

UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN AGUSTIN

FACULTAD DE CIENCIAS NATURALES Y FORMALES

ESCUELA PROFESIONAL DE QUÍMICA



**Estudios geoquímicos de las fuentes termales y frías  
asociadas al volcán Misti**

Tesis presentada por:

**Bach. Pablo Jorge Masías Álvarez**

Para optar el título profesional de

Licenciado en Química

**AREQUIPA-PERÚ**

**2007**

## RESUMEN

El Misti, de 5822 m. de altitud, está situado a solo 17 km al Noreste del centro de la ciudad de Arequipa (~1000000 habitantes), la segunda ciudad mas importante del Perú.

En febrero del 2006 se realizo el muestreo de 17 fuentes de aguas termales y frías alrededor del Misti (~ 25 to30 km).

Durante el muestreo se realizo la medida de temperatura, pH, la conductividad y TDS in situ. Las muestras fueron analizadas en el laboratorio para determinar su composición química.

Los análisis de las aguas colectadas alrededor del volcán muestran las tendencias geoquímicas evidentes que son interpretadas como el resultado de un proceso de mezclas entre aguas freáticas, meteóricas y fluidos magmáticos, que a veces interactúan con reservorios clorurados profundos. De hecho, podemos distinguir tres tipos de aguas:

- Sulfato clorurado alcalino terreas
- Cloruro sulfato alcalina
- Bicarbonatadas alcalinas terreas

Las aguas bicarbonatadas alcalinas terreas están mas cerca al cráter, mientras que las sulfato cloruradas alcalinas terreas están mas alejadas del volcán. Las cloruradas alcalinas están en una zona intermedia.

Claramente, se ha observado, que la temperatura estimada por el geotermómetro de Na-K-Mg mostró <100 ° C. Esto sugirió que el agua geotérmica alrededor del volcán Misti pueda ser mezclada con aguas subterráneas frías.

De otra parte, es posible que, las fuentes de Tigre y Quiscos sean asociadas con el sistema hidrotermal del volcán Chachani y la fuente Mariposa al volcán Ubinas.

## ABSTRACT

The summit of Misti volcano (5822 m.s.n.m.) is located at 17 km from the downtown of Arequipa (~1000000 inhabitants), the second largest and important city of Peru.

In February, 2006 we have realized the sampling of 17 sources of thermal and cold waters around the Misti (~ 25 to 30 km).

During the sampling, we have realized the measurement of temperature, pH, conductivity and TDS in situ. The samples were analyzed in the laboratory to determine the chemical compositions of the samples.

The result of the analyses of the waters collected around the volcano displays evident geochemical trends that are interpreted as the result of mixing processes between fresh meteoric waters and magmatic fluids, sometimes interacting with a deep chloride reservoir. In fact, we can distinguish three types of waters:

- Earth-alkalinechloride-sulfate
- Alkalinesulfate-chloride
- Earth – alkaline bicarbonates

The earth alkaline bicarbonate waters are more near to crater, whereas, the earth alkaline chloride - sulfate are more far of the volcano. The alkaline sulfate chlorides are in an intermediate zone.

Clearly, we have observed that the temperature estimated of the waters by Na-K-Mg Geothermometer showed < 100 °C. It suggested that the geothermal water around the Misti volcano may be mixed with cold ground water.

On the other hand, is possible that, the sources of Tigre and Quiscos are associated with the hydrothermal system of the Chachani volcano and Mariposa source to the Ubinas volcano.

## AGRADECIMIENTOS

Deseo expresar mi especial agradecimiento a mi mentora y amiga Lic. Vicentina Cruz, por todo su apoyo incondicional, a mi asesor Ms. Juan Lopa, por las sugerencias, recomendaciones por despejar mis dudas durante la elaboración de la tesis, a ellos guardo un profundo respeto y admiración.

Mi agradecimiento al Instituto Geológico Minero y Metalúrgico en las personas de los José Machare, Víctor Carlotto y el Ing. Lionel Fidel por el apoyo brindado en la realización de esta tesis, a mis compañeros de trabajo Jersy Mariño, Lourdes Cacya, Luisa Macedo, Marco Rivera y Yanet Antaihua, por sus valiosos aportes, concejos y recomendaciones.

A mis padres, hermanos, Karla, su mamá y toda mi familia que siempre confió en mí, por su apoyo constante para la realización de este proyecto de tesis.

A los docentes de la Escuela Profesional de Química de la Universidad Nacional San Agustín de Arequipa, quienes han contribuido con mi formación profesional.

A mis amigos, que siempre estuvieron a mi lado y supieron comprender mi vocación.

A todos ellos “muchas gracias”

## Introducción

Arequipa la segunda ciudad más importante del Perú, que cuenta con una superficie de 63 345 km<sup>2</sup> y una población de aproximadamente de un millón de habitantes. Al Noreste (NE) de la ciudad se encuentra localizado el volcán Misti (16°18´S, 71°24´O, 5825 msnm). Es un estrato volcán cuyo cráter está ubicado a solo 17 Km. del centro de la ciudad, es considerado como potencialmente peligroso, dada la gran explosividad de sus erupciones pasadas y por que la población arequipeña no cuenta con un plan de emergencia ante una eventual crisis volcánica, además el sistema de monitoreo de la actividad es muy limitada, lo que hace, que esta ciudad sea mucho más vulnerable ante el peligro volcánico.

La ciudad de Arequipa se ha ampliado dramáticamente con dirección hacia el volcán Misti, durante los últimos 60 años. La población en el área de Arequipa y el pueblo de Chiguata están amenazados por al menos por cuatro tipos de fenómenos volcánicos: caídas piroclásticas (cenizas y pómez), coladas piroclásticas (flujo y oleadas piroclásticas), coladas de lava y los colapsos de flanco. (Thouret et al, 2001). El interés que despierta el volcanismo en nuestra sociedad no se debe a la relevancia científica del fenómeno volcánico, sino a sus facetas destructivas como generador de desastres (Astiz et al, 2000)

En las zonas volcánicas, los manantiales termales pueden generarse por la condensación de vapores provenientes del ascenso y/o migración de magma y al agua de filtración. Las fuentes termales son consideradas como puntos importantes, por la directa comunicación y la información que nos brindan acerca de la situación de un volcán activo a nivel más profundo.

Las técnicas geoquímicas de monitoreo resultan muy eficaces para vigilar un volcán activo. En el Misti se viene realizando el monitoreo de la fuente termal de Charcani V, desde 1998, actualmente el INGEMMET realiza mensualmente un muestreo de aguas y registra la temperatura cada 15 minutos con ayuda de

dataloggers de temperatura, esperando encontrar modificaciones térmicas que se reflejen en cambios de la composición química y de las características físicas de las manifestaciones superficiales asociadas al producto del ascenso de un cuerpo magmático hacia la superficie (Cruz et al, 2004).

Por lo que en el presente trabajo de investigación plantea como objetivo obtener mayores conocimientos sobre el funcionamiento del sistema hidrotermal del volcán Misti, caracterizando las fuentes calientes y frías, física y químicamente, determinar el posible origen asociado a los fluidos volcánicos del Misti u otros volcanes cercanos, con los parámetros obtenidos de los análisis en el laboratorio y las observaciones realizadas en el campo, permitirá determinar que las fuentes están asociadas al sistema hidrotermal del volcán Misti.

## INDICE

<b>CAPÍTULO I</b>	<b>MARCO TEÓRICO.....</b>	<b>1</b>
1.1	ASPECTOS GENERALES.....	1
1.1.1	ACTIVIDAD VOLCÁNICA RECIENTE EN LOS ANDES....	1
1.2	EL VOLCÁN MISTI.....	3
1.2.1	CONTEXTO TECTÓNICO.....	3
1.2.2	GEOLOGÍA.....	5
1.2.3	HISTORIA ERUPTIVA.....	6
1.3	ESTUDIOS ANTERIORES.....	7
1.4	FLUIDOS GEOTERMALES.....	10
1.4.1	GASES VOLCÁNICOS.....	11
1.4.1.1	FUMAROLAS.....	12
1.4.1.2	GASES.....	13
1.4.2	FUENTES DE AGUA ASOCIADAS A LOS SISTEMAS VOLCÁNICOS.....	14
1.4.2.1	CONSTITUYENTES COMUNES DE LAS AGUAS ASOCIADAS A LOS SISTEMAS VOLCÁNICOS....	16
1.4.2.2	PARÁMETROS FISICOQUÍMICOS.....	17
1.4.2.3	COMPONENTE MAGMÁTICO DE LAS AGUAS ASOCIADAS A LOS SISTEMAS VOLCÁNICOS....	19
1.4.2.4	MEZCLAS CON OTRAS AGUAS.....	20
1.4.2.5	GASES ASOCIADOS A LAS FUENTES TERMALES.....	20

1.4.3	RELACIÓN ENTRE LAS FUENTES DE AGUA Y LOS SISTEMAS VOLCÁNICOS.....	21
1.5	QUÍMICA DE LAS AGUAS.....	22
1.5.1	CLASIFICACION QUÍMICA DE LAS AGUAS.....	22
1.5.1.1	Diagrama ternario Cl-SO <sub>4</sub> -HCO <sub>3</sub> .....	22
1.5.1.2	Diagrama cuadrado Langelier-Ludwig .....	23
1.5.1.3	Diagrama de Stiff modificado.....	23
1.5.1.4	Diagrama de Piper-Hill-Langelie.....	24
1.5.2	TIPOS DE AGUAS.....	25
1.5.2.1	CLORURADAS.....	26
1.5.2.2	SULFATADAS.....	26
1.5.2.3	BICARBONATADAS.....	27
1.5.2.4	CLORURO SULFATADA.....	27
1.5.2.5	CLORURADAS DILUIDAS y/o BICARBONATADAS.....	28
1.6	GEOTERMÓMETRO.....	28
<b>CAPÍTULO II</b>	<b>PARTE EXPERIMENTAL.....</b>	<b>30</b>
2.1.	UBICACIÓN.....	30
2.2.	DESCRIPCIÓN DE LAS FUENTES.....	32

2.2.1	Fuente termal Charcani V.....	32
2.2.2	Manantial Zemanat .....	33
2.2.3	Manantial de Chilina.....	34
2.2.4	Galerías del Puente de Fierro.....	35
2.2.5	Manantial de la calle Cuzco.....	36
2.2.6	Manantial de Tingo.....	36
2.2.7	Ojo del Milagro.....	37
2.2.8	Piscina N° 2 Sabandia.....	38
2.2.9	Manantial de Yumina.....	39
2.2.10	Manantial de la quebrada Agua Salada.....	40
2.2.11	La Bedoya.....	42
2.2.12	Jesús.....	42
2.2.13	Fuente termal Umaluso.....	43
2.2.14	Fuente termal Quiscos.....	44
2.2.15	Fuente termal Mariposa.....	45
2.2.16	Fuente termal El Tigre.....	46
2.3.	MUESTREO.....	47
2.3.1	RECONOCIMIENTO DE LA ZONA DE MUESTREO.....	48
2.3.2	PRUEBAS ORGANOLÉPTICAS.....	48
2.3.3	ENJUAGADO DE LAS BOTELLAS.....	48
2.3.4	TOMA DE MUESTRA.....	49
2.3.5	FILTRACIÓN.....	49
2.3.6	ENJUAGADO DE LAS BOTELLAS CON EL FILTRADO.....	50
2.3.7	CONSERVACIÓN.....	50
2.3.8	TAPADO DE LAS BOTELLAS.....	50
2.3.9.	ROTULADO.....	51
3.3.10.	ALMACENAMIENTO Y TRANSPORTE.....	51

2.4.	METODOLOGÍA.....	51
2.4.1	ENSAYOS DE CAMPO.....	51
2.4.1.1	MEDICION DEL pH.....	52
2.4.1.2	MEDICION DE LA CONDUCTIVIDAD Y TDS.....	52
2.4.1.3	TEMPERATURA.....	52
2.4.2	DESCRIPCIÓN DE LOS METODOS DE ANALISIS QUÍMICOS EN EL LABORATORIO.....	52
2.4.2.1	CARBONATOS Y BICARBONATOS.....	53
2.4.2.2	CLORUROS.....	53
2.4.2.3	SULFATO.....	54
2.4.2.4	NITRATOS.....	54
2.4.2.5	ABSORCIÓN ATOMICA FLAMA.....	54
2.4.2.6	ABSORCIÓN ATOMICA HORNO DE GRAFITO.....	55
2.4.2.7	ABSORCIÓN ATOMICA HMS – FIAS.....	55
2.5	ESTÁNDARES Y CONTROL DE CALIDAD.....	56
2.6	TRATAMIENTO DE DATOS.....	56
<b>CAPÍTULO III</b>	<b>RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....</b>	<b>57</b>
3.1	RESULTADOS.....	57
3.2	PARÁMETROS FISICOQUÍMICOS.....	60
3.2.1	Temperatura .....	60
3.2.2	pH.....	61

3.2.3	Conductividad y TDS.....	62
3.3	CARACTERÍSTICAS GEOQUÍMICAS DE LAS AGUAS.....	63
3.3.1	CATIONES.....	63
3.3.2	ANIONES.....	64
3.3.3	REPRESENTACIÓN DE LA COMPOSICIÓN ANIÓICA Y CATIÓICA DEL AGUA.....	65
3.3.4	GRUPAMIENTO GRÁFICO DE LAS FUENTES.....	67
3.3.5	GEOTERMÓMETRO.....	71
3.3.6	METALES PESADOS.....	72
3.3.7	DISTRIBUCIÓN GEOGRÁFICA DE LAS FUENTES DE AGUA ASOCIADAS AL VOLCÁN MISTI.....	72
3.4	CONCLUSIONES.....	74
3.5	RECOMENDACIONES Y SUGERENCIAS.....	75
	<b>BIBLIOGRAFIA.....</b>	<b>76</b>
	<b>ANEXOS.....</b>	<b>81</b>

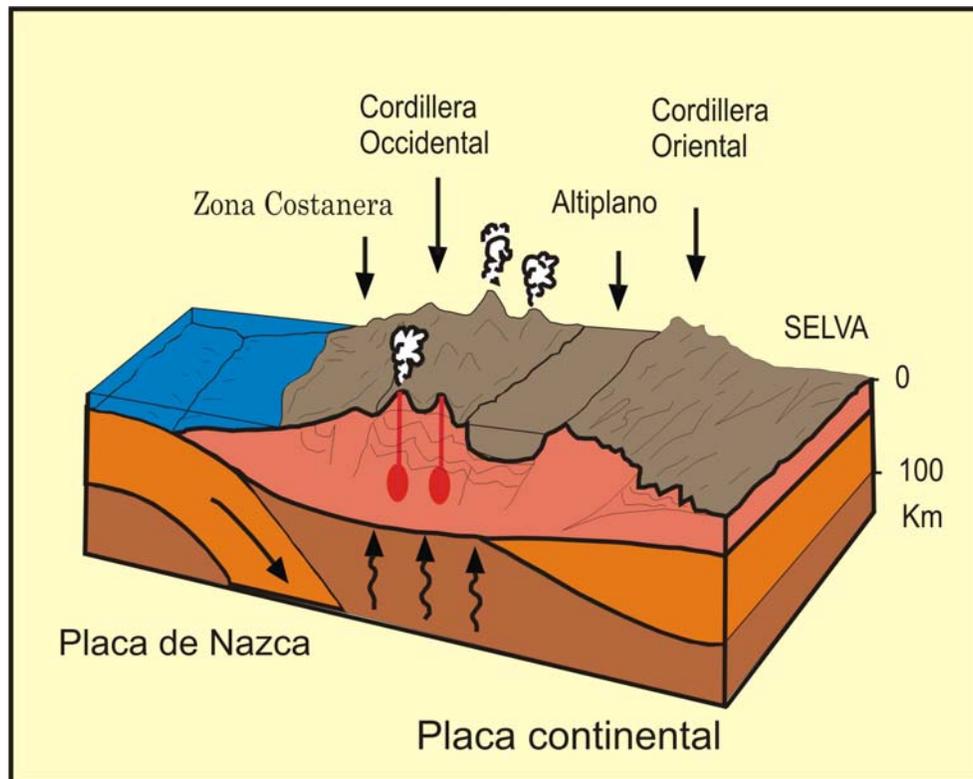
# **CAPÍTULO I**

## **MARCO TEÓRICO**

### **1.1 ASPECTOS GENERALES**

#### **1.1.1 ACTIVIDAD VOLCÁNICA RECIENTE EN LOS ANDES**

El volcanismo y sismicidad en América del Sur están asociados a procesos dinámicos de subducción de la placa oceánica de Nazca por debajo de la placa continental Sudamericana. (Fig.1.1) Los sistemas hidrotermales, están asociados a fuentes de calor y fluidos magmáticos provenientes de cámaras magmáticas profundas. Cualquier cambio interno y profundo del volcán, será reflejado en el sistema hidrotermal. (Gonzáles, 2001)



**Fig.1.1** Esquema del proceso subducción normal que forma la cordillera de los andes al Sur del Perú y norte de Chile, la placa de Nazca se deshidrata bajo la placa continental liberando fluidos a alta temperatura, los cuales emergen para formar los sistemas volcánicos (Modificado de Mattauer, 1989).

La cordillera de los Andes es la cadena montañosa que tiene más de 8,000 Km de longitud, extendiéndose por todo el borde Oeste del continente sudamericano. En esta cordillera se han definido tres zonas volcánicas, que son la manifestación del volcanismo cuaternario activo:

- Zona Volcánica del Norte (Colombia-Ecuador, NVZ),
- Zona Volcánica Central (Perú y norte de Chile, CVZ) y
- Zona Volcánica del Sur (Chile, SVZ).

Del total de volcanes activos del mundo, el 10% de ellos se ubican en estas tres zonas: NVZ, CVZ, SVZ. (Fidel et al., 1997).

## 1.2 EL VOLCÁN MISTI

El Misti (8196371.7 S, 243543.3 E, 5822msnm), (fig. 1.2.) es un estrato volcán, situado a sólo 17 km al Noreste del centro de la ciudad de Arequipa, con una diferencia de 3500 m de desnivel que existe entre la cumbre del volcán (5822msnm) y el centro de la ciudad (2300 msnm). El cono volcánico tiene un diámetro aproximado de 17,5 Km (De Silva et al, 1991). Los productos más antiguos tienen una edad de 830 000 años (Thouret et al., 2001).

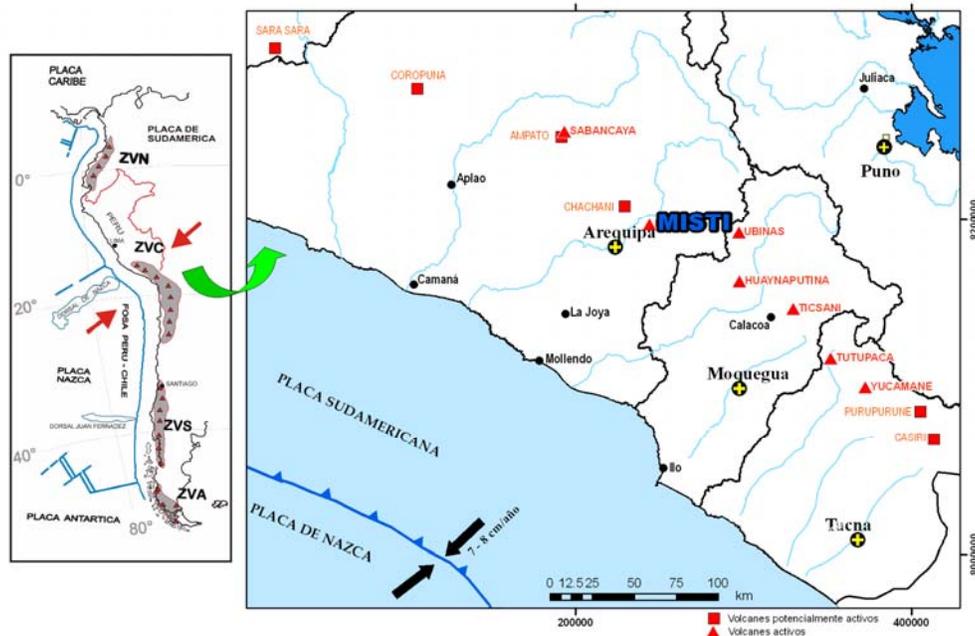
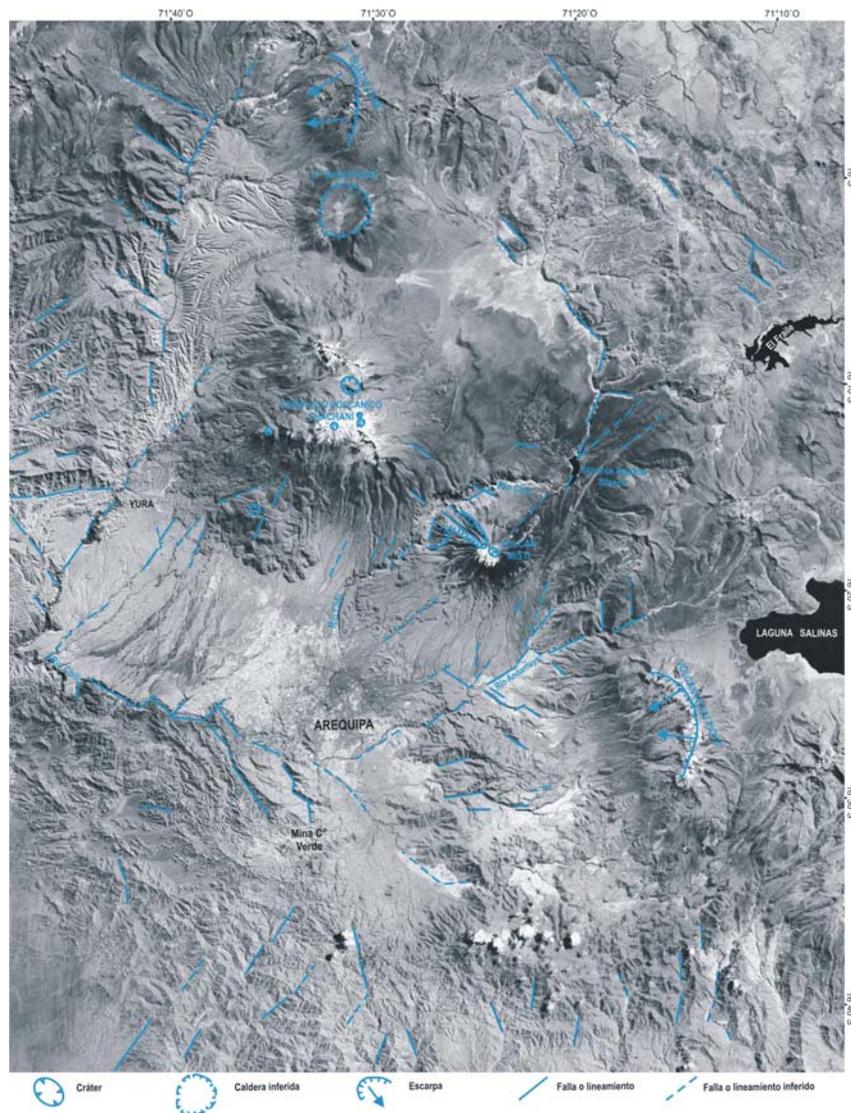


Fig.1.2 – En el mapa se puede apreciar las tres zonas volcánicas de Sudamérica, con mayor detalle la Zona Volcánica Central de los Andes (ZVC) donde se aprecia la ubicación del volcán Misti.  
(Cacya, 2006)

### 1.2.1 CONTEXTO TECTÓNICO

El Misti yace dentro de un sistema tectónico extensional de rumbo complejo, compuesto por 4 grupos de fallas: el activo de tipo normal-slip orientado en

dirección Oeste-Noroeste (O-NO), la falla Huanca cuyo buzamiento es hacia el Suroeste (SO) con una pequeña componente lateral izquierda, la cual compensa probablemente la orientación de las fallas inactivas de tipo normal y de rumbo al Norte (N), Noreste (NE) y Norte–Noroeste (N-NO). Las fallas con dirección Noreste y las ya existentes fallas compresivas de dirección N habrían originado la formación de 1 km de profundidad en el cañón del río Chili que drena en la cordillera Occidental hacia la cuenca tectónica de Arequipa de 2300 msnm. (Thouret et al., 2001).



**Fig.1.3 – Imagen Landsat TM, donde se muestran las principales estructuras volcánicas (cráteres y calderas), además de fallas, alineamientos y escarpas. (Mariño et al., 2007).**

## 1.2.2 GEOLOGÍA

El Misti comprende dos edificios: un estrato volcán "antiguo" erosionado al Oeste (O) (Pleistoceno medio) también llamado Misti 1; un flujo de lava de la base del Misti fue datado en 833 Ka. y un estrato-cono "moderno" al Este (E) y Sureste (SE) que se eleva hasta los 5800 m. (Thouret et al.1999a, 1999b, 2001). El estrato-cono moderno se ha formado al lado, y se ha superpuesto en parte, al estrato volcán "antiguo" al Oeste y Noroeste (NO) y se formó en aproximadamente 112 Ka, en etapas llamadas Misti 2, Misti 3 y Misti 4. Ambos edificios se han formado al menos sobre cinco ignimbritas riolíticas soldadas y no soldadas, que reciben el nombre de "sillares" (Pre Misti) Los cuales observados en la quebrada del río Chili alcanzando más de 300 m de espesor y pertenecen al Plioceno superior. (Thouret et al., 2001)

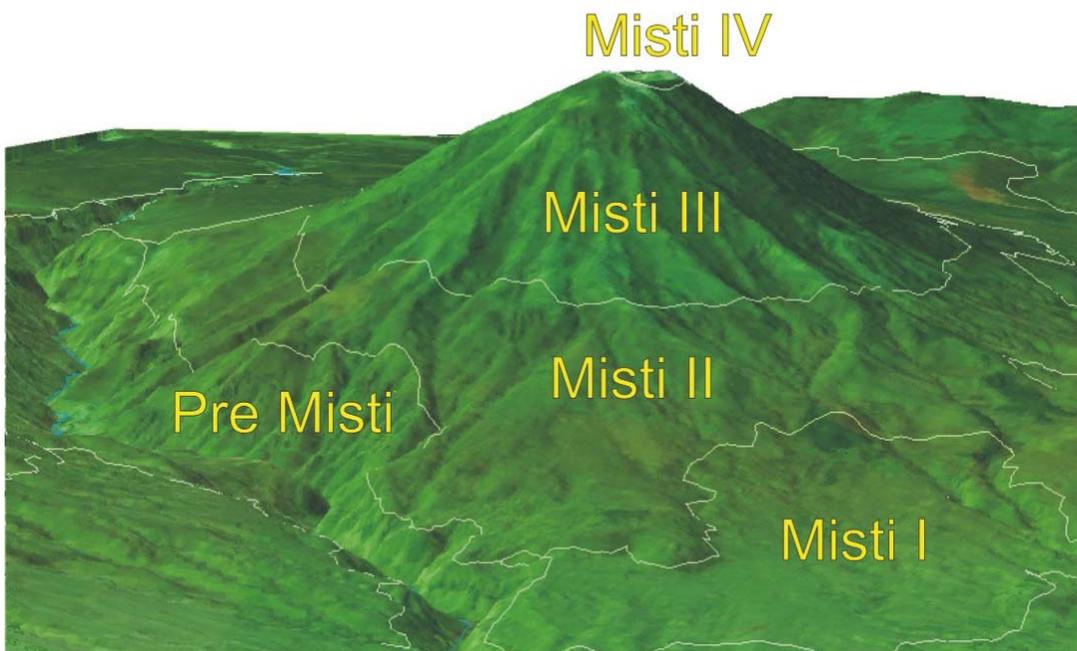


Fig.1.4 – Esquema geológico donde se aprecian los depósitos del pre Misti como cimiento, el estrato volcán Misti 1, los estrato cono Misti 2 y Misti 3, el cono de la cumbre Misti 4 Flancos SE, S y SO (Modificado de Cacya, 2006)

### 1.2.3 HISTORIA ERUPTIVA

Los datos históricos muestran 12 eventos eruptivos del Misti, ocurridos desde el siglo XV hasta la actualidad. La actividad mas importante se registró durante los años 1454, 1677, 1784 y 1787 por Ballón (1900), Travada y Córdova (1958), Barriga (1952), Zamácola y Jáuregui (1823), Chávez (1993). En la tabla 1.1 se muestra un resumen de estos hechos.

La última actividad presentada por el Misti ocurrió en el año 1985 y de acuerdo a testigos que dan cuenta, produjeron columnas altas de 1 km que contenían cenizas finas, además el domo del cráter aparentemente creció. En general las actividades en el último siglo se caracterizan por presentar crisis fumarólica tal como lo muestra la crisis de 1985. Esto ocurrió dentro del contexto normal de un volcán activo, estas actividades se consideran de tipo freática, con presencia de gases y en la mayoría de casos con cenizas. Muchos de estos hechos estuvieron acompañados de ruido y sismos. Pero una de las últimas erupciones explosivas de gran magnitud presentada por el Misti fue la erupción de alrededor de 2000 años A.P. (antes del presente) (Thouret et al., 2001)

Tabla 1.1 - Actividad volcánica histórica del Misti ocurrida desde 1464 hasta la actualidad.

ANO	TIPO DE ACTIVIDAD	OBSERVACIONES
1454	Erupción central y explosiva	Cenizas alcanzaron hasta 23 km hacia el NO.
1542	Erupción explosiva	Caída de cenizas probablemente alrededor del cráter.
1599	Erupción explosiva	
1677	Erupción explosiva	Caída de cenizas alrededor del cráter.
1784	Erupción explosiva	Caída de cenizas alrededor del cráter.
1787	Erupción explosiva	Caída de cenizas alrededor del cráter.
1826	Erupción explosiva	
1830	Erupción explosiva	
1831	Erupción central	Caída de cenizas alrededor del cráter.
1869	Erupción explosiva	Presencia de fumarolas.
1870	Erupción explosiva	Columnas fumarólicas y posibles caídas de cenizas cercanas al cráter.
1948	Erupción explosiva	Alarma en la ciudad de Arequipa por cenizas emitidas
1985	Intensa actividad fumarólica	Columnas fumarólicas hasta de 1 km.
1997	Actividad fumarólica	Presencia de fumarolas de color blanco grisáceo. Aumento de la temperatura en las fumarolas y fuente de Charcani V
2001	Aumento actividad geotermal	después del terremoto de junio



**Fig.1.5 – Foto de la actividad fumarólica del año 1985 del volcán Misti, la toma fue hecha del lado SE. Se puede apreciar que el viento dirige la columna de gases hacia la Ciudad de Arequipa. Por el color blanco se puede presumir que esta compuesta de una gran cantidad de vapor de agua, estas columnas alcanzaron una altura de 1 Km (Macedo, 1985)**

### **1.3 TRABAJOS ANTERIORES**

Existen pocos trabajos, los que tienen como objetivo el consumo humano y la utilización en la agricultura del agua en Arequipa, Rosas (2006) realiza un trabajo donde sostiene que las rocas volcánicas y las secuencias Volcanoclásticas en el área aledaña al volcán Misti, son los que soportan el mayor rendimiento subterráneo, las facies metamórficas (génesis de Charcani) e intrusivas (Batolito de la Caldera) son las que se comportan como barreras impermeables. En el fondo de los valles existen depósitos aluviales que soportan filtraciones de recarga en las partes altas y escurrimiento subterráneo en las partes cultivadas.

El régimen de escurrimiento superficial es regular, por lo que los manantiales alrededor del Misti en su mayoría tienen agua todo el año.

Existe una distribución irregular de los manantiales cercanos al volcán Misti, generalmente se encuentran entre los 2200 a 3600 msnm

El Misti se encuentra en la cuenca del río Chili, exactamente en la sub cuenca oriental, entre el río Chili y el río Andamayo. En esta parte se encuentra gran cantidad de manantiales y afloramientos. Los más cercanos al volcán en los distritos de Chiguata, Paucarpata, Sabandia, Characato, Cercado y Alto Selva alegre.

La tabla N° 1.2 detalla la lista de fuentes de la sub cuenca oriental del río Chili.

Hacia el lado occidental del río Chili se encuentra el volcán Chachani, donde se consideran las fuentes muy cercanas al río Chili en los distritos de Cayma, Yanahuara, Cercado y Sachaca.

En la parte alta de la cuenca (atrás del Volcán Misti) se encuentra la zona de Pampa Cañahuas y Aguada Blanca donde existen manantiales de aguas calientes, en un afluente del río Sumbay.

Existe un grupo de fuentes termales en el río Yura, en la ladera E del volcán Chachani, las cuales podrían estar mas asociadas a este que al Misti.

Desde el punto de vista químico de las aguas de origen volcánico como efecto del terremoto de junio del 2001 presentaron un trabajo Cruz et al. (2004) donde se aprecian anomalías químicas en la fuente termal de Charcani V, ubicada junto al volcán Misti.

Cruz et al. (2006), presentaron un trabajo de caracterización de las aguas calientes asociadas al volcán Ubinas donde se tomo algunas muestras a distancias menores de 40 km del volcán Misti.

Tabla 1.2 - Lista de fuentes de la sub cuenca oriental del río Chili ( modificada de Rosas, 2006).

N°	N° de Fuente	Nombre	Ubicación	Cota msnm	Cordenadas U.T.M.		Caudal l/s
					Norte	Este	
<b>DISTRITO CHIGUATA</b>							
<b>SECTOR CHIGUATA</b>							
1	1	Pasto Grande	Pampa La Paccha	4341	8191744	258850	450,00
2	2	La Bedoya	Fundo "La Bedoya"	2947	8184671	243167	220,00
3	3	Cutire	Qda. Cutire	2828	8184063	242645	0,25
4	4	Siete topos # 1	Cauce derecho del río Killocona Cauce derecho del río Killocona	2882	8183636	242602	2,50
5	5	Siete topos # 2		2858	8183799	242388	2,50
<b>SECTOR MIRAFLORES</b>							
6	1	La Trampilla	Qda La Trampilla	3456	8187462	250056	9,70
7	2	Pasto verde (milagro)	Cuesta Simbral, Miraflores	3980	8184111	258029	0,13
<b>SECTOR AGUA SALADA</b>							
8	1	Cañón Agua Salada	Cañón Agua Salada	2849	8185137	241390	5,25
9	2	Cauce abierto Agua Salada	Cause izquierdo de Qda	2750	8185349	241223	2,00
10	3	Infiernillo	Chiguata	2800	8185220	256020	11,40
<b>DISTRITO PAUCARPATA</b>							
11	1	Los Bautistas	Cauce Izq del río Paucarpata.	2458	8180780	235193	145,00
12	2	Jesús	Balneario de Jesús	2466	8182699	235814	10,00
13	3	La Bedoya Chico	Fundo "La Bedoya"	2947	8184671	243167	15,00
14	4	La Rinconada	Qda. "Bajo la Capilla"	2520	8180584	236975	65,00
15	5	Los Linares	Qda Jesús lado derecho	2665	8183094	235738	1,00
16	6	Pozo Negro	Qda. Pozo Negro	2663	8182737	235644	2,00
<b>DISTRITO SABANDIA</b>							
17	1	Las Sanjas	La Isla Sabandia	2430	8178617	233518	12,00
18	2	2da Piscina baja	Calle Las Piscinas	2459	8179357	233634	60,00
19	3	1ra Piscina alta	Calle Las Piscinas	2459	8179551	236535	90,00
20	4	Yumina	Sector la Rinconada # 1	2383	8179572	235961	253,10
21	5	El Camal	Camal de Sabandia	2285	8179763	233768	1,00
22	6	Buena Vista	Cuesta del Herraje	2459	8179763	233823	4,00
23	7	La Rinconada # 2 (Yumina)	La Rinconada # 2	2414	8178657	236210	1,50
24	8	Albertazzo # 1	Qda. Albertazzo	2520	8180584	236995	10,00
25	9	Albertazzo # 2	Qda. Central Albertazzo Pastos, Los Pintos y Calderón	2520	8180584	236995	2,50
26	10	Los Pintos		2441	8179225	234423	2,50
27	11	Pastos Los Conejos	Los Pastos Coripata	2445	8180529	234027	2,00
<b>DISTRITO CHARACATO</b>							
28	1	Estanquillo	Ojo del Milagro	2522	8177469	237594	4,00
29	2	Yanayaco	Ojo del Milagro	2520	8177269	237600	104,50
30	3	Cancahuani	Ojo del Milagro	2518	8177186	237580	139,54
31	4	El tunel (Cuta cuta)	Río Cachimayo Lad. derecho	2515	8177376	236619	32,00
32	5	El Carrizal	QDA. Carrizal Lad. Derecho	2548	8178564	235675	2,40
33	6	Estanque Los Alarcones	Ojo del Milagro	2589	8177413	237647	4,00
34	7	Rio Cachimayo	Rio Cachimayo	2490	8177220	237618	2,00

## 1.4 FLUIDOS GEOTERMALES

Según Catalán (2000), existen tanto en la superficie, como en el interior de la superficie terrestre, corrientes de agua de origen variado que están sujetas a procesos físicos y químicos que determinan su comportamiento.

Las aguas meteóricas provenientes de la lluvia, sufren procesos de infiltración, escorrentía y evaporación. Las aguas de infiltración pueden ser retenidas por un manto de material impermeable localizado en una zona no muy distante de la superficie terrestre, llegando a formar una zona de aguas freáticas o someras. Otras son estancadas a distancias más profundas hasta donde llegan por medio de fisuras o grietas constituyendo un sistema de aguas artesianas y finalmente, otras que aparentemente no se han filtrado y que su localización es casi inmediata a la superficie.

Las aguas freáticas depositadas en un nivel poco profundo, constituyen una masa continua a la que se conoce como “nivel freático”. En el interior de la superficie terrestre, no solamente existe agua de origen superficial, sino que existen otros tipos, como el agua juvenil y las aguas vadosas, esta última producto del ciclo del agua meteórica. Las de tipo juvenil son las que tienen origen magmático y son desde el punto de vista físico-químico, muy diferentes a las de infiltración, obviamente debido al hecho de haber estado influenciado por un medio magmático. La circulación de esta agua por la corteza, obedece a diferentes factores, mientras que parte de ellas recorren distancias a nivel subterráneo, otra parte emerge a la superficie a través de fallas o fisuras, dependiendo de las fuerzas hidrostáticas presentes en la zona.

La descarga al exterior se manifiesta en la superficie a través de las llamadas fuentes de agua. Estas fuentes pueden ser clasificadas según su temperatura como fuentes termales ( $>15^{\circ}\text{C}$ ) y fuentes frías ( $<15^{\circ}\text{C}$ ). En las aguas juveniles, la temperatura muchas veces sobrepasa los  $80^{\circ}\text{C}$ . Muchas de ellas presentan gases disueltos de diverso origen. (Catalán, 2000)

Según Buffer (1979) Los sistemas saturados con vapor se clasifican como de: alta temperatura ( $>150^{\circ}\text{C}$ ), intermedia ( $90$  a  $150^{\circ}\text{C}$ ) y baja ( $<90^{\circ}\text{C}$ ).

Para los efectos de diferenciación de las aguas, no basta conocer la concentración de ciertos elementos químicos en solución, ya que su paso por la corteza se ve influenciado por las diferentes formaciones geológicas y por la variada configuración tectónica o estructural del área. Sin embargo, las aguas juveniles, cuyo contenido químico se ve muchas veces enriquecido por el aporte magmático, podrían brindar información de los ambientes geológicos y vulcanológicos por los que ha sido influenciado. (Chiodini et al, 1993)

La química de las aguas y gases geotermales, constituyen información importante acerca de la configuración hidrogeológica del campo y las condiciones físico-químicas relacionadas al origen e interacción (fluidos-rocas y fluidos-fluidos) de estos fluidos en el análisis de los signos precursores de la actividad volcánica. Por tanto, un análisis químico de las fuentes termales asociadas al sistema volcánico activo es recomendable para el conocimiento tanto del estado actual del reservorio y del sistema hidrotermal asociado, así como de los ambientes de circulación a los que han estado sujetas (González, 2001).

#### **1.4.1 GASES VOLCÁNICOS**

Los fluidos de la actividad hidrotermal y magmática profunda, asociados a los volcanes se encuentran presentes tanto en forma líquida como en forma de vapor.

Esta fase de vapor, está constituida por vapor de agua y gases provenientes de distintas fuentes. A medida que estos fluidos se dirigen a la superficie, se produce una reducción de la presión confinante dentro del sistema, lo que origina que la fase de vapor se separe de la fase líquida. Estos vapores migran hacia la superficie independientemente de la fase líquida y se manifiestan al exterior en forma de fumarolas, o lo hacen con la fase líquida por medio de las fuentes termales pero en disolución. Bajo estas circunstancias, la química del

vapor de agua tanto en la fumarola como en las fuentes termales, será una consecuencia directa de la composición del fluido del reservorio. Las fuentes calientes de agua, aparte de su contaminación por aguas meteóricas y por sustancias disueltas de las rocas, nos darán información acerca de la composición de volátiles, tal como que lo hacen las fumarolas.

#### 1.4.1.1 FUMAROLAS

La composición química de las fumarolas en los diferentes volcanes es muy variada. El 90%, ó más, del total es vapor de agua. Los gases de carbono ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{CH}_4$ ) están cercanos en orden de abundancia; de éstos el  $\text{CO}_2$  es generalmente el más abundante, el  $\text{CH}_4$  es bajo y el  $\text{CO}$  raramente excede al  $\text{CO}_2$ . Los gases de azufre ( $\text{SO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{S}$ ,  $\text{S}_8$ ,  $\text{SO}_3$ ) siguen en abundancia a los gases de carbono; generalmente, el  $\text{SO}_2$  es el más importante a altas temperaturas y el  $\text{H}_2\text{S}$  a bajas temperaturas.

De los gases halógenos, el  $\text{HCl}$  es el más común, sin embargo su cantidad es muy variable y se cree que es característico de fumarolas de alta temperatura, el  $\text{HF}$  normalmente ocurre como la décima parte del  $\text{HCl}$ . El nitrógeno se presenta como un elemento libre, pero algunas veces se reportan pequeñas cantidades de  $\text{NH}_3$ ; el  $\text{NH}_4\text{Cl}$  es un sublimado común y en pequeñas partículas, es responsable del color azulado de las fumarolas.

Según algunos autores como Giggenbach et al. (1976) proponen que la composición de las fumarolas tomando en cuenta diferentes volcanes, como se puede apreciar en la tabla 1.3 tienen el siguiente orden de concentración:

Tabla 1.3 - Composición general de las fumarolas volcánicas.

Elemento	$\text{H}_2\text{O}$	$\text{CO}_2$	$\text{SO}_2$	$\text{H}_2$	$\text{HCl}$	$\text{CO}$
Composición: mole-%	80	10	7	1 a 2	0.5	0.5

La composición de las fumarolas varía con la temperatura, con el estado de oxidación y la desgasificación del cuerpo magmático. El He proviene del manto y su presencia se puede interpretar como un aporte magmático cuando la relación He/Ar  $\sim$  0.1. Sin embargo, rocas volcánicas jóvenes pueden contener He proveniente del manto portado durante su intrusión y puede formar parte de los fluidos, al ser disuelto en las rocas. Altas concentraciones de hidrógeno, boro, arsénico y mercurio, y un alto valor de  $H_2/H_2S$  indican temperaturas subterráneas muy elevadas (D'Amore et al, 1987; White, 1970)

Algunos procesos que afectan la composición de las fumarolas, son la solubilidad de los gases en la fase líquida, la condensación, oxidación, las reacciones con la roca encájante y la contaminación con los gases de la atmósfera.

#### 1.4.1.2 GASES

Al igual que los constituyentes solubles de las fuentes termales de agua, los gases también pueden dividirse en dos grupos (Nicholson, 1993):

**Gases reactivos:** ( $CO_2$ ,  $H_2S$ ,  $NH_3$ ,  $H_2$ ,  $N_2$ ,  $CH_4$ ), los cuales toman parte en el equilibrio químico y proveen información de las condiciones subterráneas, como la temperatura.

El  $CO_2$  (dióxido de carbono) es el más abundante, representa mayormente el 85% tanto del volumen, como del peso (Mahon et al., 1980b), el  $H_2S$  (sulfuro de hidrógeno) es más soluble que el  $CO_2$  y es producido por la alteración de las rocas del reservorio o de una fuente magmática, el  $NH_3$  (amonio) es el más soluble y es producto de la alteración de materia orgánica, el  $H_2$  (hidrógeno) resulta de la reacción con las rocas, el  $CH_4$  (metano) es el hidrocarburo más común y resulta de la alteración con las rocas sedimentarias, el  $N_2$  (nitrógeno) que puede ser de origen magmático así como provenir de las aguas meteóricas que recargan los reservorios subterráneos.

**Gases inertes o conservativos:** (gases nobles, los hidrocarburos mayores que el metano) que no toman parte de las reacciones químicas. Éstos proveen información de la fuente de los gases.

Parte de los gases nobles (He, Ne, Ar, Kr y Xe) provienen de la recarga de aguas meteóricas y otra parte proviene del interior de la tierra.

El oxígeno, normalmente se encuentra bajo los límites detectables, sin embargo cuando hay presencia de éste, significa que hubo contaminación (Mazor et al., 1984)

#### **1.4.2 FUENTES DE AGUA ASOCIADAS A LOS SISTEMAS VOLCÁNICOS**

Frecuentemente, en áreas volcánicas activas o en zonas en las cuales la actividad eruptiva ha disminuido o cesado, se pueden observar numerosas fuentes termales, evidenciando así la presencia de los sistemas hidrotermales asociados a la actividad volcánica. (Hochstein et al., 2000) Fig. 1.6

Un sistema hidrotermal, es el producto de la interacción entre un cuerpo magmático profundo y el agua meteórica. Esta agua, atraviesa la corteza por medio de las fracturas y los horizontes geológicos permeables, hasta profundidades muy próximas al cuerpo magmático profundo. Adquiere así altas temperaturas debido al aporte de calor generado por el cuerpo magmático y muchas veces recibe un aporte de fluidos magmáticos provenientes de éste (Craig, 1963)

Las aguas, a medida que descienden se convierten en aguas primarias cloruradas debido a las interacciones con la roca encajante y todos los demás tipos de aguas derivarán directa o indirectamente de éstas.

Los fluidos son retenidos en niveles geológicos permeables, estableciéndose así en primer término un equilibrio entre el líquido y el mineral, luego se produce alteración del mineral por el líquido, diluyendo ciertos elementos minerales y llevándolos consigo para luego ascender a la superficie como

consecuencia de altas temperaturas, en forma de vapor. Si consigue arribar hasta la superficie, se generan las fumarolas. Alternativamente, los vapores pueden disolverse en las aguas subterráneas y formar aguas bicarbonatadas, aguas ácido-sulfatadas.

La composición de esta agua dependerá por tanto del tipo de roca con la cual interactúe en su recorrido.

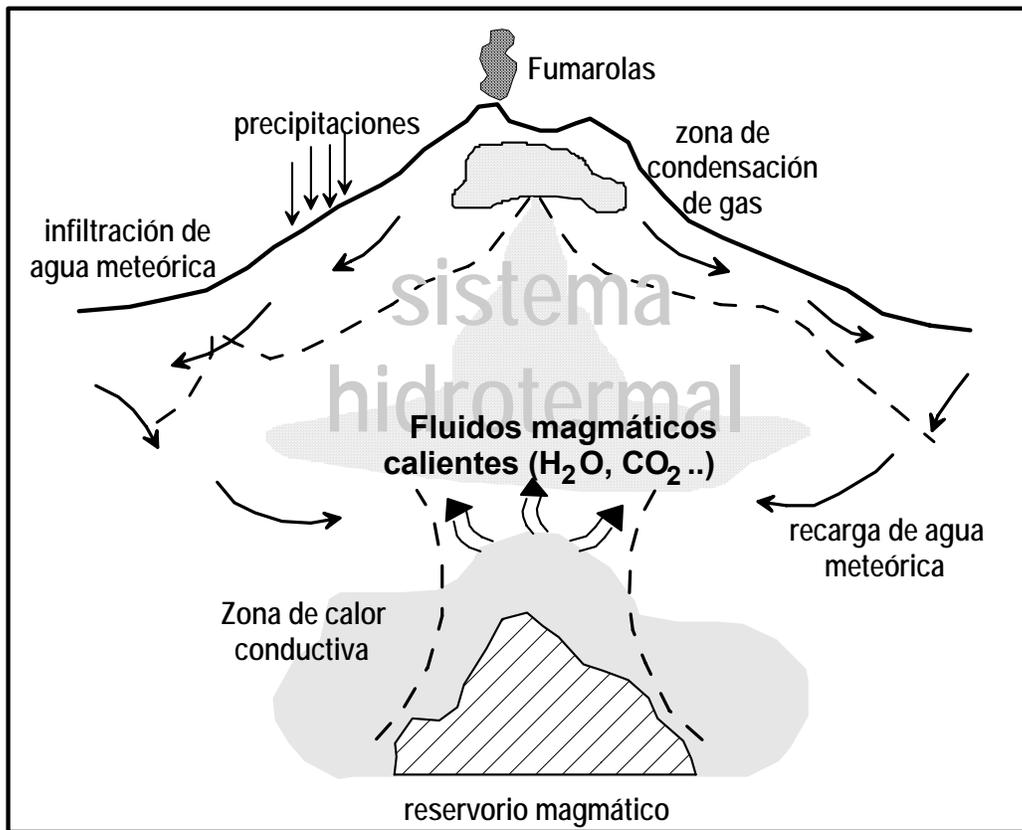


Fig. 1.7 - Modelo conceptual de un sistema hidrotermal volcánico y las manifestaciones en superficie asociadas (modificado de Hochstein et al., 2000).

Cuando el agua de infiltración es calentada, asciende a la superficie y puede ser descargada a través de fuentes termales o puede viajar lateralmente hasta emerger a muchos kilómetros de distancia. Los vapores de esta agua pueden migrar hasta la superficie, independientemente de la fase líquida y ser descargados como fumarolas.

Se presenta también el caso del agua que se infiltra hasta alcanzar grandes profundidades y por consiguiente alcanza altas temperaturas pero sin recibir el aporte de fluido magmático alguno (Giggenbach, 1990)

#### 1.4.2.1 **CONSTITUYENTES COMUNES DE LAS AGUAS ASOCIADAS A LOS SISTEMAS VOLCÁNICOS**

Los análisis químicos de las aguas termales asociadas a áreas volcánicas muestran gran diversidad en su composición, y que siempre se encuentran presentes los cationes, aniones y ciertos constituyentes menores. (Anorsson et al 1983):

Aniones:  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{F}^-$ ,  $\text{Br}^-$ ,  $\text{I}^-$

Cationes:  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Li}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Rb}^+$ ,  $\text{Cs}^+$ ,  $\text{Mn}^{2+}$ ,  $\text{Fe}^{2+}$

Neutral:  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{NH}_3$ , As, B, Gases Nobles.

Las diferencias en concentración de los elementos químicos, son debidas a varios factores tales como: variaciones de temperatura, contenido de gases, fuente de calor, tipo de roca, permeabilidad, fuente del fluido o mezcla, etc.

Los constituyentes disueltos más comunes en los fluidos del reservorio del acuífero profundo se pueden clasificar según su comportamiento de solubilidad. (Ellis, 1970)

**Elementos conservativos (Cl, B, Br, As, Cs):** pasan a solución antes que ocurra alteración de las rocas encajantes. Tienen tendencia a mantenerse en solución y se les considera como elementos no reactivos, aunque esto se cumple solo para el cloro, ya que los otros elementos tienen reacciones cerca de la superficie.

**Elementos no-conservativos ( $\text{SiO}_2$ , Na, K, Ca, Mg,  $\text{HCO}_3$ , Li):** estos tienen regular participación en procesos secundarios. Entran en solución,

solamente después de la alteración de la roca encajante. Dan información de la interacción mineral-fluido y su solubilidad está controlada por la temperatura, por eso son utilizados como geotermómetros (Arnorsson, 1985).

#### **1.4.2.2 PARÁMETROS FISICOQUÍMICOS**

El agua subterránea natural como consecuencia de su composición química y de acciones naturales externas, presenta una serie de propiedades o características fisicoquímicas: color, turbidez, sabor, temperatura, conductividad eléctrica, dureza, etc. Estas propiedades varían en el espacio y en el tiempo. Las más representativas son:

##### **1.- Temperatura**

La temperatura del agua subterránea, en un punto y momento determinado, representa un estado de equilibrio entre los "aportes" y las "extracciones" caloríficas en ese punto.

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

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

La temperatura de las aguas subterráneas pueden ser influenciados directa o indirectamente por la presencia de una cámara magmática.

## **2.- Conductividad, residuo seco (RS) y sólidos totales disueltos (TDS)**

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

La variación de temperatura modifica notablemente la conductividad. Para soluciones diluidas se estima que el aumento de temperatura en  $1^\circ\text{C}$  se traduce en un aumento de alrededor del 2% en la conductividad.

Se denomina "residuo seco" (RS) a las especies que permanecen después de la evaporación de un volumen determinado de agua, generalmente un litro.

Sólidos totales disueltos (TDS) es la medida de peso de todas las sustancias disueltas en el agua sean o no volátiles. Aunque residuo seco y total de sólidos disueltos suelen tomarse como sinónimos no son exactamente equivalentes debido a los procesos de deshidratación pérdida de  $\text{CO}_2$ , etc. que se producen al calentar el agua, hasta  $110^\circ\text{C}$  por lo general para determinar el residuo seco.

## **3.- pH**

El pH es el logaritmo del inverso de la concentración de los iones hidrónios, este aumenta con el incremento de temperatura hasta en un 8% por lo que debe referirse a la temperatura de medida in situ. Por regla general el pH de las aguas naturales se mantiene entre 6.5 y 8, aunque excepcionalmente puede variar entre 3 y 11.

El pH juega un papel importante en muchos procesos químicos y biológicos de las aguas subterráneas naturales (equilibrio carbonatado. procesos redox, etc.). Es fácilmente alterable por lo que su determinación debe hacerse en el momento de la toma de muestra.

El pH en los sistemas hidrotermales se encuentra bajo la influencia de los fluidos salinos, la temperatura y por los minerales amortiguadores.

#### **4 – Alcalinidades, Grado Alcalimétrico Total (TAC) y Grado Alcalimétrico (TA)**

La alcalinidad de un agua determina su capacidad para neutralizar ácidos. Esta capacidad debe definirse pues para ciertos rangos de pH. Así la alcalinidad TAC mide la capacidad de neutralización hasta pH 4.5 y la alcalinidad TA hasta pH 8.3.

#### **5.- Dureza**

La dureza de un agua mide la capacidad de ésta para consumir jabón o producir incrustaciones.

Aunque en la reacción con jabón para producir compuestos insolubles pueden intervenir Ca, Mg, Fe, Mn, Cu, Ba, Zn, etc. actualmente la dureza se define en términos de contenido en Ca y Mg (dureza total) esta suele expresarse en mg/L de CaCO<sub>3</sub>. La dureza de las aguas subterráneas naturales varía generalmente entre 10 y 300 mg/L de CaCO<sub>3</sub> pudiendo llegar a 2000 o más.

#### **1.4.2.3 COMPONENTE MAGMÁTICO DE LAS AGUAS ASOCIADAS A LOS SISTEMAS VOLCÁNICOS**

Uno de los métodos para estimar la proporción de fluidos magmáticos en las fuentes termales, es medir la razón de isótopos. El oxígeno de las aguas meteóricas tiene menos isótopos pesados por tanto la razón <sup>16</sup>O/<sup>18</sup>O será baja) que el oxígeno del agua en equilibrio con el magma. Desafortunadamente, las aguas meteóricas pueden recibir un aporte de isótopos pesados debido a reacciones con las rocas ígneas, lo que puede provocar interpretaciones erradas. Sin embargo, la relación de los isótopos de hidrógeno suele ser diferente, por lo tanto es recomendable realizar el análisis de ambos isótopos (oxígeno e hidrógeno) si se quiere tener una mejor estimación del componente magmático. (Giggenbach, 1992)

Los estudios en general han demostrado que la mayor parte del agua de las fuentes calientes son de origen meteórico. Es necesario el estudio de los componentes disueltos de las aguas, debido a que algunos elementos

presentes en menor cantidad, son los que pueden proveer ciertas pautas sobre el aporte hacia las aguas meteóricas circulantes de las emanaciones provenientes del cuerpo magmático.

Algunos componentes volátiles provenientes de cuerpos magmáticos que llegan a mezclarse con las aguas circulantes a diferentes profundidades, son: los dos óxidos de carbón, los gases de azufre  $H_2S$  y  $SO_2$ , los ácidos halógenos  $HCl$  y  $HF$ , y el hidrógeno. El metano y el amonio como constituyente menores. Los componentes menos volátiles son el sulfuro, el cloruro de amonio y algunos metales que muchas veces se desprenden del cuerpo magmático en forma de cloruros (Brombach et al., 2000).

#### **1.4.2.4 MEZCLAS CON OTRAS AGUAS**

Los fluidos hidrotermales profundos pueden mezclarse con aguas frías, antes de ser descargadas por las fuentes o pozos. Las aguas meteóricas, son menos salinas que los fluidos hidrotermales, este proceso es conocido como dilución (Nicholson, 1993). De hecho el caso que más se presenta es la dilución de un fluido profundo con las aguas meteóricas frías. Este proceso de dilución brinda las pautas necesarias para determinar el tipo de fuente que proporciona el aporte para la dilución.

#### **1.4.2.5 GASES ASOCIADOS A LAS FUENTES TERMALES**

Es común observar en las fuentes termales, gases disueltos que pueden ser muestreados, analizados y obtener una fuente de información importante. Mayormente se presentan  $CO_2$ ,  $H_2S$  y  $NH_3$  que son los más solubles, además de  $N_2$ ,  $H_2$ ,  $NH_4$ . Estos gases provienen de diversas fuentes, por ejemplo el aporte de  $CO_2$  puede provenir de la interacción roca-vapor de agua, o por descomposición de los minerales de carbono y degradación termal de materia orgánica de la que a su vez se produce un aporte de metano ( $CH_4$ ) y amoniaco ( $NH_3$ ). El  $H_2S$  puede tener su origen de la alteración de la roca que conforma el reservorio, o un origen magmático; el amonio ( $NH_3$ ) es producido por la

descomposición de materia orgánica en rocas sedimentarias al igual que el metano; el hidrógeno ( $H_2$ ) es removido de las rocas (Chiodini et al., 2003).

### **1.4.3 RELACIÓN ENTRE LAS FUENTES DE AGUA Y LOS SISTEMAS VOLCÁNICOS**

Recientemente se ha tomado una especial atención enfocada hacia los métodos hidrogeoquímicos de investigación volcánica, basada en el hecho de que los gases de origen magmático que alcanzan niveles superficiales de la corteza, afectan la composición de las fuentes termales.

Numerosos volcanes han sido estudiados utilizando técnicas geoquímicas, para determinar tanto el origen de los fluidos, los procesos por los cuales son afectados y bajo la influencia de los cuales su circulación y dinámica son controladas, así como para generar modelos de circulación de los fluidos; por ejemplo Marini et al., (1991) en Guagua Pichincha-Ecuador, Brombach et al., (2000) en La Soufrière – Guadalupe. Asimismo, se muestra que los sistemas magmáticos e hidrotermales son muchas veces influenciados por controles estructurales, por ejemplo Italiano et al., 1998 en Vulcano; Finizola et al., 2000 en el Estromboli, etc.). Los cambios en ciertos elementos químicos han sido observados y correlacionados con cambios en la actividad volcánica (Italiano et al., 1998).

Como vemos, la aplicación de la geoquímica en vulcanología representa una herramienta de gran relevancia si tomamos en cuenta los alcances en el conocimiento que podemos obtener acerca del funcionamiento de un volcán. Adicionalmente, la identificación de precursores geoquímicos que representen un aumento de la actividad volcánica, es igualmente útil en el desarrollo de un programa de vigilancia volcánica.

## 1.5 QUÍMICA DE LAS AGUAS

### 1.5.1 CLASIFICACION QUÍMICA DE LAS AGUAS

#### 1.5.1.1 Diagrama ternario Cl-SO<sub>4</sub>-HCO<sub>3</sub>

El diagrama triangular Cl-SO<sub>4</sub>-HCO<sub>3</sub> es usado dar una clasificación inicial del las muestras de agua geotermál (Giggenbach, 1988; Giggenbach et al, 1989).

La ubicación de los datos en la grafica se obtiene calculando:

$$\Sigma_{an} = [\text{Cl}^-] + [\text{SO}_4^{2-}] + [\text{HCO}_3^-]$$

$$\% \text{Cl}^- = ([\text{Cl}^-] / \Sigma_{an}) 100$$

$$\% \text{SO}_4^{2-} = ([\text{SO}_4^{2-}] / \Sigma_{an}) 100$$

$$\% \text{HCO}_3^- = ([\text{HCO}_3^-] / \Sigma_{an}) 100$$

Este diagrama se puede generar introduciendo la información en la hoja de cálculo en la computadora (Mustard et al 1990)

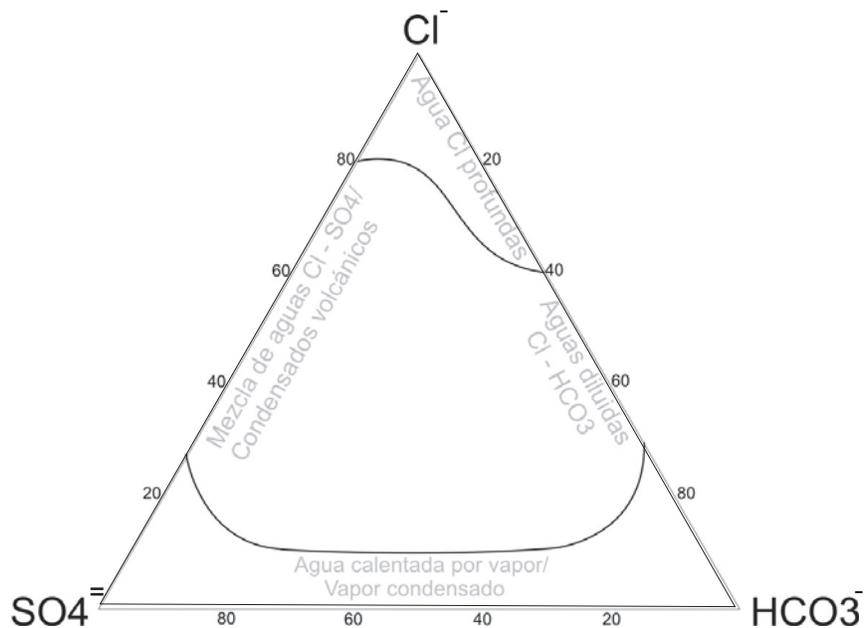


Fig.1.8 Diagrama ternario de Giggenbach (1988) SO<sub>4</sub> - Cl - HCO<sub>3</sub>.

### 1.5.1.2 Diagrama cuadrado Langelier-Ludwig

Este diagrama es una versión cuadrada del más popular diagrama rómbico de Piper.

Se trabaja con eq/L ó meq/L realizando las siguientes ecuaciones:

$$\Sigma an = e_{Cl} + e_{SO4} + e_{HCO3}$$

$$\Sigma cat = e_{Ca} + e_{Mg} + e_{Na} + e_K$$

$$\%Na^+ = 50 e_{Na} / \Sigma cat$$

$$\%Cl^- = 50 e_{Cl} / \Sigma an.$$

### 1.5.1.3 Diagrama de Stiff modificado

Consiste en tomar sobre semirrectas paralelas segmentos proporcionales a la concentración de cada ión (meq/L) y unir los extremos para formar, así un polígono. Aunque la disposición de los iones en cada semirrecta es opcional suele utilizarse la que se presenta en la fig. 3.9. Esta disposición permite apreciar rápidamente los valores de las relaciones iónicas con respecto a la unidad y la variación de las relaciones entre cationes o entre aniones. La forma de cada polígono orienta sobre el tipo de agua y su tamaño da una idea relativa del contenido iónico total del agua e indirectamente de la conductividad.

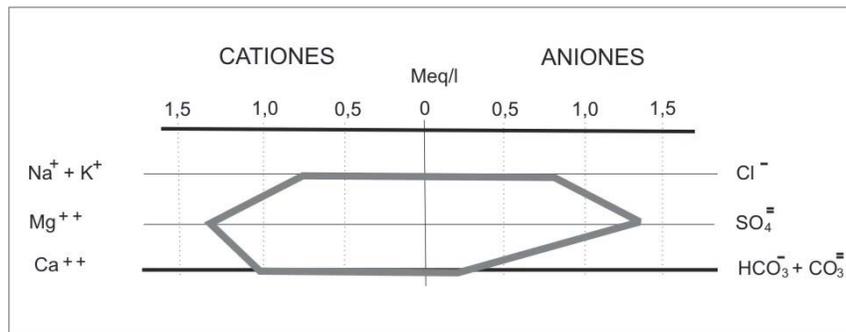


Fig.1.9 Diagrama de Stiff modificado.

#### 1.5.1.4 Diagrama de Piper-Hill-Langelier

Se trata de un diagrama triangular compuesto. Está constituido (Fig. 1.10) por dos triángulos equiláteros (donde se representa, respectivamente, la composición aniónica y catiónica del agua) y un campo central romboidal en que se representa la composición del agua deducida a partir de aniones y cationes.

Es necesario reducir las concentraciones de los iones expresadas en mili equivalentes/litro a % y sólo se pueden reunir en cada triángulo tres aniones y/o tres cationes. A cada vértice le corresponde el 100% de un anión o catión.

Como aniones se suelen representar:  $\text{HCO}_3^- + \text{CO}_3^{=}$ ,  $\text{SO}_4^{=}$  y  $\text{Cl}^- + \text{NO}_3^-$ , como cationes:  $\text{Na}^+ + \text{K}^+$ ,  $\text{Ca}^{+2}$  y  $\text{Mg}^{+2}$  a cada composición aniónica o catiónica le corresponde un punto en cada triángulo. Para obtenerlo basta trazar por el punto que representa el porcentaje de cada ión, una paralela al lado opuesto al vértice que representa el 100% de dicho ión.

En este tipo de diagramas no se representan concentraciones absolutas. Si se quiere tenerlas en cuenta se puede asociar a cada punto representativo de un análisis una cifra que indique la conductividad, residuo seco, o un círculo de radio proporcional a esas magnitudes o bien un listado adjunto.

Frente a este inconveniente y la imposibilidad de representar más de tres iones por triángulo, estos diagramas permiten reflejar mezclas de aguas. precipitaciones, disoluciones, procesos de intercambio iónico, así como representar varias muestras.

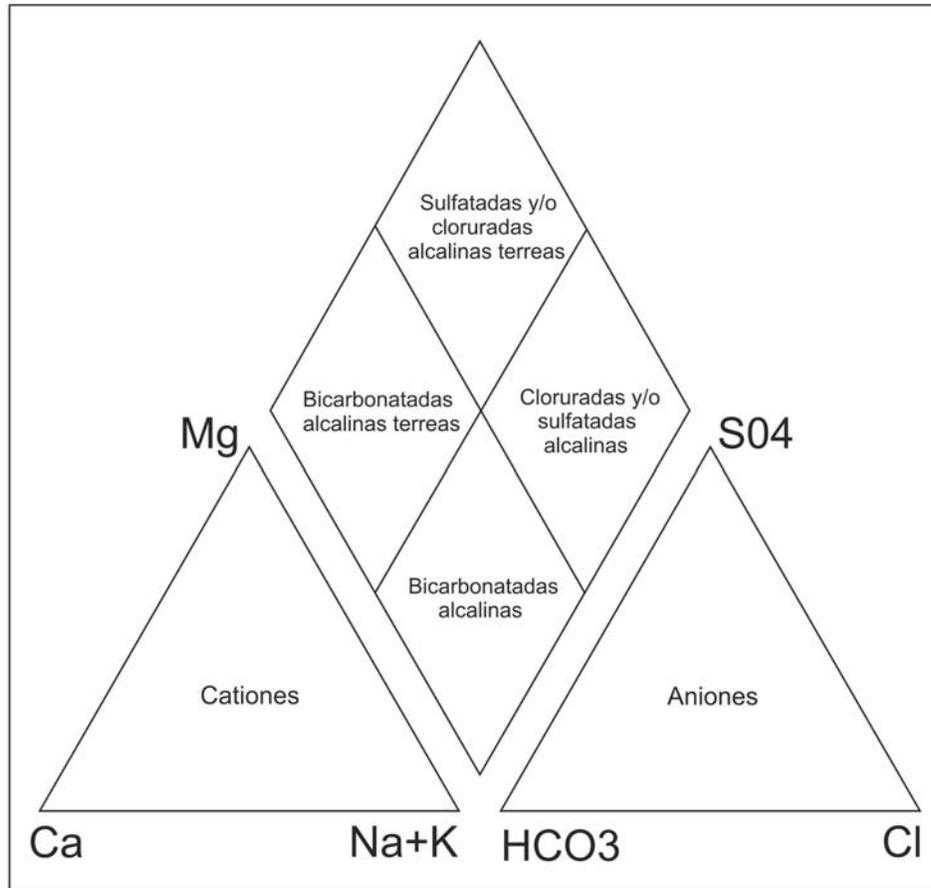


Fig. 1.10 Diagrama de Piper-Hill-Langelier

### 1.5.2 TIPOS DE AGUAS

El tipo más común de fluido se encuentra a profundidad, en sistemas geotermáles de alta temperatura que tiene un pH cercano al neutro y con el cloruro como anión dominante. Otras aguas se encuentran dentro del perfil de un campo geotermál y son comúnmente derivados de estos fluidos profundos, como consecuencia de procesos fisicoquímicos. Las características se describirán a continuación y son clasificadas de acuerdo a los aniones dominantes.

Aunque no en un esquema formal genérico, esta clasificación descriptiva permite hacer alguna generalización sobre el probable origen de las aguas (Duchi, 1987)

#### **1.5.2.1 CLORURADAS**

Estas aguas pueden ser alcalinas o neutras, normalmente son fluidos geotermales profundos, formando sistemas de muy altas temperaturas.

Afloran en la superficie como fuentes calientes, piscinas de buen caudal y la mayoría de geiser

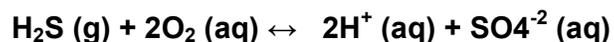
Las fuentes calientes, limpias y de color verde azulado con altas concentraciones de cloruros son alimentadas directamente de reservorios profundos. (Toutain, 1997)

El cloruro es el anión dominante, y se encuentra en cantidades que superan los 10000 mg/l, los principales cationes son el sodio y el potasio (a menudo ~10:1), sílice y boro en proporciones significativas. El bicarbonato y los sulfatos se encuentran en cantidades variables, pero en cantidades menores al cloruro. El pH es ligeramente ácido o alcalino, cercano al neutro. Los principales gases disueltos son el dióxido de carbono y en niveles inferiores esta el sulfuro de hidrógeno.

#### **1.5.2.2 SULFATADAS**

Son aguas de mezcla, formadas por la condensación de gases geotermales cerca de la superficie, originalmente son fluidos profundos, las cuales al llegar al punto de ebullición en las profundidades se separaron de las aguas cloruradas y al acercarse a la superficie se mezclan con las aguas subterráneas de origen meteóricas ricas en oxígeno, el cual reacciona con el sulfuro de hidrógeno formando el ión sulfato (Mahon et al, 1980a)

El sulfato es el principal anión y se forma por la oxidación de los condensados de sulfuro de hidrogeno



Esta reacción y la condensación del dióxido de carbono producen protones, dando acidez al agua.

### 1.5.2.3 BICARBONATADAS

Estas aguas son ricas en dióxido de carbono, se producen bajo la superficie por la condensación de vapor y gas, mezclándose con aguas subterráneas pobres en oxígeno. (Chiodini et al., 2000)



Las aguas tienen pH cercano al neutro como reacción con las rocas cercanas, reservorios superficiales o durante los flujos laterales, neutralizando la acidez inicial de esta agua. La pérdida de protones en estas reacciones produce aguas cercanas al neutro con bicarbonato y sodio como constituyentes principales. El sulfato puede estar presente en concentraciones variables, con el cloruro en concentraciones variables o ausente. (Mahon et al, 1980a)

### 1.5.2.4 CLORURO SULFATADA

Estas aguas pueden proceder de diferentes procesos, los siguientes pueden ser sugeridos:

- a) Mezclas de aguas cloruradas y sulfatadas a diferentes profundidades, que es la más común.
- b) Oxidación del sulfuro de hidrógeno en aguas cloruradas cerca a la superficie.
- c) Condensación de gases volcánicos en aguas meteóricas.
- d) Condensación vapor a profundidad.
- e) El paso de fluidos clorurados a través de secuencias de sulfato a presión o el contenido litológico de sulfato a presión.

Las aguas formadas por el proceso (a) son las más comunes. Estas aguas tienen un pH típico entre 2 – 5, con cloruro y sulfato en proporciones casi iguales. Las aguas formadas en el proceso (c) y (d) pueden reconocerse por la alta concentración

### **1.5.2.5 CLORURADAS DILUIDAS y/o BICARBONATADAS**

Estas aguas están formadas por fluidos clorurados con aguas subterráneas o bicarbonatadas, estas son descargadas generalmente en fuentes tibias o calientes. En esta agua son muy aplicables los geotermómetros. (Fournier et al, 1974).

## **1.6 GEOTERMÓMETRO**

Los geotermómetros permiten estimar la temperatura de los fluidos en el reservorio. Son instrumentos valiosos en la evaluación de nuevos campos geotermales y en la supervisión de sistemas de producción hidrogeológica. Los geotermómetros están basados en la solubilidad mineral (sílice) y reacciones de cambio (Na-K, Na-K-Ca etc.)

El soluto en los geotermómetros está basado en el equilibrio del fluido con los minerales y la temperatura en el reservorio y su aplicación acertada confían en cinco presunciones básicas

1. - La concentración de los elementos o especies para ser usada en el Geotermómetro esta controlada sólo por temperatura - mineral dependiente - reacción de fluidos.
2. Hay una abundancia del minerales y/o la especies disueltos (roca - sistema fluido) para que la reacción pueda ocurrir fácilmente
3. La reacción logra el equilibrio en el reservorio.
4. Hay flujo rápido hacia la superficie, sin que ocurra un reequilibrio, después de que el fluido abandona el reservorio no hay reacciones cerca a la superficie.
5. No hay ninguna mezcla o dilución de fluido profundo (esta asunción puede ser engañada si el grado de dilución/mezcla puede ser evaluado)

### Geotermómetro Na-K-Mg

El diagrama ternario Na/100 – K/100 –  $Mg^{1/2}$ , fue propuesto por Giggenbach en (1988) (fig. 1.11), como un método para determinar la temperatura del reservorio y reconocer las aguas que lograron el equilibrio con las rocas. Este diagrama es muy útil para determinar las aguas que son más convenientes para geotermometría.

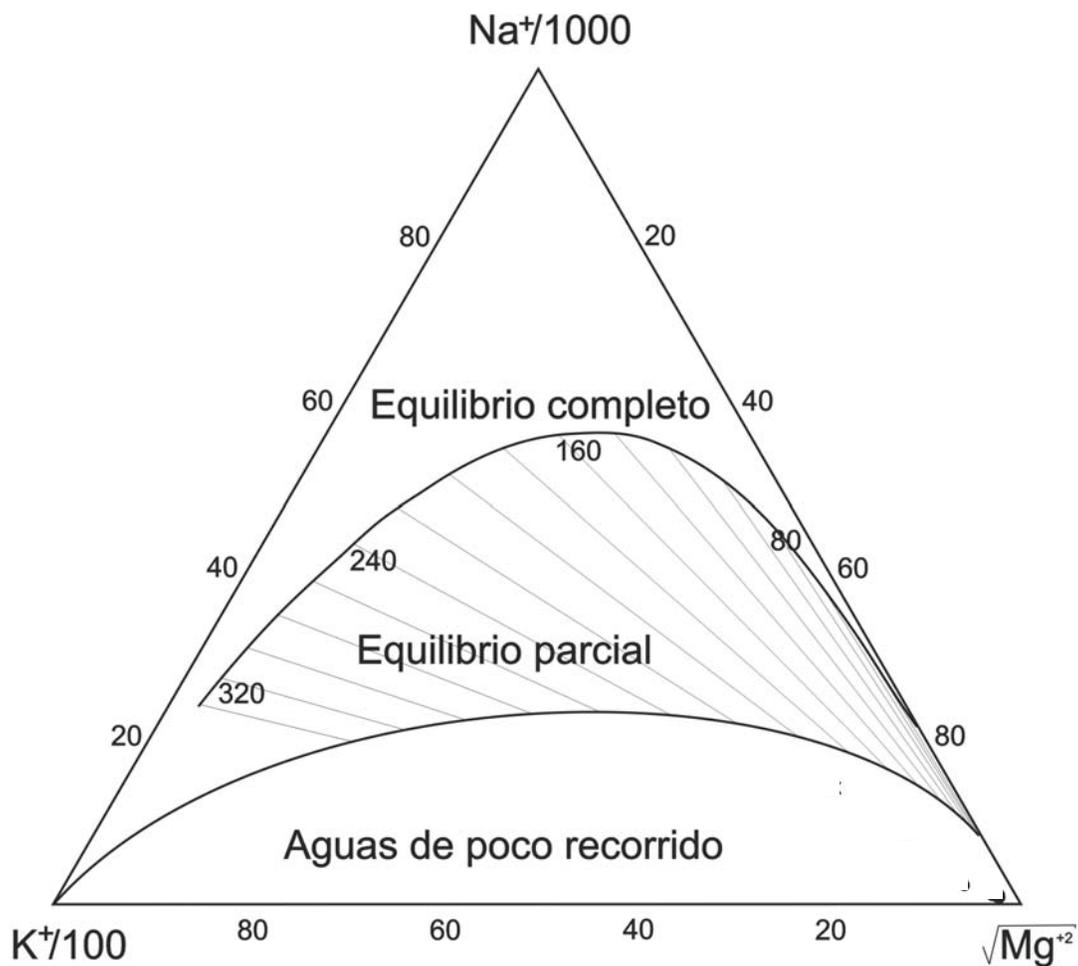


Fig. 1.11 Diagrama del geotermómetro

## **CAPITULO II**

### **PARTE EXPERIMENTAL**

#### **2.5. UBICACIÓN**

Para el presente trabajo de investigación se tomo un área aproximada de 25 a 30 Km de radio alrededor del volcán Misti, La mayoría de las fuentes de aguas termales y frías se localizan al sur del volcán (ver mapa de localización, Fig. 2.1 y tabla 2.1 de los datos de las fuentes)

Se determinaron 17 lugares de muestreo, para el reconocimiento de las fuentes termales que podría, estar relacionadas al volcán Misti, tomando en cuenta la temperatura y la cercanía al volcán.

Tabla 2.1 - Lista de fuentes y ubicación de donde se tomaron las muestras para la investigación.

Nº	Fuente Termal	Codigo	Longitud	Latitud	Altura (msnm)
1	Charcani V	CHV	237881.7	8199470.9	2960
2	Ojo Chilina 1	CHS	229125	8188537	2382
3	Ojo Chilina 2	CHN	229125	8188537	2382
4	Zemanat	ZEM	228966	8186522	2340
5	Ojo Calle Cuzco	CCZ	226544	8182271	2245
6	Puente Fierro	PFE	227885	8183977	2300
7	Tingo	TIN	226382	8181802	2232
8	Ojo del Milagro	OMI	237617	8177638	2581
9	Yumina	YUM	235916	8179818	2569
10	Sabandia	P2S	233537	8179686	2420
11	Bedoya	BED	243201	8184836	2913
12	Agua Salada	AGS	241258	8186105	2896
13	Jesús	JES	236103.6	8183848.8	2640
14	Quiscos	QIS	215570	8209729	2919
15	Umaluso	UMA	244548	8222575	3950
16	Tigre	TIG	212344.4	8202449.5	2417
17	Mariposa	MAR	269600.1	8187191.9	4352

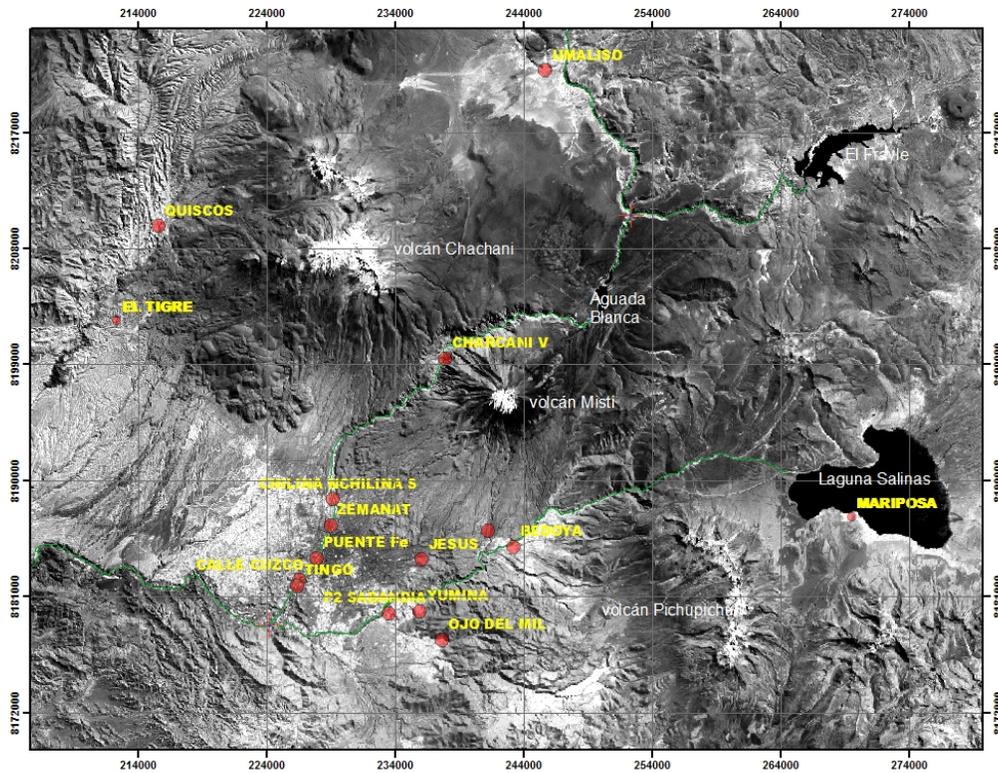


Fig. 2.1 - Mapa de ubicación de las fuentes donde se tomaron las muestras.

## 2.6. DESCRIPCIÓN DE LAS FUENTES

### 2.2.1 Fuente termal Charcani V

Esta fuente (8199470.9 S, 237881.7 E, 2960 msnm), se encuentra dentro de las galerías subterráneas donde se alberga la central hidroeléctrica del mismo nombre, en la ladera Este del volcán Misti, siendo el acceso por la antigua carretera Arequipa – Cusco, que parte del distrito de Cayma y toma el desvío hacia la hidroeléctrica pasando por la escuela de policía.

En esta fuente el agua fluye por un agujero entre las estructuras de contención de la galería y discurren por un pequeño canal (Fig. 2.2), también existe un tubo el cual es utilizado por los trabajadores de EGASA para bañarse.

El agua es caliente, se pudo apreciar la formación de depósitos de Carbonatos, también fue evidente la presencia de precipitado rojizo de hidróxido de hierro, tiñendo el recorrido del agua.

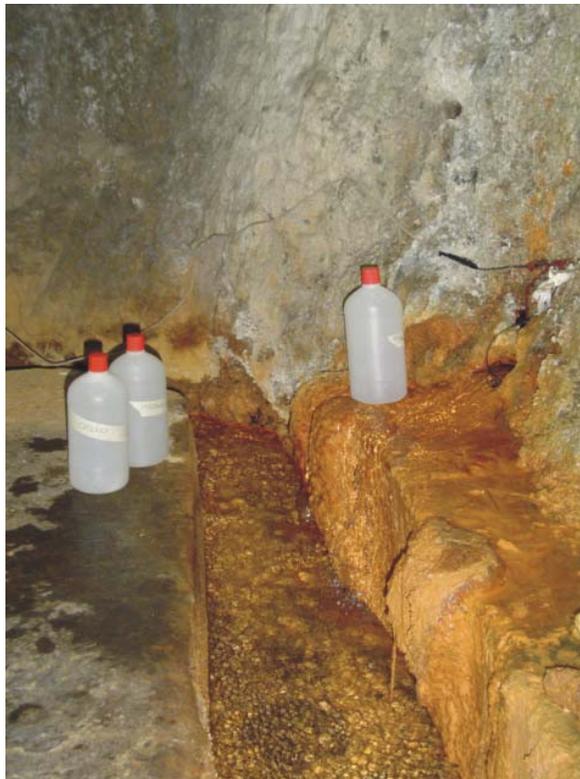


Fig. 2.2 - Fotografía de la fuente de Charcani V.

### 2.2.2 Manantial Zemanat

Se encuentra (8186522.0 S, 228966.0 E, 2340 msnm) junto a la antigua piscina del mismo nombre (Fig. 2.3) en el distrito de Yanahuara, antiguamente sus aguas alimentaban este conocido balneario. Se llega por la Av. Bolognesi y se toma la bajada al club Internacional.

El agua fluye por el piso arenoso y discurre en una especie de acequia, existe una tubería mediante la cual el club Internacional toma el agua para el riego de sus campos deportivos.

El agua es ligeramente fría y cristalina existe vegetación alrededor de la fuente el piso de ésta se encuentra cubierto por un musgo verde.

Se tiene información verbal que los ingleses que construyeron el ferrocarril del sur, tomaron agua de este manantial para abastecer la estación de Arequipa y las construcciones aledañas y es utilizada en algunos casos hasta la actualidad, pero esto no se pudo comprobar.



Fig. 2.3. Fotografía de la fuente de Zemanat.

### 2.2.3 Manantial de Chilina (1 y 2)

Se encuentra en la orilla occidental del río Chili en el distrito de Cayma, al frente de la granja militar en Chilina. (8188537.0 S, 229125.0 E, 2382 msnm).

El acceso se realiza por el camino de herradura que sube por las inmediaciones del asilo de ancianos Lira en Yanahuara, 150 m después del Puente de Chilina.

El manantial tiene aproximadamente 2 m de diámetro (Fig. 2.4), hacia el lado opuesto al río se encuentran rocas piroplásticas (ignimbrita), la cual se puede apreciar en la ladera del cañón con un desnivel de 20 m. El agua fluye claramente de tres lugares, del lado Norte de una grieta en la pared de ignimbrita cae aproximadamente 40 cm de altura un chorro de agua; del lado Sur (1), casi a la altura del nivel del agua del río Chili sale otro chorro de agua con temperatura mayor a la del lado Norte(2); hacia el lado del Chili surge agua del piso arenoso de la fuente. Las aguas transparentes son utilizadas por bañistas, estas al rebosar terminan vertiéndose en el río Chili.



Fig. 2.4 - Fotografía de la fuente de Chilina, especificando las salida Norte y Sur.

### 2.2.4 Galerías del Puente de Fierro

Bajo el Puente de Fierro en la orilla occidental del río Chili (8183977.0 S, 227885.0 E, 2300 msnm), se encuentra una zona húmeda algo pantanosa, en la cual se ha colocado unos tubos (galería) para extraer el agua. (Fig. 2.5) Se encontraron dos junto al río Chili.

El acceso se realiza por el camino de herradura que une el puente San Martín con la variante de Uchumayo.

El agua que chorreaba del tubo era cristalina y relativamente fría, en la actualidad es utilizada para el lavado de ropa.



Fig. 2.5 - Fotografía de la Galería del Puente de Fierro

### 2.2.5 Manantial de la calle Cuzco

Este manantial se ubica en la ribera occidental del río Chili, (8182271.0 S, 226544.0 E, 2245 msnm). Se accede por la entrada del estadio de Sachaca, siguiendo la calle Cuzco, tomando un pasaje que lleva hacia el río.

Es un pequeño manantial, de agua cristalina surge del piso arenoso (Fig. 2.6) y fluye hacia el río Chili.



Fig. 2.6 - Fotografía de la fuente de la calle Cuzco en Sachaca.

### 2.2.6 Manantial de Tingo

En barrio de Tingo, en el cauce de la segunda torrentera, cerca de su desembocadura al río Chili (8181802.0 S, 226382.0 E, 2232 msnm), se distingue una fuente dividida en tres manantiales. (Fig. 2.7)

El acceso fue por un lado del puente que une Tingo con el colegio Prescott. El agua de los manantiales sale del suelo entre la grava y discurren hacia una acequia, es cristalina y de una temperatura agradable al tacto, esta fuente es frecuentada por bañistas.



Fig. 2.7 - Fotografía de la fuente de Tingo.

### 2.2.7 Ojo del Milagro

En el Distrito Tradicional de Characato se localizan las fuentes de agua del Ojo del Milagro. (8177638.0 S, 237617.0 E, 2581 msnm), el acceso se realiza por la carretera que une la plaza de Characato con el anexo de Yanayaco, se toma un desvío hacia el Ojo del Milagro.

Es una fuente conformada por dos manantiales, el más grande y de donde se tomaron las muestras, está un poco más alto que el otro, (Fig. 2.8) de estas fuentes aflora una gran cantidad de agua para el consumo humano, la

agricultura y el uso recreacional; en estos manantiales se puede observar especies acuáticas como renacuajos y peces.



Fig. 2.8 -. Fotografía de la fuente del Ojo del Milagro.

### **2.2.8 Piscina N° 2 Sabandia**

En el distrito de Sabandia se distinguen gran cantidad de fuentes, algunas son usadas para el consumo humano, la agricultura y uso recreacional, En este ultimo caso se construyeron dos piscinas aprovechando estos afloramientos. En el caso de la piscina N° 1 el manantial está cerrado y está a cargo de SEDAPAR por lo que no se pudo tomar la muestra.

La piscina N° 2 se encuentra a una 100 m del mercado. (8179686.0 S, 233537.0 E, 2420 msnm). El manantial se encuentra en el piso de la piscina (Fig. 2.9)

La fuente es pequeña pero afloraba una gran cantidad de agua la cual llena la piscina en pocas horas.



Fig. 2.9 - Fotografía de la Piscina N° 2 de Sabandia donde se encuentra la fuente.

### 2.2.9 Manantial de Yumina

En el distrito de Sabandia, a 700 m de la plaza del anexo de Yumina, en la zona de la Rinconada, (8179818.0 S, 235916.0 E, 2569 msnm), se encuentra la fuente formada por tres manantiales de los cuales emana gran cantidad de agua cristalina, sobretodo uno que es el principal y más grande.



Fig. 2.10 - Fotografía de la Fuente de Yumina.

### **2.2.10 Manantial de la quebrada Agua Salada**

En la carretera que une Arequipa con Chiguata existe un desvío hacia el Misti (Km 23.5), que es utilizado por los transportistas de agregados para la construcción. Para arribar a la fuente se asciende por una trocha carrozable y luego se desciende a la quebrada Agua Salada. (8186105.0 S, 241258.0 E 2913 msnm)

El agua aflora del piso de la quebrada Agua Salada entre la grava y el cascajo, a un lado hay un pequeño manantial de donde sale la mayor cantidad de agua, esta es cristalina, con un sabor a agua mineral, con presencia de gases disueltos. El agua es utilizada para el consumo de las familias dedicadas a la extracción de los agregados.



**Fig.2.11 - Fotografía de la Fuente de Agua salada.**

### 2.2.11 La Bedoya

En el distrito de Chiguata; antes de llegar al pueblo se encuentra la hacienda la Bedoya, a 100 m de la carretera (8184836.0 S, 243201.0 E, 2913 msnm), existe un complejo de manantiales, la mayoría se encuentran cerrados y a cargo de SEDAPAR. El agua era fría, cristalina y de sabor agradable.



Fig.2.12 - Fotografía de la Fuente la Bedoya.

### 2.2.12 Jesús

La fuente de Jesús se encuentra en el balneario del mismo nombre, en el límite de la ciudad de Arequipa. (8183848.8 S, 236103.6 E, 2640 msnm). El agua aflora de un manantial principal que desemboca en la poza, que tiene agua aflorando por el piso empedrado, además de burbujas. El agua es cristalina,

tibia y con sabor característico, muchas personas acuden para utilizarlas con fines medicinales, bañándose y bebiéndolas.



Fig. 2.13 - Fotografía de la Fuente de Jesús.

### 2.2.13 Fuente termal Umaluso

Al Norte del Misti, en pampa Cañahuas se encontró la fuente. El acceso es por la nueva carretera a Juliaca, aproximadamente 5 Km después del desvío al Cusco, por una trocha hacia el Norte. (8222575.0 S, 244548.0 E, 3950 msnm)

En la fuente se ha construido una piscina de piedra pircada, del piso aflora el agua y burbujas. El agua es color verde con olor sulfuroso, el agua es caliente, sumado al frío de la zona produce la salida de vapor y rebosa al riachuelo que fluye muy cerca.



Fig. 2.14 - Fotografía de la Fuente de Umaluso.

### **2.2.14 Fuente termal Quiscos**

Este manantial fue tomado como referencia, ya que podría tener mayor influencia del volcán Chachani. El acceso es pasando la fábrica de cemento Yura por la carretera que va hacia Juliaca se encuentra el desvío a la irrigación Quiscos, en medio de la irrigación en el cauce de la quebrada se llega a la fuente. (8209729 S, 215570 E, 2919 msnm)

El agua aflora de una pared de la quebrada, entre una especie de conglomerado fluvial, el agua es cristalina y caliente, fluye para llenar la poza mas abajo construida, la cual es concurrida por bañistas.



Fig. 2.15 - Fotografía de la Fuente de Quiscos.

### **2.2.15 Fuente termal Mariposa**

Esta fuente se encuentra a una distancia aproximada de 28 km de volcán Misti, pero fue asociada en un trabajo anterior realizado por el INGEMMET al volcán Ubinas que se encuentra a igual distancia.

Por la antigua carretera a Juliaca, tomando el desvío a Ubinas y Matalaque, junto a la laguna de Salinas se llega a la fuente. (8209729 S, 215570 E 4352 msnm)

El agua aflora del piso arenoso, con alguna burbuja eventual, esta agua se empoza y el reboce discurre hacia la laguna Salinas.



Fig. 2.15 - Fotografía de la Fuente Mariposa.

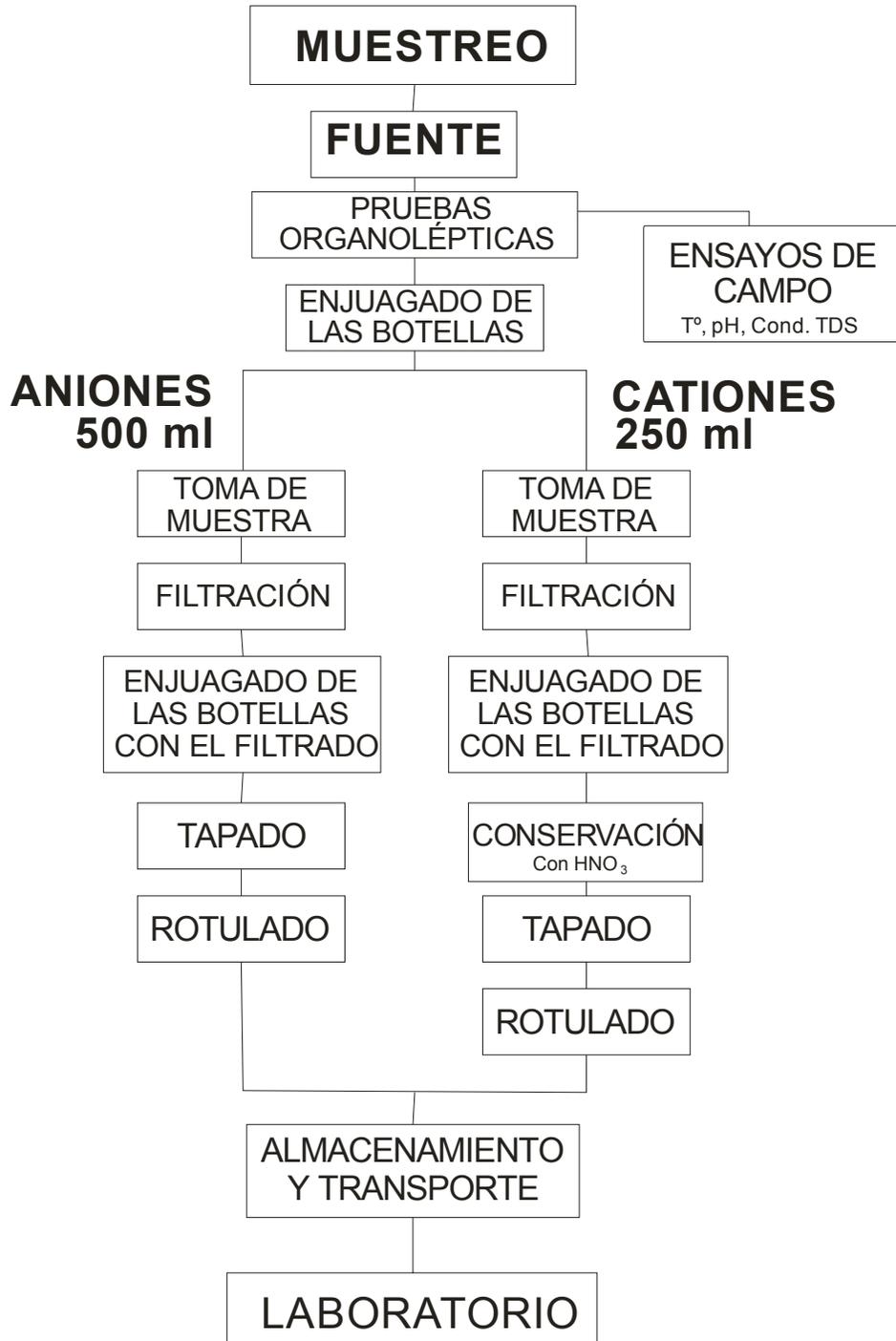
### 2.2.15 Fuente termal Tigre

Esta fuente se encuentra en iguales condiciones que la fuente de Quiscos, se encuentra a 28 km de la ciudad de Arequipa se encuentra el pueblo de Yura, junto al antiguo Hotel de Turistas se encuentran un edificio con 4 pozos a los que se les atribuye efectos medicinales, de estas el que más destaca, el Pozo del Tigre (8202449.5 S, 212344.4 E, 2417 msnm).

El agua aflora del piso empedrado, con abundantes burbujas de  $\text{CO}_2$  y  $\text{CH}_4$ , a una temperatura agradable.

## 2.7. MUESTREO

La toma de muestras se realizó por muestreo simple en cada una de las fuentes de agua considerando la secuencia que se detalla en el diagrama de flujo:



### **2.3.1 RECONOCIMIENTO DE LA ZONA DE MUESTREO**

El reconocimiento de la zona de muestreo es la primera etapa del muestreo, en el campo se pueden encontrar fuentes en lugares poco accesibles. Se debe de llegar al lugar donde el agua aflora a la superficie.

Se debe tener como precaución lo siguiente:

- Que en el punto del muestreo no este ocurriendo mezclas con agua de otra procedencia.
- Si el agua estuviese empozada debemos asegurarnos que no se hubiese usado para el baño de personas, o que el agua en el momento de la toma este renovada por completo.
- La presencia de vapor a presión, y gran cantidad de burbujas pueden hacer pensar que se trata de una fuente de temperaturas muy altas. Se debe tomar las precauciones para no quemarse o dañar ciertos equipos.

En esta etapa es cuando se procede a la toma de las coordenadas con el GPS (Sistema de Posicionamiento Global), toma de fotografías y se anotan las características del afloramiento (características de la roca, emanación del suelo, etc.)

### **2.3.2 PRUEBAS ORGANOLÉPTICAS**

Las pruebas organolépticas consisten en tomar las características de las fuentes como color, olor, sabor (en ciertos casos), presencia de burbujas y alguna otra característica resaltante a los sentidos.

### **2.3.3 ENJUAGADO DE LAS BOTELLAS**

Al salir al campo debemos contar con las botellas de plástico adecuadas (volumen, doble tapa,..etc.) y limpias.

Para la toma de la muestra se necesitan por lo menos 3 botellas, por muestra, de las cuales 1 es para el muestreo y 2 para guardar las muestras.

Estas se llenan parcialmente con el agua de la fuente, se tapan y se agitan energicamente. Esta operación se repite 3 veces.

### 2.3.4 TOMA DE MUESTRA

La toma de muestras se realiza con una de las botellas enjuagadas, se tiene en cuenta como surge el agua, en algunos casos es del suelo y se empoza el agua, por lo que la muestra se adquiere por inmersión simple (Fig. 2.16 A). En otros casos surge de paredes, de poco desnivel a manera de chorro y los frascos se llenaron directamente sin inmersión. (Fig. 2.16 B).

- **Inmersión Simple (A)** – Zemanat, Calle Cuzco, Tingo, Ojo del milagro, Piscina N° 2 Sabandia, Yumina, Umaluso.
- **Tomadas directamente del chorro (B)** – Charcani V, Chilina; Puente de Fierro, Agua Salada, Bedoya, Jesús, Quiscos.

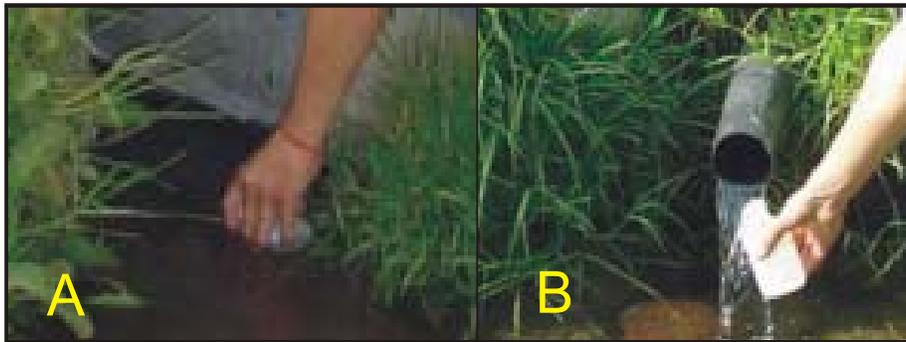


Fig. 2.16 - Fotografía de cómo se tomaron las muestra en las Fuentes.

El volumen de las muestras es de 500 mL para aniones y 250 mL para cationes, según los requerimientos del laboratorio donde se trabajo, estos no fueron mayores ya que los equipos trabajan con cantidades mínimas de muestra.

### 2.3.5 FILTRACIÓN

La muestra recogida se filtró con embudos de vidrio y papel filtro “Whatman” N° 40, el filtrado se recogió en las botellas de plástico directamente. (Fig. 2.17).



Fig. 2.17 - Fotografía de cómo se Filtraron las muestra de agua.

### **2.3.6 ENJUAGADO DE LAS BOTELLAS CON EL FILTRADO**

Al recibir los primeros mililitros del agua filtrada, se realiza el enjuagando de la botella y se continua con la filtración.

### **2.3.7 CONSERVACIÓN**

A la botella destinada para realizar el análisis de cationes (250 ml), se le agregó 0.5 ml de ácido nítrico concentrado P.A. (para análisis), para conservar la muestra.

### **2.3.8 TAPADO DE LAS BOTELLAS**

A las botellas se les coloca un sistema de doble tapa, una a presión y la otra con rosca.

### 2.3.9. ROTULADO

El rotulado se realizó utilizando un trozo de cinta adhesiva, la cual se colocó alrededor de la botella por la parte central. En ella se consignaron los datos:

Nombre de la fuente, fecha, código de la muestra, coordenadas geográficas, tipo (cationes o aniones).

Estos datos también se deben consignar en la libreta de campo.

### 2.3.10. ALMACENAMIENTO Y TRANSPORTE

Las botellas se acomodaron en cajas correctamente acondicionadas, evitando así que se golpeen o se aprieten.

## 2.8. METODOLOGÍA

### 2.4.1 ENSAYOS DE CAMPO

En el campo se realizaron ensayos directamente en las fuentes, se realizaron con equipos y técnicas que se describen en la tabla 2.3.

Tabla 2.3. Metodología y sensibilidad de los ensayos realizados en el campo.

ENSAYOS	MÉTODO	Equipo/modelo	Metodo	Sensibilidad
pH	pH - metro	CyberScan/waterproof	S.M.	0.01
TDS	Conductímetro	HACH/sensION5	standard	±0.5%
Conductividad	Conductímetro	HACH/sensION5	standard	±0.5%
Temperatura	Termómetro	AA Precision	standard	0.1 °C

### **2.4.1.1 Medición del pH**

EL pH se mide por métodos potencioméricos, que consisten en comparar el potencial de un electrodo indicador en contacto con la solución problema. Por lo tanto el pH-metro es un voltímetro donde las lecturas de voltaje se convierten a pH con la siguiente fórmula para 25°C:

$$\text{pH} = \text{voltaje}/0,059$$

Las mediciones se realizan introduciendo el electrodo de vidrio en el agua a determinar, se toma la lectura cuando se estabiliza la temperatura en el termómetro del equipo.

### **2.4.1.2 Medición de la Conductividad y TDS**

La medición de estos dos parámetros se realizan midiendo la capacidad que presentan las soluciones de conducir la corriente eléctrica. Relacionando la concentración con la propiedad de la conductancia. La conductancia de una solución depende inversamente de la distancia entre los electrodos y directamente de su área.

Las mediciones se realizan introduciendo la celda en el agua a determinar, se toma la lectura cuando se estabiliza la temperatura en el termómetro del equipo.

### **2.4.1.3 Temperatura**

La temperatura se midió utilizando un termómetro digital, este equipo esta basado en la diferencia de potencial que ocurre entre dos metales al variar la temperatura. Se introdujo el censor y la lectura se toma al estabilizarse.

## **2.4.2 DESCRIPCION DE LOS METODOS DE ANALISIS QUIMICOS EN EL LABORATORIO**

Las muestras se transportaron por carretera, como encomienda en una caja al laboratorio de geoquímica del Instituto geológico minero y metalúrgico INGEMMET en la ciudad de Lima, para su análisis. Éstas se corrieron con el

método y técnica que podemos apreciar en la Tabla 2.2, donde también se registra la sensibilidad del equipo, según cada caso.

Tabla 2.2 - Metodología y límite de detección máximo de los análisis en el laboratorio.

Iones	Técnica	Equipo/modelo	Método	L.D.M. (mg/l)
CO <sub>3</sub> <sup>=</sup>	Vía Clásica – Volumetría	–	standard	0,1
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	Vía Clásica – Volumetría	–	standard	0,1
Cl <sup>-</sup>	Vía Clásica – Volumetría	–	standard	0,1
SO <sub>4</sub> <sup>=</sup>	Vía Clásica - Gravimetría	–	standard	0,1
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	Espectrofotometría UV-VIS	SHIMADZU UV 1601	standard	0,1
Ca <sup>+2</sup>	Absorción Atómica – Flama	PERKIN ELMER Aanalyst 300	standard	0,1
Mg <sup>+2</sup>	Absorción Atómica – Flama	PERKIN ELMER Aanalyst 300	standard	0,1
Na <sup>+</sup>	Absorción Atómica – Flama	PERKIN ELMER Aanalyst 300	standard	0,1
K <sup>+</sup>	Absorción Atómica – Flama	PERKIN ELMER Aanalyst 300	standard	0,1
Sr <sup>+2</sup>	Absorción Atómica – Flama	PERKIN ELMER Aanalyst 300	standard	0,1
Li <sup>+</sup>	Absorción Atómica – Flama	PERKIN ELMER Aanalyst 300	standard	0,01
Zn <sup>+2</sup>	Absorción Atómica – Flama	PERKIN ELMER Aanalyst 300	standard	0,005
Al <sup>+3</sup>	Absorción Atómica - Horno de Grafito	PERKIN ELMER 3100	standard	0,01
Ba <sup>+2</sup>	Absorción Atómica - Horno de Grafito	PERKIN ELMER 3100	standard	0,001
Cu <sup>+2</sup>	Absorción Atómica - Horno de Grafito	PERKIN ELMER 3100	standard	0,005
Pb <sup>+2</sup>	Absorción Atómica - Horno de Grafito	PERKIN ELMER 3100	standard	0,005
Cd <sup>+2</sup>	Absorción Atómica - Horno de Grafito	PERKIN ELMER 3100	standard	0,0005
Cr <sup>+2</sup>	Absorción Atómica - Horno de Grafito	PERKIN ELMER 3100	standard	0,005
Fe <sup>+3</sup>	Absorción Atómica - Horno de Grafito	PERKIN ELMER 3100	standard	0,005
As <sup>+2</sup>	Absorción Atómica - Horno de Grafito	PERKIN ELMER 3100	standard	0,005
Hg <sup>+2</sup>	Absorción Atómica - MHS – FIAS	PERKIN ELMER Aanalyst 300	standard	0,0002

#### 2.4.2.1 Carbonatos y Bicarbonatos

Los carbonatos y bicarbonatos se determinaron por volumetría (titulación ácido base), al adicionar cantidades conocidas de ácido clorhídrico de concentración conocida, el viraje del indicador fenoltaleina nos indica la neutralización del carbonato, luego se continua el mismo procedimiento con indicador anaranjado de metilo, para determinar bicarbonatos.

#### 2.4.2.2 Cloruros

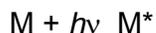
Se determinan por titulación de la muestra de agua con solución de nitrato de plata de concentración conocida y utilizando como indicador cromato de potasio.

### 2.4.2.3 Sulfatos

Los sulfatos se determinan por gravimetría. A un volumen conocido de muestra de agua se le agrega una solución de cloruro de bario, luego de separar el sólido es pesado como sulfato de bario.

### 2.4.2.4 Nitratos

Se determinan por espectrofotometría ultravioleta – visible, La absorción de radiación ultravioleta o visible por una especie atómica o molecular M se puede considerar que es un proceso en dos etapas, la primera de las cuales implica una excitación electrónica como muestra la ecuación



El producto de la reacción entre M y el fotón es una especie electrónicamente excitada que se representa por M\*. El tiempo de vida de la especie excitada es breve (de  $10^{-8}$  a  $10^{-9}$  s) su existencia acaba por alguno de los diversos procesos de relajación.

### 2.4.2.5 Absorción Atómica Flama ( $\text{Ca}^{+2}$ , $\text{Mg}^{+2}$ , $\text{Na}^+$ , $\text{K}^+$ , $\text{Sr}^{+2}$ , $\text{Li}^+$ , $\text{Zn}^{+2}$ )

La absorción atómica se basa en que los átomos en el estado fundamental o la configuración más estable, al aplicarle energía, esta será absorbida excitando un electrón a un estado excitado. Este electrón al retornar a su orbital inicial, emitirá energía radiante equivalente a la energía inicialmente absorbida, estas energías pueden ser medidas. Esto se basa en la ley de Beer.

$$A = \alpha lc$$

$$A = -\log I_1/I_0$$

Dónde:

- A es la absorbancia
- $I_0$  es la intensidad de la luz incidente
- $I_1$  es la intensidad de la luz una vez que ha atravesado el medio
- $l$  es la distancia que la luz atraviesa por el cuerpo
- $c$  es la concentración de sustancia absorbente en el medio
- $\alpha$  es el *coeficiente de absorción* o la absorbancia molar de la sustancia

En resumen, la ley explica que hay una relación exponencial entre la transmisión de luz a través de una sustancia y la concentración de la sustancia, así como también entre la transmisión y la longitud del cuerpo que la luz atraviesa. Si conocemos  $I$  y  $\alpha$ , la concentración de la sustancia puede ser deducida a partir de la cantidad de luz transmitida. Las unidades de  $c$  y  $\alpha$  dependen del modo en que se exprese la concentración de la sustancia absorbente.

La espectrometría de absorción atómica por flama, es el método por el cual el elemento se determina mediante un espectrómetro de absorción atómica, usado en conjunto con un sistema de nebulización y una fuente de atomización. La fuente de atomización es un quemador que utiliza diferentes mezclas de gases, las más frecuentes son aire-acetileno y óxido nitroso-acetileno.

#### **2.4.2.6 Absorción Atómica Horno de Grafito ( $\text{Al}^{+3}$ , $\text{Ba}^{+2}$ , $\text{Cu}^{+2}$ , $\text{Cd}^{+2}$ , $\text{Cr}^{+2}$ , $\text{Fe}^{+3}$ , $\text{As}^{+2}$ )**

El horno de grafito es un cilindro abierto en sus dos extremos, con un pequeño orificio en el centro a través del cual se coloca la muestra. El tubo de grafito actúa como una resistencia en un circuito eléctrico. Cuando se aplica diferencia de potencial, la corriente que fluye por el tubo incrementa la temperatura que llega hasta los  $3000^{\circ}\text{C}$ , este es enfriado por agua.

El horno de grafito es un dispositivo de disociación de los componentes de la muestra sin flama. El haz emitido por la lámpara de cátodo hueco, pasa por el centro del tubo de grafito. Además puede determinar mas elementos en concentraciones 1000 veces más bajas que las que se pueden detectar con la AA flama.

#### **2.4.2.7 Absorción Atómica HMS – FIAS ( $\text{Hg}^{+2}$ )**

La técnica de absorción atómica con generador de hidruros permite cuantificar elementos como mercurio, arsénico, selenio y otros con propiedad de formar el

hidruro correspondiente, esta técnica nos permite cuantificar estos elementos en el orden de ppb o ultra trazas. Las muestras reaccionan en un dispositivo externo con un agente reductor, generalmente boro hidruro. Los productos gaseosos de reacción se llevan a una celda de muestreo que se encuentra en el paso óptico del espectrómetro de absorción atómica, en este caso, los productos de reacción son hidruros volátiles. Estos compuestos moleculares no son capaces de dar una señal de absorción atómica

## **2.5 ESTÁNDARES Y CONTROL DE CALIDAD**

En los equipos de absorción atómica las concentraciones son el resultado de 3 lecturas, las cuales son promediadas por el software con el que trabaja el equipo.

Al encender estos equipos se colocan a cero y luego corre una solución estándar de Cu 5,0 mg/l obteniendo una lectura de 0,27, siendo este elemento el más sensible para el calibrado del equipo. Para tener las lecturas en los equipos se corrieron patrones de concentración conocida, también se hicieron lecturas de control de calidad, las cuales se detallan en los anexos 1 y 2.

## **2.7 TRATAMIENTO DE DATOS**

Para el tratamiento de los datos se utilizaron los siguientes programas en la computadora:

- Microsoft Excel 2003
- Aqua chem 5.0
- Grafer 3
- Surfer 8
- Arc Map

## **CAPÍTULO III**

### **RESULTADOS Y DISCUSIÓN**

#### **3.1 RESULTADOS**

Los resultados obtenidos en campo y en el laboratorio son plasmados en 4 tablas: Tabla N° 3.1 Temperatura, pH, conductividad y sólidos totales disueltos, Tabla N° 3.2 Cationes, Tabla N° 3.3 Aniones y la Tabla N° 3.4 Metales pesados.

Tabla N° 3.1 Temperatura, pH, conductividad y sólidos totales disueltos.

N°	Fuente	Código	Fecha 1 (D/M/A)	Temp.1 (°C)	pH 1	Fecha 2 (D/M/A)	Temp.2 (°C)	pH 2	Cond. 2 μS/cm	TDS 2 mg/l
1	Charcani V	CHV	17/02/2006	36,1	6,27	09/03/2006	37,1	6,23	1614,0	634
2	Ojo Chilina S	CHS	17/02/2006	18,0	6,59	23/09/2006	15,5	6,50	658,0	329 (22,4)
3	Ojo Chilina N	CHN	17/02/2006	16,0	6,65	23/09/2006	14,5	6,50	623,0	312 (22,1)
4	Zemanat	ZEM	17/02/2006	19,3	6,60	23/09/2006	17,0	6,00	677,0	339 (22,8)
5	Ojo C. Cuzco	CCZ	17/02/2006	18,1	6,68	23/09/2006	15,0	6,00	686,0	343(22,3)
6	Puente Fierro	PFE	17/02/2006	17,4	6,34	23/09/2006	14,5	6,34	446,0	223 (23,0)
7	Tingo	TIN	17/02/2006	20,1	6,43	23/09/2006	19,0	6,50	1136,0	568 (22,9)
8	Ojo del milagro	OMI	18/02/2006	17,3	6,60	02/11/2006	19,0	6,00	535,0	268 (24,4)
9	Yumina	YUM	18/02/2006	16,1	6,37	-	-	-	-	-
10	Sabandia	P2S	18/02/2006	17,3	6,60	-	-	-	-	-
11	Bedoya	BED	18/02/2006	14,0	6,50	09/06/2007	15,5	6,43	744	452
12	Agua Salada	AGS	18/02/2006	18,5	6,30	11/06/2006	16,6	6,50	788,0	395 (16,6)
13	Jesus	JES	23/02/2006	22,8	5,71	11/06/2006	24,0	6,25	1375,0	669 (24,0)
14	Quiscos	QIS	23/02/2006	32,0	7,11	06/01/2007	33,8	7,06	1446,0	608,0
15	Umaluso	UMA	23/02/2006	34,0	7,00	06/01/2007	34,2	6,21	2700,0	1141,0
16	Tigre	TIG	11/11/2005	31,9	6,30	-	-	-	-	-
17	Mariposa	MAR	06/04/2006	32,4	7,00	21/02/2007	32,1	7,51	1478	657

Temp.: Temperatura

Cond.: Conductividad

TDS: Sólidos totales disueltos

Tabla N° 3.2 Cationes.

N°	Código	Fecha (D/M/A)	Ca (mg/l)	Mg (mg/l)	Na (mg/l)	K (mg/l)	Al (mg/l)	Sr (mg/l)	Li (mg/l)	Ba (mg/l)
1	CHV	17/02/2006	86	59,0	136	7,3	0,031	1,85	0,10	0,224
2	CHS	17/02/2006	35	17,5	62	6,9	0,021	0,29	0,06	0,066
3	CHN	17/02/2006	39	19,8	64	6,7	0,020	0,32	0,06	0,056
4	ZEM	17/02/2006	39	22,6	66	9,8	0,006	0,39	0,07	0,059
5	CCZ	17/02/2006	44	18,4	72	9,2	0,045	0,44	0,08	0,072
6	PFE	17/02/2006	34	12,8	44	5,0	0,101	0,34	0,05	0,097
7	TIN	17/02/2006	61	42,0	105	14,5	0,015	0,61	0,16	0,113
8	OMI	18/02/2006	42	17,9	37	6,7	0,016	0,36	0,08	0,054
9	YUM	18/02/2006	37	14,8	55	8,2	0,029	0,43	0,19	0,047
10	P2S	18/02/2006	39	17,5	86	11,7	0,090	0,58	0,29	0,055
11	BED	18/02/2006	35	18,0	111	20,0	0,010	0,43	0,09	0,068
12	AGS	18/02/2006	75	40,0	45	10,7	0,74	0,72	0,03	0,090
13	JES	23/02/2006	115	51,0	404	43,0	0,051	2,49	1,52	0,050
14	QIS	23/02/2006	39	31,1	156	27,0	0,014	0,53	0,22	0,179
15	UMA	23/02/2006	47	24,1	359	51,0	0,092	0,42	1,71	0,942
16	TIG	11/11/2005	146	89,1	176	16,0	-	-	-	-
17	MAR	06/04/2006	3,6	1,7	240	21,0	21	< 0,01	0,10	0,42

Tabla N° 3.3 Aniones.

N°	Codigo	Fecha (D/M/A)	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> (mg/l)	Cl <sup>-</sup> (mg/l)	SO <sub>4</sub> <sup>=</sup> (mg/l)	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> (mg/l)
1	CHV	17/02/2006	393,3	19,5	73,3	0,10
2	CHS	17/02/2006	46,2	69,8	40,7	7,25
3	CHN	17/02/2006	47,5	78,2	45,3	6,80
4	ZEM	17/02/2006	61,8	75,4	41,6	7,80
5	CCZ	17/02/2006	60,6	75,4	95,5	8,20
6	PFE	17/02/2006	30,9	60,0	75,3	2,95
7	TIN	17/02/2006	103,4	129,8	178,0	4,70
8	OMI	18/02/2006	41,6	48,9	110,0	0,53
9	YUM	18/02/2006	38,0	83,7	91,4	0,25
10	P2S	18/02/2006	39,2	139,6	94,3	0,74
11	BED	18/02/2006	32,1	149,3	149,0	1,50
12	AGS	18/02/2006	219,8	22,3	50,6	1,30
13	JES	23/02/2006	136,6	743,9	152,0	0,21
14	QIS	23/02/2006	165,2	181,4	53,1	1,50
15	UMA	23/02/2006	212,7	505,3	1,2	0,10
16	TIG	11/11/2006	5.656,0	127,0	2,0	0,10
17	MAR	06/04/2006	49,9	278,1	108,2	0,10

Tabla N° 3.4 Metales pesados

N°	Codigo	Fecha (D/M/A)	Cu (mg/l)	Pb (mg/l)	Zn (mg/l)	Cd (mg/l)	Cr (mg/l)	As (mg/l)	Hg (mg/l)	Fe (mg/l)
1	CHV	17/02/2006	<0,005	<0,005	0,031	<0,0002	<0,005	0,131	<0,0002	1,030
2	CHS	17/02/2006	<0,005	<0,005	0,038	<0,0002	<0,005	0,007	<0,0002	0,008
3	CHN	17/02/2006	<0,005	<0,005	0,017	<0,0002	<0,005	0,012	<0,0002	0,011
4	ZEM	17/02/2006	<0,005	<0,005	0,025	<0,0002	<0,005	0,016	<0,0002	0,009
5	CCZ	17/02/2006	<0,005	<0,005	0,012	<0,0002	<0,005	0,030	<0,0002	0,005
6	PFE	17/02/2006	<0,005	<0,005	0,018	<0,0002	<0,005	0,009	<0,0002	0,018
7	TIN	17/02/2006	<0,005	<0,005	0,013	<0,0002	<0,005	0,022	<0,0002	0,005
8	OMI	18/02/2006	<0,005	<0,005	0,011	<0,0002	<0,005	0,008	<0,0002	0,010
9	YUM	18/02/2006	<0,005	<0,005	0,017	<0,0002	<0,005	0,027	<0,0002	0,007
10	P2S	18/02/2006	<0,005	<0,005	0,029	<0,0002	<0,005	0,039	<0,0002	0,042
11	BED	18/02/2006	<0,005	<0,005	0,008	<0,0002	<0,005	0,005	<0,0002	0,033
12	AGS	18/02/2006	<0,005	<0,005	0,010	<0,0002	<0,005	0,008	<0,0002	0,005
13	JES	23/02/2006	<0,005	<0,005	0,022	<0,0002	<0,005	0,172	<0,0002	0,006
14	QIS	23/02/2006	<0,005	<0,005	0,006	<0,0002	<0,005	0,006	<0,0002	0,011
15	UMA	23/02/2006	<0,005	<0,005	0,012	<0,0002	<0,005	0,005	<0,0002	0,330

## 3.2 PARÁMETROS FISICOQUÍMICOS

### 3.2.1 Temperatura

En tabla 3.1, se puede apreciar que la temperatura de las fuentes se encuentran en un rango que varia de 14 a 36°C; de las cuales diez fuentes tienen temperaturas por abajo de los 20°C y se localizan a una altura menor a los 3000 msnm. Dos fuentes entre los 20 y los 30°C y cinco encima de los 30°C. Así podemos inferir que los fluidos geotermáles antes de alcanzar la superficie, pudieron ser afectados por factores, como la temperatura del medio por donde fluyen, además de posibles mezclas con agua fría.

Se comprobó lo dicho por Rosas (2006) donde pone en evidencia del factor altitud, la mayoría de fuentes se encuentran entre los 2200 y los 3600 msnm, encontrando solo 2 fuentes fuera de este rango; Umaluso y Mariposa (ver la Fig.3.1).

Teniendo en cuenta que se midió la temperatura Temp. 1, en el mes de febrero (verano y época de lluvias), al compararlo con Temp. 2 que se realizó meses después tenemos los siguientes resultados que se pueden apreciar en la tabla 3.1, son:

- Las mediciones hechas en Junio (invierno, no llueve) muestra que las aguas más calientes (Charcani V y Jesús), tuvieron un ligero ascenso, mientras que la más fría (Agua Salada), hubo un ligero descenso.
- En el mes de setiembre (fin del invierno) ocurre una disminución de la temperatura en todas las fuentes (más frías).
- En el mes de enero (inicio del Verano e inicio de las lluvias), se midió un ligero aumento de la temperatura, en el caso de Quiscos mayor que en Umaluso que es casi constante.

Evidentemente estos cambios podrían ser afectados por la estación climática y el agua infiltrada proveniente de la lluvia, a menor cantidad de lluvia las aguas más calientes aumentarán su temperatura, en el caso de las aguas menos calientes disminuye, esto se puede complementar con un monitoreo de los volúmenes que afloran y la temperatura.

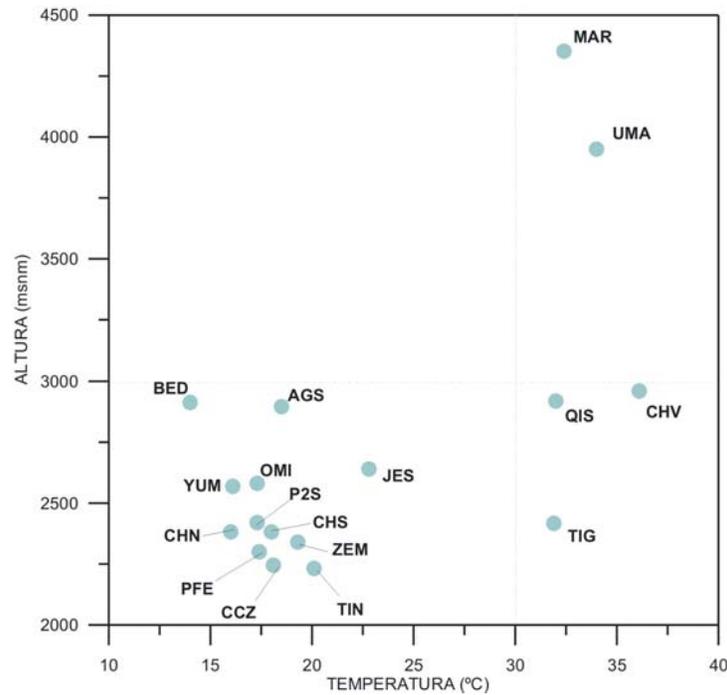


Fig. 3.1 Temperatura altura de las fuentes.

### 3.2.2 pH

El pH es un factor que en algunos casos se modifica con las variaciones de la temperatura, por lo que en los sistemas calientes, el neutro puede estar algo desplazado en la escala no coincidiendo exactamente en 7. Esto se puede ver en la tabla 3.1 donde tras un ligero aumento de temperatura de las fuentes Charcani V y Umaluso, presentan una pequeña disminución en el pH, esto puede estar sujeto a otros factores como en Jesús donde ocurre un efecto contrario.

En general, el pH de las fuentes pH1 tiene un valor máximo de 7.11 y un valor mínimo de 5.71 en pH2 el máximo es 7.51 y el mínimo es 6.00, se mantiene dentro de los parámetros normales de variación (no presentando cambios extremos) esto puede ser por que no existen cambios en la composición química y la temperatura tampoco presenta variaciones considerables.

### 3.2.3 Conductividad y TDS (Sólidos Totales Disueltos)

La conductividad indica la capacidad del agua para la conducir la electricidad, como se observa en la tabla 3.1, donde las fuentes de Charcani V y Umaluso presentan los valores más altos ( $> 2000 \mu\text{S}/\text{cm}$ ), las fuentes Tingo, Jesús y Quiscos ( $> 1000 \mu\text{S}/\text{cm}$ ). El resto de fuentes presentan valores menores a  $1000 \mu\text{S}/\text{cm}$ . Se puede apreciar valores similares en las fuentes Chilina norte, Chilina sur, Zemanat y el ojo de la calle Cuzco. La galería del Puente de Fierro tiene el valor mas bajo de  $446 \mu\text{S}/\text{cm}$ . Estos valores se encuentran en relación directa con la temperatura (fig. 3.2)

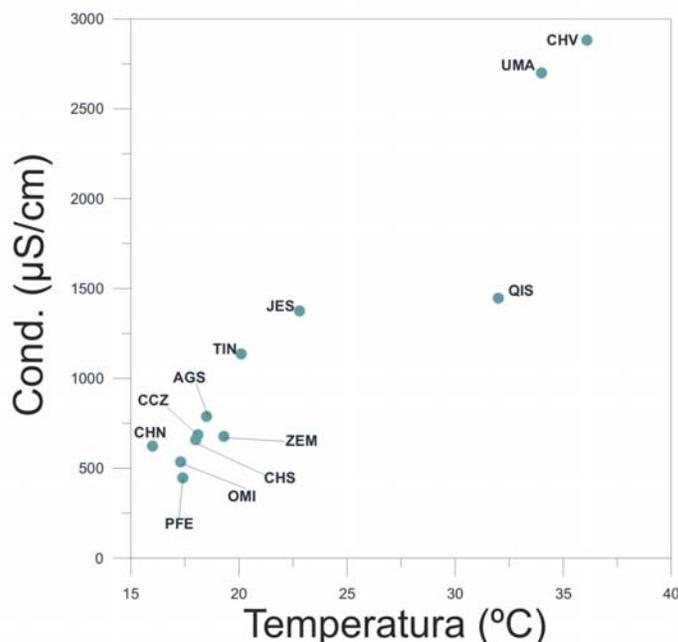


Fig. 3.2 conductividad- temperatura de las fuentes.

En el caso de los sólidos totales disueltos también las fuentes más calientes son las que presentan mayor cantidad de aniones y cationes. Los valores altos de TDS nos están indicando que esta agua (Charcani V y Umaluso) tienen menor grado de dilución con aguas periféricas.

### 3.3 CARACTERÍSTICAS GEOQUÍMICAS DE LAS AGUAS

#### 3.3.1 CATIONES

Entre los cationes más significativos encontrados en todas las fuentes termales tenemos el  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Ca}^{+2}$ ,  $\text{Mg}^{+2}$ ; también el  $\text{K}^+$ , pero en menor proporción. El  $\text{Ba}^{+2}$ ,  $\text{Sr}^{+2}$  y  $\text{Li}^+$  se encontraron en proporciones menos significativas.

Con los resultados de los análisis procesados de la tabla N° 3.2 se traza la gráfica 3.3, donde se puede apreciar que las aguas son más enriquecidas en  $\text{Na}^+$  y  $\text{K}^+$ , que se encuentran en mayor proporción junto al  $\text{Ca}^{+2}$ , con respecto al  $\text{Mg}^{+2}$ .

La fuente Mariposa (Ubinas) es la que tiene mayor proporción de  $\text{Na}^+$  y  $\text{Ca}^{+2}$ , seguida de Jesús y Quiscos.

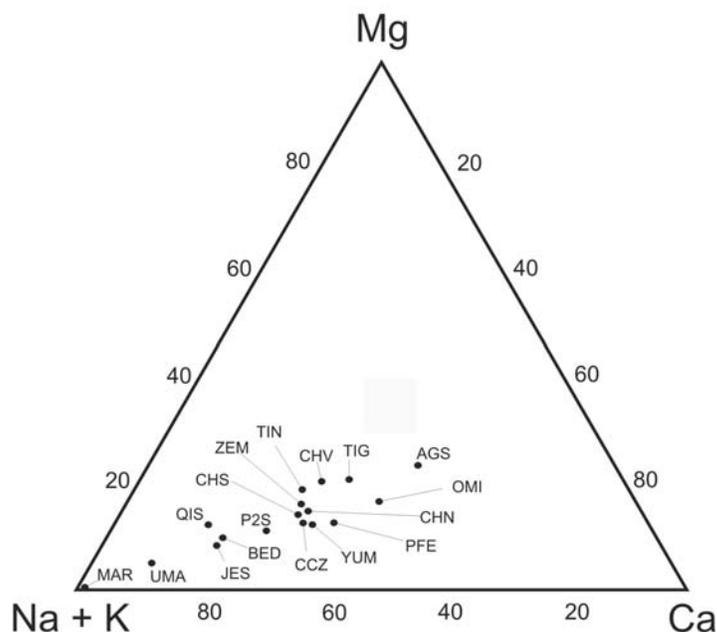


Fig. 3.3 Diagrama ternario Ca-Mg-Na+K.

### 3.3.2 ANIONES

Los resultados de los análisis químicos descritos en la tabla 3.3 fueron utilizados para elaborar el diagrama ternario de Giggenbach (1988) (Fig. 3.4), las aguas son divididas dentro de los siguientes tipos hidroquímicos, sobre la base de las concentraciones relativas de  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{SO}_4^{=}$  y  $\text{HCO}_3^-$ .

En esta gráfica se puede notar la formación de 3 grupos aniónicos (A, B, C) que se asocian a la cámara magmática del Misti, por su similitud de concentraciones y por su ubicación geográfica. La fuente Mariposa se encuentra aislada ya que esta se encuentra asociada al volcán Ubinas (Cruz, 2006) y otro grupo es conformado formado por las fuentes Quiscos y el Tigre que por encontrarse en el lado Este del volcán Chachani, podrían estar asociados al sistema hidrotermal de este volcán.

Las aguas del grupo A (Umaluso y Jesús) se encuentran en la parte de la gráfica dominada por el ión cloruro, posiblemente estén asociados a un reservorio de origen profundo.

Las del grupo B (La piscina 2 de Sabandia, Chilina Norte y Sur, La Bedoya, Zemanat, Yumina, Puente de Fierro, Tingo, El Ojo de la Calle Cuzco y el Ojo del Milagro) se encuentra en la parte de la gráfica correspondiente a las aguas cloruro sulfatadas, esta agua podría provenir de reservorios de componentes de condensados volcánicos, pero la baja concentración de componentes volcánicos, indica que esta agua estaría mezclándose con aguas freáticas. Mariposa también puede tener un origen similar, al igual que Quiscos pero este sufre una mayor dilución.

El grupo C (Agua Salada y Charcani V) que se encuentran en la zona cercana al bicarbonato, está relacionada con un posible origen asociado al calentamiento de aguas por vapores condensados de origen volcánico así como podría estar asociado a componentes de aguas freáticas. El agua del Tigre también puede tener un origen similar.

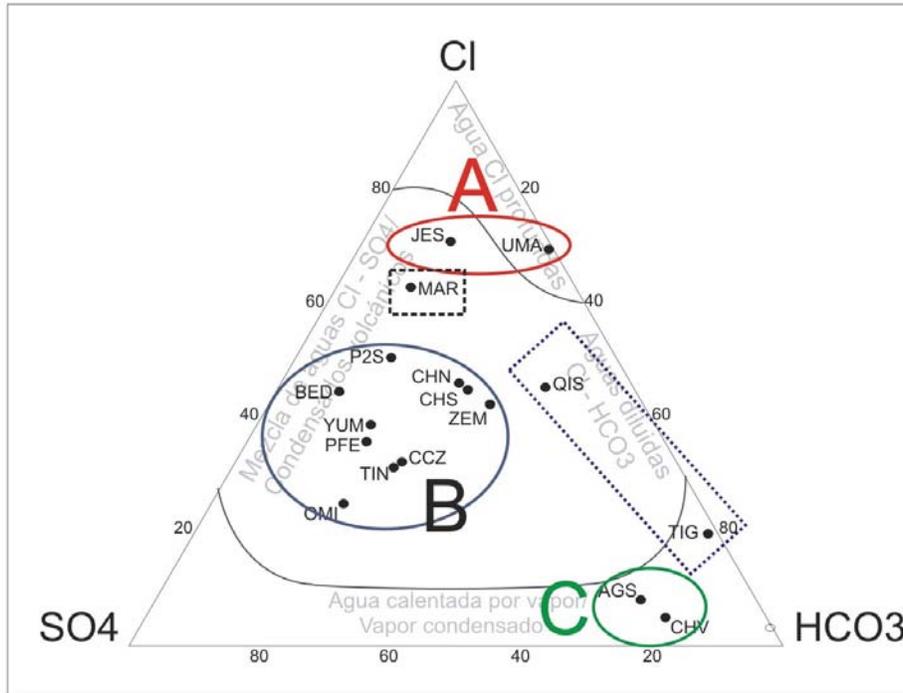


Fig. 3.4 Diagrama ternario  $\text{SO}_4$  -  $\text{Cl}$  -  $\text{HCO}_3$  (de Giggenbach 1988) para las aguas del Misti .

### 3.3.3 REPRESENTACIÓN DE LA COMPOSICIÓN ANIÓNICA Y CATIONICA DEL AGUA

Con los datos de las tablas 3.2 y 3.3 se elaboró el diagrama de Piper Hill Langelier (Fig. 3.5).

En términos de iones dominantes la mayoría de las fuentes se encuentran agrupadas de la siguiente manera:

- **SULFATO Y/O CLORURO ALCALINAS TERREAS ( $\text{SO}_4\text{-Cl}/\text{Ca} - \text{Mg}$ )** – A este grupo pertenecen las fuentes: Chilina Norte y Sur, Zemanat, Yumina , Puente de Fierro, Tingo , El Ojo de la Calle Cuzco y el Ojo del Milagro.

- **CLORURO Y/O SULFATO ALCALINAS (Cl-SO<sub>4</sub>/Na+K )** – A este grupo pertenecen las fuentes: Umaluso, Jesús, La piscina 2 de Sabandia, La Bedoya y Mariposa.
- **BICARBONATADAS ALCALINAS TERREAS (HCO<sub>3</sub>/Ca – Mg)** – A este grupo pertenecen las fuentes: Agua Salada, Charcani V y Tigre.

No se ubicó ninguna fuente en la zona de las aguas bicarbonatadas alcalinas. Es posible distinguir un acercamiento entre las fuentes de Agua Salada y Charcani V, al igual que entre Jesús y Umaluso. Existe un distanciamiento de Quiscos del grupo principal y Mariposa siempre se mantiene aislada.

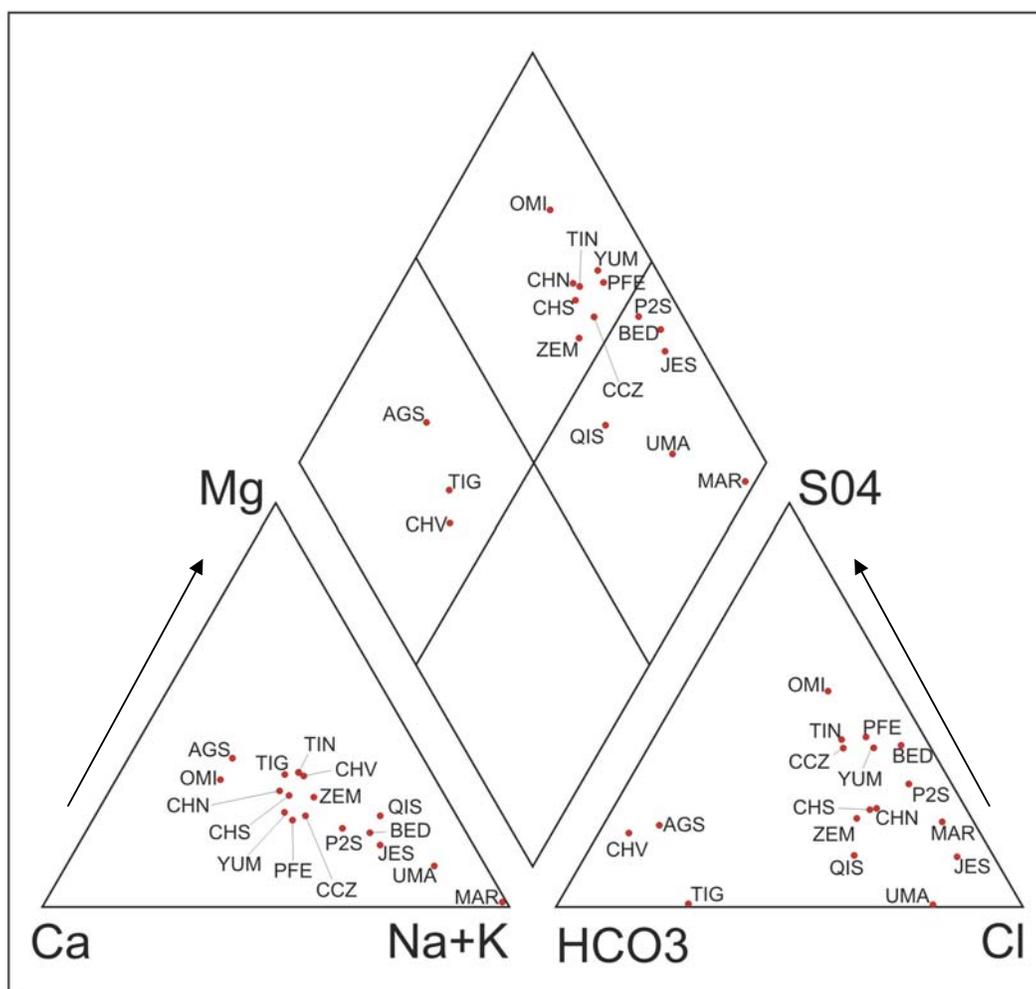
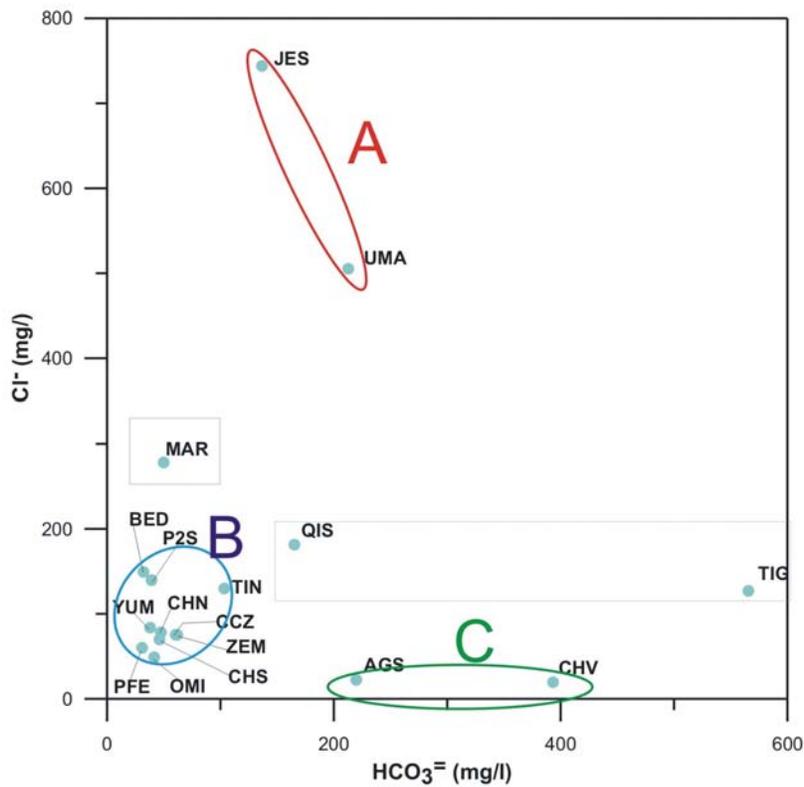


Fig. 3.5 Diagrama de Piper Hill Langgelier.

### 3.3.4 AGRUPAMIENTO GRAFICO DE LAS FUENTES

Para ver la tendencia de agrupación de las fuentes se realizaron una serie de diagramas binarios que a continuación se desarrollan.

Con los datos de la tabla 3.3 se elaboró el gráfico que combina  $\text{HCO}_3^-$  con  $\text{Cl}^-$  (Fig. 3.6), donde se distinguen los resultado similares a los obtenidos en el diagrama ternario de Giggenbach (1988), con la formación de 5 grupos, donde: Mariposa se aleja al igual que Quiscos del grupo principal y lo agrupamos con la fuente Tigre aun mas alejada de este grupo principal. En el grupo A se repite la relación Jesús – Umaluso, Al igual que en el grupo C Agua Salada – Charcani V, así como el Grupo B integrado por las fuentes Sabandia, Chilina Norte y Sur, La Bedoya, Zemanat, Yumina, Puente de Fierro, Tingo se mantienen muy cerca, pero se puede apreciar un acercamiento entre la fuentes La Bedoya y La piscina 2 de Sabandia, además de un ligero acercamiento entre Tingo y Quiscos.



Grafica 3.6 Diagrama binario  $\text{HCO}_3^-$  -  $\text{Cl}^-$

Gran parte de las fuentes tienen gran cantidad de compuestos clorurados, en la gráfica 3.7 se relacionó con  $\text{Ca}^{+2}$  y  $\text{Mg}^{+2}$ , que representan a los alcalinos térreos por su abundancia en las aguas con respecto al cloro. En este caso se encuentran muy cercanas y se puede observar la formación de los grupos A, B y C donde el grupo A se encuentra alejado del B, debido a la mayor concentración de cloruro, el grupo C tiene una ligera menor cantidad de cloruro pero mayor de alcalinos térreos.

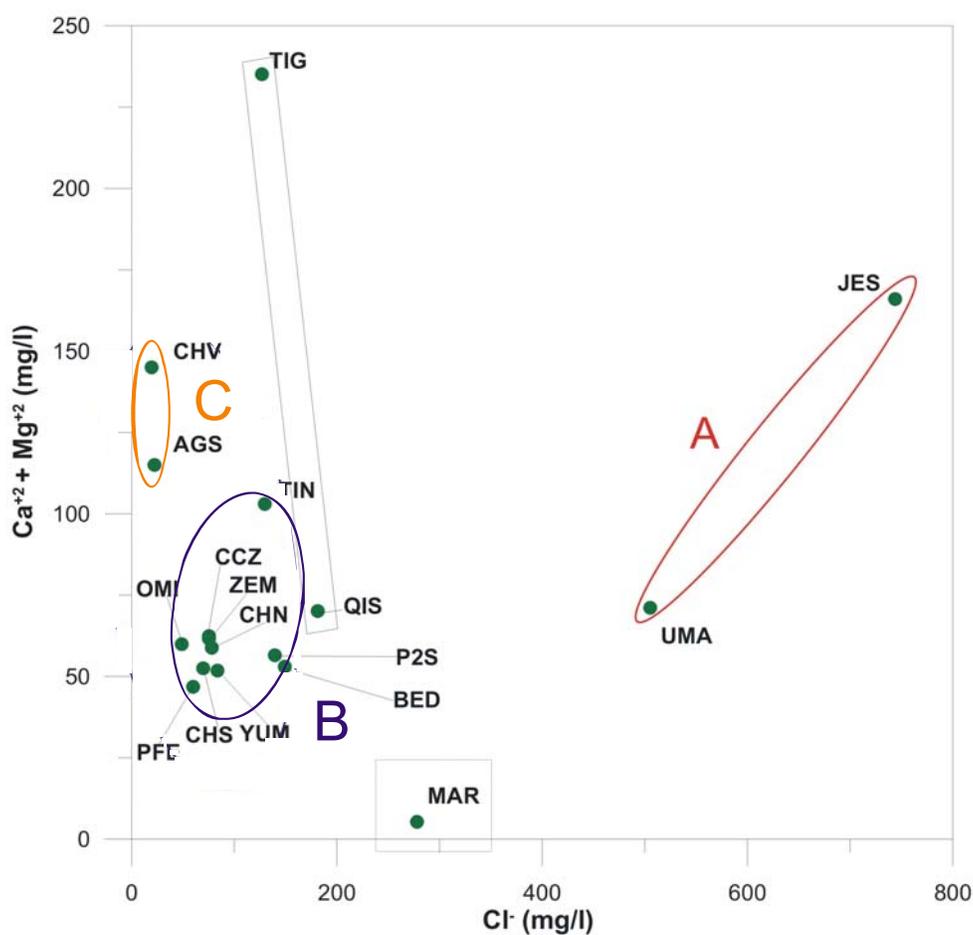


Fig. 3.7 Diagrama binario  $\text{Cl}^-$  con  $\text{Ca}^{+2} + \text{Mg}^{+2}$ .

Para llegar a una mejor comprensión se realizó la gráfica binaria conjugando alcalinos con alcalinos térreos, obteniendo el mismo resultado lo que confirma la hipótesis de los resultados obtenidos anteriormente.

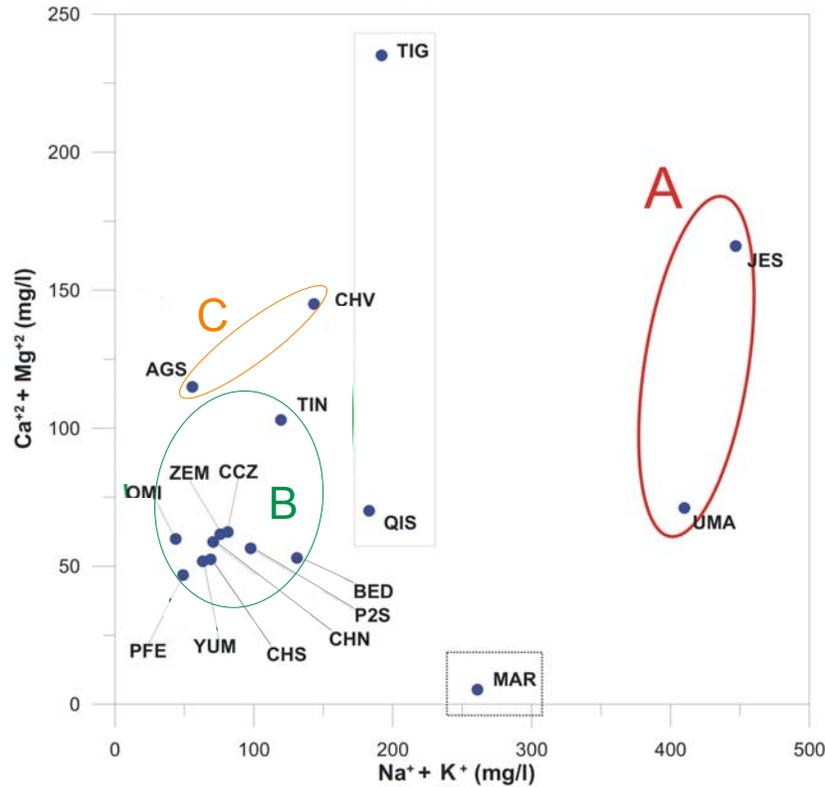


Fig. 3.8 Diagrama binario Na<sup>+</sup>+K<sup>+</sup> con Ca<sup>2+</sup> + Mg<sup>2+</sup>.

El cloro y el sodio son elementos que suelen estar siempre juntos, y casi siempre en proporciones similares, por lo que se trazó la gráfica 3.9. Se puede apreciar claramente la formación de 5 agrupamientos:

Grupo A – Formado por la fuente Jesús con mayor cantidad de cloruro, seguido de la fuente Umaluso, esta característica se observó en las diferentes graficas (cloruradas alcalinas), posiblemente estas aguas provengan de un reservorio clorurado profundo.

Grupo B – Formado por las fuentes Sabandia, Chilina 1 y 2, La Bedoya, Zemanat, Yumina, Puente de Fierro, Tingo y el manantial de la calle Cuzco; esto se repite en casi todas las gráficas. Existe un subgrupo que se repite también en las graficas, el formado por las fuentes Chilina 1 y 2, Zemanat y el manantial de la Calle Cuzco, lo que podemos atribuir a un posible reservorio común, lo que es apoyado por la ubicación geográfica muy cercana, aunque en

el caso de Chilina 1 y 2 el hecho de encontrarse aflorando a pocos metros, demuestra un mismo origen pero diferentes recorridos. Todo este grupo tiene una cantidad de cloruros y sodio pequeña en comparación con el grupo A.

Grupo C – Formada por las fuentes de Agua Salada y Charcani V, estas tienen la cantidad de cloruro mas baja de todas las fuentes y es casi igual en ambas. La cantidad de sodio, charcani V tiene una mayor cantidad significativa sobre agua salada. Este resultado coincide con la caracterización de bicarbonatadas alcalina terreas. Además por su localización geográfica son las mas cercanas al volcán Misti y a la cámara magmática de este.

Grupo D – Formada por las fuentes Tigre y Quiscos, este agrupamiento confirma la posible asociación con el volcán Chachani, lo cual esta sumado a su ubicación geográfica, a pesar de ser aguas diferentes, Quiscos (Clorurada alcalina) y el Tigre (Bicarbonatada alcalina terrea) que no se agrupa con Charcani V y agua salada.

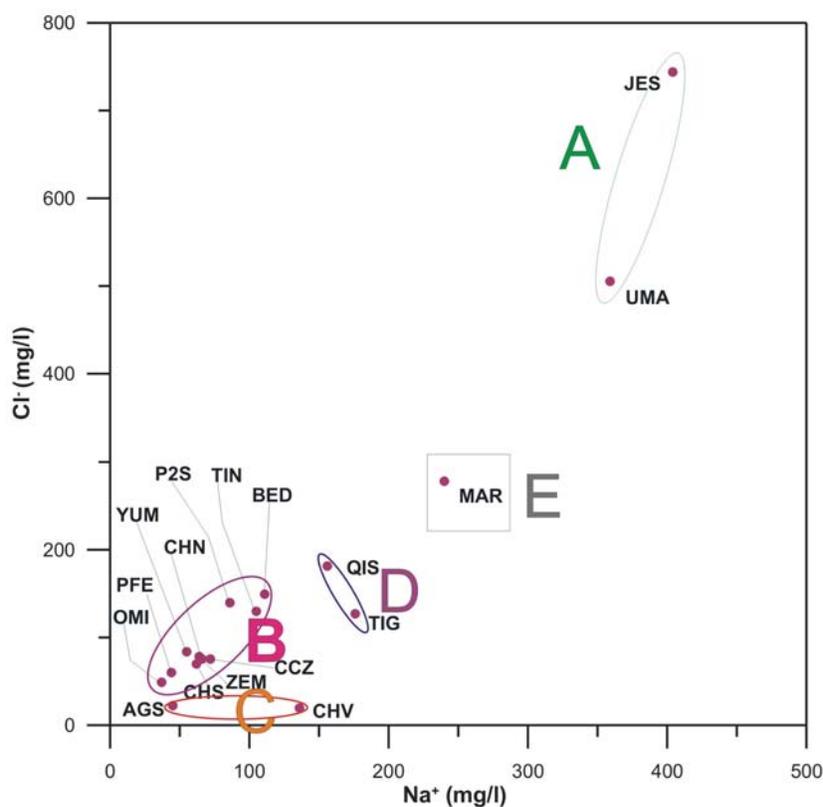


Fig. 3.9 Diagrama binario  $\text{Na}^+$  con  $\text{Cl}^-$

### 3.3.5 GEOTERMÓMETRO

Para completar la caracterización se debe de recurrir a la gráfica del Geotermómetro Na-K-Mg de Giggenbach (1988)(Fig. 3.9), donde se caracteriza un equilibrio entre la disolución de las rocas con la temperatura del reservorio en el subsuelo. Obtenido como resultado, que ninguna de las fuentes alcanzado el equilibrio completo ni el parcial. La fuente más cercana a este equilibrio parcial es la de Mariposa, seguida de Umaluso, Jesús, Quiscos y Agua salada. El resto de fuentes se encuentran casi juntas. Pero todas se encuentran en el grupo de aguas de poco recorrido.

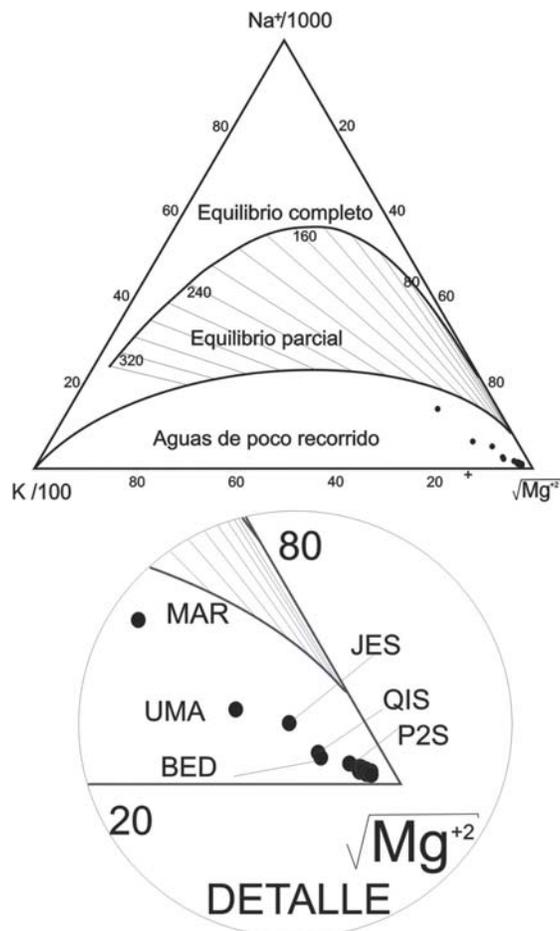


Fig. 3.10 Diagrama del Geotermómetro Na-K-Mg de Giggenbach (1988).

### **3.3.6 METALES PESADOS**

Los datos de la Tabla N° 3.4 muestran que se tratan de cantidades no significativas, y el único metal pesado presente es el Arsénico, que es característico de fuentes termales en la forma de As (III) y (V), se presenta en concentraciones que sobrepasan el límite máximo permisible de la OMS (anexo 4), en las fuentes de Jesús (0,172 mg/l ) y Charcani V (0,131 mg/l), estos niveles deberían de ser controlados, sobre todo en Jesús, que es embasada para el consumo humano. En el resto de fuentes la concentración se encuentra por debajo de 0,03 mg/l.

### **3.3.7 DISTRIBUCION GEOGRÁFICA DE LAS FUENTES DE AGUA ASOCIADAS AL VOLCÁN MISTI**

Con los datos de las tablas y gráficas se ha elaborado un mapa del Volcán Misti, donde se limitan zonas con respecto al tipo de agua que afloran.

- Zona de posible influencia de la cámara magmática del volcán Misti, la cual se encuentra separando la posible zona de influencia del Chachani (Tigre y Quiscos) y la del Volcán Ubinas (mariposa).
- Zona de las Aguas Bicarbonatadas – Esta formada por las fuentes de Charcani V y Agua Salada. Estas son las más cercanas al cráter del Volcán Misti, Tienen gran cantidad de bicarbonato, alcalinos térreos, presencia de gases disueltos y pH ligeramente ácido.
- Zona de las aguas Cloruradas – En esta zona las que más destacan son las fuentes de Jesús, Umaluso y la Bedoya. estas presentan altas concentraciones de cloruros, alcalinos, y en menor cantidad sulfatos. En el caso de las dos primeras fuentes presentan burbujas. La de Jesús fue medida por el Dr. Toutain (Junio 2006) y presento 18 - 19% de CO<sub>2</sub>.

- Zona de las aguas Sulfatadas alcalinas terreas – Está formada por las fuentes de Sabandia, Chilina Norte y Sur, Zemanat, Yumina, Puente de Fierro, Tingo, manantial de la calle Cuzco, Tingo y Ojo del Milagro. Estas presentan alta concentración de sulfatos, alcalinos térreos y cloruros en menor cantidad, se encuentran más alejadas del cráter del volcán Misti.

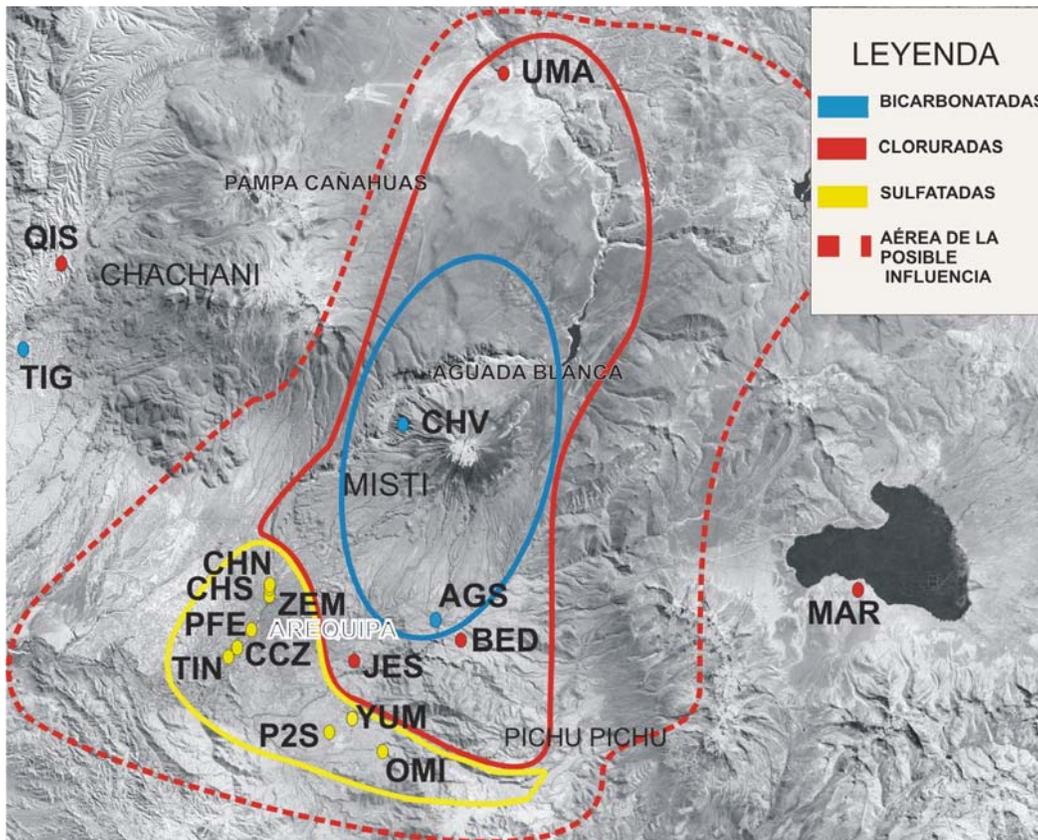


Fig. 3.11 Grupos caracterizados de aguas asociadas al Misti.

### 3.4 CONCLUSIONES

1. Las fuentes estudiadas se clasifican como aguas termales, con temperaturas que varían entre los 15° a 40 °C.
2. Se pudieron distinguir claramente tres tipos de aguas:
  - Sulfato clorurado alcalino terreas
  - Cloruro sulfato alcalina
  - Bicarbonatadas alcalina terreas
3. Por su ubicación geográfica, las que podrían tener influencia de la cámara magmática del Misti son: Jesús, la Bedoya, Charcani V, Tingo, Umaluso, Chilina Norte y Sur, Zemanat, Puente de Fierro, calle Cuzco, Ojo del Milagro, Piscina 2 Sabandia, Yumina, Agua Salada.
4. De igual manera, basándonos en las características ya señaladas es que podemos deducir que las aguas que podrían tener influencia de la cámara magmática del Chachani son: Quiscos y el Tigre.
5. En todos los casos, se trata de una mezcla de aguas juveniles con aguas vadosas y freáticas; es debido a esto y otros factores en el recorrido del agua, es que las aguas no sean más calientes y que no alcancen el equilibrio en el Geotermómetro.

### 3.5 RECOMENDACIONES Y SUGERENCIAS

1. Falta establecer los límites de la influencia de la cámara magmática, para ello se recomienda investigar más fuentes como la fuente Pasto Grande y la Trampilla entre otras. Así se podría determinar los límites de la posible influencia de la cámara magmática del Volcán Misti en aguas termales y frías.
2. Es necesario realizar los estudios isotópicos (D/H,  $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ ), análisis de gases disueltos en el agua de las fuentes de agua, de la misma manera en las fumarolas hasta obtener un modelo del sistema hidrotermal del volcán Misti, con el cual se podría tener un monitoreo de alta precisión.
3. Se debe realizar un trabajo de investigación similar en el volcán Chachani, ya que este es un volcán aparentemente dormido y en cualquier momento podría mostrar mayores señales de actividad, además no cuenta con ningún sistema de monitoreo.
4. El sistema de monitoreo del volcán Misti, además de la difusión del tipo de evento que podrían darse en un escenario eruptivo, resulta insuficiente para el peligro que representa, siendo necesaria la capacitación de la población y autoridades, de tal manera que se plante un ordenamiento de la ciudad a fin de minimizar estos efectos.

## BIBLIOGRAFIA

1. Arnorsson, S., (1985).- The use of mixing models and chemical geothermometers for estimating underground temperatures in geothermal systems. *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, 23, 299-335.
2. Arnorsson, S., Gunnlaugsson, E. and Svavarsson, H., (1983).- The chemistry of geothermal waters in Iceland. II. Mineral equilibria and independent variables controlling water compositions. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 47, 547 – 566.
3. Astiz M., García A. (Editores científicos) (2000) – Curso Internacional de Vulcanología y Geofísica Volcánica
4. Aubouin, J., Borrello, A.U., Cecioni, G., Charrier, R., Chotin, P., Frutos, J., Thiele, R. & Vicente, J.C. (1973).- Esquisse paléogéographie et structurales des Andes méridionales. *Rev. Géogr. Phys. Géol. Dyn.*, (2), XV, fasc. 1-2, 11-72.
5. Brombach, T., Marini, L. & Hunziker, J.C. (2000).- Geochemistry of the thermal springs and fumaroles of Basse-Terre Island, Guadalupe, Lesse Antilles. *Bull. Volcanol*, 61, 477-490.
6. Cruz V., Finizola A., Macedo O., Sortino F. (2004) - Disruptions in the hydrothermal water geochemistry inside Misti volcano in coincidence with the earthquake of June 23<sup>rd</sup>, 2001, 8.4 in magnitude in southern Peru, General Assembly , IAVCEI, Pucon - Chile, Poster.
7. Cruz V., Fournier N., Sortino F., Finizola A. (2006) Geochemistry characterization of the hot spring waters associated to Ubinas volcano, South Perú - “Cities on volcanoes” international conference – Quito Ecuador, Poster.
8. Cacya L.(2006) Volcán Misti: Sedimentología, geoquímica y correlación Tefro-estratigráfica del depósito de caída de pomes “autopista” ~ 14000 años, Tesis para optar el título de ingeniero Geólogo, UNSA.
9. De Silva, S. L., and FRANCIS, P., (1991). *Volcanoes of the Central Andes*. Springer – Verlag, p. 31 - 33
10. Duchi, V., A.A., and Prati, F., (1987). - Chemical composition of thermal spring, cold spring, streams, and gas vents in the Mt Amiata geothermal region (Tuscani, Italy). *J. Volcanol. Geotherm. Res.* , 31, 321-332
11. Catalán J., (1968) - *Química del agua*, EDITORIAL BLUME, España.

12. Chavez Ch., (1993). - La erupción del volcán Misti. Pasado, presente y futuro, Edit. Zenit, 176 p., Arequipa.
13. Chiodini, G., Cioni, R., Leonis, C., Marini, L., Raco, B., (1993). Fluid geochemistry of Nisyros island, Dodecanese, Greece. J. Volcanol. Geotherm. Res. 56, 95–112.
14. Chiodini, G., Frondini, F., Cardellini, C., Parello, F., Peruzzi, L., (2000). Rate of diffuse carbon dioxide Earth degassing estimated from carbon balance of regional aquifers: the case of central Apennine, Italy. J. Geophys. Res. 105, 8423–8434.
15. Craig, H., (1963). - The isotopic geochemistry of water and carbon in geothermal areas, Spoleto. Consiglio Nazionale delle Ricerche, Laboratorio di Geologia Nucleare, Pias, 17- 53.
16. D'amore, F. & Panichi, C. (1987).- Geochemistry in geothermal exploration. In: Economides, M. and Ungemach, P. (eds). Applied geothermics, Wiley & Sons, New York, 69-89.
17. De Silva, S. L., and Francis, P., (1991). Volcanoes of the Central Andes. Springer – Verlag, p. 31 - 33
18. Fournier, R. O. and Truesdell, A. H., (1974). – Geochemical indicators of subsurface temperature – Part 2, estimation of temperature and fraction of hot water mixed with coldwater. J. Res. U.S. Geol. Survey, 2, 263-270.
19. Ellis, A. J., (1970). – Quantitative interpretation of chemical characteristics of hydrothermal systems. Geothermics, Special Issue 2, 1, 516-528
20. Fidel, L.S., Morche, W., & Núñez, S. (1997).- Inventario de volcanes del Perú. Album de mapas de riesgos volcánicos de las principales ciudades del suroeste del Perú. Bol. de Ingemmet 15, 91 p.
21. Finizola, A., Ramos, D. & Macedo, O. (1998).- Constraints on hydrothermal system and structural limits by self-potential method on Misti and Ubinas volcanoes (South Peru). XXIII General Assembly of the European Geophysical Society, Nice-France.
22. Finizola, A., Sortino, F., Lénat, J-F, & Valenza, M. (2000).- Fluid circulation at Stromboli volcano, (Aeolian Islands, Italy) from self-potential and CO<sub>2</sub> surveys. Submitted to Journal of Volc. and Geophys. Res.
23. Fournier N,- (1999) Caracterization of fluids at Ubinas Volcano, South Peru, . Université Blaise Pascal, Italy.

24. Giggenbach, W. F. & Le Guern, F. (1976).- The Chemistry of magmatic gases from Eta Ale, Ethiopia, *Geochim. et Cosmochim. Acta* volc. 40, 25-30.
25. Giggenbach, W.F., (1988). Geothermal solute equilibria: derivation of Na–K–Ca–Mg geoindicators. *Geochim. Cosmochim. Acta* 52, 2749–2765.
26. Giggenbach, W.F., (1988) Water and gas chemistry of lake Nylos and its bearing on the eruptive process volcano Geotherm. Res. 42, 337-362.
27. Giggenbach, W.F. (1992). Isotopic shift in waters from geothermal and volcanic systems along convergent plate boundaries and their origin. *Earth and Planetary Science Letters*, Vol. 113, pp. 495-510.
29. Gonzáles, K., (2001). Estudio estructural del sistema hidrotermal del volcán Ubinas aplicando métodos geofísicos y geoquímicos. Tesis para ingeniero geofísico, UNSA.
30. Guevara, C., (1969). Geología del cuadrángulo de Characato. del servicio Geología y Minería N° 223, p. 11 - 17 Lima.
31. James, D. E., (1971).- Plate tectonic model for the evolution of the Central Andes: *Geological Society of America Bulletin*, 82, 3325-3346..
32. Italiano, F., Pecoraino, G., & Nuccio, P.M. (1998).- Steam output from fumaroles of an active volcano: Tectonic and magmatic-hydrothermal controls on the degassing system at Vulcano (Aeolian arc). *Journal of Geophysical Res.* 103, B-12, 29,829-29,842.
33. Hasegawa, A.& Isacks, I.S. (1981).- Subduction of the Nazca plate beneath Peru as determined from seismic observations. *J. Geophys. Res.*, 86, 4971-4980.
34. Kono, M., Fukao, Y., & Yamamoto A. (1989).- Mountain building in the Central Andes. *J. Geophys. Res.*, 94, (B4), 3891-3905.
35. Mahon, W. A. J., Klyen, L. E. and Rhode, M., (1980a) Neutral sodium/bicarbonate/sulfate hot waters in geothermal systems. *Chinetsu (J. Japan Geotermal Energy Association)*, 17, 11-24.
36. Mahon, W. A. J., McDowell, G. D. and Finlayson, J. B., (1980b) Carbon dioxide: its role in geotermal systems. *N. Z. J. Sci.*, 23, 133-148.

37. Marini, L., Agostini, A., Cioni, R., Guidi, M., & Leon, O. (1991).- Guagua Pichincha volcano, Ecuador: fluid geochemistry in volcanic surveillance. *Journal of Volcanology and Geothermal Res.*, 46, 21-35.
38. Mazor, E. and Truesdell, A. H., (1984). Dynamics of the geothermal field traced by noble gases: Cerro Prieto, Mexico. *Geothermics*, 12, 83-110
39. Mégard, F. (1987).- Cordilleran Andes and Marginal Andes: a review of Andean geology, north of the Arica elbow (18°S). In: J.W.H. Monger & J. Francheteau Eds., *Circum-Pacific orogenic belts and evolution of the Pacific Ocean Basin*. Am. Geophys. Union, *Geodin.*, 18, 71-95.
40. Minster, J.B. & Jordan, T.H. (1978).- Present day plate motions. *J. Geophys. Res.*, 83-B, 5331-5354.
41. Mustard, P.S. and Richardson, J. M., 1990. a Lotus 1 – 2 – 3 template for triangular plots. *Geobyte*, 47-53.
42. Nicholson, K. (1993).- *Geothermal Fluids, Chemistry and Exploration Techniques*. Springer-Verlag edition, Germany
43. Simkin, T. & Siebert, L. (1994): *Volcanoes of the world*. Smithsonian Institution, 2nd edition, 349 p., Geosciences Press, Inc.
44. Ramos, D. (2000).- *Aplicación del método geofísico del Potencial Espontáneo para el estudio estructural del volcán Misti*. Tesis profesional, Universidad Nacional San Agustín. Arequipa, Perú.
45. Thouret, J.-C., (1996) *El Misti stratovolcano, south Perú: Eruptive history and implications for hazard assessment*. Segundo seminario Latino Americano “Volcanes, sismos y prevención”, Lima y Arequipa, p. 45 – 50 de 177
46. Thouret J.C., (1999). *Assessment of volcanic hazards in the area of Arequipa city based on the eruptive history of the Misti volcano, southern Peru*, *Zeitschrift fur Geomorphologie, suppl.-Bd 11H*; 89-112.
47. Thouret, J.-C., Finizola, A., Fornari, M., Legeley-Padovani, A., Suni, J., and Frechen, M., (2001) *Geology of el Misti volcano near the city of Arequipa, Peru*, p. 1595 – 1604
48. Toutain, J. P., Munoz, M., Poitrasson, F., Lienard, A. C., (1997). *Springwater chloride ion anomaly prior to a  $M_L = 5.2$  Pyrenean earthquake*. *Earth and Planetary Science Letters* Volume 149, Issues 1-4

49. Vargas, L., (1970). Geología del cuadrángulo de Arequipa. Boletín del servicio Geología y Minería N° 24, p. 64 Lima.
50. White, D.E. (1970).- Geochemistry applied to the discovery, evaluation and exploitation of geothermal energy resources. Geothermics, Special Issue 2, 1, 58-80.

# **ANEXOS**

**ANEXO N° 01 – Cationes. Lecturas con al equipo de absorción atómica de los estándares y controles internos.**

Parámetros	Ca mg/l	Mg mg/l	Na mg/l	K mg/l	Al µg/l	Sr mg/l	Li mg/l	Ba ug/l
Lecturas de estándares (mg/l)	5,0 -	0,50	2,0 -	2,0 -	20,0 -	0,50 -	0,50	20,0
	10,0 -	1,00	5,0 -	5,0 -	50,0-	1,00 -	1,00	50,0
	20,0 -	2,00	10,0	10,0	100,0µg/l	2,00	2,00	100,0
Lecturas de estándares (mg/l)	Bco: 0,0	Bco: -0,00	Bco:-0,0	Bco: 0,0	Bco: 12,4	Bco: 0,00	Bco: 0,00	Bco: 14,1
	0,5: 0,4	0,20: 0,19	0,5: 0,5	0,5: 0,5	10,0: 2,4	0,20: 0,20	0,01:0,01	10,0: -25,3
	2,0: 1,9	0,50: 0,49	2,0: 2,0	2,0: 2,1	100,0: 98,0	0,50: 0,50	0,10:0,10	100,0: 89,3
	5,0: 5,0	1,00: 0,98	5,0:5,0	5,0: 5,2		1,00: 1,01	0,50: 0,49	
	10,0: 10,2	2,00: 1,96	10,0:9,9	10,0:9,8		2,00: 2,00	Bco: -0,00	
controles internos	Br1: -0,1	agua ultp:0,01	agua ultp 1: -0,0	agua ultp 1: -0,0	agua ultp 1: 49,7	agua ultp1: 0,00	agua ultp: 0,00	agua ultp1:17,5
	Br1: -0,0	agua ultp:0,01	agua ultp 2: -0,0	<b>agua ultp 2: -0,0</b>	agua ultp 2: 2,9	agua ultp2: -0,01	agua ultp: 0,00	agua ultp2:-83,8

**ANEXO Nº 02 – Metales pesados. Lecturas con al equipo de absorción atómica de los estándares y control de calidad.**

Parámetros	Cu µg/l	Pb µg/l	Zn mg/l	Fe ug/l	Mn mg/l	Cd µg/l	Cr µg/l	As µg/l	Hg µg/l
<b>Estándares de Calibración</b>	-	10,0- 20,0-50,0	0,100 - 0,200 0,500	20,0 - 50,0- 100,0	0,50- 1,00- 2,00	0,5- 1,0- 2,0	5,0- 10,0-20,0	10,0-20,0-50,0	5,0- 10,0-20,0
<b>Lecturas de estándares )</b>	B: -6,6 5,0:-1,2 50,0: 53,8	B: -1,0 5,0:1,1 50,0: 60,3	B:-0,002 0,005: 0,004 0,020: 0,017	B: 0,3 10,0 : 6,5 100,0 : 104,4	B: 0,00 0,02: 0,02 0,20:0,21 0,50: 0,51 1,00:1,03 2,00:2,00	B: -0,1 0,2:0,2 2,0:2,0	B: 0,2 2,0: 2,1 20,0: 20,6	B: 1,0 5,0:3,4 50,0: 45,2	B: -0,6 2,0:1,3 20,0: 20,1
<b>Control de calidad con M. C.I.</b>	H <sub>2</sub> O ultrap.1: -6,0 H <sub>2</sub> O ultrap.2: -3,9	H <sub>2</sub> O ultrap.1: -1,7 H <sub>2</sub> O ultrap.2: -1,4	H <sub>2</sub> O ultrap.1: 0,001 H <sub>2</sub> O ultrap.2: 0,000	H <sub>2</sub> O ultrap.1: -0,4 H <sub>2</sub> O ultrap.2: -0,5	H <sub>2</sub> O ultrap.1: -0,001 H <sub>2</sub> O ultrap.2: -0,001	H <sub>2</sub> O ultrap.1: -0,1 H <sub>2</sub> O ultrap.2: -0,0	H <sub>2</sub> O ultrap.1: 0,6 H <sub>2</sub> O ultrap.2: 0,4	H <sub>2</sub> O ultrap.1: 1,5 H <sub>2</sub> O ultrap.2: 1,0	H <sub>2</sub> O ultrap.1: -3,9 H <sub>2</sub> O ultrap.2: -2,6

**ANEXO N° 03 – Limite máximo permisible para algunos metales pesados.**

PARAMETROS	L.M.P. OMS	L.M.P. Ley General (*)
Arsénico - As (mg/l)	0,05	0,20
Cobre - Cu (mg/l)	1,0	0,50
Hierro - Fe (mg/l)	0,3	1,0
Plomo - Pb (mg/l)	0.05	0,1
Zinc – Zn (mg/l)	5,0	25

(\*) D.L. N° 17752. Ley General de Aguas – Clase III.

GEOCHEMISTRY OF THE THERMAL AND COLD WATERS AROUND THE MISTI VOLCANO, PERU

*V. Cruz-Pauccara<sup>1,✉</sup> and P. Masias-Álvarez<sup>2</sup>*

<sup>1</sup>Instituto Geológico Minero y Metalúrgico INGEMMET, Av. Canadá N° 1470, San Borja Lima 41, Perú  
 Formerly: Instituto Geofísico del Perú, Lima

<sup>2</sup>Instituto Geológico Minero y Metalúrgico INGEMMET, Av. Canadá N° 1470, San Borja Lima 41, Perú  
 ✉ vcruz@ingemmet.gob.pe

The summit of Misti Volcano (5,822 m.a.s.l.) is located at 17 km from downtown Arequipa (~1'000,000 inhabitants) the second most important city of Peru. The volcano piedmont extends to the vicinity of the city and includes the most recent volcanic products of its activity (Sub-plinian eruption ~340 BC - 200 AD).

Since 1998, after a geochemical survey on some 15 springs around Misti, we selected and began monitoring the "Charcani V" hot spring located 6 km northwest from the crater at an altitude between 3,250 and 3,550 m a.s.l. This work allowed us to establish a baseline that records short-term (weekly to monthly) variations in composition and physical parameters.

Analyses of the waters collected around the volcano display evident geochemical trends interpreted as the result of mixing processes between fresh meteoric waters and magmatic fluids, sometimes interacting with a deep chloride reservoir. In fact, we can distinguish three types of waters:

- Earth-alkalinechloride-sulfate
- Alkalinechloride-sulfate
- Alkalinebicarbonate-sulfate

According to the results obtained during eight years of monitoring (1998 to 2005), the chloride (Cl<sup>-</sup>), sulphate (SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>) ions, temperature and pH parameters suffered considerable variations along 2001. We also noticed the following important variations in the summit of El Misti: 1) increasing fumarolic activity at the crater visible from Arequipa since early August 2001, 2) an increase in the temperature of the crater's varying from a maximum of 221°C (December 1, 1997) to a maximum of 430°C (September 11, 2001). Concurrently with the physical and chemical variations observed in mid 2001, a strong earthquake (Mw=8.2) occurred in southern Peru on June 23. It was located at S 16°14', W 73°31', 28 km deep. On active volcanoes, sulfate and chlorine elements essentially come from the interaction of water with acid gas species (HCl, SO<sub>2</sub>/H<sub>2</sub>S). Therefore, the observed geochemical changes could be explained by a mixing between hydrothermal water with the surrounding shallow cold waters, which contain lower sulfate and chlorine concentrations.