total del sector de Chachimbiro	100
Mapa 6 : Mapa de As (III) del Sector de Chachimbiro	101
Mapa 7 : Mapa de As Total del sector del Volcán Ilaló.	102
Mapa 8 : Mapa de As (III) del Sector del Volcán Ilaló.	103
Mapa 9 : Mapa de As Total del Sector La Merced de Nono	104
Mapa 10 : Mapa de As (III) del Sector La Merced de Nono	105

INDICE DE ANEXOS

Anexo 1: Constantes del Producto de Solubilidad.	107
Anexo 2: Concentraciones de As (III) y As (V) de la I Fase.	108
Anexo 3: Concentraciones de As (III) y As (V) de La Calera-Río El Ángel	109
Anexo 4: Concentraciones de As (III) y As (V) del Balneario Chachimbiro.	110
Anexo 5: Concentraciones de As (III) y As (V) del sector del Ilaló	111
Anexo 6: Concentraciones de As (III) y As (V) de La Merced de Nono.	112
Anexo 7: Cationes y Aniones de las Fuentes en m-eq.	113
Anexo 8: Alcalinidad.	114
Anexo 9: Cloruros	115
Anexo 10: Fosfatos	116
Anexo 11: Sulfatos	117
Anexo 12: Nitratos	118
Anexo 13: Diseño de la Encuesta.	119
Anexo 14: Tabulación de las Encuestas.	121
Anexo 15: Matriz de valoración de vivienda.	123

Resumen

Los problemas del arsénico (As) asociados con las fuentes geotermales han sido reportados en varios lugares del mundo debido a sus efectos adversos en la salud. En el Ecuador, la presencia de arsénico en aguas geotermales cercanas a la laguna de Papallacta, sugiere que fuentes similares en la región interandina estarían contaminadas con As. En este contexto, el presente proyecto pretende identificar las fuentes de agua geotermal de la Región Centro-Norte de la Sierra Ecuatoriana con significativas concentraciones de arsénico. De los datos de campo, estas fuentes geotermales, originadas por el vulcanismo de la era cuaternaria, poseen pH entre 3,5 y 8,3 y una temperatura media de 28.8°C. En las muestras recolectadas, en el laboratorio se cuantificaron el arsénico total y las especies de arsenicales, As(III) y As(V). Para determinar arsénico en los sedimentos de los cuerpos de agua, se condujo un ensayo de digestión ácida y uno de digestión básica. Los resultados de la caracterización de las aguas termales indican que la concentración de arsénico total es bastante elevada en la fuente del balneario Chachimbiro (976 µg/L), en el tanque del balneario La Calera (684 µg/L) y en el balneario Cununyacu (405 µg/L). Adicionalmente, el contenido de arsénico en los

sedimentos es muy alto en la fuente de Aguas Hediondas (1544 mg/Kg) y en la fuente El Baño (461,39 mg/kg). Debido a que el 30% de las fuentes sobrepasan el límite de la legislación ecuatoriana, se investigó la evolución y los posibles usos de las agua contaminadas. De igual manera, los resultados de la investigación indican que el pH de la mayor parte de las fuentes está sobre el neutro y el potencial redox es mayor que 50 mV; consecuentemente, el As(V) es la especie arsenical predominante, situación que favorecería la adsorción del As en las fracciones minerales y la materia orgánica natural. Sin embargo, otro mecanismo que podría también controlar la movilidad del As, es la precipitación de ciertas fases sólidas como la escodorita y el hidróxido de hierro, las que paralelamente capturan el As. En contraste, los altos niveles de arsénico en La Merced de Nono y Chachimbiro podrían estar asociados con las elevadas concentraciones de bicarbonato y carbonatos, con los que el arsénico forma complejos solubles. Por otro lado, las aguas geotermales una vez utilizadas en los balnearios son descargadas a quebradas o ríos aledaños. El río El Ángel por ejemplo presenta una concentración considerable de arsénico debido a la descarga de las aguas residuales de La Calera. Desgraciadamente, parte de esas aguas son destinadas para riego de productos agrícolas como es el caso en la población de Mascarilla, creando así un impacto indirecto en su población pero potencialmente peligroso.

Abstract

Arsenic problems associated to geothermal springs have been reported around the world because of its harmful effects on human health. In Ecuador, the presence of arsenic at the geothermal springs in the surroundings of Papallacta lagoon, suggest that geothermal springs at the Andean region could be contaminated with arsenic. In this context, the present study intends to identify the sources of geothermal water at the Northern-Center Region of the Ecuadorian Sierra with significant concentrations of arsenic. From field data, these thermal springs associated with Quaternary volcanism, have pH values between 3,5 and 8,3 and an average temperature of 28,8°C. In collected samples, were quantified in the lab total arsenic and arsenical species, i.e. As(III) and As(V). Basic and acidic digestion tests were used to determine arsenic in sediments from water bodies. Results of geothermal water analyses report that the concentration of total arsenic is high at Chachimbiro hot spring (976 µg/L), La Calera reservoir (684 µg/L), and Cununyacu spring (405 µg/L). In addition, arsenic content in sediments is very high at the Aguas Hediondas hot spring (1545 mg/kg) and at El Baño spring (461 mg/kg). Since 30% of the springs have arsenic concentrations above the Ecuadorian legislation limit, the

fate and possible uses of contaminated water was further investigated. Similarly, the investigation results indicate that pH of the majority of water sources are above neutral and redox potential is greater than 50 mV; therefore, As(V) is the predominant arsenic species, which would favor the adsorption of As on the mineral fractions and natural organic matter. However, there is another mechanism that could also control arsenic mobility, is precipitation of solid phases such as scorodite and Fe(III) hydroxide which capture As at the same time. In contrast, high arsenic levels at La Merced of Nono and Chachimbiro could be associated to high concentrations of bicarbonate and carbonate with which arsenic forms soluble complexes. On the other hand, geothermal waters once used in hot baths are discharged to the nearest water bodies. For example, El Angel River presents a substantial concentration of arsenic due to the discharge of La Calera's residual waters. Unfortunately, some of these waters are used for irrigation of agriculture products as in Mascarilla town, thus creating an indirect impact but potentially dangerous in its population.

AGRADECIMIENTO

A Dios, por permitir la realización de este proyecto, por darnos la fuerza y sabiduría necesaria para culminarlo.

Al equipo de investigación del CEINCI, por su paciencia, preocupación y ayuda tanto académica como personal.

Al Ing. Aguilera, por su aporte científico que facilitó el trabajo de campo.

Al Crnl. Aguiar, al Ing. León y Sra. Adri por su apoyo para la aprobación y realización de la tesis.

Al Ing. Lara, por tomarnos en cuenta para esta investigación.

A la Ing. Atiaga, por su tiempo, interés y apoyo en cada actividad.

Al Doctor Cumbal, por su mano amiga y su constante ayuda en los 11 meses de duración de la tesis, por su aporte con conocimientos

científicos, humanos y pedagógicos. Por su paciencia y su interés en realizar un trabajo de calidad.

CERTIFICACIÓN

Certifico que el presente proyecto fue realizado en su totalidad por las señoritas: **Brígida Beatriz Rodríguez Guerrero** y **Paulina Vallejo Cueva**, como requerimiento parcial a la obtención del título de Ingeniero Geógrafo y del Medio Ambiente.

Sangolquí, Febrero de 2007

DIRECTOR

CODIRECTOR

Sr. Ing. Luis Cumbal PhD

Sra. Ing. Oliva Atiaga

CAPÍTULO I

1.1 INTRODUCCIÓN

El As es un elemento químico que se lo considera tóxico y perjudicial para la salud en determinadas concentraciones (10 $\mu\text{g/L}$ según WHO, World Health Organization). Su posible origen se relaciona a las fuentes geotermales en consecuencia al vulcanismo presente, característico de la era cuaternaria de la cordillera de los Andes. El arsénico asociado con estas aguas geotermales ha sido reportado en varias partes del mundo, incluyendo, aguas termales en los Estados Unidos, Japón, Nueva Zelanda, Chile, Islandia, Francia e Isla Dominica, Welch et al. (2000), Criaud y Fouillac(1989).

El posible uso de esta agua o sus descargas en los ríos aledaños, podría causar enfermedades de la piel como arsenicosis, dermatosis, hiperqueratosis en las poblaciones generalmente rurales.

Es por ello que durante los últimos tiempos, alrededor del mundo se ha dado una especial atención a esta contaminación.

Según datos divulgados a la opinión pública, por De la Torre et al. (2004) y mediciones randómicas realizadas por el equipo de investigación del Centro de Investigaciones Científicas CEINCI, se sabe que las aguas termales de la piscina el Tambo, el reservorio de aguas termales Jamanco, las aguas termales Termas Papallacta y el agua termal de la cuenca alta del río Tambo (Cantón Quijos, Provincia del Napo) contienen altas concentraciones de arsénico. La presencia de arsénico en aguas geotermales cercanas a la laguna de Papallacta, teóricamente sugiere que fuentes similares de la Sierra Ecuatoriana estarían contaminadas con este elemento tóxico.

En razón de la ausencia de estudios en el Ecuador, este proyecto pretende identificar las fuentes geotermales con altas concentraciones de As y su comportamiento en el ambiente, así como su influencia en la población en la zona Centro-Norte de los Andes Ecuatorianos.

1.2. OBJETIVOS

1.2.1. Objetivo general

Espacializar la distribución, especiación y movilización del arsénico en las aguas geotermales de la zona Centro-Norte de los Andes ecuatorianos.

1.2.2. Objetivo específicos

- Realizar un plan de monitoreo de las aguas geotermales en las provincias de Carchi, Imbabura, Pichincha, Cotopaxi y Tungurahua.

- Muestrear las fuentes geotermales de la zona centro-norte de los Andes Ecuatorianos.
- Analizar en el laboratorio las especies arsenicales encontradas en las aguas geotermales de la zona centro-norte del país.
- Establecer las concentraciones de arsénico en las aguas geotermales en estaciones lluviosas y secas, y establecer rangos de variación de las especies arsenicales en las diferentes fuentes de agua termal por estación climática
- Determinar el comportamiento del Arsénico en las aguas geotermales de la zona centro-norte del país.
- Determinar el impacto del Arsénico en la población de la zona centro-norte del país.
- Espacializar la distribución del Arsénico en las aguas geotermales de la zona centro-norte del país.
- Investigar sobre el tipo de enfermedades en la zona centro-norte del país relacionadas con la presencia de arsénico en el agua de origen termal.
- Levantar información socio ambiental en la zona de estudio.

1.3 GEOGRAFÍA DE LA ZONA CENTRO NORTE DE LOS ANDES ECUATORIANOS

El área del proyecto se localiza en la zona norte de la sierra ecuatoriana (cordillera septentrional) entre 1°11' N y 1°30'S. Comprende las provincias de

Carchi, Imbabura, Pichincha, Cotopaxi y Tungurahua, aproximadamente 31477 km² del territorio nacional.

Esta cadena montañosa de formación reciente data del principio del período cretáceo (hace unos 140 millones de años). Pertenece al cinturón Peripacífico, cuyos vulcanismo y depósitos sedimentarios fueron retocados en el transcurso de la era Cuaternaria, recubriendo gran parte de los Andes de material piroclástico; en particular de las andesitas, pómez y cangahua. Por ello, los suelos en su mayoría se componen de metales típicos de la andesita y de la pómez.

Composición de la Andesita

Porcentajes de los elementos químicos encontrados en la roca andesita

Elemento	%
SiO ₂	54,2
Ar ₂ O ₃	17,3
Fe ₂ O ₃	3,5
FeO	5,5
MgO	4,4
TiO ₂	1,3
CaO	7,9
MnO	0,1
Na ₂ O	3,7
K ₂ O	1,1
H ₂ O	0,9

Tabla 1.1 Composición de la Roca Andesita
 Fuente: Geología del Ecuador. Ing. Walter Sauer, 1974

Composición de la Pómez

Porcentajes de los elementos químicos encontrados en la pómez.

Elemento	%
SiO ₂	71
Al ₂ O ₃	12.8
Fe ₂ O ₃	1.75
CaO	1,36
Na ₂ O	3.23

K ₂	3.83
CaO	3.83
H ₂ O	3.88

Tabla 1.2 Composición de la Pómez

Fuente: Geología del Ecuador. Ing. Walter Sauer, 1974

La actividad volcánica mencionada es importante ya que a ella se relacionan la distribución y origen de las fuentes geotermales en la zona centro norte de los Andes.

1.3.1. Provincia del Carchi

La topografía de la provincia es bastante irregular, va desde zonas bajas hasta los fríos páramos de El Ángel. Posee elevaciones importantes como son el volcán Chiles (4.723 m), donde nace el río Carchi; seguido de los montes Pelados (4.149 m), Chiltazón (3.967 m) entre otros. El principal río es el Carchi, seguido por el Bobo, el Blanco, el San Juan, el Tajamar, el Mayasque y el Chota que aguas abajo toma el nombre de Mira. En Tufiño, Rumichaca y Cristóbal Colón existen fuentes termales, frecuentadas por fines medicinales.

En la zona afloran formaciones volcánicas (lavas andesíticas, basálticas, basaltos, brechas volcánicas, tobas y cenizas) y sedimentos volcánico – clásticos (cangahua y lapilli), que constituyen la parte fundamental de la geología de la región y son el resultado de la actividad volcánica final aparecida en los Andes en la era Plioceno.



Gráfico 1.1: Provincia del Carchi
Fuente: AEE (Almanaque Electrónico Ecuatoriano)

1.3.2 Provincia de Imbabura

Las principales elevaciones de la provincia son: el Imbabura (4560 m), el Cotacachi (4.944 m) y el Yanaurco de Piñán (4.535 m). El río Chota es el límite de las provincias de Imbabura y de Carchi. Los afluentes más importantes de este río son: El Salinas, El Salado y el Pisque. Existen otros ríos que descienden de Huaca y forman el río Ambi, éste último aumenta el caudal con el Tatuando y Blanco, para unirse con el río Chota y formar así el río Mira. En la provincia de Imbabura existen aguas ferruginosas y termales, éstas son destinadas con fines terapéuticos.

Los suelos se caracterizan por tener depósitos de lapilli y cenizas, producto de algunas erupciones volcánicas. Algunos de estos depósitos son ricos en pómez y líticos. La pómez es de color gris claro, liviana bien vesiculada y contiene

abundante fenocristales de plagioclasa, cuarzo y hornblenda así como pequeños cristales de hipersteno y magnetita.

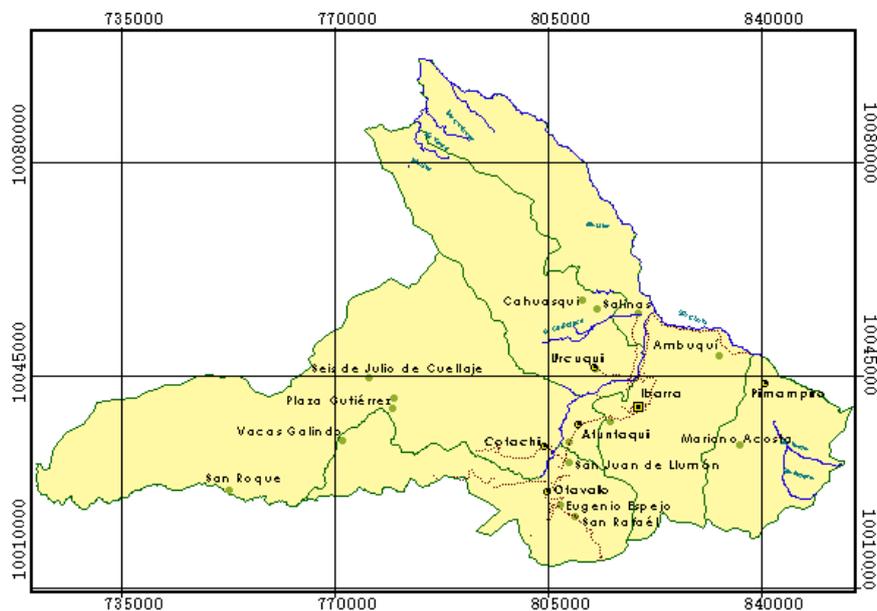


Gráfico 1.2: Provincia de Imbabura
Fuente: AEE (Almanaque Electrónico Ecuatoriano)

Los suelos característicos de la provincia son: arenoso (arena volcánica de color café o negro) y arcilloso de color café o negro (lapilli y ceniza).

1.3.3 Provincia de Pichincha

La provincia posee algunos valles: Machachi, Turubamba, Los Chillos, Tumbaco, Puembo, Yaruquí, Guayllabamba, Cayambe, Puéllaro. De las numerosas elevaciones se destacan las siguientes: Cayambe (5.790 m) y Sincholagua (4.893 m), en la cordillera Oriental; y Atacazo (4.463 m), Corazón (4.788 m), Guagua Pichincha (4.675 m) y Rucu Pichincha (4.324 m), en la cordillera Occidental.

El sistema hidrográfico de la provincia es el Río Guayllabamba. Los afluentes más importantes son: el río Pita, el río San Pedro y el río Pisque.

La provincia posee algunas fuentes termales debido a la actividad volcánica presente en el sector, algunos de estas fuentes son turísticas como es el caso de: La Merced, El Tingo, entre otras.

Pichincha esta cubierta por rocas volcano-sedimentarias de composición andesita – basáltica (cretácica), también esta recubierta por conglomerados, lutitas, tobas, calizas. Posee suelos negros, limosos, limo-arenoso derivados de materiales piroclásticos con menos de 3% de arcilla y con presencia de arena fina.



Gráfico 1.3: Provincia de Pichincha
Fuente: AEE (Almanaque Electrónico Ecuatoriano)

1.3.4. Provincia de Cotopaxi

La principal elevación es el Cotopaxi, considerado el volcán activo más alto del mundo (5.897 m). Los valles de esta provincia están regados por el río Cutuchi, que nace en el Cotopaxi y baña casi toda la provincia. Existen otros ríos importantes como son: Illuchi, Patoa, Yanayacu, Chalupas, Nagsiche, Pumancunchi.

Los suelos son de coloración café claro y negro, la mayoría de estos son arenosos (compuestos de Feldespato, KAlSi_3O_8 , Fe_3O_4 y SiO_2) y arcillosos (presencia de Al_2O_3 y SiO_2). La formación geológica del sector es característica de depósitos de caídas de piroclastos andesíticos, lapilli de pómez.



Gráfico 1.4: Provincia de Cotopaxi
Fuente: AEE (Almanaque Electrónico Ecuatoriano)

1.3.5. Provincia del Tungurahua

La orografía de esta provincia es variada debido a su topografía, que cuenta con elevaciones, planicies y valles como son los de Ambato, Baños, Cuchibamba, el Triunfo, Izamba, Leito y Patate.

El río más importante de la provincia es el Patate, proveniente del norte, que al unirse con el río Chambo, nacido en el sur da origen al río Pastaza.

El suelo es arenoso, posee paleosuelo de color café oscuro y negro, debido a los depósitos de lavas, piroclásticos andesíticos y pómez. Los terrenos poseen: ceniza, lapilli de pómez de color gris claro a café grisáceo.

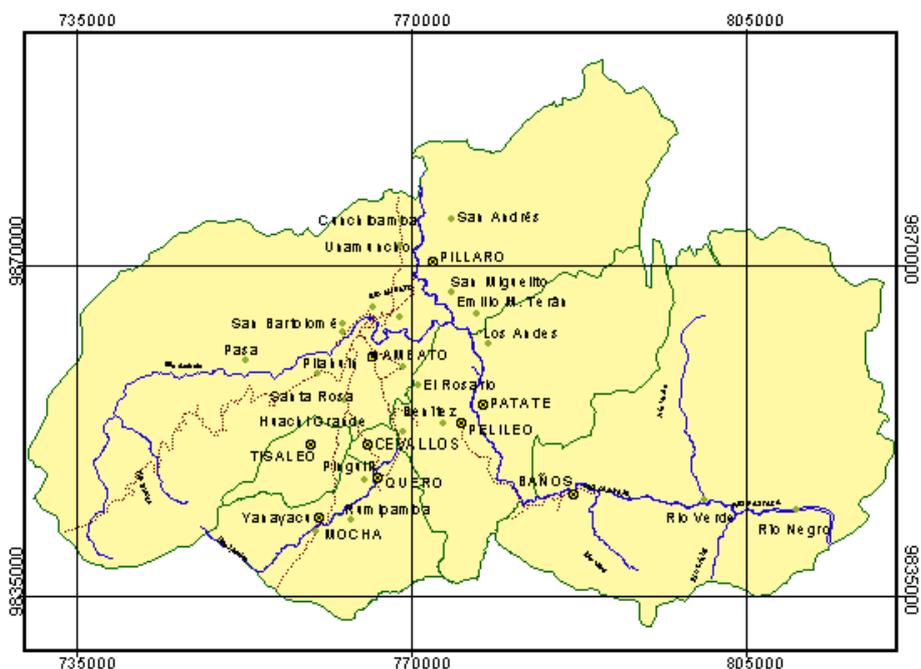


Gráfico 1.5: Provincia de Tungurahua
Fuente: AEE (Almanaque Electrónico Ecuatoriano)

CAPÍTULO II

CONCEPTOS FUNDAMENTALES

2.1. El Arsénico

El Arsénico (As) es un elemento químico que se encuentra distribuido ampliamente en la naturaleza (cerca de 0,00005% de la corteza terrestre). Es un metaloide que pertenece al grupo VB, cuyo peso atómico es 74,922.

El arsénico es sumamente tóxico, cáustico y lábil. Posee una gran solubilidad en el agua. Es naturalmente un compuesto móvil, es decir se esparce fácilmente. Su química es similar a la del fósforo.

Se encuentra muy raras veces en estado puro en la naturaleza, generalmente esta combinado con el azufre o en estado oxidado unido al oxígeno de forma trivalente o pentavalente.

En su fase sólida se lo encuentra principalmente como orpimento (As_2S_3), rejalgar (AsS), arsenopirita o mispiquel ($FeAsS$), la cobaltina ($SAsCo$), la arsenolita (As_2O_3), entre otros.

El arsénico en el ambiente puede formar compuestos orgánicos e inorgánicos.

Los compuestos inorgánicos de arsénico presentes en el suelo y en el agua como especies disueltas existen en dos estados de oxidación: As(III) arsénico trivalente y As(V) arsénico pentavalente.

2.1.1 Arsénico Trivalente, As (III)

Se hace referencia al arsénico (III), cuando el elemento químico se encuentra en su estado de oxidación +3, al cual se lo llama arsenito o arsénico trivalente.

El arsenito es estable y móvil en el agua, pero es el estado más lábil y biotóxico¹. Las condiciones de reducción favorecen al cambio o presencia de especies de As (III). Se lo encuentra en solución como: H_3AsO_3 , $H_2AsO_3^-$, $H_2AsO_4^{-2}$.

¹ LILLO Javier, Peligros Geoquímicos: Arsénico de origen natural en las aguas, GEMM (Grupo de Estudios de Minería y Medioambiente (Textos y cursos *on-line*), 2002.

Ácido Arsenioso: es la forma hidrolizada del trióxido de arsénico As_2O_3 . Su fórmula química es H_3AsO_3 . Su peso molecular es 125.94 g. Es una molécula piramidal con tres grupos hidroxilo conectados por enlaces simples al arsénico. Es un ácido débil con un pK_a de 9,2. Al añadir a la hidrólisis del trióxido de arsénico una base, forma iones arsenito como: $H_2AsO_3^-$, $[AsO_3]^{-3}$.

2.1.2 Arsénico Pentavalente, As (V)

El arsénico pentavalente, se refiere al arsénico en su estado de oxidación +5. Se lo conoce también como arseniato. Tiene mayor capacidad de ionización por la presencia del doble enlace. Los arseniatos son predominantes en aguas superficiales. Las especies disueltas con estado de oxidación +5 son termodinámicamente más estables. Las condiciones de oxidación favorecen a la presencia o al cambio a especies de As (V).

Sus constantes de disociación son:

$$pK_{a1} = 2.19$$

$$pK_{a2} = 6.94$$

$$pK_{a3} = 11.5$$

Sus productos de disociación son: H_3AsO_4 , $H_2AsO_4^-$, $HAsO_4^{2-}$, AsO_4^{3-} .

Ácido Arsénico: conocido también como ácido ortoarsénico, su fórmula química es H_3AsO_4 , es la forma ácida del ion arseniato (AsO_4^{3-}), un anión trivalente. La química de los arseniatos es similar a la de los fosfatos.

El ácido arsénico es usado en tratamiento de madera, como agente para terminados de vidrio y metal, en la industria de teñidos. También es usado como herbicida, insecticida o raticida.

2.2 Estado Natural del Arsénico

El arsénico se encuentra en la naturaleza formando parte de una variedad de minerales. Las mayores concentraciones de As aparecen en los sulfuros de pirita donde el As se encuentra sustituyendo al azufre de la estructura. También se encuentra formando parte de los óxidos-hidróxidos de Fe, algunas ocasiones de los óxidos de Al y Mn.

El arsénico natural en las aguas superficiales y subterráneas en América Latina está asociado con el vulcanismo terciario y cuaternario de la cadena montañosa de los Andes. Esta se presenta en los flujos de lava, fumarolas y fenómenos geotermales asociados al vulcanismo del “Anillo de Fuego del Pacífico”.

La principal vía de dispersión del As en el ambiente es el agua. La gran capacidad de disolución del agua y su elevada reactividad, hace que ésta ataque al arsénico directamente o a través de otras sustancias que lleva disueltas por medio de procesos químicos como la disolución, la oxidación, la reducción, etc.

Así, el arsénico está presente en el agua como especie disuelta por la disolución natural de minerales de depósitos geológicos y la sedimentación atmosférica.

Cuando ocurre la disolución de los minerales, el As se disocia en sus respectivos iones. La especiación, movilidad y destino de estos iones se ven afectadas por el pH, las condiciones redox presentes y la química entre el As y los compuestos que se puedan encontrar en el agua. También es necesario tomar en cuenta las constantes de disociación de As (III) y As (V).

El gráfico 2.1 muestra la distribución de las especies de As (V) y As (III) de acuerdo a la función del pH.

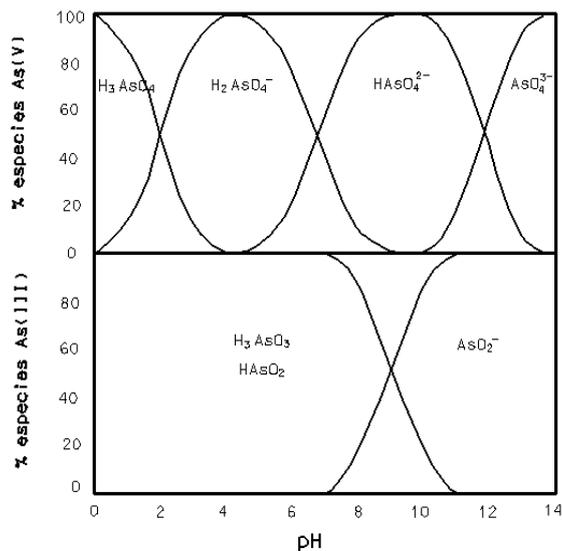


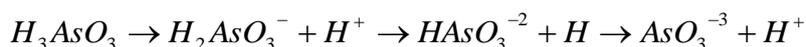
Gráfico 2.1 Especies Arsenicales según el pH

Fuente: Senguptu, Arup K. Environmental separation of heavy metals. Engineering processes

Tomando en cuenta condiciones oxidantes, sin involucrar la materia orgánica, el As (V) predomina sobre el As (III), encontrando a un pH menor a 6.9 el $H_2AsO_4^-$ como especie predominante; a un pH mayor a 6.9 la especie de As (V) que predomina es $HAsO_4^{2-}$. En un medio ácido predomina la especie neutra H_3AsO_4 y en un medio extremadamente básico predomina el ion AsO_4^{-3} .

En relación al As (III), las especies también varían de acuerdo al pH del agua; en un medio con condiciones reductoras a un pH menor a 9.2 predomina la especie neutra H_3AsO_3 (ácido arsenioso).

Como resultado de la disociación del ácido arsenioso característico en aguas subterráneas con pH mayor de 7, el arsénico se puede presentar en alguna de las siguientes formas:



En el rango de un pH mayor a 9.2, las formas predominantes de arsenitos son: $H_2AsO_3^-$ y $HAsO_3^{2-}$.

No obstante, las condiciones química y biológica que favorecen la reducción, cambiarán el equilibrio al estado trivalente. También la concentración de otros elementos controla la especiación de arsénico y su movilidad.

Adicionalmente, ciertos ambientes con condiciones aeróbicas favorecen reacciones de oxidación y las especies más probables de encontrar son las del As(V). En cambio en aquellos ambientes con condiciones anaeróbicas favorecen las reacciones de reducción, teniendo así como especies los iones arsenito.

Entonces, la presencia o ausencia de oxígeno es un factor determinante para la especiación del arsénico.

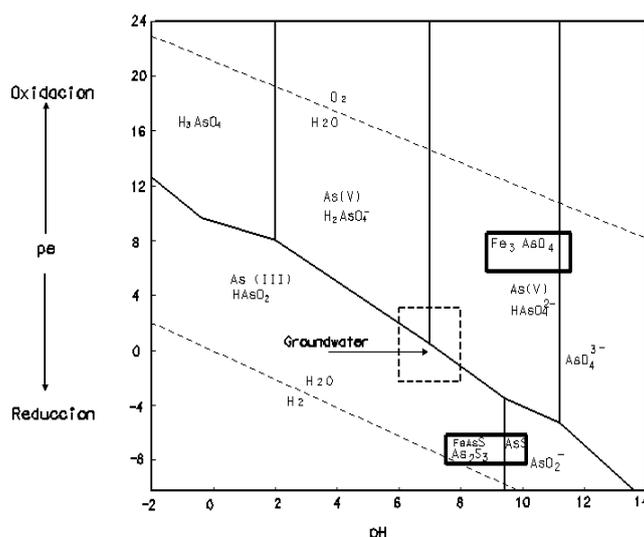


Grafico 2.2: Especiación del Arsénico según el pH y Eh
 Fuente: Senguptu, Arup k. Enviromental Separation of Heavy Metals. Engineering processes

Como se aprecia en el gráfico 2.2, los compuestos de fase sólida de As juegan un papel muy importante. De esta manera, en ambientes oxidantes y una condición alcalina moderada, el precipitado de arseniato férrico es la fase sólida predominante.

Por el contrario en condiciones reductoras, el realgar AsS , el orpimento As_2S_3 y la arsenopirita $FeAsS$ son las fases sólidas más favorables termodinámicamente.

En las aguas subterráneas, existen procesos que liberan al As de su fase sólida. Así en muchas aguas subterráneas el proceso más importante es la desorción reductiva o la disolución del As de óxidos minerales.

El recuadro de la figura muestra las especies de As encontradas en aguas subterráneas a condiciones específicas de pH y redox.

<i>Especie</i>	<i>Propiedad</i>	<i>Arsenito/Arsenato</i>
	Movilidad *	El Arsenito es de 5 a 6 veces más móvil que el Arsenato
	Toxicidad	El Arsenato es menos tóxico que el Arsenito.
	Solubilidad	El Arsenato por su bajo pKa es mas soluble que el Arsenito

* Condicionado por el pH del agua

Tabla 2.1: Propiedades de las Especies Arsenicales
 Fuente: Autoras 2007

2.3. Arsénico en las Aguas Subterráneas

2.3.1 Aguas Subterráneas y Geotermiales

Las aguas subterráneas son aguas de la zona saturada que se ubican debajo de muchos tipos de formaciones geológicas. Son un recurso natural muy

importante en los abastecimientos de agua en ciertas áreas del país, aportando en un gran porcentaje al consumo de agua del territorio ecuatoriano.

Las poblaciones de las zonas rurales y urbanas destinan el agua subterránea para: uso doméstico, agrícola e industrial.

El agua subterránea emerge del fondo de la tierra a través de los manantiales, cuyo origen ígneo o la presencia volcánica, da lugar a vertientes de agua caliente, más conocidas como fuentes geotermales, caldas o termas. En general, el pH típico de las aguas subterráneas es de 6.5 a 8.5².

2.3.2 Clasificación de las Aguas Geotermales

La temperatura es la principal característica de las aguas geotermales, a continuación la clasificación de acuerdo a la temperatura:

CLASIFICACION	TEMPERATURA (°C)
Aguas Hipertermales	>45°C
Aguas Meso-termales o Calientes	De 35°C a 45°C
Aguas Hipo-termales o poco frías	De 21°C a 35°C
Aguas frías	< 21°C

Tabla 2.2: Clasificación de las Aguas Geotermales de acuerdo a la temperatura
Fuente: H. Schoeller

2.3.3 Composición

La composición de estas fuentes varía según la naturaleza del suelo o la roca de su lecho.

a) Sustancias que se encuentran disueltas

² LILLO Javier, Peligros Geoquímicos: Arsénico de origen natural en las aguas, GEMM (Grupo de Estudios de Minería y Medioambiente (Textos y cursos *on-line*), 2002.

Generalmente la mayoría de sustancias disueltas en las aguas subterráneas y por lo tanto en aguas geotermales, se encuentran en estado iónico, aunque también se pueden encontrar como sustancias neutras.

Existen algunos iones que siempre están presentes y su suma representa casi la totalidad de los iones disueltos. Estos reciben el nombre de iones fundamentales.

Aniones		Cationes	
Cloruros	Cl ⁻	Sodio	Na ⁺
Sulfatos	SO ₄ ⁻²	Calcio	Ca ⁺²
Bicarbonato	CO ₃ H ⁻	Magnesio	Mg ⁺²

Tabla 2.3: Sustancias que se encuentran disueltas en las Aguas Geotermales
 Fuente: Autoras 2007

Los aniones nitrato (NO₃⁻), carbonato (CO₃⁻²) y el catión potasio (K⁺) se los considera en este grupo de los iones fundamentales, aún cuando su proporción sea pequeña. Otro elemento que se lo considera parte de este grupo es al Ion ferroso (Fe⁺²). El resto de iones y sustancias disueltas se encuentran por lo general en cantidades más pequeñas que las anteriores y se llaman iones menores.

2.3.4 Características Químicas de los Iones

2.3.4.1 Aniones

a) Ion Cloruro (Cl⁻)

En aguas subterráneas su concentración va entre los 10 y 250 mg/L, no siendo raro encontrar contenidos muchos mayores hasta varios miles de mg/L. Los contenidos elevados de cloruros son perjudiciales para muchas plantas, además de ser corrosivos.

b) Ion Sulfato (SO_4^{-2})

Su concentración va entre 2 y 150 mg/L en aguas subterráneas, pudiendo llegar a 5000 mg/L en aguas salinas si existe Ca y hasta 200.000 mg/L si está asociado a Mg y Na en ciertas salmueras.

c) Iones Bicarbonato y Carbonato (CO_3H^- y CO_3^{-2})

Estos iones tienen mucha relación con la alcalinidad del agua y el pH. El ion bicarbonato HCO_3^- varía entre 50 y 350 mg/L en aguas subterráneas pudiendo llegar a veces hasta 800 mg/L. El ion carbonato CO_3^{-2} tiene concentraciones mucho menores que el de los bicarbonatos para aguas subterráneas y si el pH es menor a 8.3, su concentración es cero. En aguas alcalinas (pH mayor a 8.3), se pueden encontrar cantidades importantes de CO_3^{-2} hasta 50 mg/L.

d) Ion Nitrato (NO_3^-)

En general se encuentran concentraciones menores de 0,1 ppm. En ciertos casos puede llegar a 400 ppm. Estas concentraciones elevadas en aguas de bebida pueden producir cianosis en los niños y comunican corrosividad, (oxidaciones) al agua y produce interferencias en fermentaciones.

e) Fosfato (PO_4^{-3})

Su concentración va desde 0.01 a 1 mg/L pudiendo llegar a 10 mg/L y excepcionalmente a 50 mg/L.

2.3.4.2 Cationes

a) Iones relacionados con el Fe

La concentración de Fe^{+2} es entre 0 y 10 mg/L, siendo menos de 0.5 mg/L en aguas aireadas. Con pH entre 5 y 8 rara vez se llega a 50 mg/L. En aguas ácidas se puede llegar a 100 mg/L de Fe^{+2} y Fe^{+3} . Suele ser tóxico para las plantas en concentración mayor de 5 mg/L.

b) Ion Calcio Ca^{+2}

En las aguas subterráneas, la concentración de este elemento está entre 10 y 250 mg/L, pudiendo llegar a 600 mg/L en aguas selenitosas.

c) Ion Magnesio Mg^{+2}

Las concentraciones van desde 1 a 100 mg/L en aguas subterráneas, pudiendo llegar a algunos miles de mg/L en aguas salinas o salmueras.

d) Ion Arsénico As

El arsénico se puede encontrar en las aguas subterráneas en altas concentraciones como elemento traza.

Según estudios de Smedley & Kinniburgh, el rango de concentración en el que se encuentra el arsénico en el agua subterránea es de 0.5 a 5000 $\mu\text{g/L}$.³

La variación de esta concentración depende de las características y las condiciones que presente el acuífero. Así, concentraciones altas pueden aparecer en acuíferos con condiciones reductoras, con circulación geotermal, aquellos acuíferos afectados por la minería, los relacionados con depósitos minerales o acuíferos influenciados por la actividad antropogénica. Sin embargo, las concentraciones altas casi siempre están ligadas a los procesos geoquímicos naturales.

³ Smedley P.L., Kinniburgh D.G., 2002. A review of the source, behaviour and distribution of arsenic in natural waters. Applied Geochemistry, 17, 517-568.

Los minerales más comunes encontrados que intervienen en la geoquímica de los acuíferos son la pirita y la arsenopirita, que son las mayores fuentes de arsénico.

No es posible determinar un esquema para las reacciones que puedan darse dentro de un acuífero.

2.4 Movilidad y Transporte del Arsénico

El Arsénico se mueve en el ambiente debido a numerosos procesos ya sean estos naturales como la meteorización geoquímica o biogeoquímica de las fases sólidas, actividad biológica, emisiones volcánicas; o debido a procesos antropogénicos como la actividad minera, uso de combustibles fósiles, pesticidas, herbicidas, desecantes, conservadores de maderas, fundiciones, etc. Estas actividades han ampliado el ciclo del elemento encontrándose en la actualidad una mayor cantidad del mismo presente en el medio ambiente.

La continúa exposición del arsénico en fase sólida a condiciones de oxidación generadas por el agua, es la mayor vía para la elevación de la concentración de As en el agua subterránea.

De esta manera, cualquier soluto, gas disuelto o fase sólida, que tienda a alterar las condiciones redox de la fase acuosa del As, influenciará fuertemente en la especiación del arsénico disuelto. Especies como óxidos de Fe hidratado (HFO), la presencia de oxianiones como sulfatos, fosfatos, etc. o cationes como Ca^{+2} y Mg^{+2} encontrados en la composición del agua subterránea son los elementos más comunes con los que interactúa el arsénico.

2.4.1 Interacción Fase Sólida / Solución

a) Adsorción/Desorción:

En las aguas subterráneas el As(V) (H_2AsO_4^- y HAsO_4^{2-}) está presente cargado negativamente y el As(III) como especie neutra (H_3AsO_3).

La forma como estas especies sean adsorbidas por la fase sólida presente depende de la diferencia de cargas de estas especies disueltas y las cargas de la fase sólida. Las reacciones de adsorción o desorción son cuantificadas por las isoterms de adsorción o desorción.

Una isoterma de adsorción es aquella que relaciona la concentración de As en solución con su concentración en la superficie de la fase sólida. Ésta última depende de la especie arsenical, de la carga de la superficie y también de la concentración de otros iones en solución, ya que estos compiten con el As por ocupar los sitios de adsorción.

En consecuencia, a determinadas condiciones de concentración de una especie iónica, ésta puede provocar la desorción de otra especie previamente adsorbida.

Las isoterms de adsorción tanto del As(V) como del As(III) son de naturaleza no lineal. Esto implica que la cantidad de As adsorbida es relativamente mayor, aún cuando las concentraciones de As disueltas sean bajas.⁴

La máxima adsorción del arseniato se da a un $\text{pH} < 7$ y la del arsenito a un $\text{pH} < 8$.

A continuación las superficies más comunes donde el Arsénico se adsorbe:

<i>Arsénico</i>	<i>Superficies de adsorción</i>
------------------------	--

⁴ Smedley P., Kinniburgh D.G. Applied Geochemistry 17.(2002). 517-568

Arseniato o arsenito	Óxidos de Hierro Concentración alta de óxidos de aluminio o manganeso Materia Orgánica Arcilla Bicarbonatos
-------------------------	--

Tabla 2.4: Superficie de Adsorción del As
 Fuente: Autoras 2007

La adsorción puede ser fuerte dependiendo de las concentraciones de los minerales presentes.

Las reacciones de adsorción o desorción entre el arseniato y los óxidos de Fe son muy importantes ya que los óxidos de hierro son encontrados como recubrimiento de otras fases sólidas.

También para la adsorción de arseniato o arsenito hay que tomar en cuenta la capacidad adsorbente del mineral, su estabilidad como fase cristalina, la densidad de las sedes de intercambio, la reactividad de los grupos funcionales de la superficie.

Los cambios de pH son importantes en la adsorción o desorción del As. En un proceso de diagénesis se consumen H^+ , entonces el pH del agua subterránea tiende a ser mayor con el tiempo de residencia. Es por esto que esta evolución geoquímica del agua hacia condiciones alcalinas puede causar la desorción de As.

Las reacciones de oxidación-reducción pueden controlar la adsorción o desorción del As, ya que tienen efectos en la especiación.

b) Precipitación/Disolución

Las reacciones de precipitación-disolución están controladas por los cambios de la solución, por el pH, la temperatura, las condiciones redox y la concentración de las especies acuosas.

Estas reacciones implican la formación o la desintegración de fases minerales donde solo se encuentran involucrados los elementos que forman parte de la fórmula química del mineral.

La disolución de un mineral depende del tamaño de la partícula y de la cristalinidad del mismo.

La velocidad de disolución o de precipitación de un mineral es corta⁵.

La reacción de disolución de los minerales tiende a ser más rápida bajo condiciones extremas de pH y del potencial redox.

La disolución de los óxidos de Fe se realiza bajo fuertes condiciones ácidas y reductoras. En esta reducción, el arsénico tiende a liberarse.

La coprecipitación es un proceso natural, que tiene lugar al mismo tiempo que la adsorción, y consiste en la incorporación de componentes menores a la estructura mineral.

Como parte de la disolución está la codisolución, que es el proceso inverso de la coprecipitación. Esta codisolución da lugar a la movilización del As en el agua. La codisolución en muchos casos puede ser más efectiva para la movilización que la desorción.

2.5 Incorporación del Arsénico al agua

⁵ LILLO Javier, Peligros Geoquímicos: Arsénico de origen natural en las aguas, GEMM (Grupo de Estudios de Minería y Medioambiente (Textos y cursos *on-line*), 2002.

Luego de una combinación de los fenómenos arriba señalados, el arsénico es incorporado a las aguas. Sin embargo, no solo bastan estos fenómenos, también es necesario que el arsénico liberado permanezca en el agua.

Para ello intervienen las condiciones locales, la cantidad de oxígeno del que disponga el ambiente y la evolución del acuífero.

A continuación se enumeran algunos de los mecanismos más comunes encontrados en las localidades que permitirán al arsénico movilizarse y liberarse, o permanecer en el medio.

a) Oxidación de sulfuros:

La oxidación de sulfuros se da en medios oxidantes con la intervención por lo general del Fe disuelto, que tiende a precipitar y a formar óxidos. Este mecanismo no es considerado el más eficiente en cuanto a movilización, ya que existe una readsorción de la mayor cantidad de arsénico en los óxidos de Fe formados.

b) Disolución de óxidos y oxihidróxidos de Fe y Mn

En aguas con pH bajo, los óxidos y oxihidróxidos de Fe y Mn tienden a disolverse. El arsénico adsorbido en ellos se moviliza durante la disolución.

c) Desorción en condiciones alcalinas y oxidantes

En condiciones oxidantes y pH alto se produce la desorción del As. EL pH se incrementa debido a procesos de meteorización o de intercambio iónico⁶. Este mecanismo es el más efectivo para la movilización del arsénico. Además en esta desorción se liberan vanadatos, fosfatos, uranilos y molibdatos.

d) Desorción y disolución promovidos por cambios en las condiciones reductoras

⁶ Smedley P.L., Kinniburgh D.G., 2002. A review of the source, behaviour and distribution of arsenic in natural waters. Applied Geochemistry, 17, 517-568.

En los ríos, es común que se presente una rápida acumulación de los sedimentos. Esta materia orgánica acumulada, al descomponerse usa todo el O_2 disuelto, NO_3 y SO_4 ; creando así las condiciones reductoras.

Mientras se presentan estos fenómenos, el cambio de As (V) fuertemente adsorbido a As (III) levemente adsorbido, es la primera reacción que ocurre.

El cambio en las condiciones redox de iones adsorbidos afectan la manera en que otros aniones compiten por los sitios de sorción.

2.6 Toxicidad

Como se mencionó anteriormente, el arsénico es un compuesto sumamente tóxico que afecta a la salud humana. Las consecuencias en la salud de una exposición al arsénico dependen del modo y la duración de la exposición así como en la fuente y el tipo de arsénico.

El As(III) es más tóxico que el As(V). Esto se debe a que los compuestos pentavalentes tienen menor efecto en la acción de las enzimas⁷.

Entonces, la toxicidad del arsénico viene dado por su estado de oxidación, su estructura química y por la solubilidad del mismo en el medio biótico.

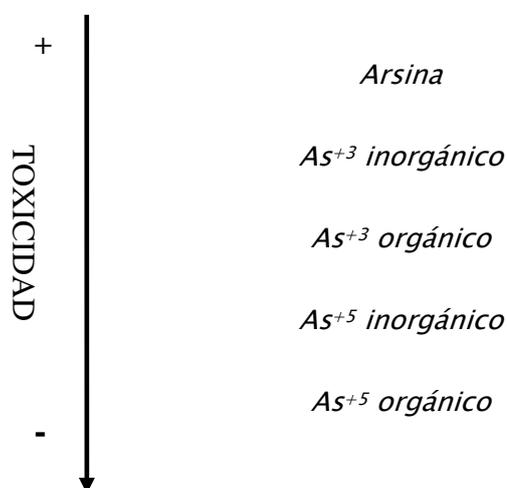
La estructura química de As (III) y As(V) es diferente.

El As (V) tiene mayor capacidad de ionización por la presencia del doble enlace en su fórmula química. Esto implica que tiene mayor facilidad de disolverse en el agua. Además su constante de disociación comienza a darse a pH bajos, facilitando la formación de los compuestos de As(V).

⁷ ESPARZA de Castro María Luisa, Seminario Internacional sobre Evaluación y Manejo de las fuentes de Agua de bebida contaminadas con Arsénico, Universidad de Chile, Santiago de Chile, 11 de noviembre del 2004.

El As (III) tiene un constante de disociación a pH alto por lo que en aguas naturales se lo encuentra como especie neutra. Esta característica facilita su movilidad. Por el hecho de no encontrarse en estado iónico en las aguas, no puede disolverse o disociarse lo que permitiría mantener su concentración, llegando así a ser más tóxico que el As en estado de oxidación +5.

Tomando en cuenta las características arriba señaladas, la escala de toxicidad de las especies de arsénico puede resumirse de la siguiente manera:



2.6.1 Dosis

De acuerdo a algunas investigaciones y análisis realizados en laboratorios de América Latina, se concluye que la dosis letal en adultos es de 1-4mg As^{+3} /kg y para los demás compuestos (AsH_3 , As_2O_3 , As_2O_5) la dosis varía entre 1,5mg/kg y 500mg/kg de la masa de cuerpo.

2.6.2 Arsénico en el Cuerpo Humano

La principal vía de exposición al arsénico es por la ingesta y la inhalación. Así, el tóxico llega al organismo y entra en contacto con las superficies epiteliales

del tracto digestivo, del aparato respiratorio o de la piel, donde se absorbe. Al atravesar estas membranas alcanza el torrente sanguíneo, considerándose que el tóxico ha penetrado al organismo. Al hacerlo empieza a ser transformado por las enzimas microsómicas hepáticas del organismo y se enlaza con la hemoglobina.

A continuación es transportado por la sangre a los distintos órganos, donde puede llegar a causar un daño permanente.

En 24 horas puede ser encontrado en el hígado, en el riñón, los pulmones, en el bazo y en la piel. La acumulación en la piel es debido a su facilidad de reaccionar con las proteínas.

El arsénico inorgánico también es absorbido por los tejidos, es transformado mediante la metilación y eliminado en la orina a través del riñón. Cuando la ingestión es mayor que la excreción, se tiende a acumular en el cabello y en las uñas.

El nivel normal de arsénico en la orina es 5-40 $\mu\text{g}/\text{día}$, en el cabello de 80-250 $\mu\text{g}/\text{día}$ y en las uñas de 430-1080 $\mu\text{g}/\text{día}$.

Los efectos tóxicos del As en los humanos varían de acuerdo a la genética, al metabolismo, a la dieta, al estado de la salud, a la nutrición, al sexo, entre otros.

Aquellos con mayor riesgo son los que tienen una baja habilidad en la metilación del arsénico y por consiguiente lo retienen. Los más afectados son los niños que no metabolizan el As como un adulto, ya que su organismo realiza mayor división celular por encontrarse en desarrollo; y las personas desnutridas por la carencia de vitamina A y C, metionina.

El As también altera la genética de los cromosomas, quitándole la mitad de su información.⁸

Concentraciones altas de arsénico en la dieta afecta también al crecimiento y la reproducción. De acuerdo a estudios realizados, grupos de alimentos como hortalizas, frutas, lácteos, carnes poseen concentraciones de arsénico, siendo las más altas aquellas encontradas en los pescados y mariscos.

La orina es el mejor biomarcador para la medición de arsénico inorgánico absorbido. La sangre, el cabello y las uñas son menos sensibles a la exposición.

En las muestras de orina, concentraciones de As menores a 10 µg/L son normales. Si estos sobrepasan los 100 µg/L se debe realizar un análisis exhaustivo de la fuente de As. Concentraciones en sangre mayores 100-500 µg/L se consideran tóxicas. Concentraciones de arsénico en cabello o uñas por encima de 5 mg/kg son patológicas, y se pueden medir entre los seis a doce meses de la exposición arsénico; en orina, hasta el décimo día después de la exposición.⁹

2.6.3 Intoxicación

De acuerdo al tiempo de exposición y la concentración ingerida, la intoxicación por arsénico y sus síntomas pueden ser:

1. Intoxicación Aguda

⁸ SCHOEN Ari, BECK Barbara, Arsenic toxicity at low doses: epidemiological and mode of action considerations, Gradient Corporation, Cambridge, March 2004

⁹ Agency for toxic substances and diseases registry, División of Toxicology, Toxicological profile for arsenic for arsenic(update). Atlanta, GA. U.S. Disponible en www.estrucplan.com.ar

Una gran cantidad de arsénico afecta la vía digestiva, manifestándose como un cuadro gastrointestinal con dolores abdominales, vómitos, diarreas y deshidratación.

La pérdida de sensibilidad en el sistema nervioso periférico es el efecto neurológico más frecuente; aparece una a dos semanas después de grandes exposiciones.

Los síntomas de la intoxicación aguda pueden aparecer en minutos o bien muchas horas después de la ingestión de entre 100 y 300 mg de As, aunque también es posible la inhalación de polvo de As o la absorción cutánea.

2. Intoxicación crónica

La ingestión de As durante un tiempo prolongado y dosis repetitivas, acarrea variados síntomas como: fatiga, gastroenteritis, leucopenia, anemia, hipertensión, alteraciones cutáneas.

Fases de la intoxicación crónica por arsénico.- En general, definir una sintomatología especial para las intoxicaciones por arsénico es complicado, debido a que se involucran algunos factores que difieren de acuerdo a la localidad.

Muchos síntomas se asocian a la sintomatología general de algunas enfermedades comunes, por ello es necesario realizar un seguimiento del origen de la fuente de arsénico y una serie de análisis médicos que cuantifiquen la concentración del elemento en el organismo. Luego de extensos estudios, en Bangladesh se utilizó el siguiente modelo epidemiológico:

Fase	Manifestaciones
------	-----------------

Preclínica	No hay síntomas. As se encuentra en muestras de orina y en los tejidos
Clínica	Afecta a la piel Melanosis en las palmas de las manos, manchas oscuras en el pecho, espalda, miembros y encías Keratosis o endurecimiento de la piel. Callosidades en las palmas de las manos y en las plantas de los pies. Según WHO 5-10 años de exposición
Complicaciones	Síntomas clínicos más pronunciados Efectos en los órganos internos como: ▲ Riñón ▲ Hígado ▲ Bazo Se asocia también: ▲ Conjunctivitis ▲ Bronquitis ▲ Diabetes
Malignidad	Tumores o cáncer de piel y otros órganos Gangrena, cáncer del pulmón o vejiga.

Tabla 2.5: Modelo de Epidemiología
 Fuente: Esparza de Castro María Luisa

Las enfermedades causadas por la intoxicación por arsénico se enumeran a continuación:

- ▲ Cáncer pulmón, vejiga, riñón, próstata
- ▲ Líneas de Mees
- ▲ Arsenismo crónico
- ▲ Abortos espontáneos
- ▲ Malformaciones congénitas
- ▲ Hidroarsenismo Crónico Regional Endémico HACER.

2.7 Marco Regulatorio sobre arsénico

Norma	Tipo de Agua	Límite
Norma Técnica Ecuatoriana NTE. INEN	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Agua Potable 	0.01 mg/L
Texto Unificado de Legislación Ambiental Secundario	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Agua Subterránea ▪ Agua de consumo humano ▪ Agua de riego ▪ Agua para uso pecuario 	35 µg/L 0.05 mg/L 0.1 mg/L 0.2 mg/L
Organización Mundial de la Salud (OMS)	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Agua de consumo 	0.05 mg/L

Tabla 2.6: Normativas Nacionales e Internacionales de Arsénico total
 Fuente: Autoras 2007

CAPÍTULO III

METODOLOGÍA

Las muestras de agua fueron tomadas en dos etapas. En la primera etapa, se realizó el levantamiento de información sobre concentración de arsénico para una línea base de las aguas geotermales.

Las fuentes geotermales muestreadas se describen en la tabla 3.1 y se georeferencian en el Gráfico 3.1.

#	Descripción	Provincia
1	Fuente Geotermal Aguas Hediondas	Carchi
2	Fuente Geotermal Aguas Negras	
3	Toma de Agua de San Miguel de Carchi	
4	Balneario Rumichaca	
5	Balneario Los Tres Chorros	
6	Cristóbal Colón, Fuente Termal El Baño	
7	Balneario El Ángel	
8	Balneario Chachimbiro	Imbabura
9	Fuente Geotermal Tímbuyacu	
10	Fuente Geotermal Urauco	
11	Balneario Municipal Cununyacu	

12	Balneario Municipal Rumiloma	Pichincha
13	Fuente Geotermal La Merced de Nono	
14	Balneario Cachaco	
15	Balneario Municipal El Tingo	
16	Balneario La Merced	
17	Complejo Turístico Ilaló	
18	Balneario Ushimana	
19	Fuente Geotermal San Guillermo	
20	Fuente Geotermal La Ciénega, Hda. Altamira	
21	Fuente de agua Mineral San Felipe	
22	Piscinas Municipales Guapante	
23	Piscinas Municipales de Pelileo	Tungurahua
24	Fuente Geotermal Balneario Agua Santa	
25	Balneario El Salado	
26	Balneario Cununyacu	
27	Fuente Geotermal Aguayan	
28	Fuente Geotermal Hacienda Payabaños	

Tabla 3.1: Fuentes Geotermales Analizadas
 Fuente: Autoras 2007



Grafico 3.1: Localización de los Sitios De Muestreo
Fuente: Almanaque Electrónico Ecuatoriano

En cada punto se tomó la ubicación geográfica con GPS navegador MAGELLAN, parámetros in situ y dos muestras de agua en botellas de plástico. Una muestra acidificada (con HNO_3 con el fin de evitar reacciones) para determinar Arsénico y cationes; y la segunda para aniones

En la segunda etapa se muestrearon 8 de las 10 fuentes geotermales que sobrepasaron el límite permitido¹⁰.

¹⁰ TULAS, Texto Unificado de Legislación Ambiental, Libro VI, Anexo I, Tabla 1. Límites máximos permisibles para aguas de consumo humano y uso doméstico.

En estos puntos, se realizó un análisis más detallado de las fuentes, aumentando los parámetros in situ y de laboratorio, identificando sus afloramientos, siguiendo sus cursos e indagando el posible uso del agua en la fuente y en su trayecto. También se aplicó las encuestas a los habitantes de centros poblados para establecer el posible daño socioambiental.

No se muestrearon Rumichaca y Balneario de Agua Santa.

Este monitoreo comprendió:

1. Las fuentes geotermales del Balneario la Calera y el Río El Ángel

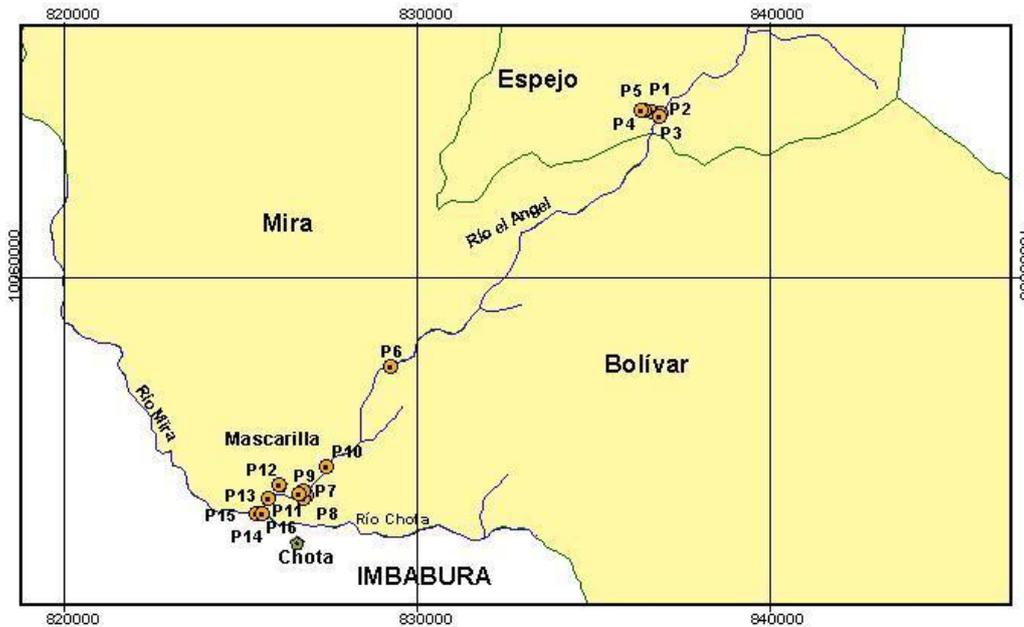


Gráfico 3.2: Localización de los puntos muestreados en el Sector del Río El Ángel
Fuente: Autora 2007

2. La fuente geotermal de Chachimbiro y la quebrada Cachiyacu.

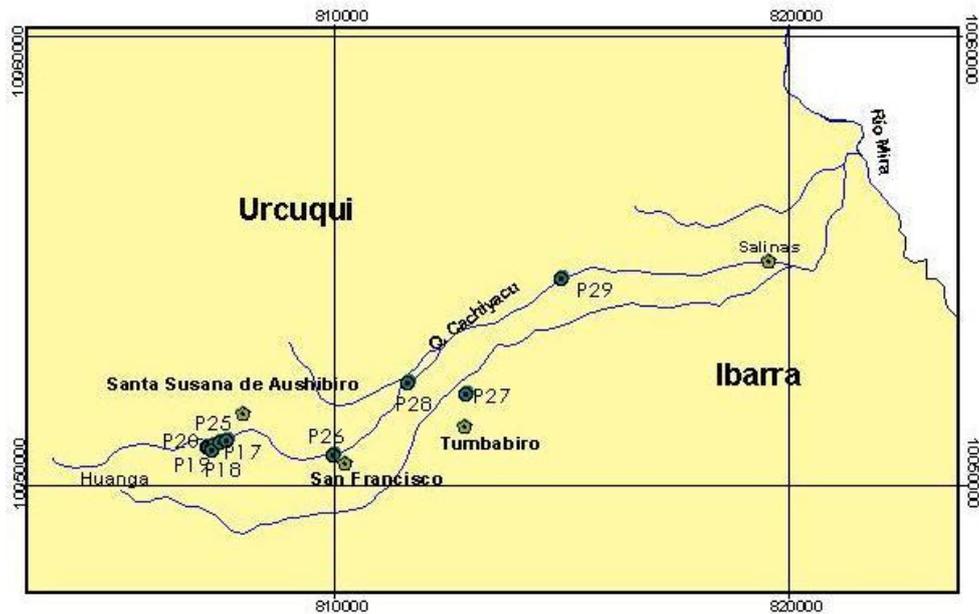


Gráfico 3.3: Localización de los puntos muestreados en el Sector de la Quebrada Cachiya
Fuente: Autoras 2007

3. Las fuentes geotermales alrededor del volcán inactivo Ilaló, Río San Pedro, Quebrada Ilaló y Río Chiche.

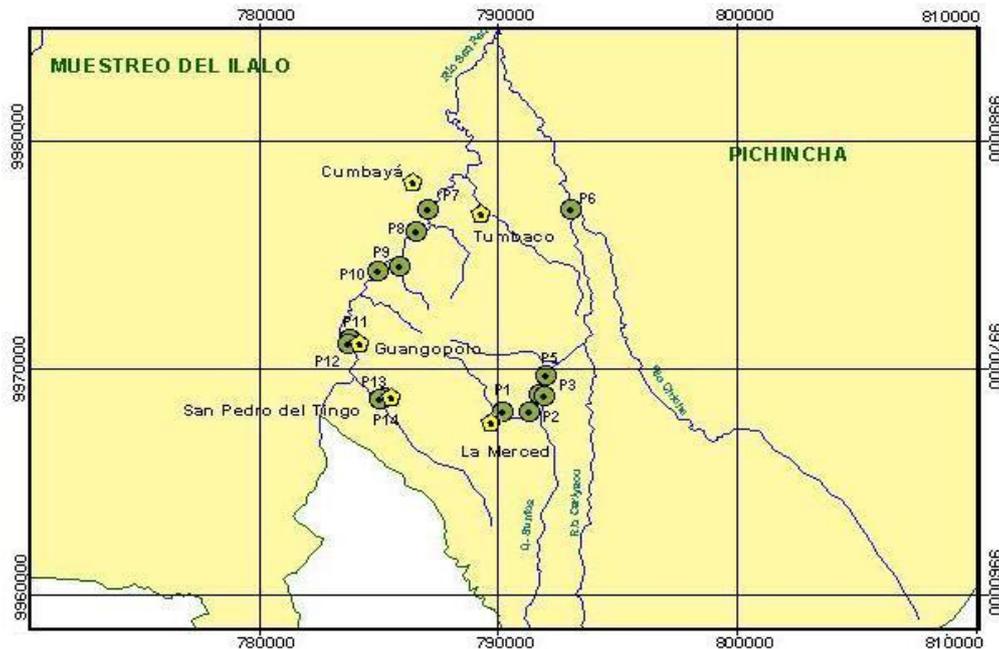


Gráfico 3.4: Localización de los puntos muestreados en el Sector del volcán inactivo Ilaló
Fuente: Autoras 2007

4. La fuente geotermal La Merced de Nono.

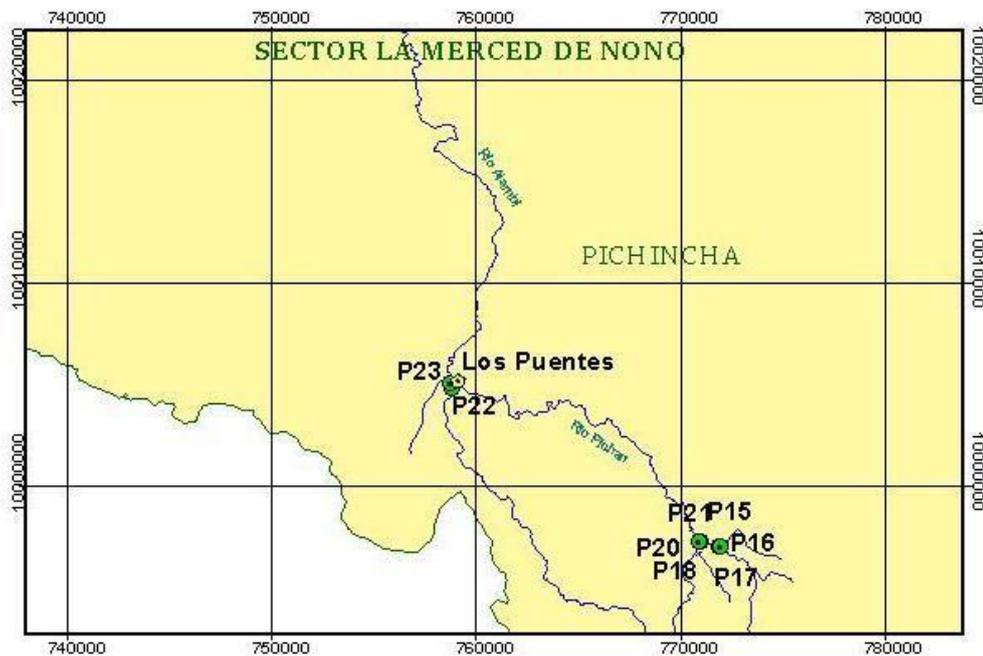


Grafico 3.5: Localización de los puntos muestreados en la Provincia de Pichincha Sector La Merced de Nono
 Fuente: Autoras 2007

3.1 Parámetros tomados In Situ

Parámetro	Equipo	Sensibilidad
Temperatura	Termocupla marca Hanna Instruments modelo MINITHERM	1 Centésima de la lectura
Conductividad	Conductivímetro marca Mettler Toledo, modelo PortableLab™	1 Centésima de la lectura
pH	Equipo marca Mettler Toledo, modelo PortableLab™	1 Centésima de la lectura
Eh*	Equipo marca Mettler Toledo, modelo PortableLab™	1 Centésima de la lectura
OD*	Equipo Mettler Toledo, modelo PortableLab™	1 Centésima de la lectura
TDS*	Equipo Mettler Toledo, modelo PortableLab™	1 Centésima de la lectura

*Parámetros adicionales para la segunda etapa

Tabla 3.2 Parámetros in Situ
 Fuente: Autoras 2007

3.2 Parámetros Analizados en Laboratorio

a) Separación de Especies Arsenicales

Procedimiento Utilizado: separación usando mini-columna empacada con resina de intercambio aniónico

Mediante este procedimiento se separa el arsénico(V) del arsénico(III) en muestras de agua. Para ello se usa una resina aniónica A--- cargada con cloro que se empaca en la columna.

El pH de las muestras debe ajustarse entre 4 y 5 a fin de que las especies arsenicales del As(V) se conviertan en aniones, los cuales serán retenidos por la resina; mientras que los arsenitos o especies As(III) permanecerán neutros y atravesarán la columna sin ser capturados. En el ajuste del pH se utilizan soluciones diluidas de NaOH y HNO₃, las cuales se añaden a las muestras de agua conforme varía el pH. El caudal con el que se inyecta el agua a la columna es de alrededor de 0,1 mL/min. A fin de disponer de suficiente muestra para la cuantificación y para que exista una homogenización de ésta por la columna se hacen pasar al menos 30 mL de agua pretratada. El líquido saliente de la columna se recoge en un matraz para cuantificarse. Al final son analizadas ambas muestras usando generación de hidruros acoplado a un espectrómetro de absorción atómica.

b) Determinación de Arsénico Total y As(III)

La cuantificación de arsénico en el laboratorio se la realiza usando la técnica de generación de hidruros acoplado a un espectrómetro de absorción atómica (HG-AAS). Para el efecto se utiliza un volumen pequeño (0,5 a 1 µL) de muestra, el cual se agrega a 10 mL de HCl 0,1 N. Luego de 10 segundos, se deja pasar una solución de borohidruro de sodio a un reactor, para reducir todo al arsénico y posteriormente generar el hidruro de arsénico. El gas hidruro es

transportado hacia una celda de cuarzo ayudado por un gas de transporte inerte (argón). La celda es mantenida a alta temperatura mediante la combustión de acetileno y el arsénico se cuantifica usando una lámpara de descarga de electrones (e^-) que trabaja con 180 voltios y con una longitud de onda de 193.7 nm. La sensibilidad del equipo es de 0,5 a 2 ng As.



Fotografía 3.1: Equipo de Absorción Atómica
Fuente: Autoras 2007

c) Extracción de As de Sedimentos

En los sedimentos, el arsénico no se encuentra como una especie iónica, sino, como una especie química no soluble. Por esta razón, se realiza la digestión de sedimentos, que permite al equipo leer los iones de arsénico formados por el ácido o por la base utilizada.

En la digestión ácida y básica, separan los iones de arsénico de acuerdo a cada medio.

El tipo de digestión permite conocer el mineral encontrado en el sedimento.

Una digestión ácida indica la concentración de As_T que se encuentra presente en la materia orgánica y en los sulfuros.

Una digestión básica indica la concentración de As_T en los óxidos metálicos como Fe, Al y Mn.

Método Utilizado: Digestión Acida

Principio: De cada muestra de sedimento, se lo procede a secar en una estufa con una temperatura de $100^{\circ}C$ durante 24 horas, luego se procede a triturar el sedimento en un mortero y se lo tamiza. A continuación, se pesa un gramo de la muestra y se los coloca en un recipiente con ácido sulfúrico a 0.2N, y a estos se los coloca en el agitador orbital con una velocidad de 100 durante 3 días. Estas muestras con digestión ácida son filtradas con una bomba al vacío. Este líquido es utilizado para medir la cantidad de Arsénico en los sedimentos.

Método Utilizado: Digestión Básica

Principio: Se retira los sedimentos que se encuentra en el papel filtro, y se añade Hidróxido de sodio (NaOH) al 2N. Dichas muestras son colocadas en el agitador orbital a una velocidad de 100 durante 3 días. Se procede después a ser filtradas con la bomba al vacío. Este líquido es el que nos permite leer la cantidad de Arsénico en los sedimentos.

3.3 Análisis Químico Complementario

Los siguientes parámetros químicos fueron realizados según el Standard Methods

Parámetros Químicos	Standard Methods
Alcalinidad Total	Titration Method 2320 B

Cloruros	Argentometric Method	4500 – Cl ⁻ B
Nitratos	Ultraviolet Spectrophotometric Screening Method	4500 –NO ₃ ⁻
Fosfatos	Stannous Chloride Method	4500 - PDS
Sulfatos	Turbidimetric Method	4500 – SO ₄ ²⁻ E

Tabla 3.3: Standard Methods
 Fuente: Standard methods 18 edition 1992

Determinación de Metales

Principio: Determinación de metales en agua por espectrometría de absorción atómica

Materiales

- Espectrómetro de Absorción Atómica de rayo simple con resolución espectral menor de 1nm.
- Lámparas de cátodo hueco: Na, Fe, Mg, Ca, K
- Gases para flama: acetileno, hidrógeno, aire comprimido, argón
- Cabezas quemadoras para aire acetileno
- Soluciones estándar.

3.4 Aspecto Socioambiental

Se realizaron encuestas en las poblaciones cercanas al cuerpo de agua donde desembocan las vertientes geotermales con elevadas concentraciones de As.

Las encuestas se orientaron a obtener información sobre:

- Uso del agua
- Nutrición
- Canasta básica de alimentos
- Salud
- Vivienda

La información obtenida es evaluada para establecer un perfil preliminar del posible daño socio-ambiental.

CAPÍTULO IV

RESULTADOS Y ANÁLISIS

1. Primera Fase

Agua

Luego de realizada la fase de campo y de laboratorio, se obtuvieron los siguientes resultados:

Muestra	Descripción	Altitud m.s.n.m.	pH	T (°C)	Conductividad (μ s/cm)	Cl- (mg/L)	Alcalinidad (mg/L)	As T (μ g/L)
El Carchi								
P1	Aguas hediondas	3610	4,75	54	1802	102,77	36,60	20
P2	Aguas hediondas	3610	4,5	36,10	1433	154,15	24,40	38
P3	Aguas hediondas	3610	3,53	26,9	1353	132,13	24,40	19
P4	Aguas hediondas	3610	3,13	35,5	1515	374,36	24,40	39
P5	Aguas negras	3553	5,95	34,5	1660	183,51	97,60	2
P6	Toma de Agua de San Miguel de Carchi	3179	7,4	13,3	97,8	380,40	36,60	20
P7	Rumichaca	2801	6,92	37,7	320	205,53	317,20	403
P8	Balneario Los Tres Chorros	2805	6,43	20	602	22,02	207,40	39
P9	Balneario Los Tres Chorros	2805	6,16	20,8	506	117,45	146,40	49
P10	Balneario Los Tres Chorros	2805	2,05	13,3	74,7	117,45	0,00	3
P11	Cristóbal Colón, Fuente termal El Baño	2778	6,63	32,7	2140	183,51	341,60	4
P12	La Calera, Balneario El Ángel	2532	7,26	30,9	1019	132,13	183,00	684

Tabla 4.1 Características Químicas de los sitios muestreados en Carchi
 Fuente: Autoras 2007

En la provincia de Carchi (tabla 4.1) de los 12 puntos muestreados en 7 vertientes, el Balneario Rumichaca (403 μ g/L) y el Balneario El Ángel (684 μ g/L) obtuvieron alta concentración de As_T.

El número restante de vertientes y puntos de agua se encuentran en los límites tolerables.

En Aguas Hediondas, el pH de las aguas oscila entre 3,13 a 4,75. La temperatura varía de 26,9°C a 54°C. La conductividad se encuentra entre 1353 a 1802 μ s/cm.

En el balneario Los Tres Chorros, el pH del agua de las fuentes se encuentra entre 6,16 y 6,43, la temperatura entre 20°C y 20,8°C. La conductividad varía entre 506 y 602 μ s/cm.

En Imbabura, se tomaron muestras en dos vertientes. De ellas, los puntos en el Balneario Chachimbiro, obtuvieron las concentraciones más altas del proyecto, entre 976 μ g/L en el punto de descarga de las piscinas y 185 μ g/L en la quebrada al final del balneario. (Tabla 4.2)

Muestra	Descripción	Altitud m.s.n.m.	pH	T (°C)	Conductividad (μ s/cm)	Cl- (mg/L)	HCO ₃ (mg/L)	As T (μ g/L)
Imbabura								
P13	Balneario Chachimbiro	2513	7,05	39,5	5920	587,2	183	926
P14	Balneario Chachimbiro	2513	7,7	43,5	5120	550,5	158,6	726
P15	Balneario Chachimbiro	2513	8,03	40,5	5340	748,7	195,2	976
P16	Balneario Chachimbiro	2513	7,97	18,3	1840	249,6	73,2	185
P17	Chachimbiro, Quebrada Cachiyacu	2513	8	23	3020	660,6	85,4	336
P18	Fuente Timbuyacu	2693	6,5	39	4660	411,1	366	4
P19	Fuente Timbuyacu	2693	7,54	13,1	251	102,8	61	ND
P20	Fuente Timbuyacu	2693	7,71	15,3	170,5	124,8	36,6	ND
P21	Fuente Timbuyacu, Río Huarniyacu	2693	7,66	14	343	102,8	73,2	ND

Tabla 4.2 Características Químicas de los sitios muestreados en Imbabura
 Fuente: Autoras 2007

El balneario Timbuyacu presenta bajas concentraciones en sus vertientes; en la descarga de las aguas residuales a la quebrada Huarniyacu, la concentración de As_T no es detectable.

En Chachimbiro, el pH del agua oscila entre 7(P13) y 8 (P17), la temperatura varía de 18,3°C (P16) en la fuente de Fe a 43°C (P14) en la fuente de origen del agua. La conductividad mayor se encuentra en la fuente de origen con 5,92 ms/cm (P13); la menor conductividad (1840 μ s/cm) en la fuente de agua con alto contenido de Fe (P16), como se puede apreciar en la fotografía 4.1



Fotografía 4.1: Fuente de Hierro en Chachimbiro (P16)
Autoras 2007

En los cuatro puntos de Timbuyacu, el pH del agua oscila entre 6,5 y 7,66, la temperatura se encuentra entre 39°C en la fuente y 13°C en el río Guarmiyacu. La conductividad varía de 4,66 ms/cm en la fuente y 170,5 μ s/cm en el río Guarmiyacu.

En la provincia de Pichincha, se realizó el muestreo en 10 fuentes geotermales como se indica en la tabla 4.3. Los contenidos de As_T en Cununyacu, Nono, El Tingo, La Merced y el Balneario Ilaló, sobrepasaron el límite sobre aguas de consumo del Libro VI, Anexo I del TULAS. (Texto Unificado de Legislación Ambiental Secundario)

Muestra	Descripción	Altitud m.s.n.m.	pH	T (°C)	Conductividad (μ S/cm)	Cl- (mg/L)	Alcalinidad (mg/L)	As T (μ g/L)
Pichincha								
P22	Hacienda Palmira, Fuente Termal Urauco	2763	6,51	34,5	2780	293,6	402,6	ND
P23	Hacienda Palmira, Fuente Termal Urauco	2763	6,4	32,4	2360	146,8	329,4	ND
P24	Hacienda Palmira, Fuente Termal Urauco	2763	6,51	36,5	3390	234,9	475,8	ND
P25	Balneario Cununyacu	2349	7,38	28,8	970	102,8	195,2	120
P26	Balneario Cununyacu	2349	7,27	28,5	959	110,1	146,4	405
P27	Balneario Guangopolo	2382	7,66	31,3	923	161,5	170,8	11
P28	Hda. San francisco, La Merced de Nono	3143	6,34	30,5	4120	301,0	512,4	30
P29	Hda. San francisco, La Merced de Nono	3143	6,25	30,1	4060	330,3	463,6	39
P30	Hda. San francisco, La Merced de Nono	3143	6,49	28,4	4110	367,0	475,8	69
P31	Hda. San francisco, La Merced de Nono	3143	6,32	30,6	4140	205,5	256,2	96
P32	Cachaco, Calacalí	2624	6,56	28,8	3430	198,2	329,4	28
P33	Balneario El Tingo	2461	7,05	42,6	3040	256,9	414,8	96
P34	Balneario La Merced	2593	6,6	36	1008	117,4	183	50
P35	Balneario Ilaló	2564	6,53	37,7	1604	139,5	207,4	103
P36	Balneario Ushimana	2495	7,16	21,5	365	88,1	73,2	2
P37	Sillunchi, Fuente San Guillermo	2827	6,97	33,8	650	286,3	1098	48

Tabla 4.3 Características Químicas de los sitios muestreados en Pichincha
 Fuente: Autoras 2007

En las tres fuentes geotermales de Urauco cerca de Lloa, el pH del agua se encuentra entre 6,4 y 6,51, la temperatura varía de 32,4°C a 36,5°C. Los valores de conductividad se encuentra entre 2,36 a 3,39 ms/cm.

En los cuatro puntos de la fuente geotermal La Merced de Nono, el pH se encuentra de 6,25 a 6,49, la temperatura varía entre 28,4°C y 30,6°C y la conductividad oscila entre 4,06 mS/cm y 4,14 mS/cm.

El balneario Cununyacu, tiene un pH que oscila entre 7,27 y 7,38, la temperatura se encuentra entre los 28,5°C y 28,8°C. y la conductividad varía entre 959 y 970 μ S/cm.

En Cotopaxi y Tungurahua, las vertientes de las piscinas de Agua Santa en Baños, tienen la concentración de 93 μ g/L y 114 μ g/L de As_T (tabla 4.4). El resto de puntos tienen bajas concentraciones de As_T.

Muestra	Descripción	Altitud m.s.n.m.	pH	T (°C)	Conductividad (μ S/cm)	Cl- (mg/L)	HCO ₃ (mg/L)	As T (μ g/L)
Cotopaxi								
P38	Fuente La Ciénega, Hda. Altamira	2976	6,48	19,8	268	95,4	170,8	12
P39	Fuente La Ciénega, Hda. Altamira	2976	6,41	19,3	1524	161,5	524,6	45
P40	Fuente La Ciénega, Hda. Altamira	2976	6,6	19,5	348	183,5	597,8	ND
P41	Fuente La Ciénega, Hda. Altamira	2976	6,39	18,6	896	102,8	292,8	47
P42	Fuente San Felipe	2795	6,67	33,8	496	212,9	634,4	40
P50	Hacienda Payabaños	3656	6,95	38,5	1316	154,1	244	3
P51	Hacienda Payabaños	3656	7,36	34,1	1221	110,1	231,8	4
Tungurahua								
P43	Piscinas Guapante	2574	7,6	27,6	250	110,1	170,8	31
P44	Piscinas Municipales de Pelileo	2545	7,9	19	664	88,1	48,8	11
P45	Agua Santa, Piscina de la Virgen	1921	6,52	55,5	5010	205,5	378,2	93
P46	Agua Santa, Piscina de la Virgen	1921	6,59	54	4990	234,9	414,8	114
P47	Balneario El Salado	1935	6,39	48,9	740	374,4	402,6	48
P48	Balneario Cunungyacu	3200	8,3	42,6	422	484,5	48,8	47
P49	Balneario Aguayán	2865	7,56	23,9	445	198,2	97,6	6

Tabla 4.4 Características Químicas de los sitios muestreados en Cotopaxi y Tungurahua
 Fuente: Autoras 2007

En la Ciénega, los valores de pH se encuentran entre 6,39 y 6,48, la temperatura varía en 1°C, siendo la más alta 19,8°C y la conductividad oscila entre 268 μ S/cm a 1524 μ S/cm.

En la fuente de Agua Santa, el pH se encuentra entre 6,52 y 6,59, la temperatura varía entre 54°C y 55,5°C y la conductividad tiene una media de 5,0 μ S/cm.

En las fuentes de la Hacienda Payabaños, el pH oscila entre 6,95 y 7,36, la temperatura entre 34,1°C y 38,5°C y la conductividad se encuentra entre 1221 μ S/cm y 1316 μ S/cm.

La concentración de Arsénico total de las muestras tomadas se encuentran entre 1-976 μ g/L.

De los 51 puntos muestreados en la región centro-norte del Ecuador, 15 fuentes geotermales tienen concentraciones mayores a 50 μ g/L.

Punto	Descripción	As Total (ppb)
P7	Rumichaca	403
P10	La Calera, Balneario El Angel	684
P11	Balneario Chachimbiro	976
P12	Río Cachaco	336
P15	Balneario Cununyacu	405
P17	Hda. San francisco,Fuente Termal La Merced de Nono	96
P19	Balneario El Tingo	96
P20	Balneario La Merced	50
P21	Balneario Ilalo	103
P28	Balneario Agua Santa	114

Tabla 4.5: Concentraciones de As_T mayores a 50µg/L I Fase
 Fuente: Autoras 2007

El gráfico 4.1 hace referencia a los puntos con concentraciones menores que 50µg/L y las especies arsenicales en cada punto.

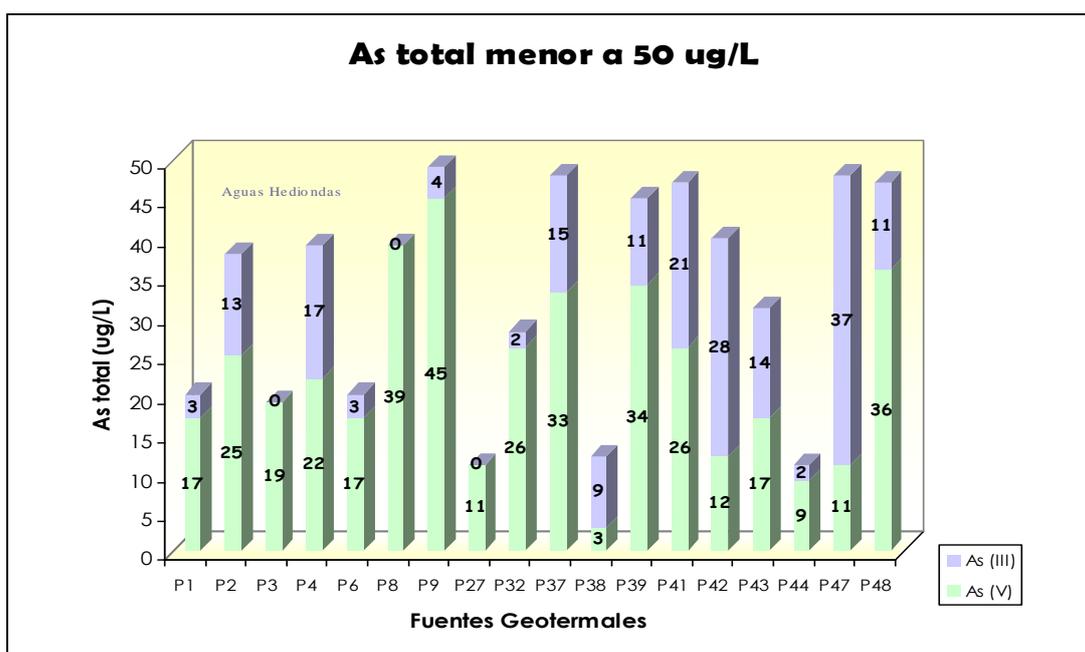


Gráfico 4.1: Concentraciones de As_T menores a 50 µg/L I Fase
 Fuente: Autoras 2007

Estos puntos se georeferencian en el siguiente gráfico (4.2):



Gráfico 4.2: Espacialización de las Fuentes Geotermales con Concentraciones menores de 50 ppb
Fuente: Autoras2007

En la mayor parte de estas fuentes se encontró como especie arsenical predominante el As(V), en algunos puntos como de la fuente de agua San Felipe, se tienen concentraciones significativas de As(III). Es preciso destacar que esta vertiente es fuente de agua mineral.

El balneario el Salado en Baños tiene la mayor concentración de As(III) ($37\mu\text{g/L}$).

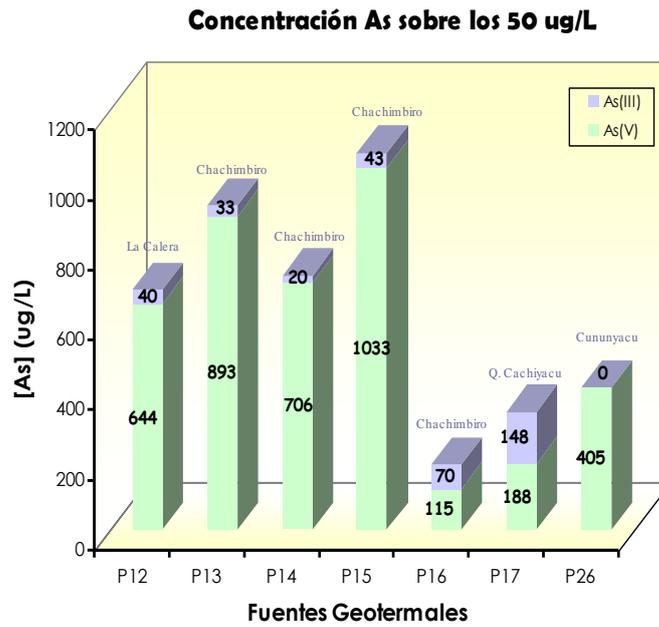


Gráfico 4.3: Sitios muestreados en las provincias del Carchi e Imbabura con concentraciones de As_T mayores a 50 $\mu\text{g/L}$
 Fuente: Autoras 2007

El gráfico 4.3 indica la especiación de los puntos con mayor concentración de As_{total} . Se observa que en los puntos en Chachimbiro tienen alta concentración de As (III), los demás son altos en As (V).

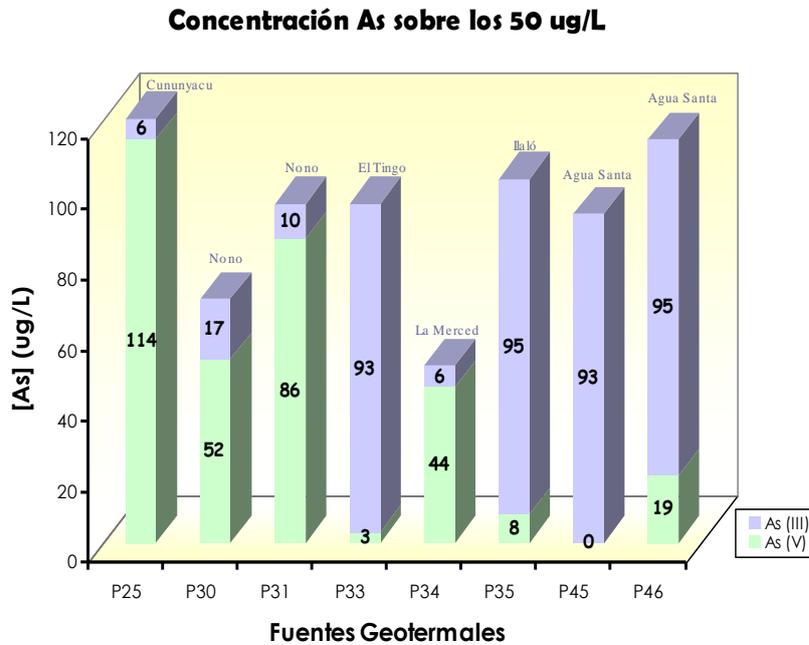


Gráfico 4.4: Sitios muestreados en la provincia de Pichincha con concentraciones de As_T mayores a 50 $\mu\text{g/L}$
 Fuente: Autoras 2007

Como se aprecia en el gráfico 4.4, las concentraciones de As(V) en uno de los puntos de Cununyacu, en Nono y en La Merced son casi la totalidad del As presente.

En los balnearios El Tingo, Ilaló y Agua Santa, las concentración alta de As(III) son altas.

Estos resultados se corroborarán midiendo el potencial redox (Eh) en la segunda fase del proyecto.

a) Sedimentos

Como se aprecia en la tabla (4.6), la mayoría de las muestras de suelo tienen elevadas concentraciones de As_T.

Muestra	Fuente Geotermal	As total mg/Kg
P1	Aguas hediondas	170,71
P2	Aguas hediondas	286,55
P3	Aguas hediondas	1545,03
P4	Aguas hediondas	717,6
P5	Aguas negras	92,48
P11	Cristóbal Colón	461,39
P16	Chachimbiro	131,85
P17	Chachimbiro	174,25
P18	Timbuyacu	2,86
P19	Timbuyacu	4
P22	Hda Lloa. Fuente termal Urauco	1,58
P23	Hda Lloa. Fuente termal Urauco	4,08
P28	Hda.San Francisco La Merced Nono	329,74
P32	Cachaco Calacalí	69,53
P39	Hda Altamira (ciénega)	238,09
P43	Piscinas Guapante	6,85
P44	Piscinas Pelileo Moya	2,29
P47	El salado Baños	198,7

Tabla 4.6: Concentración de As en los Sedimentos, I Fase
 Fuente: Autoras 2007

En el punto donde existe la mayor concentración de As_T presente en el suelo es Aguas Hediondas (1.545,03 mg/kg). En este punto la concentración de As_T extraída mediante digestión básica fue representativa (434 mg/kg del total).

En la fuente geotermal el Baño - Cristóbal Colón, la concentración de As_T extraído fue 461,39 mg/kg.

En la quebrada Cachiyacu al final del balneario Chachimbiro, la concentración de As_T extraído fue 174,25mg/kg.

En Timbuyacu, la concentración de As_T contenido en los sedimentos es bastante pequeña (2,86mg/kg).

En la fuente geotermal La Merced de Nono, el As_T presente tiene una concentración de 329,74 mg/kg.

En la Ciénega, el As_T tiene una concentración de 238,09 mg/kg.

2. Segunda Fase

4.1 Fuente Geotermal del Balneario La Calera / Río El Àngel

La tabla (4.7), muestra los parámetros físico-químicos, así como los componentes más significativos presentes en las fuentes geotermales de La Calera y el Río el Àngel.

El agua del sector presenta un pH de neutro a alcalino oscilando entre 6 y 9, condiciones oxidantes ($Eh = 150mV$) y un rango de Total de Sólidos Disueltos entre 145,7 y 699 mg/L. Presenta valores de conductividad entre 292 $\mu S/cm$ y 1406 $\mu S/cm$.

Entre los elementos químicos principales, el Na^+ es el elemento dominante de estas aguas.

Los componentes principales de la fuente La Calera se encuentran representados en miliequivalentes en el gráfico (4.5).

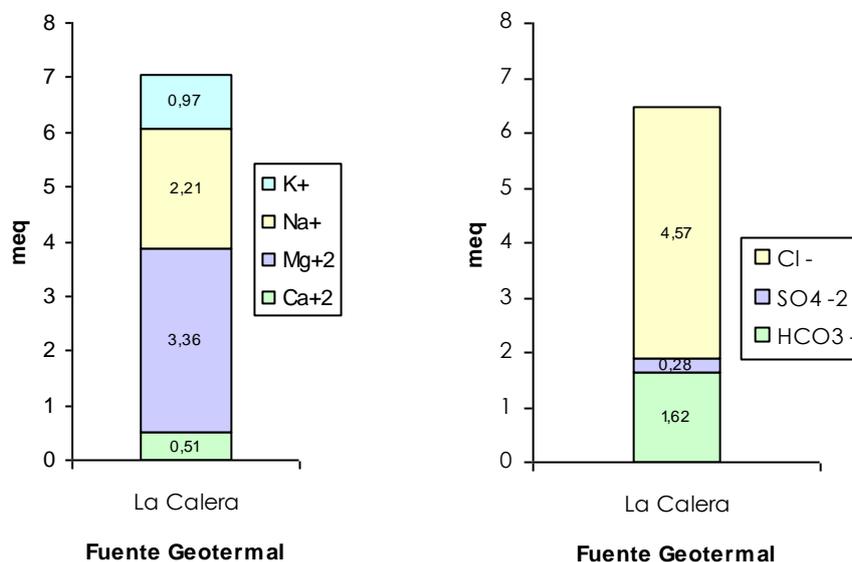


Gráfico 4.5: Aniones y Cationes presentes en la Fuente Geotermal La Calera / Balneario El Ángel
 Fuente: Autoras 2006

La Calera presenta mayor cantidad de cationes Mg⁺, seguido de una alta concentración de Na⁺. Con relación a los aniones, el Cl⁻ es el más abundante. En la tabla 4.7, la concentración de Na⁺ varía desde 33 mg/L a 55mg/L. La concentración de Cl⁻ varía entre 70 mg/L y 160 mg/L, siendo esta última la correspondiente a la fuente (P1). La concentración de Fe varía entre 610 µg/L y 840 µg/L.

Punto	Descripción	pH	T °C	Cond µs/cm	TDS mg/L	OD mg/L	Eh mv	As total µg/L	Cl- mg/L	HCO ₃ mgCaCO ₃ /L	PO ₄ mg(P-)/L	NO ₃ - mg/L	SO ₄ = mg/L	Fe+ mg/L	Ca+ mg/L	K+ mg/L	Na+ mg/L	Mg+ mg/L
P1	Balneario El Ángel, La Calera	7,27	34,6	1160	581	1,4	201	573	160	98,8	0,79	313,5	13,7	0,83	10,2	37,8	50,8	40,8
P2	Bajando del balneario, Río El Ángel	8,98	20,6	369	187,6	5,25	230	113	108	145,3	0,89	11,2	7,0	0,8	9,7	18,5	49,1	30,5
P3	100 m aguas abajo Río El Ángel	8,92	20,7	407	207	5,25	68,1	107	104	129,4	0,81	13,2	7,7	0,72	8,8	18,9	43,3	29,1
P4	Origen del agua, arriba del balneario	6,1	36,7	1406	699	1,61	45,8	336	120	170,8	0,38	14,0	13,6	0,75	5,6	26,4	49,6	41,8
P5	Vertiente que desemboca en el Río El Ángel	6,44	28,4	1142	569	1,2	105	319	120	146,4	0,93	13,2	9,4	0,83	4,7	34,5	46,9	35,8
P6	Río el Ángel, sector Uyamá	8,84	24,4	991	496	4,8	150	127	75	128,6	0,72	13,6	100,7	0,72	8,2	40,4	49,6	40,5
P7	Río El Ángel, sector Mascarilla	8,02	20,7	836	418	4,49	130	94	70	117,4	0,83	11,9	100,8	0,73	8,0	28,1	48,5	36,1
P8	Río El Ángel, bajando 100 m por el río	8,15	20,7	833	416	4,72	110	84	68	109,5	0,80	40,9	87,4	0,73	7,8	40,2	49,1	31,9
P9	Acequia proveniente del Río El Ángel	8,47	20,5	832	511	5,19	NC	94	92	99,4	4,08	17,4	86,3	0,73	7,2	21,5	55,6	32,1
P10	Toma de agua para la acequia, Río El Ángel	8,33	20,7	1018	510	4,9	NC	130	70	82,9	3,49	27,9	98,4	0,71	6,4	22,8	50,3	26,6
P11	Acequia proveniente del Río El Ángel	8,38	20,7	1065	534	5,21	NC	105	80	81,9	2,96	12,8	93,0	0,7	7,7	30,5	50,5	29,5
P12	Poblado de Mascarilla	6,51	21	987	494	3,3	NC	74	101	14,6	9,89	17,6	127,6	0,7	9,3	16,8	52,9	29,8
P13	Río El Ángel, 100 m antes de la unión con el Río Chota	8,31	25,4	832	417	4,87	NC	57	90	81,6	4,47	15,2	91,6	0,72	8,2	19,7	52,0	31,4
P14	Desembocadura del Río El Ángel en el Río Chota	8,08	26,8	868	435	8,1	NC	64	91	73,2	6,47	11,3	87,4	0,69	7,3	34,1	50,4	31,1
P15	20m después de la desembocadura	7,73	27	292	146,9	4,82	NC	ND	80	24,4	3,73	15,6	51,0	0,61	2,3	9,8	39,2	20,6
P16	20 antes de la desembocadura	7,68	27	288	145,7	5,2	NC	ND	70	28,8	2,08	17,3	49,9	0,84	2,1	7,1	33,5	18,7

Tabla 4.7 Parámetros Físico-Químicos del muestreo en la Fuente Geotermal La Calera / Río El Ángel
Fuente: Autoras 2007

La concentración de Fosfatos se encuentra entre 0.38 mg/L a 9.89 mg/L. Las mayores concentraciones se encuentran en el sector de Mascarilla.

Las concentraciones de As_T en todo el río El Ángel fueron elevadas. En la fuente geotermal, el valor fue 573 $\mu\text{g/L}$. El menor valor fue 57 $\mu\text{g/L}$ antes de la desembocadura en el Río Chota. En la población Mascarilla se encontró un valor de 74 $\mu\text{g/L}$ en el agua de consumo. En el agua de las acequias los valores son de 94 y 105 $\mu\text{g/L}$.

Cuando el río el Ángel llega al río Chota, la concentración de As_T no es detectable. Esto se debe a la dilución causada por el gran caudal que posee el río Chota.

En el gráfico 4.6 se muestra las concentraciones de As_T de cada punto mientras se aleja de La Calera.

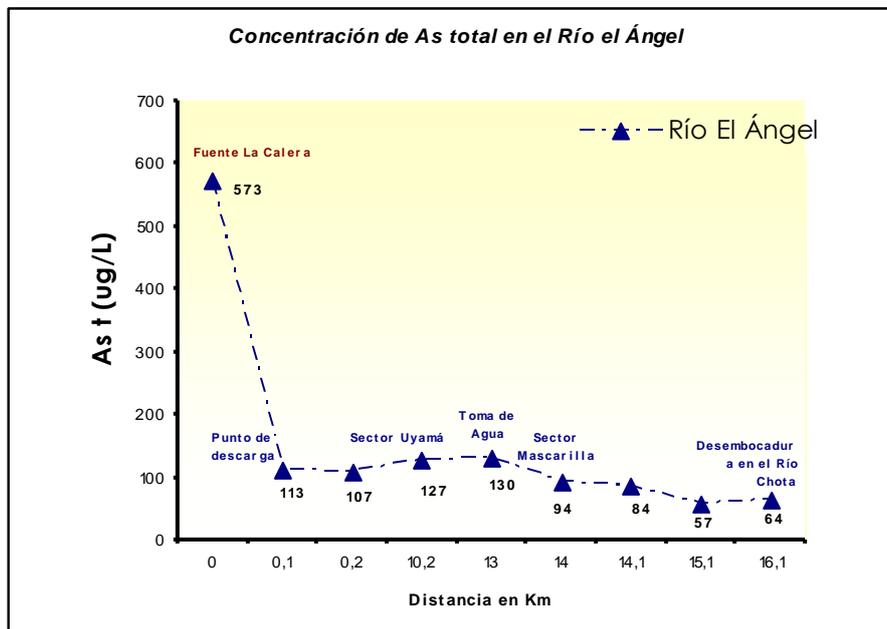


Gráfico 4.6: Variación de la concentración de As en el Río El Ángel de acuerdo a la distancia desde la fuente geotermal La Calera..
Fuente : Autoras 2007

En gran parte del sector del río el Ángel, la especie dominante es el As(V) con una concentración promedio de 528 $\mu\text{g/L}$. En el resto de puntos, las concentraciones se encuentran entre 315 $\mu\text{g/L}$ en la vertiente cercana a la fuente y 37 $\mu\text{g/L}$ en el río el Ángel, sector Mascarilla.

En el punto de origen de la fuente La Calera fuera del balneario, la especie dominante es el arsenito con una concentración 271 $\mu\text{g/L}$. Es probable que exista mayor concentración de As en la fuente del balneario debido a influencia de la carga de agua proveniente de otro lugar como se puede observar en la fotografía 4.2.



Fotografía 4.2: Fuente Geotermal La Calera
 Autoras 2007

En la zona del río el Ángel, sector Mascarilla, se realizó la recolección de sedimentos. (Tabla 4.8)

Punto	Descripción	Arsénico Total mg/kg
P7	Río El Ángel, sector Mascarilla	5,43
P8	Río El Ángel, bajando 100 m por el río	9,37
P9	Acequia proveniente del Río El Ángel	3,08
P10	Toma de agua para la acequia, Río El Ángel	3,26
P11	Acequia proveniente del Río El Ángel	4,35
P13	Río El Ángel antes de su desembocadura	2,64

Tabla 4.8: Arsénico en Sedimentos del Río El Ángel
 Fuente: Autoras 2007

La concentración de As_T va desde 9,37mg/kg de suelo en el Río el Àngel en el sector cercano a Mascarilla, llegando hasta 2,64 mg/Kg antes de la unión con el Chota.

Estos valores podrían indicar la presencia de As_T adsorbido en la materia orgánica.

4.1.1 Información Socioambiental

Mascarilla es una parroquia del cantón Mira, provincia de Carchi. Posee alrededor de 300 habitantes. La gente de este lugar se dedica a la agricultura y a los quehaceres domésticos.

De acuerdo a la población encuestada (n=15), el 78% posee un nivel primario de educación, el 11% restante posee educación media (primaria y secundaria).

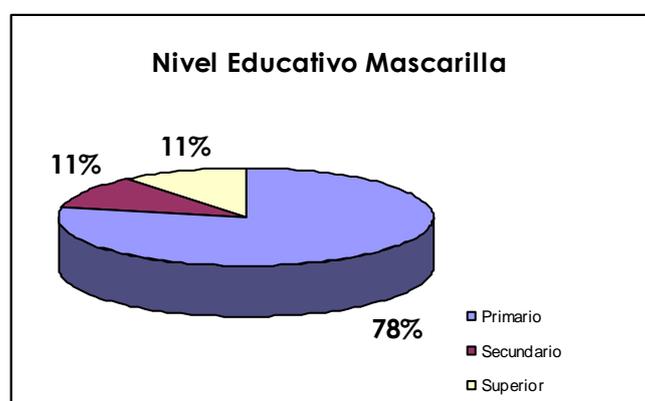


Gráfico 4.7: Representación del nivel educativo en la población Mascarilla
Fuente: Autoras 2007

El subcentro de salud existente en la población proporciona asistencia médica mínima. Las enfermedades más comunes son las gastrointestinales y las virales (gripes, alergias); siendo muy pocos los casos de cáncer (estómago, pulmón, útero) en gente de edad avanzada. (tabla 4.9)

Condiciones de vida	Detalle
Vivienda	56% baja* 44% media baja* *Vivienda rural
Nutrición	10% 2 comidas 90% 3 comidas
Enfermedades	Manchas blancas, gastritis, alergias, piodermitis
Causas de mortalidad	Cáncer al estómago, Cáncer al pulmón, cáncer al seno

Tabla 4.9: Condiciones de vida del sector del Río El Ángel
 Fuente: Autoras 2007

En su mayoría (vivienda rural baja 56%) están construídas con ladrillo artesanal y techo de eternit.

La población tiene una nutrición media, pese a que algunos habitantes acceden a las 3 comidas diarias. Según el subcentro de salud de la localidad, dentro de su canasta básica, se encuentran alimentos como caña de azúcar, yuca, fréjol, aguacates, pimiento, camote, tomate y frutas.

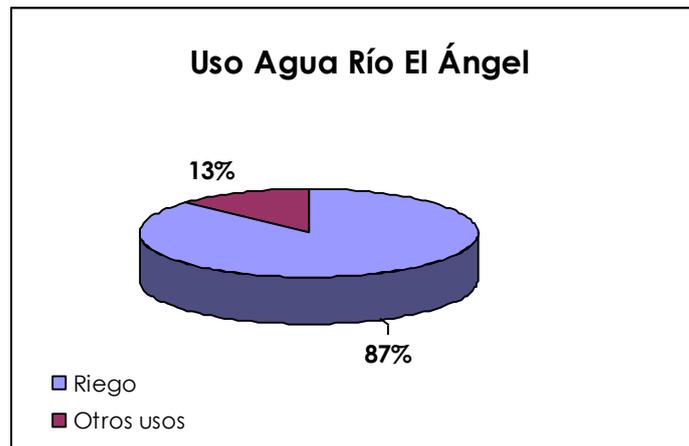


Gráfico 4.8: Representación del Uso del Agua del Sector Río El Ángel, Población Mascarilla
 Fuente: Autoras 2007

El río el Ángel no abastece a Mascarilla de agua de bebida; se abastece con agua proveniente de la vertiente de Uyamá localizada aproximadamente a 5km.

Los moradores de Mascarilla indican que un 87% del agua del río se utiliza para el cultivo de productos agrícolas de la zona. (Gráfico 4.8)

4.2 Fuente Geotermal del Balneario Chachimbiro / Quebrada Cachiyacu

En la tabla 4.10 se observa los parámetros físico-químicos más significativos de la fuente geotermal del balneario Chachimbiro y de la Quebrada Cachiyacu.

El agua del sector presenta un pH de neutro a ligeramente alcalino con rangos entre 6,1 a 8,66; Chachimbiro presenta tanto condiciones oxidantes (Eh=117mv, P22) como reductoras (Eh= -22mv, P19).

Los valores del Total de Sólidos Disueltos son altos, encontrándose entre 929 mg/L – 3.7 g/L. La conductividad se encuentra entre 124 μ s/cm a 7,42 ms/cm.

Los componentes dominantes de este sector son el Na^+ y el K^+ . El Cl^- es el anión dominante en el agua de las fuentes de Chachimbiro y de la quebrada Cachiyacu.

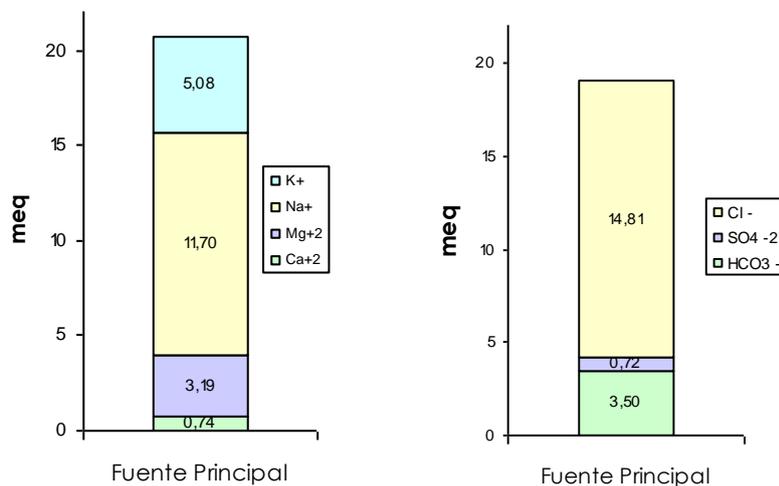


Gráfico 4.9: Aniones y Cationes presentes en la fuente principal del Balneario Chachimbiro
 Fuente: Autoras 2007

Punto	Descripción	pH	T °C	Cond ms/cm	TDS g/L	OD mg/L	Eh mv	As total µg/L	Cl- mg/L	HCO ₃ mgCaCO ₃ /L	PO ₄ mg(P-)/L	NO ₃ - mg/L	SO ₄ = mg/L	Fe+ mg/L	Ca+ mg/L	K+ mg/L	Na+ mg/L	Mg+ mg/L
P17	Punto alto Chachimbiro, arriba balneario	7,63	25,7	5,41	2,71	4,17	NC	394	506	112,56	2,62	22,05	35,62	0,74	17,36	133,125	268,25	33
P18	Tanque arriba del balneario	6,1	45,7	7,42	3,7	< 1	-1,2	656	513	196,4	7,44	10,27	30,26	0,77	18,3	184,625	270,45	41,2
P19	Fuente Principal	7,13	52	6,32	3,15	0	-22,1	510	519	213,2	3,01	23,17	34,74	0,82	14,77	198	269,2	38,7
P20	Q.Cachiyacu, Descarga agua Balneario Chachimbiro	7,28	32,4	6,28	3,16	3,41	35,7	844	515	182	2,45	9,19	22,55	0,98	15,77	208,5	265,55	39,2
P21	Tanque en el balneario	6,47	49,2	6,4	3,19	0	13	639	514	206,2	3,49	16,72	36,99	0,88	14,39	203,25	270,5	39,4
P22	Unos metros arriba del tanque anterior	6,15	44,3	6,96	3,43	0	117	550	516	199,25	1,00	17,92	46,25	0,79	14,49	204,58	269,45	38,7
P23	Piscina del balneario	7,16	47,8	6,57	3,28	0	-52,6	297	512	195,96	2,81	10,35	19,24	0,94	9,52	202,56	266,15	38,9
P24	Piscina bajo el balneario, piscina de tilapia	8	31,1	6,12	3,05	3,2	132	249	485	189,48	1,46	12,96	24,40	0,82	2,83	200,05	265,85	36,8
P25	Empieza la quebrada, Q. Cachiyacu	8,12	32,2	6,12	3,07	3,49	161	166	487	204,3	7,00	18,40	25,67	0,87	4,73	180,23	264,2	40,1
P26	Punto en San Francisco. Puente, toma de agua para regadío	8,37	33,3	5,26	2,64	4,6	173,4	117	476	226,28	1,99	18,48	29,87	1,02	3,44	172,25	268,4	38,5
P27	Acequia proveniente de la Quebrada Cachiyacu	7,77	21,9	0,184	0,0929	4,85	167	6	125	24,4	1,99	13,55	7,24	0,99	0,62	8,38	97,3	0,6
P28	Curso de la Quebrada Cachiyacu	8,66	20,4	0,124	2,63	5,04	169	86	356	176,76	0,82	17,43	26,45	0,84	5,34	149,75	176,35	35,6
P29	Quebrada Cachiyacu	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD

No
*NC Crítico
Sin
SD Dato

Tabla 4.10 Parámetros Físico-Químicos del muestreo en la Fuente Geotermal Chachimbiro / Quebrada Cachiyacu
Fuente: Autoras 2007

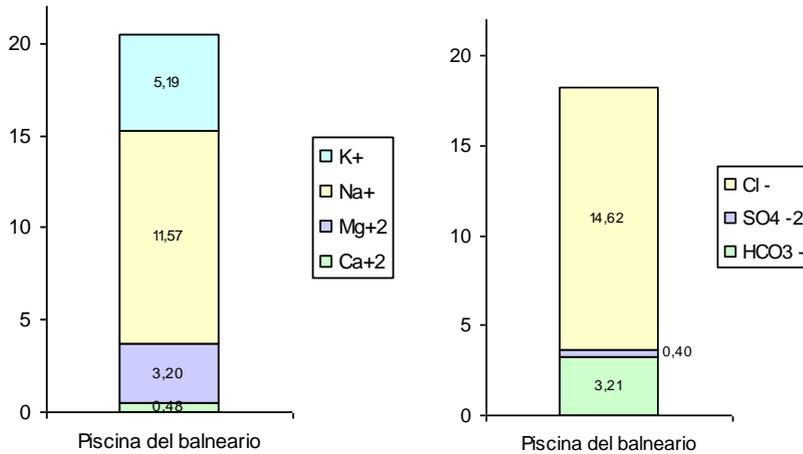


Gráfico 4.10: Aniones y cationes presentes en la fuente de la piscina del Balneario Chachimbiro
 Fuente: Autoras 2007

Como indican los gráficos 4.9 y 4.10, los componentes mayores de las fuentes son el Na^{+2} y el K^{+} . El anión Cl^{-} es el dominante del agua.

En el Balneario Chachimbiro existen varias vertientes que aportan a la elevada concentración de As de la quebrada Cachiyacu. A medida que desciende el agua en la quebrada Cachiyacu, la concentración también lo hace, como lo indica el gráfico 4.11.

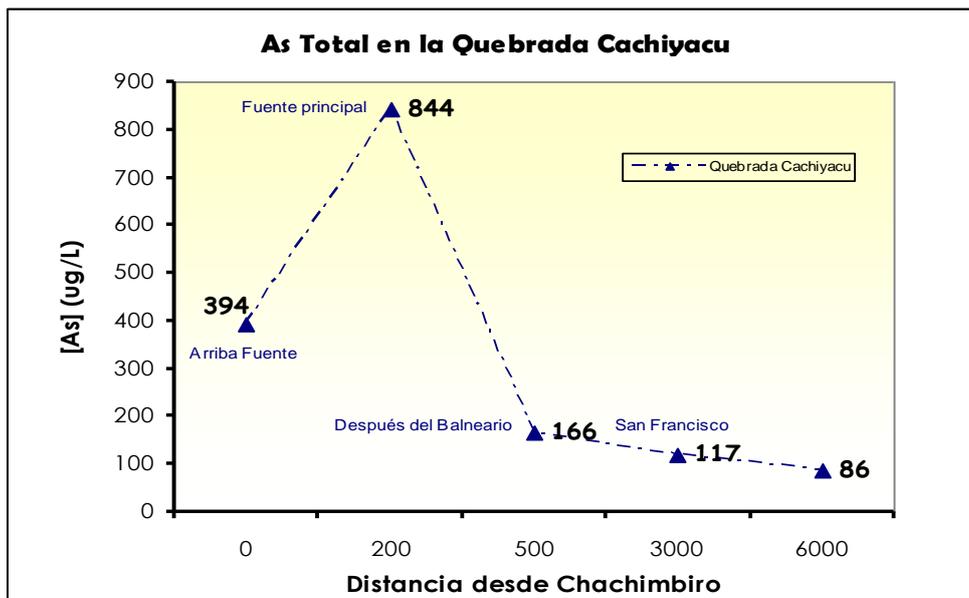


Gráfico 4.11: Variación de la concentración de As en la quebrada Cachiyacu de acuerdo a la distancia desde las fuentes en el Balneario Chachimbiro.
 Fuente: Autoras 2007

La concentración más alta es en el punto de descarga del balneario, P20=844 $\mu\text{g/L}$. La fuente principal (P19) tiene una concentración de 510 $\mu\text{g/L}$.

El punto de la quebrada Cachiyacu al final del balneario tiene 166 $\mu\text{g/L}$ de As_T .

A partir de este punto, la quebrada Cachiyacu tiene 2 usos: como receptor de aguas residuales y como proveedor de agua para regadíos. Por esta última razón, en San Francisco existe una toma de agua para la acequia cerca de Tumbabiro. En este sector, las concentraciones continúan disminuyendo $\text{As}_T=117\mu\text{g/L}$.

El siguiente punto en la quebrada baja su concentración $\text{As}_T=86\mu\text{g/L}$.

El valor más bajo es 6 $\mu\text{g/L}$ en la acequia cercana a Tumbabiro, la cual tiene muy poco caudal. La quebrada Cachiyacu a la altura del poblado Carrillos esta seca.

Tanto en el Balneario Chachimbiro, como en la quebrada Cachiyacu, la especie de arsénico que predomina es el arseniato. La concentración más alta se encuentra en la quebrada Cachiyacu, en el punto de descarga de las fuentes con 782 $\mu\text{g/L}$.

Al finalizar el balneario, en la quebrada Cachiyacu predomina el arsenito (90 $\mu\text{g/L}$) sobre el arseniato (76 $\mu\text{g/L}$).

En la quebrada Cachiyacu se encuentra una alta concentración de As en los sedimentos como se indica en la tabla (4.11).

Punto	Descripción	Arsénico Total mg/kg
P17	Punto alto Chachimbiro, arriba balneario	176,69
P24	Piscina bajo el balneario, piscina de tilapia	84,92
P25	Empieza la quebrada, Q. Cachiyacu	153,02
P26	Puente en San Francisco. Puente, toma de agua	16,94
P27	Acequia proveniente de la Quebrada Cachiyacu	3,65
P28	Curso de la Quebrada Cachiyacu	13,33
P29	Quebrada Cachiyacu	6,36

Tabla 4.11. Arsénico en Sedimentos de la Fuente Geotermal Chachimbiro / Q.Cachiyacu
 Fuente: Autoras 2007

Las concentraciones mayores de As se encuentran en el punto de la quebrada antes de la influencia del balneario con 176.69 mg/Kg. El siguiente punto alto es la quebrada Cachiyacu al final del balneario 153.02 mg/kg y de la piscina de tilapia 84.92 mg/kg.

La concentración de As_T más baja se encuentra en la acequia que viene de la quebrada Cachiyacu (3.6 mg/kg).

4.2.1 Información Socioambiental

La población de Tumbabiro es parte del cantón Urcuquí. Tiene alrededor de 1808 habitantes y la mayor actividad económica es la agricultura.

Un 85% de la población es adulta, el porcentaje restante corresponde a los niños y jóvenes del sector. La mayor parte de ellos tienen una educación primaria (70%).

El agua de la quebrada Cachiyacu, debido a su bajo caudal no es utilizada para abastecer el consumo de poblaciones como Tumbabiro (Gráfico 4.12).

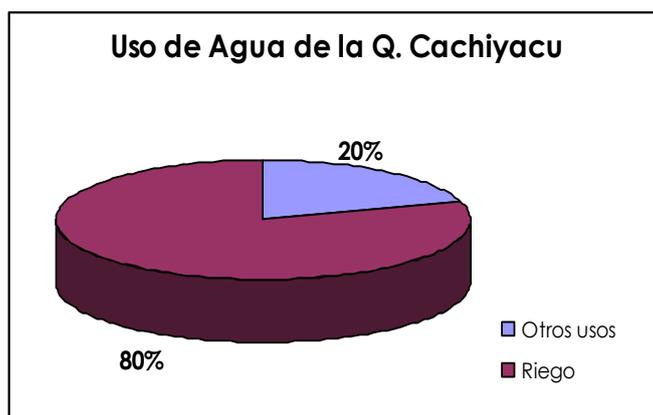


Gráfico 4.12: Representación del Uso del agua del Sector de Chachimbiro / Quebrada Cachiyacu
Fuente: Autoras 2007

Los moradores utilizan el agua como fuente de regadíos (80%), ya que la zona está en su mayoría destinada a la agricultura.

Enfermedades más comunes en Tumbabiro
Enfermedades Gastrointestinales Cáncer al estómago Cáncer a la piel Cáncer pulmonar Cáncer de tiroides Dermatomicosis

Tabla 4.12: Enfermedades más comunes en el Sector de Chachimbiro / Población Tumbabiro.
Fuente: Autoras 2007

La tabla 4.12 indica las enfermedades más comunes de Tumbabiro según el Subcentro de Salud.

4.3 Fuentes Geotermales alrededor del volcán inactivo Ilaló

El muestreo abarca las fuentes geotermales de los balnearios Ilaló, La Merced, El Tingo, Cununyacu, que en la primera fase tuvieron concentraciones altas de As total. Estos balnearios y el curso del agua de los ríos donde se descargan las vertientes, rodean el volcán Ilaló.

En la tabla (4.13) se pueden observar los parámetros físico-químicos de las vertientes y de los ríos del sector del Ilaló.

El agua del sector tiene un pH de neutro a alcalino, entre 6,18 a 8,63; el total de sólidos disueltos varía entre 145.5 a 1860 mg/L. La conductividad se encuentra entre 290 $\mu\text{s}/\text{cm}$ y 3.8 ms/cm. Los componentes dominantes del agua son el Na^{+2} , el K^{+} , el HCO_3^{-} y el Cl^{-} .

Se encuentran bajas concentraciones de Fe, fosfatos y nitratos.

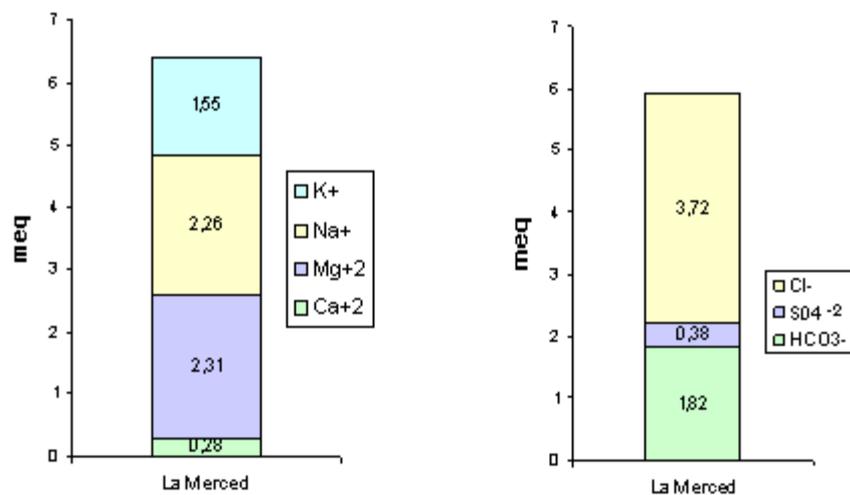


Gráfico 4.13: Aniones y Cationes presentes en la Fuente Geotermal del Balneario La Merced
 Fuente: Autoras 2007

Punto	Descripción	pH	T °C	Cond µs/cm	TDS mg/L	OD mg/L	Eh mv	As total µg/L	Cl- mg/L	HCO ₃ mgCaCO ₃ /L	PO ₄ mg(P-)/L	NO ₃ - mg/L	SO ₄ = mg/L	Fe+ mg/L	Ca+ mg/L	K+ mg/L	Na+ mg/L	Mg+ mg/L
P1	Balneario La Merced	6,48	36,1	1230	608	1,2	50	101	130	111,12	2,14	0,53	18,10	0,83	5,63	60,55	52	28,1
P2	Balneario Ilaló	6,18	38,7	1920	954	1,2	-24,7	272	169	155,6	0,60	0,26	71,21	0,83	4,83	116,2	54,22	47,6
P3	Desembocadura del agua del Balneario Ilaló	7,49	35,4	1893	948	2,65	67,6	265	104	254	4,48	0,32	68,51	0,83	2,28	110,5	54,09	47,6
P4	Quebrada Ilaló	7,24	23	970	488	3,2	145	125	84	124,12	1,05	1,06	53,02	0,84	3,11	38,4	49,94	30,8
P5	Quebrada Ilaló, dirección al Río Chiche	8,26	25,2	1538	773	4,5	134,3	171	75	192	0,34	0,68	75,57	0,81	2,26	65,9	53,46	39,8
P6	Río Chiche	8,6	20,2	290	145,5	3,53	131,5	2	68	85,4	2,02	2,44	7,81	0,86	2,98	42,6	32,91	14,7
P7	Río San Pedro sector Cumbayá	8,63	27,5	750	374	3,35	162,3	23	95	176	2,78	3,94	35,46	0,87	4,57	72,2	48,52	26,25
P8	Río San Pedro, Urbanización	8,11	28	750	379	3,81	177,3	20	56	170,88	3,49	4,04	38,99	0,86	2,28	40,55	48,08	25,85
P9	Río San Pedro, Finca Sr. Dávalos	8,35	27,1	590	296	4,03	174,6	4	38	126,4	0,50	5,02	43,15	0,84	2,3	33	45,71	17,8
P10	Balneario Cununyacu	7,4	30	970	612	3,1	179	389	121	172	0,59	0,83	25,60	0,9	2,35	61,5	78,2	23,2
P11	Balneario Guangopolo	7,9	32,6	1130	566	2,7	185	4	115	95,8	0,51	0,32	13,84	0,91	2,22	71,25	72,63	24,8
P12	Río San Pedro, sector Guangopolo	8,3	25,6	559	289	3,2	174	ND	151	203,984	0,27	4,03	17,06	0,93	2,16	91,5	71,04	14,25
P13	Balneario El Tingo	7,08	43,5	3800	1860	1,37	48	100	271	366	0,68	0,62	59,20	0,92	3,32	84,375	95,38	83
P14	Descarga agua del Balneario El Tingo	8,5	19,9	410	205	3,38	80,8	2	40	180,8	0,62	4,88	16,65	0,96	1,78	20,875	146,1	14

Tabla 4.13 Parámetros Físico-Químicos del muestreo en el Sector del volcán Ilaló / Río San Pedro/ Quebrada Ilaló
Fuente: Autoras 2007

El gráfico 4.13 indica los porcentajes de aniones y cationes de la fuente geotermal de La Merced. El Na, el K, el HCO_3^- y el Cl^- son los mayores.

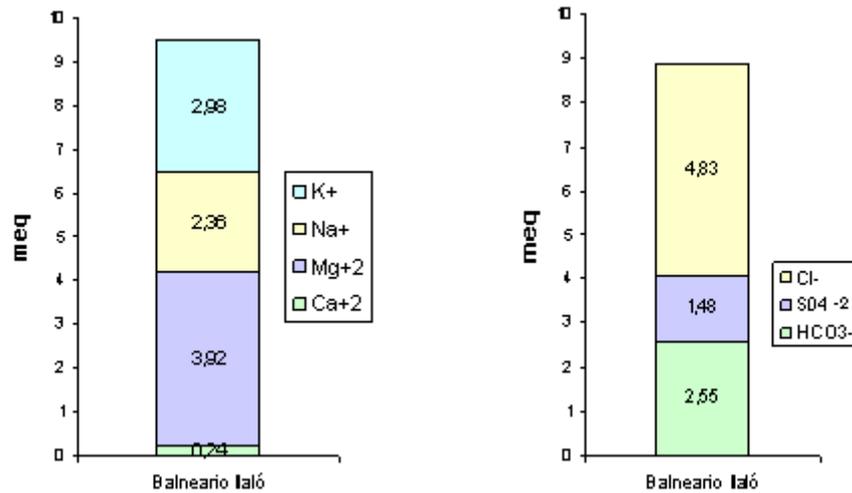


Gráfico 4.14: Aniones y Cationes presentes en la fuente geotermal del Balneario Ialó
 Fuente: Autoras 2007

Los componentes mayores que indica el gráfico 4.14, son el K^{+} y el HCO_3^- en la fuente del balneario Ialó.

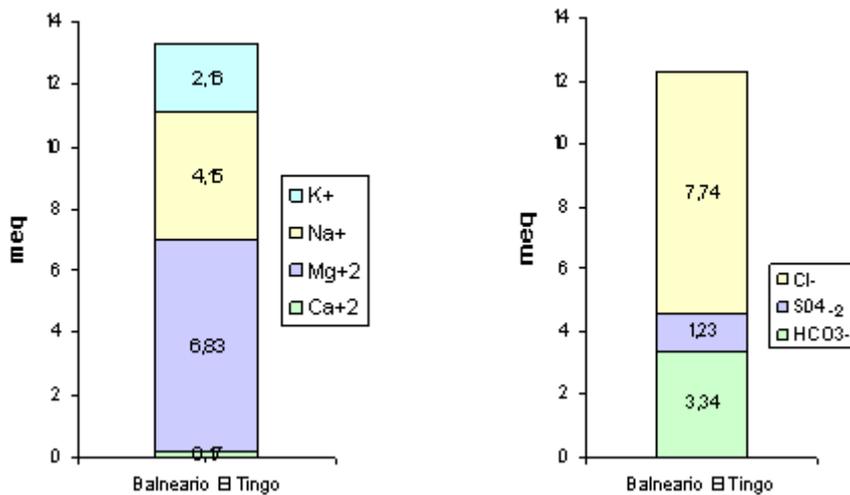


Gráfico 4.15: Aniones y Cationes presentes en la fuente geotermal del Balneario El Tingo
 Autoras 2007

Como enseña la gráfico 4.15, el Mg^{+2} , el K^{+} y el Na^{2+} componen el agua de la fuente en iguales porcentajes. El HCO_3^- compone más del 50% del total de aniones.

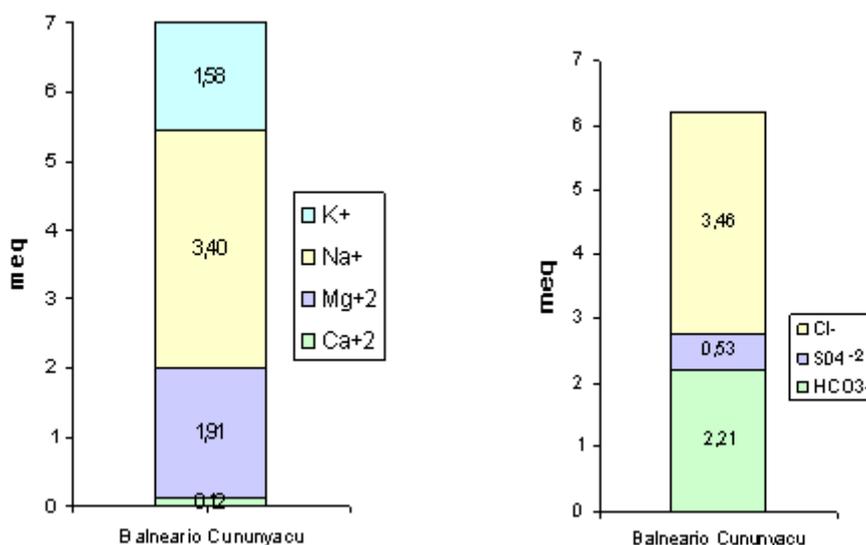


Gráfico 4.16: Aniones y Cationes presentes en la fuente geotermal del Balneario Cununyacu
 Fuente: Autoras 2007

En el gráfico 4.16 se aprecia que el Na⁺² es el catión predominante. Con respecto a los aniones, el Cl⁻ y el HCO₃⁻ se encuentran formando el 90% del total de componentes.

En el balneario La Merced se obtuvo 102 µg/L de As_T. Avanzando por la quebrada Ilaló, la concentración de As_T aumenta a 125 µg/L.

En el Balneario Ilaló, la concentración de As_T es 272 µg/L. Al desembocar a la quebrada Ilaló se encontró As_T = 265 µg/L.

En el punto de encuentro de las descargas antes mencionadas, la concentración es 171 µg/L. A partir de este punto hasta la unión con la quebrada Cariyacu, el acceso se dificultó, debido a la topografía del lugar. En el último punto en el río Chiche, la concentración de As_T es baja. Como se puede apreciar en el gráfico 4.17.

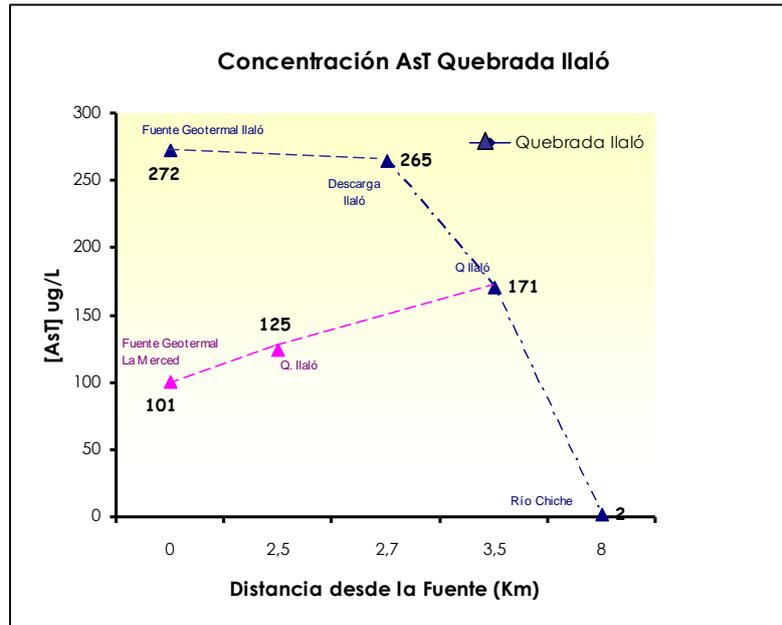


Gráfico 4.17: Variación de la concentración de As en la Quebrada Ijaló en relación a la distancia desde las fuentes del Balneario La Merced e Ijaló.
Fuente: Autoras 2007

El gráfico 4.17 indica el trayecto del río San Pedro, entre las poblaciones del Tingo y Cumbayá. En un recorrido de 10 km aproximadamente, existen 3 fuentes geotermales.

La fuente en el Tingo tiene una concentración de 100 $\mu\text{g/L}$. Sus aguas desembocan en conjunto con el agua de la población en el Río San Pedro, llegando a 2 $\mu\text{g/L}$ de As_T.

La fuente en Guangopolo y su punto de descarga no contienen As. Continuando por el Río San Pedro, la concentración se mantiene baja (4 $\mu\text{g/L}$), hasta la altura del balneario Cununyacu. La influencia de la concentración elevada (389 $\mu\text{g/L}$) de este último provoca un aumento en la concentración del río 20 $\mu\text{g/L}$. En Cumbayá la concentración llega a 23 $\mu\text{g/L}$.

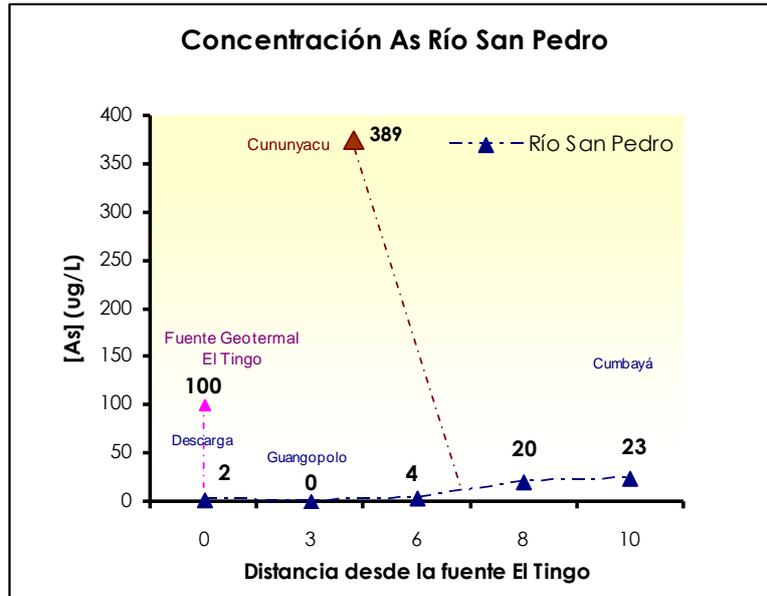


Gráfico 4.18: Variación de la concentración de As en el río San Pedro de acuerdo a la distancia.
 Fuente: Autoras 2007

Rodeando el volcán Ilaló, la especie que predomina es el As(V), con concentraciones de 208 µg/L en la desembocadura del agua del balneario Ilaló, 90 µg/L en el Balneario La Merced y 128 µg/L en la quebrada Ilaló. En el río San Pedro, las concentraciones de As (V) disminuyen, siendo la mayor 48 µg/L en el balneario El Tingo. El As (V) predominan en el balneario Ilaló con 230 µg/L y en el balneario el Tingo con 52 µg/L.

En la tabla (4.14) los resultados de los sedimentos de la quebrada Ilaló y el Río San Pedro, indican que existe una gran concentración de As_T (Q. Ilaló 238.99mg/kg – río San Pedro 158.64 mg/kg).

Punto	Descripción	Arsénico Total mg/kg
P4	Quebrada Ilaló	238,99
P5	Quebrada Ilaló, dirección al Río Chiche	29,13
P6	Río Chiche	250,39
P7	Río San Pedro sector Cumbayá	108,69
P8	Río San Pedro, Urbanización	158,64
P12	Río San Pedro, sector Guangopolo	61,73

Tabla 4.14 Arsénico en Sedimentos del Sector del Volcán Ilaló
 Fuente: Autoras 2007

En la quebrada Ilaló, 2 km aguas abajo, la concentración de As disminuye a 29,13 mg/kg de suelo. En el río Chiche, la concentración vuelve a subir (250.39 mg/kg).

4.3.1 Información Socioambiental

Los moradores de estos sectores poseen los servicios básicos necesarios, y con respecto a la educación alcanzan el nivel secundario.

Un 40% del sector posee un nivel medio bajo de vivienda, el restante de los moradores viven en condiciones de nivel medio.

La actividad económica de los pobladores de estos lugares son: la agricultura, la ganadería, y el comercio.

El sector posee centros de salud, hospitales y clínicas equipados para asistir cualquier tipo de emergencia.

Los productos típicos de la zona son: limones, maíz, aguacates y frutas en los valles. El agua de la quebrada Ilaló no es destinada para consumo humano sino para el turismo, agricultura y criadero de animales. (Gráfico 4.19)

El agua del Río San Pedro está destinada para la generación hidroeléctrica.

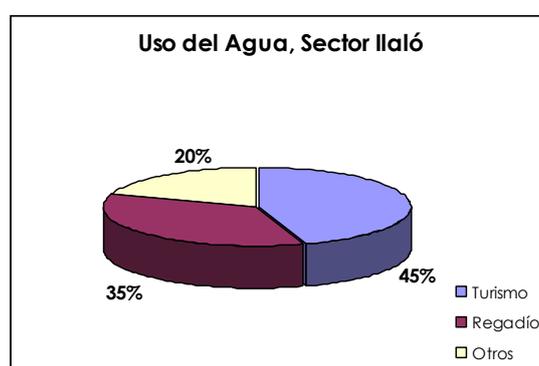


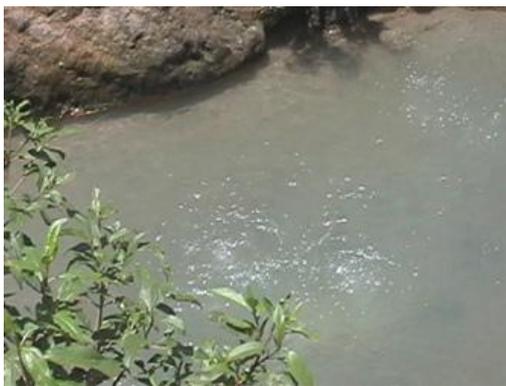
Gráfico 4.19 : Representación del uso del agua – Sector Ilaló
Fuente: Autoras 2007

4.4 Fuente Geotermal La Merced de Nono / Río Pichán

Según la tabla 4.15 el agua de las vertientes de la Merced de Nono son ácidas (pH de 6.1) y el agua de los puntos del río Pichán a medida que baja es alcalina (pH 8.3 aprox).

El parámetro TDS se encuentra entre 122.7 mg/L y 2.45 g/L. La temperatura oscila entre 31.1°C-31.6°C en las fuentes geotermales. En el río llegan hasta 18°C.

La fuente geotermal de gas carbónico (P17) como se observa en la fotografía 4.3, posee la conductividad más alta 4.96 ms/cm. El Na^{+2} es el componente más abundante, así como el Cl^{-} .



Fotografía 4.3: Fuente Geotermal La Merced de Nono
Foto: Autoras 2007

Punto	Descripción	pH	T °C	Cond μs-ms/cm	TDS mg-g/L	OD mg/L	Eh mv	As total μg/L	Cl- mg/L	HCO3 mgCaCO3/L	PO4 mg(P-)/L	NO3- mg/L	SO4= mg/L	Fe+ mg/L	Ca+ mg/L	K+ mg/L	Na+ mg/L	Mg+ mg/L
P15	Fuente Termal La Merced de Nono	6,65	18,8	578	293	3,96	115	11	176	180,8	0,58	3,73	11,97	1	6,14	30,5	157,35	12,95
P16	Fuente Termal La Merced de Nono	5,83	31,1	4,69	2,31 g/L	1,02	-60	403	236	230,8	0,39	1,77	35,15	0,87	61	68,2	107,4	38,125
P17	Fuente Termal La Merced de Nono (Tanque)	6,9	31,6	4,96	2,45 g/L	1,2	-61	507	236	243,504	0,68	2,09	19,14	0,99	42,9	62,7	104,6	47,5
P18	Fuente Termal La Merced de Nono	6,4	22,1	1870	935	2,8	30	200	76	422,12	0,21	3,14	13,11	0,86	9,81	45,2	121,325	37,75
P19	Inicio Quebrada	6,36	21	2,48	1248	2,8	-23,7	573	156	361,3	0,27	2,99	18,83	3,68	12,02	56	126,45	42,6
P20	Río Pichan	8,6	22,2	2,05	1040	3,1	23	519	84	409,92	0,33	1,85	11,24	1,12	1,85	39	127,35	43,4
P21	Río Pichan	8,8	28,7	245	122,7	3,58	81,7	47	32	187,88	0,20	1,42	8,02	1,37	0,49	39,85	61,7	12,3
P22	Río Pichan	8,8	20,2	337	165,5	3,6	95	23	76	64,72	0,11	0,26	8,64	1,5	2,75	8,75	50,5	6,98
P23	Río Pichán	8,7	22,1	330	165,1	3,8	96	32	70	69,65	0,12	0,16	6,98	1,11	3,6	11,1	49,7	5,73

Tabla 4.15: Parámetros Físico-Químicos del muestreo en la fuente geotermal La Merced de Nono / Río Pichán
Fuente: Autoras 2007

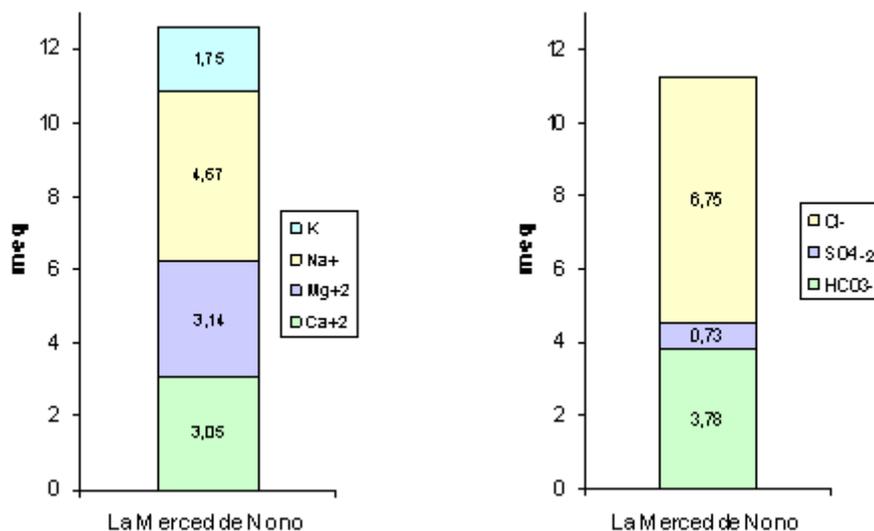


Gráfico 4.20: Aniones y Cationes presentes en la fuente geotermal La Merced de Nono
 Autoras 2007

En el gráfico 4.20 se observa que la fuente La Merced de Nono presenta mayor cantidad de cationes Na^{+2} , seguido del K^{+} . El Cl^{-} es el anión más abundante en conjunto con los bicarbonatos.

Se obtuvieron concentraciones de arsénico desde $573 \mu\text{g/L}$ en el punto donde descargan las fuentes, hasta las más bajas de $11 \mu\text{g/L}$ antes de la fuente (P11) y de $23 \mu\text{g/L}$ en el Río Pichán a la altura de la población Los Puentes.

La vertiente que posee gas carbónico (P17) tiene una concentración de $507 \mu\text{g/L}$, el punto P16 tiene $403 \mu\text{g/L}$.

Mientras el curso de río sigue unos 2km aproximadamente, la concentración de As baja a $519 \mu\text{g/L}$. Alejándose de este último punto (P21), existe una concentración de $47 \mu\text{g/L}$. Entre este punto y aquellos tomados a la altura de Los Puentes, se tuvo dificultad de ingresar debido a la poca infraestructura vial que existe en la zona.

En el sector de La fuente geotermal de La Merced de Nono, la especie arsenical más abundante encontrada es el As (V). La mayor concentración de As (V) es 512 µg/L en la quebrada donde descargan las fuentes.

El As(III) se encuentra en bajas concentraciones, siendo la mayor 100 µg/L en la quebrada S/N.

Punto	Descripción	Arsénico Total mg/kg
P15	Fuente Termal La Merced de Nono	213,89
P16	Fuente Termal La Merced de Nono	56,13
P19	Inicio Quebrada	267,73

Tabla 4.16 Arsénico en sedimentos de la fuente geotermal La Merced de Nono
Fuente: Autoras 2007

La tabla 4.16 muestra que la concentración de As_T de los sedimentos cercanos a la fuente geotermal son elevados (213.89 mg/kg).

4.4.1 Información Socioambiental

La población de Nono se encuentra en el cantón Quito y vive de la actividad agrícola y ganadera.

Los centros de salud y educativos más próximos se encuentran en Calacalí. La población es muy pequeña, poseen viviendas sencillas de ladrillo y techos de eternit.

El sector de la Merced de Nono y sus alrededores poseen altas concentraciones de As_T en el agua y en los sedimentos.

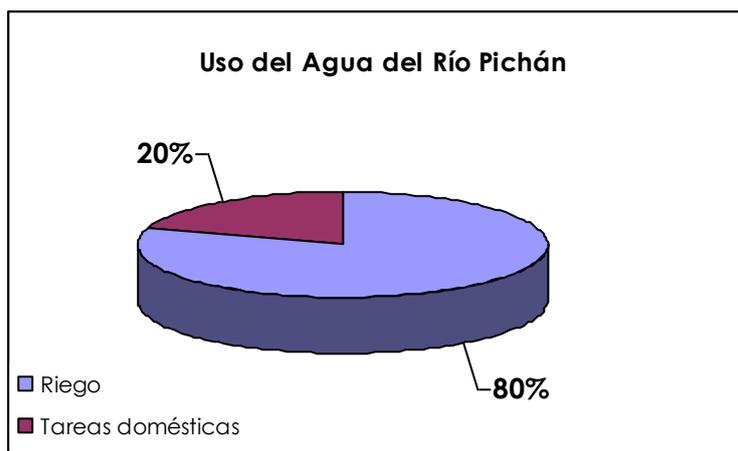


Gráfico 4.21: Representación del uso del agua del Sector del Río Pichán
Fuente: Autoras 2007

Un 80% de la población utiliza el agua del río Pichán, en el sector Los Puentes para riego. El 20% lo usa para tareas domésticas.

CAPÍTULO V

5.1 DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Aguas Hediondas

Según datos recopilados de la concentración de SO_4^{-2} (845.95mg/L)¹¹ y Ca^{+2} (95mg/L)¹² disueltos en la fuente de Aguas Hediondas y la formación de sólidos evidenciados en la fotografía 5.1, se cree que existe la precipitación del CaSO_4 (CaSO_4 , $K_{ps} = 4.93 \times 10^{-5}$).

¹¹ Atiaga, O. *Caracterización Geoquímica e Isotópica de los Acuíferos Hidrotermales del Ecuador Comisión Federal de Electricidad*. Gerencia de Proyectos Geotermoeléctricos. Morelia. Michoacán. México

¹² OLADE. *Proyecto de Investigación Geotérmica de la República del Ecuador*. Diciembre 1979



Fotografía 5.1: Fuente geotermal Aguas Hediondas. Presencia de Ca^{+2} y H_2S
Autoras 2007

Al darse esta precipitación, el As se adsorbería en el precipitado y coprecipitaría como arsenato de calcio. (Smedley & Kinniburgh, 2002). Esta hipótesis es confirmada por la alta concentración de As en los sedimentos (tabla 4.6) y el menor contenido en el agua (tabla 4.1, Cap IV). Sin embargo, el significativo contenido de As en el agua podría atribuirse a la disolución de los precipitados causada por la acidez de la fuente (Media pH = 3.97).

Aguas negras



Fotografía 5.2: Fuente geotermal Aguas Negras
Autoras 2007

Es posible que en Aguas Negras ocurra el mismo fenómeno que en Aguas Hediondas; precipitación del sulfato de calcio, ya que la concentración del $\text{SO}_4^{2-}=701.64$ mg/L y $\text{Ca}=98$ mg/L son bastante altas¹³. Esto justificaría la alta concentración de As_T en los sedimentos (92.48mg/Kg).

Fuente Geotermal El Baño, Cristóbal Colón.

Como se aprecia en la fotografía 5.3, la rápida oxidación del Fe^{2+} a Fe^{3+} promueve la formación del $\text{Fe}(\text{OH})_3$ ($k_{ps}=2.79 \times 10^{-39}$). Lo que ocasionaría la remoción de As del agua, porque el hidróxido de hierro tiene una superficie sólida muy reactiva que captura en forma selectiva al As. Esto coincide con el resultado del contenido de As en los sedimentos extraídos de la fuente ($\text{As}=461.39$ mg/kg).



Fotografía 5.3: Depósitos de Fe. Fuente geotermal El Baño
Autoras 2007

Balneario Chachimbiro

En Chachimbiro la concentración de As_T es significativa y oscila entre 976 $\mu\text{g/L}$ y 366 $\mu\text{g/L}$ en el agua y en los sedimentos entre 127.94 mg/kg y 171.39 mg/kg.

¹³ Atiaga, O. *Caracterización Geoquímica e Isotópica de los Acuíferos Hidrotermales del Ecuador Comisión Federal de Electricidad*. Gerencia de Proyectos Geotermoeléctricos. Morelia. Michoacán. México

La alta concentración de bicarbonatos (616 mg/L)¹⁴ puede causar la formación de complejos solubles con el arsénico, lo que originaría una alta concentración de As en el agua (Smedley et al. 1998). Adicionalmente, puede que exista una desorción del As desde las fracciones metálicas debido al pH relativamente alto de la fase acuosa, las condiciones oxidantes (Eh mayores que 100 mV) y la presencia de alto contenido de NaCl. (Smedley & Kinniburgh, 2002)

Por otra parte, el alto contenido de SiO₂ (212mg/L)¹⁴ y bajo contenido de Fe (0.24mg/L)¹⁵, ocasionaría una fuerte competencia del silicio por los escasos sitios de reacción presentes en los óxidos de hierro, lo que causaría que una limitada cantidad de As sea atrapada por el suelo As (Swedlund and Webster, 1998).

Adicionalmente, los resultados de la digestión de sedimentos indica que es posible que el As se encuentre adsorbido en la materia orgánica presentes en el suelo (color café de la solución acuosa obtenida de la digestión).

La Merced de Nono

La elevada concentración de As en los sedimentos (tabla 4.6, Cap IV) podría estar relacionada con la elevada cantidad de Fe presente en la fuente de la Merced de Nono (13.28mg/L)¹⁶, como se puede apreciar en la fotografía 5.4. No obstante, la presencia de bióxido de carbono en altas concentraciones, CO₂=640mg/L¹⁶, en el agua termal podría influenciar en la disolución de ciertas fracciones minerales, liberando consecuentemente el arsénico al medio acuoso.

¹⁴ Aguilera, E; Cioni, R. Chemical and Isotope Characteristics of the Chachimbiro Geothermal Fluids (Ecuador) December 2002

¹⁵ Inventarios de estudios geotermales del INAHMI, Mayo 1978.

¹⁶ Inventarios de estudios geotermales del INAHMI, Mayo 1978.



Fotografía 5.4: Depósitos de Fe en la fuente geotermal La Merced de Nono
Autoras 2007

La Ciénega

Los sedimentos de la fuente de la Ciénega tienen una elevada concentración de As (238.09 mg/kg) porque éste, posiblemente se encuentre adsorbido en la materia orgánica presente en el lugar, ya que es una zona agrícola bastante buena (ver fotografía 5.5).



Fotografía 5.5: Materia orgánica presente en la fuente geotermal La Ciénega
Autoras 2007

Segunda Fase

a) Balneario El Ángel, río El Ángel

En la fuente de origen del balneario La Calera (P4) se observa que la especie arsenical predominante es el As^{3+} con un 80,6% de la cantidad total de As_T ($As_T=336\mu/L$). Esta predominancia del arsenito puede explicarse por el relativamente bajo potencial redox del agua geotermal (45.8mV) y la escasa influencia del viento sobre el agua ya que el tanque se encuentra tapado.

El $As(V)$ sería la especie predominante en los demás puntos ya que los sitios se encuentran abiertos a la atmósfera y consecuentemente existe mayor cantidad de oxígeno disuelto en el agua ($OD=4,87mg/L$) por lo que el potencial redox es oxidante (Eh mayores a 100mV).

La concentración del arsénico total ($573\mu g/L$) presente en la fuente disminuye al descargarse en el río el Ángel por una posible dilución, porque el caudal del río es muchas veces mayor que el caudal de las aguas termales residuales que

se descargan. A partir de este punto, el contenido de As continua disminuyendo debido a una posible adsorción de los arseniatos en los sedimentos que contienen materia orgánica y óxidos metálicos (datos no disponibles). Además, el pH, las condiciones oxidantes y la presencia de cationes como Ca^{+2} y Mg^{+2} (tabla 4.7, Cap IV), promueven esta adsorción (Smedley & Kinniburgh,2002).

En el punto Uyamá, el pH sube a 8.83, consecuentemente podría darse una ligera desorción del arsénico. Esto justificaría el incremento en la concentración del As_T (127 $\mu\text{g/L}$) con respecto al sitio muestreado anteriormente (108 $\mu\text{g/L}$).

Del punto P13 al P14 (tabla 4.7, Cap IV), la concentración de As_T aumenta, teóricamente. Los fosfatos provenientes de las descargas domésticas de Mascarilla ($\text{PO}_4=6.47\text{mg/L}$) compiten por los sitios reactivos de las fracciones minerales y materia orgánica presentes en los sedimentos del río. Investigaciones anteriores reportan que los fosfatos compiten exitosamente con los arseniatos por los sitios de adsorción en los sedimentos debido a que su química es similar (valores de constantes de ionización casi iguales)

Además, la presencia de fosfatos en el agua del río El Ángel ha dado lugar a la proliferación de algas (ver fotografía 5.6), con lo cual aumenta la materia orgánica del lugar, hecho que se ve reflejado por la disminución del oxígeno disuelto (promedio OD =4.6mg/L).



Fotografía 5.6: Algas presentes en el Río el Ángel
Autoras 2007

Los resultados de la extracción de As de los sedimentos demuestran que el As está relacionado con la abundante materia orgánica presente en el río el Ángel como se aprecia en la fotografía 5.7.



Fotografía 5.7: Materia orgánica en el Río el Ángel
Autoras 2007

Efecto Socioambiental

La concentración de As_T en el Río el Ángel (promedio $As_T=101 \mu\text{g/L}$) se encuentra en el límite para riego ($As_T=100\mu\text{g/L}$).¹⁷

El agua de consumo de Mascarilla (proveniente de Uyamá) contiene concentraciones de As_T ($74 \mu\text{g/L}$) superiores a las señaladas por la normativa

¹⁷ Texto Unificado de Legislación Ambiental Secundario, TULAS. Libro VI, Anexo I. Tabla 6. Criterios de calidad admisibles para aguas de uso agrícola

ecuatoriana.¹⁸ Ésta concentración podría estar relacionada con algunos casos de cáncer que se han presentado en el pueblo y con ciertas enfermedades de la piel en los niños.

La información de las tablas 4.9 del Capítulo IV, indican que el nivel socioeconómico de la población es bajo. Esta situación en conjunto con los niveles de As encontrados en el agua de consumo y de riego, ponen a Mascarilla como una población con potencial riesgo de adquirir enfermedades crónicas (hiperqueratosis, melanosis, cáncer de piel, etc) derivadas del consumo diario de As.

b)Fuente Geotermal de Chachimbiro / Quebrada Cachiyacu

El curso de la quebrada Cachiyacu se ve influenciado por la concentración elevada de As ($As_T=844\mu\text{g/L}$) proveniente de las fuentes termales del balneario Chachimbiro. Con un pH de neutro a alcalino (media $\text{pH}=7.40$) y condiciones oxidantes (media $E_h=100\text{ mV}$), la especie arsenical más abundante en Chachimbiro y en la Quebrada Cachiyacu es el As(V).

El descenso en la concentración de As_T ($844\mu\text{g/L}$ a $86\mu\text{g/L}$) en la quebrada se debe a la dilución ocasionada por las descargas de aguas residuales del restaurante, del balneario y de las piscinas provenientes de fuentes no termales.

¹⁸ Texto Unificado de Legislación Ambiental Secundario, TULAS. Libro VI, Anexo I. Tabla 1. Límites máximos permisibles para aguas de consumo humano y uso doméstico, que únicamente requieren tratamiento convencional.



Fotografía 5.8: Descargas de las fuentes geotermales de Chachimbiro en la Quebrada Cachiyacu
Fuente: Autoras 2007

A medida que se avanza en la quebrada, el As(III) desaparece en razón de la posible oxidación de su estado trivalente a pentavalente, causada por las condiciones oxidantes presentes (promedio OD=4.26 mg/L).

El agua del sector es calificada como, agua clorurada alcalina sódica¹⁹, caracterizada por una alta salinidad. Esto podría justificar la correlación positiva existente entre el As/Cl⁻ ($R^2=0.96$) y As/Na⁺ ($R^2=0.97$), como indica los gráficos 5.1 a y b.

¹⁹ OLADE. *Proyecto de Investigación Geotérmica de la República del Ecuador*. Diciembre 1979

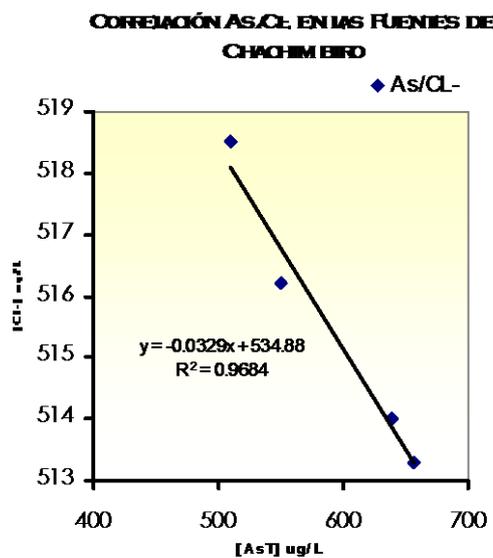


Gráfico 5.1a: Correlación As/Cl⁻ en las fuentes de Chachimbiro
Fuente: Autoras 2007

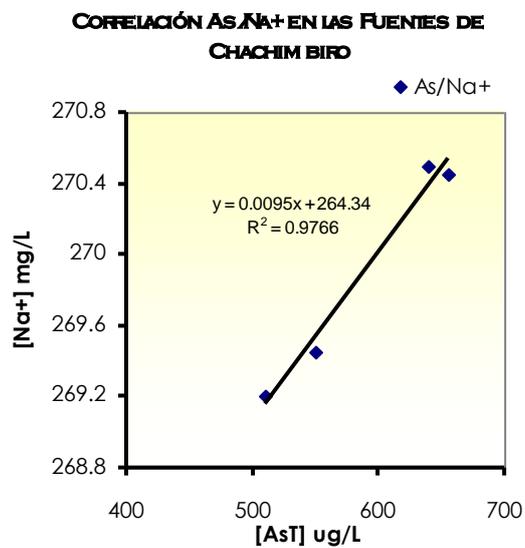


Gráfico 5.1b: Correlación As/Na⁺ en las fuentes de Chachimbiro
Fuente: Autoras 2007

El pH neutro a alcalino de las muestras, la salinidad y las concentraciones altas de As, podrían dificultar la adsorción del As(V) en los sedimentos.²⁰



Fotografía 5.9: Materia Orgánica presente en la Quebrada Cachiyacu
Autoras 2007

Según la digestión de sedimentos realizada en el laboratorio, la mayor cantidad de As podría estar adsorbida en la materia orgánica natural presente en los sedimentos de la quebrada Cachiyacu (color café de la solución acuosa). En la fotografía 5.9 se observa la apreciable cantidad de materia orgánica en el curso de la quebrada.

Efecto Socioambiental

La concentración de As_T del agua de la quebrada Cachiyacu, está sobre el límite para riego²¹. Los resultados de las altas concentraciones de As presentes en los sedimentos podrían afectar a la población en el consumo de peces que crecen en la zona. En el balneario Chachimbiro, existe un criadero de Tilapias

²⁰ Romero L, Alonso H, Campano P. *Arsenic enrichment in water and sediments of the Rio Loa (Second Region, Chile)*, Applied Chemistry 18 (1399-1416). 2003

²¹ Texto Unificado de Legislación Ambiental Secundario, TULAS. Libro VI, Anexo I. Tabla 6. Criterios de calidad admisibles para aguas de uso agrícola

para pesca deportiva. El agua del mismo esta sobre el límite permitido²², aunque de acuerdo a investigaciones realizadas en el CEINCI, los peces transforman el As inorgánico en Arsenobetaina, compuesto inocuo para la salud de los humanos.

c) Sector del Volcán Ilaló, Río San Pedro y Quebrada Ilaló

La especie arsenical predominante en la Quebrada Ilaló y el Balneario La Merced es el As(V). En cambio en la fuente del Ilaló debido a condiciones redox reductivas $Eh = -61mV$, el As(III) es la especie predominante.

En la quebrada Ilaló, la dilución causada por las unión de otras quebradas, disminuyen la concentración de As_T hasta el río Chiche (As_T de 171 a $2\mu g/L$).

De los resultados de la digestión de sedimentos y los análisis de la cantidad de SO_4^{-2} en el agua, se puede deducir que el As presente estaría adsorbido en los sulfuros del lugar.

En el balneario el Tingo, debido a su pH y Eh, el As_T se encuentra tanto como As(V) y como As(III). En la fuente de Cununyacu y en el río San Pedro, la especie de arsenical As(V). Esta fuente es la que incrementa el nivel de concentración de As en el Río San Pedro.

La concentración de As_T en el río San Pedro es baja por la presencia de variadas descargas que causan una dilución (fotografía 5.10).

²² Texto Unificado de Legislación Ambiental Secundario, TULAS. Libro VI, Anexo I. Tabla 8. Criterios de calidad para aguas de uso pecuario



Fotografía 5.10: Descargas domésticas en el Río San Pedro
Autoras 2007

Efecto socioambiental

El río San Pedro y la quebrada Ilaló no son aguas usadas para el consumo humano. El agua se destina para el riego en algunos lugares como el punto P9 (finca Sr. Dávalos).

La concentración de As de la quebrada Ilaló sobrepasa el límite para riego.²³

La población no estaría afectada directamente por las concentraciones de As, sin embargo debido al uso para el riego o para los animales, los moradores podrían estar consumiendo alimentos con altos niveles de As.

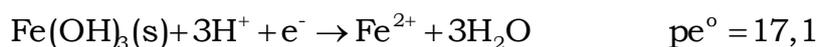
La contaminación del río San Pedro es evidente por el olor particular que posee.

²³ Texto Unificado de Legislación Ambiental Secundario, TULAS. Libro VI, Anexo I. Tabla 6. Criterios de calidad admisibles para aguas de uso agrícola

d) Fuente Geotermal La Merced de Nono / Río Pichán

Esta fuente geotermal contiene alto CO₂ y es un agua altamente clorurada férrica. Presenta alto contenido de NaCl²⁴. Estas condiciones no son favorables para el riego, ya que el NaCl cambia la composición del suelo impidiendo que las plantas absorban los nutrientes que necesitan de él.

En las fuentes geotermales debido a su relativamente bajo potencial redox (Eh = 30mV a -30mV), los compuestos de As(III) deberían ser las especies predominantes. Sin embargo, As(V) se encuentra en grandes concentraciones, esta situación podría darse por la abundante presencia de óxidos de hierro en los sedimentos y en el agua. Greenleaf y col. reportan que el As(III) es oxidado a As(V) por los óxidos hidratados de Fe(III) en un reactor flujo pistón ya que termodinámicamente la reacción de oxidación es favorable²⁵. Estas fuentes termal al ascender a la superficie pueden ser modeladas como de reactores flujo pistón, de manera que las moléculas de As(III) tienen un extenso contacto con los millones de sitios reactivos presentes en las partículas de los óxidos de hierro y oxidan al As. La ecuación que explica esta reacción de equilibrio se indica a continuación:



²⁴ Inventarios de estudios geotermales del INAHMI, Mayo 1978.

²⁵ Greenleaf j., Cumbal L, Staina I. & Sengupta A.K. *Abiotic As(III) Oxidation by Hydrated Fe(III) oxide (HFO) Microparticles in a plug flow columnar configuration.* Ichem. 2003

Por otra parte, debido al pH del agua (media=8.2) y la continua oxigenación del río Pichán por ser río de montaña ($Eh=73.9mV$), la especie arsenical que predomina es el $As(V)$.



Fotografía 5.11: Materia orgánica presente en Río Pichán
Autoras 2007

Como en los casos anteriores, los datos de digestión de sedimentos demuestran que el As estaría contenido en la abundante materia orgánica presente en el río Pichán como se aprecia en la fotografía 5.11.



Fotografía 5.12: Depósitos de Fe en el Río Pichán
Autoras 2007

Además, el contenido de hierro (inicio quebrada, P19=3.68 mg/L, Tabla 4.15 Cap IV) característico de la zona podría retener el As en los sedimentos por adsorción.

Efecto socioambiental

Las concentraciones de As presentes en el agua cercana a las fuentes geotermales, no ocasionan un daño socio-ambiental, ya que la cantidad de gente que habita el sector es mínima.

La población de Los Puentes, cerca de Nanegalito, usa el agua del río Pichán para riego; sin embargo, la concentración de As de la misma no excede el límite permitido.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

CONCLUSIONES

- El As encontrado en las fuentes debe su origen a la vulcanismo de los Andes presente en el cuaternario.
- Del 100% de las fuentes geotermales, el 30% tienen concentraciones de arsénico por encima de los 50 µg/L. La investigación del destino de las mismas corroboró niveles altos en los cuerpos de agua.
- La mayoría de las fuentes geotermales son destinadas para balnearios. Sin embargo, sus descargas desembocan en quebradas o ríos que se destinan para agricultura.
- En un 80% del área del proyecto, las condiciones oxidantes, el pH de neutro a alcalino, justifican la presencia de As(V) como especie arsenical predominante.

- Los procesos de adsorción y dilución son los que condicionan la movilidad del arsénico en el agua.
- Las fuentes geotermales con condiciones reductoras poseen mayor concentración de As(III).
- La presencia de materia orgánica en la mayor parte del proyecto influye en la concentración de As presente en los suelos.
- El daño socioambiental es indirecto debido a que el agua analizada de ríos y fuentes no es usada para consumo.

RECOMENDACIONES

- Se debe realizar un estudio más detallado de las diferentes provincias incluidas en la investigación, por ejemplo un estudio de cuencas hidrográficas de cada cuerpo de agua donde se encuentren niveles altos de As. Con ello se abordaría todos los posibles afluentes, origen, etc.
- Es necesario realizar el análisis de SiO₂ en el agua y en el suelo debido a la presencia de andesita en los suelos.
- Se debe realizar estudios geofísicos, geoquímicos, geodinámicos, hidrogeológicos, toxicológicos para entender la evolución del As en las diferentes fases.
- Este estudio debe ser la introducción a futuras investigaciones sobre contaminación de As.
- En los estudios de cuencas hidrográficas se debe considerar las fuentes geotermales y la presencia de As