

# **ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL**

## **FACULTAD DE INGENIERÍA EN GEOLOGÍA Y PETRÓLEOS**

**“ESTUDIO DE FUENTES TERMALES, FALLAS GEOLÓGICAS,  
DESCARGA DE CALOR EN LA CALDERA DE CHACANA Y EL  
APROVECHAMIENTO ACTUAL DEL RECURSO GEOTÉRMICO”**

**PROYECTO PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERO  
GEÓLOGO**

**PILICITA MASABANDA BYRON FABIAN**

**bf07epn@hotmail.com**

**DIRECTOR: ING. BERNARDO BEATE**

**bbeate49@gmail.com**

**Quito, Febrero 2013.**

## DECLARACIÓN

Yo, Pilicita Masabanda Byron Fabián, declaro bajo juramento que el trabajo aquí escrito es de mi autoría; que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y que he consultado las referencias bibliográficas que se incluye en este documento.

A través de la presente declaración cedo mis derechos de propiedad intelectual correspondientes de este trabajo, a la Escuela Politécnica Nacional, según lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, por su reglamento y por la normatividad institucional vigente.

## CERTIFICACIÓN

Certifico que el presente trabajo fue desarrollado por Byron Fabián Pilicita Masabanda, bajo mi supervisión.

-----  
Ing. Bernardo Beate  
DIRECTOR DE PROYECTO

## AGRADECIMIENTOS

*A mis padres por el apoyo que me han brindado durante mi vida estudiantil, y por quienes he alcanzado los mayores éxitos hasta el día de hoy.*

*A la Escuela Politécnica Nacional, por brindarme la oportunidad de ser un buen profesional y enseñarme que la dedicación lleva a la excelencia. Por enseñarme mis límites mentales y físicos y a su vez permitirme superarlos.*

*Al Ing. Bernardo Beate por darme la oportunidad de realizar el presente trabajo. Por ser más que un profesor, un amigo que confía en sus alumnos.*

*A los profesores de la carrera de Geología, sin excepción quienes me han compartido sus conocimientos y experiencia, y que han valorado mi esfuerzo durante mi paso por Geología.*

*A mi tía Nilda por ayudarme a mí y a mi familia en todo momento.*

*A mis tíos Luciano, Pepe y César por ser una inspiración en mi vida aunque ellos no lo sepan.*

*A mis primos Dario, Alex, Wladimir y Paúl por tratarme como su hermano.*

*A mis compañeros y amigos (Pancho, Cristian, Diego, Fabián, Angélica, Juan Fernando, Joshua, David, Tulio, Santiago, Juan Carlos, Andrea) con quienes he compartido clases, malas y buenas calificaciones, cursos de campo, viajes, farras y sobre todo penas. Gracias por crecer como personas junto a mí.*

*A mi Belencita a quien amo con todo mi corazón, quien llego a mi vida en el momento justo, por darme el cariño, respeto y confianza que una pareja necesita. Por brindarme todo su amor a cada instante y enseñarme lo que es amar. Por su apoyo incondicional en estos dos últimos años y por darme la tranquilidad y estabilidad que he buscado por mucho tiempo.*

## DEDICATORIA

*A mi madre Evita por permitirme ser la luz de sus ojos y apoyarme incondicionalmente durante toda mi vida, por darme su amor y enseñarme lo que es ser una buena persona. Mami no solo te dedico este trabajo si no todos los éxitos de mi vida.*

*A mi padre Héctor por seguir luchando a pesar de las dificultades y por su apoyo en los tiempos difíciles. Gracias por seguir a mi lado y por darme la oportunidad de rectificar mis errores.*

*A mis hermanos Michelle y Richard quienes son y han sido la razón de mis esfuerzos y a quienes siempre quiero tener a mi lado.*

## CONTENIDO

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL .....	I
DECLARACIÓN .....	II
CERTIFICACIÓN .....	III
AGRADECIMIENTOS .....	IV
DEDICATORÍA.....	V
CONTENIDO.....	VI
ÍNDICE DE FIGURAS .....	XI
ÍNDICE DE ANEXOS .....	XVI
RESUMEN .....	XXI
PRESENTACIÓN.....	XXIII
CAPÍTULO I.	
1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1. ANTECEDENTES.....	1
1.2. JUSTIFICATIVOS.....	2
1.3. OBJETIVOS. ....	3
1.3.1. OBJETIVO GENERAL.....	3
1.3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS. ....	3
1.4. ALCANCE.....	4
1.5. METODOLOGÍA.....	4
1.6. ÁREA DE ESTUDIO.....	5
1.6.1. UBICACIÓN.....	5
1.6.2. MORFOLOGÍA. ....	7
1.6.3. VÍAS DE ACCESO. ....	8
1.6.4. CLIMA, FLORA Y FAUNA. ....	8
1.6.5. POBLADOS PRINCIPALES.....	10
1.7. TRABAJOS PREVIOS.....	11
1.8. ASPECTOS CONCEPTUALES.....	13
1.9. DESARROLLO DE ESTE TRABAJO. ....	17
CAPÍTULO II.	
2. MARCO GEOLÓGICO REGIONAL Y LOCAL DE LA CALDERA DE CHACANA.....	18

2.1. INTRODUCCIÓN.....	18
2.2. MARCO GEOLÓGICO REGIONAL.....	18
2.2.1. GEOLOGÍA DE LA CORDILLERA REAL.....	20
2.2.2. VOLCANISMO TERCIARIO.....	22
2.2.3. VOLCANISMO CUATERNARIO.....	22
2.2.4. VOLCANISMO ACTUAL.....	23
2.3. MARCO GEODINÁMICO ACTUAL.....	23
2.4. GEOLOGÍA LOCAL DE LA CALDERA DE CHACANA.....	25
2.4.1. GEOMORFOLOGÍA.....	25
2.4.2. ESTRATIGRAFÍA DE LA CALDERA DE CHACANA.....	28
CAPÍTULO III.	
3. CARACTERÍSTICAS DE LOS SISTEMAS GEOTÉRMICOS ASOCIADOS A VOLCANISMO.....	37
3.1. INTRODUCCIÓN.....	37
3.2. ELEMENTOS DE UN SISTEMA GEOTÉRMICO.....	37
3.2.1. FUENTE DE CALOR.....	38
3.2.2. RESERVORIO.....	38
3.2.3. CAPA SELLO.....	39
3.2.4. FLUIDO GEOTÉRMICO.....	39
3.2.5. MANIFESTACIONES SUPERFICIALES.....	40
3.2.6. RECARGA.....	40
3.3. TIPOS DE SISTEMAS GEOTÉRMICOS.....	40
3.4. CARACTERÍSTICAS DE LOS FLUIDOS GEOTÉRMICOS RELACIONADOS A VOLCANISMO.....	41
3.5. ORIGEN DE LOS FLUIDOS GEOTÉRMICOS.....	44
3.5.1. ORIGEN 1. AGUAS METEÓRICAS.....	44
3.5.2. ORIGEN 2. AGUAS MAGMÁTICAS.....	45
3.5.3. ORIGEN 3. AGUAS DE FORMACIÓN.....	45
3.5.4. ORIGEN 4. AGUAS FÓSILES.....	45
3.6. MECANISMOS DE SURGENCIA DE LOS FLUIDOS GEOTÉRMICOS..	46
3.7. ALTERACIÓN HIDROTERMAL RELACIONADA A SISTEMAS GEOTÉRMICOS.....	47

## CAPÍTULO IV.

4.	METODOLOGÍA PARA LA OBTENCIÓN Y TRATAMIENTO DE DATOS.	50
4.1.	INTRODUCCIÓN.....	50
4.2.	IDENTIFICACIÓN DEL PROBLEMA.....	50
4.3.	HIPÓTESIS DE LA INVESTIGACIÓN.....	50
4.4.	TIPOS DE INVESTIGACIÓN DESARROLLADA.....	51
4.5.	FUENTES DE DATOS.....	51
4.6.	DISEÑO DE LA INVESTIGACIÓN.....	52
4.7.	RECOLECCIÓN DE DATOS.....	52
4.7.1.	INSTRUMENTOS Y CARTOGRAFÍA UTILIZADOS.....	53
4.7.2.	TRABAJO DE CAMPO.....	54
4.7.2.1.	Caracterización de las Fuentes Termales.....	54
4.7.2.2.	Caracterización de Fallas y Lineamientos.....	57
4.7.2.3.	Evaluación de la descarga de calor.....	57
4.7.2.4.	Aprovechamiento del Recurso Geotérmico.....	59
4.7.3.	TRABAJO GEOQUÍMICO DE LABORATORIO.....	59
4.8.	ANÁLISIS DE DATOS.....	59

## CAPÍTULO V.

5.	UBICACIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE LAS FUENTES TERMALES DE LA CALDERA DE CHACANA.....	62
5.1.	INTRODUCCIÓN.....	62
5.2.	UBICACIÓN DE LAS FUENTES TERMALES EN LA CALDERA DE CHACANA.....	63
5.2.1.	ÁREA DE JAMANCO.....	63
5.2.2.	ÁREA DE CACHIYACU.....	63
5.2.1.	ÁREA DE PAPALLACTA.....	64
5.2.2.	ÁREA DE OYACACHI.....	64
5.2.3.	ÁREA DE SALVE FACCHA.....	66
5.2.4.	FUENTES TERMALES EN LOS FLANCOS EXTERIORES DE LA CALDERA DE CHACANA.....	66
5.3.	CARACTERÍSTICAS FÍSICO-QUÍMICOS DE LAS AGUAS TERMALES EN LA CALDERA DE CHACANA.....	70
5.3.1.	TEMPERATURA.....	70
5.3.2.	pH.....	70



5.3.3. CONDUCTIVIDAD.....	71
5.3.4. POTENCIAL REDOX (Eh).....	71
5.4. ISÓTOPOS DE HIDRÓGENO Y OXÍGENO.....	74
5.5. GEOQUÍMICA DE AGUAS.....	75
5.5.1. CATIONES.....	76
5.5.2. ANIONES.....	76
5.5.3. REPRESENTACIÓN DE LA COMPOSICIÓN ANIÓNICA Y CATIONICA DE LAS MUESTRAS DE AGUAS.....	78
5.5.4. ELEMENTOS TRAZA.....	82
5.6. GEOTERMÓMETROS HIDROQUÍMICOS.....	85
5.6.1. LIMITACIONES DE LOS GEOTERMÓMETROS HIDROQUÍMICOS.....	86
5.6.2. APLICACIÓN DE LOS GEOTERMÓMETROS HIDROQUÍMICOS EN LAS AGUAS DE LAS FUENTES TERMALES DE CHACANA.....	88
5.7. GEOQUÍMICA DE GASES (GAS BURBUJEANTE Y DISUELTO).....	91
5.8. DEPÓSITOS SUPERFICIALES (TRAVERTINO).....	93
CAPÍTULO VI.	
6. RECONOCIMIENTO FOTOGEOLÓGICO DE ZONAS DE ALTERACIÓN HIDROTHERMAL Y FALLAS GEOLÓGICAS EN LA CALDERA DE CHACANA... ..	97
6.1. INTRODUCCIÓN.....	97
6.2. SISTEMAS DE FALLAS QUE ATRAVIESAN LA CALDERA DE CHACANA.....	97
6.3. ESTRUCTURAS RELACIONADAS A LINEAMIENTOS FOTOINTERPRETADOS.....	99
6.4. TECTÓNICA.....	103
6.5. ALTERACIÓN HIDROTHERMAL.....	105
6.5.1. ALTERACIÓN HIDROTHERMAL EN EL VALLE DE CACHIYACU.....	106
6.5.2. ALTERACIÓN HIDROTHERMAL EN EL VALLE DEL TAMBO BAJO.....	108
6.6. RELACIÓN DE FUENTES TERMALES, FALLAS Y ZONAS DE ALTERACIÓN.....	109
CAPÍTULO VII.	
7. DETERMINACIÓN DE LA DESCARGA DE CALOR EN LA CALDERA DE CHACANA Y EVALUACIÓN ACTUAL DEL RECURSO GEOTÉRMICO.....	116
7.1. INTRODUCCIÓN.....	116
7.2. DETERMINACIÓN DE LA DESCARGA DE CALOR NATURAL.....	117

7.2.1. CÁLCULO DE LA DESCARGA DE CALOR.....	117
7.3. EMISIÓN DE CO <sub>2</sub> EN LA CALDERA DE CHACANA.....	121
7.4. UTILIZACIÓN GEOTÉRMICA POR USO DE CALOR.....	122
7.5. ESTIMACIÓN DEL ERROR EN LOS DATOS.....	124
7.5.1. ERROR EN LA MEDICIÓN DEL CAUDAL.....	124
7.5.2. ERROR EN LA RELACIÓN MASA - CAUDAL.....	126
7.5.3. ERROR DEL CALOR ESPECÍFICO.....	128
7.5.4. ERROR EN LA MEDIDA DE LA TEMPERATURA DE LAS AGUAS TERMALES Y AMBIENTAL.....	128
7.6. CONTAMINACIÓN CALÓRICA Y QUÍMICA.....	129
CAPÍTULO VIII.	
8. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	133
8.1. CONCLUSIONES.....	133
8.2. RECOMENDACIONES.....	136
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	138
ANEXO I.....	147
A1.1. MAPA DE UBICACIÓN DE LAS FUENTE TERMALES DE CHACANA 1:100000.....	147
A.1.2. MAPA DE FALLAS Y LINEAMIENTOS DE LA CALDERA DE CHACANA 1:150000.....	147
ANEXO II.....	148
ESQUEMAS DE LAS FUENTES TERMALES DE LA CALDERA DE CALDERA DE CHACANA.....	148
ANEXO III.....	183
TABLAS DE UBICACIÓN, PARAMETROS FÍSICO-QUÍMICOS, CONCENTRACIÓN DE ELEMENTOS GEOQUÍMICOS, ELEMENTOS TRAZA, CALCULO DE GEOTERMÓMETROS, DESCARGA DE CALOR, CÁLCULO DEL ERROR DE DATOS Y APROVECHAMIENTO GEOTÉRMICO DE LAS FUENTES TERMALES DE CHACANA.....	183
ANEXO IV.....	210
INTERPRETACIÓN FOTOGEOLÓGICA.....	210
ANEXO V.....	215
ESQUEMAS DE LA MEDICIÓN DE CAUDALES EN LAS PISCINAS DE LOS CENTROS TURISTICOS UBICADOS EN LA CALDERA DE CHACANA.....	215

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. 1. Ubicación del área de estudio en la Caldera de Chacana. (Imagen de fondo tomado de Google Maps, 2012).....	6
Figura 1. 2. Superior Izquierda. Amanecer en el campamento Cachiyacu, donde se observa una capa de hilo sobre el suelo y tiendas de campaña lo que indica que la temperatura la noche anterior fue inferior a los 0°C. Superior Derecha. Páramo de pajonales intercalados con bosque montano alto en el área de Aguirre (Muestra de agua C2). Inferior Izquierda. Pantanos en el páramo de almohadillas que se deben cruzar para acceder al área de Cachiyacu. Inferior Derecha. Achupallas comidas por osos de anteojos, principal alimento para estos mamíferos. ....	10
Figura 1. 3. Placas litosféricas, dorsales oceánicas, fosas oceánicas, zonas de subducción y campos geotérmicos.1) Campos geotérmicos que producen electricidad; 2) Dorsales meso-oceánicas cruzadas por fallas transcurrentes 3) Zona de subducción, donde la placa subducida se inclina hacia abajo y se recicla en el manto (Dickson y Fanelli, 2004). ....	15
Figura 1. 4. Temperatura correspondiente a distintos gradientes (Orche, 2011). 16	16
Figura 1. 5. Diagrama que muestra la utilización de los fluidos geotérmicos (Dickson y Fanelli, 2004). ....	17
Figura 2. 1. Mapa Geológico simplificado del Ecuador. Muestra los Terrenos Tectono-estratigráficos de la Cordillera Real y Cordillera Occidental, también la localización de la Depresión Interandina y la zona subandina del tras-arco. Fallas: BF, Falla Baños; CTSZ, Zona de Cizalla Chimbo-Toachi; LF, Falla Llanganates; PF, Falla Peltetec; PPCF, Falla Pallatanga-Pujilí-Calacalí. Cuencas: CB, Cuenca del Chota, LB, Cuenca Latacunga, QB, Cuenca de Quito (Spikings y Crowhurst, 2004).....	21
Figura 2. 2. Modelo de elevación Digital de los Andes Ecuatorianos. Abreviaturas: CP, Falla Cauca; CT, Zona de Cizalla Chimbo-Toachi; GG, Golfo de Guayaquil; LS, Falla La Sofía; MB, Cuenca de Manabí; NF, Falla Nangaritza; PB, Cuenca Progreso; PaF, Falla Palanda; PeF, Falla Peltetec; PF, Falla Pujilí; PIF, Falla Pallatanga ; R, Falla Romeral; SAF, Falla Sub Andina. (Fuente: Spikings et al., 2001). ....	24
Figura 2. 3. Geomorfología de la Caldera de Chacana. (Modificado de CELEC EP., 2012).....	27
Figura 2. 4. Resumen de la Estratigrafía de la Caldera de Chacana. (Modificado de CELEC EP., 2012).....	29
Figura 3. 1. Representación esquemática de un sistema geotérmico ideal (Dickson y Fanelli, 2004). ....	38
Figura 3. 2. Esquema del origen meteórico de las aguas termales (Pinuaga, 2008).....	45
Figura 3. 3. Esquema del origen mixto de las aguas termales (Pinuaga, 2008). .	46

Figura 3. 4. Asociaciones de minerales de alteración comunes en sistemas hidrotermales (Corbett y Leach, 1998) .....	48
Figura 3. 5. Resumen generalizada de la gama de temperaturas en las que aparecen minerales de alteración. La línea sólida indica la gama de temperatura más comúnmente observadas en campos geotérmicos (Henley y Ellis, 1983). .....	49
Figura 4. 1. Fotografías tomadas durante la medición de los parámetros físico-químicos. Izquierda. Fuente de las Termas Oyacachi (UTM WGS84 824137E/9976120N); Derecha. Fuente C10 con el equipo Thermo Orion Portatil en el área de Cachiyacu (UTM WGS 84. 808865E/9954280N).....	54
Figura 4. 2. Izquierda Fotografía tomada durante el muestreo de agua de la Fuente C5 en el área de Cachiyacu (UTM WGS84. 808787E/9954836N); Derecha. Muestras de agua de la fuente termal T15 (J6 es el código utilizado en el informe geoquímico del CELEC EP., para la muestra T15), las dos primeras a la izquierda son para gas disuelto y las restantes son para composición química de la fuente termal.....	55
Figura 4. 3. Fotografías tomadas para el muestreo de gas seco. Izquierda. Muestreo de gas en la fuente termal C5. Derecha Superior. Muestreo de gas en la fuente termal T16. Derecha Inferior. Gas que entra al envase Giggenbach con solución de AgNO <sub>3</sub> en NaOH. ....	56
Figura 4. 4. Izquierda. Fotografía tomada durante la preparación del aforo en la fuente termal C4; Derecha. Esquema que muestra la metodología para la obtención del caudal 1) Instante de estabilidad del caudal en el tubo PVC, 2) Introducción del balde graduado bajo el tubo PVC e inicio de medición con el cronómetro. 3) Transcurso del llenado del balde con agua termal. 4) Instante donde se detiene el cronómetro y se toma el volumen y tiempo transcurrido. ....	58
Figura 5. 1. Fotografía panorámica del área del Jamanco tomada desde la Loma Baños hacia el S desde el UTM WGS84. 813723E/9959755N; donde se ubican las fuentes termales que desaguan en el río Tambo y Sucus.....	65
Figura 5. 2. Fotografía panorámica del área de Cachiyacu con vista hacia el E desde el UTM WGS84. 808415E/9955320N; donde se muestra la ubicación de las fuentes termales.....	65
Figura 5. 3. Foto Panorámica del valle de Papallacta desde el UTM WGS84. 817905E/9959663 hacia el W; donde se ubican las Termas Papallacta. ....	68
Figura 5. 4. Izquierda. Foto Panorámica del valle de Oyacachi en el borde Noreste de la Caldera de Chacana desde el UTM WGS84. 819721E/9975685N hacia el E. Derecha. Foto Panorámica del Poblado de Oyacachi desde el UTM WGS84. 822830E/9976510N; donde se ubican las Termas Oyacachi.....	68
Figura 5. 5. Izquierda. Fotografía Panorámica con vista hacia el ESE desde el UTM WGS84. 814568E/9975183N que muestra la ubicación de las fuentes termales Salve Faccha y Mapayacu en el valle de Salve Faccha. Derecha	

Fotografía Panorámica con vista hacia el W desde el UTM WGS84. 814850E/9975026N que muestra la ubicación la fuente termal Chimborazo Tola al pie del cerro Yarangala.....	69
Figura 5. 6. Fotografía Panorámica con vista hacia el E desde el mirador de la Armenia; de las fuentes termales exteriores de la Caldera de Chacana en su flanco Oeste.....	69
Figura 5. 7. Conductividad Eléctrica vs Temperatura de Salida de las vertientes termales.....	72
Figura 5. 8. Conductividad Eléctrica vs pH de las vertientes termales.....	73
Figura 5. 9. Condición Redox vs Temperatura de salida de las vertientes.....	73
Figura 5.10. Composición Isotópica de las aguas termales ( $\delta D$ vs $\delta^{18}O$ ) .....	74
Figura 5. 11. Elevación de las fuentes termales vs Composición Isotópica $\delta D$ ....	75
Figura 5. 12. Diagrama ternario Na+K-Ca-Mg, de las muestras de fuentes termales y frías de la Caldera de Chacana.....	76
Figura 5. 13. Diagrama ternario Cl-SO <sub>4</sub> -HCO <sub>3</sub> de Giggenbach (1988), de las muestras de fuentes termales y frías de la Caldera de Chacana. ....	77
Figura 5. 14. Diagramas binarios Cl vs Na en ppms, de las fuentes termales y frías de la Caldera de Chacana. ....	78
Figura 5. 15. Diagrama binario Cl vs Ca en ppms, de las fuentes termales y frías de la Caldera de Chacana. ....	79
Figura 5. 16. Diagrama binario Cl vs SO <sub>4</sub> en ppms, de las fuentes termales y frías de la Caldera de Chacana. ....	79
Figura 5. 17. Diagramas binarios Na vs K en ppms, de las fuentes termales y frías de la Caldera de Chacana. ....	80
Figura 5. 18. Diagrama de Piper-Hill-Langelier, para clasificación de las aguas frías y termales de Chacana.....	80
Figura 5. 19. Diagrama de Langelier-Ludwig, para clasificación de las aguas frías y termales de Chacana.....	81
Figura 5. 20. Diagramas Triangular de Giggenbach (1988) de las aguas termales y frías de Chacana. ....	82
Figura 5. 21. Diagrama binario de Li vs B, para aguas termales y frías del área de Jamanco y Cachiyacu.....	84
Figura 5. 22. Uso del diagrama ternario de Giggenbach y Goguel (1989), para aguas termales y frías del área de Jamanco y Cachiyacu.....	84
Figura 5. 23. Diagrama binario CO <sub>2</sub> vs He en aguas termales con gas disuelto. Las muestras presentan enriquecimiento en el contenido de He y CO <sub>2</sub> con respecto al agua saturada en aire (ASW).....	92
Figura 5. 24. Izquierda. Salida de gas a manera de burbujas en la Fuente Termal C6 (UTM WGS 84. 808787E/9954836N) en el área de Cachiyacu; Derecha. Salida de gas frío (H <sub>2</sub> S) a manera de burbujas en la Fuente Termal SF2 (UTM WGS 84. 814588E/9975183N) en el área de Salve Faccha.....	92

Figura 5. 25. Diagrama Binario de la Relación $R/Ra$ (He) vs $1/He/Ne$ . Las muestras sugieren una firma muy "magmática" de las aguas de las muestras. ....	93
Figura 5. 26. Precipitación de Azufre elemental en la Fuente Mapayacu "SF1" (UTM WGS84. 814951E/9975026N). ....	94
Figura 5. 27. Formación de terrazas de travertino en las fuentes termales de Cachiyacu; Izquierda. Terraza de Travertino formada por las fuentes termales C5 y C6; Derecha. Terraza de Travertino Formada por las fuentes termales C13 y C14. ....	94
Figura 5. 28. Izquierda. Cochas de lodo formadas alrededor de la fuente termal C9 (UTM WGS84. 809068E/9955157N); Derecha. Precipitación de travertino alrededor de los ojos de agua termal ubicados en el cauce del río Tambo, cercanos a la fuente termal T14 (UTM WGS84. 813988E/9958412N). ....	95
Figura 5. 29. Izquierda. Travertino formado por las fuentes termales C13 y C14 con crecimientos subsféricos (UTM WGS84. 808623E/9955152N); Derecha. Travertino laminar formado alrededor de la fuente termal C1 (UTM WGS84. 808743E/ 9954811N). ....	95
Figura 6. 1. Sistema de Fallas Regionales que atraviesan la Caldera de Chacana (Proyecto Ríos Orientales, 2000). ....	98
Figura 6. 2. Esquema de estructuras presentes en la Caldera de Chacana. ....	104
Figura 6. 3. Izquierda. Alteración Hidrotermal sílica masiva al pie del domo Yanaurco (UTM 1984. 0808623E/9955132N). Derecha. Muestra de brecha volcánica tomada al pie del domo San Clemente que muestra una matriz silicificada y formación de estibnita (UTM 1984. 0808758E/9954778N). ....	107
Figura 6. 4. Izquierda. Afloramiento de rocas alteradas en la carretera Interoceánica área de Jamanco al pie del cerro Cojanco (UTM 0814480E/9958120N) Derecha. Muestra de mano del afloramiento mostrado a la izquierda donde se nota piroxenos y plagioclasas dentro de una matriz propilitizada tornando la roca en un color verdoso. ....	108
Figura 6. 5. Alteración Hidrotermal en las fuentes termales del río Tambo área de Jamanco. ....	109
Figura 6. 6. Izquierda. Fracturas en el valle del río Tambo en la zona de la volqueta caída junto a la fuente termal T3 (UTM WGS84. 813572E/9958400N); Derecha. Fractura abierta en la en la zona de la hostería en el río Tambo en la bajada hacia la fuente termal T14 (UTM WGS84. 813988E/9958412N). ....	111
Figura 6. 7. Fallas y zonas de alteración hidrotermal en el área Cachiyacu. Fotografía panorámica tomada desde la cumbre del domo Yanaurcu (UTM WGS84. 809640E/9955903N) en dirección SSW. ....	112
Figura 6. 8. Fallas y zonas de alteración hidrotermal en el área Jamanco. Fotografía panorámica tomada desde el Caserío El Tambo (UTM WGS84. 812469E/9958620N) hacia el E. ....	113

Figura 6. 9. Fallas y lineamientos en el valle de Papallacta. Fotografía panorámica tomada desde el borde Sur del valle de Termas Papallacta (UTM WGS84. 817711E/9959010N) hacia el N.....	113
Figura 6. 10. Lineamientos y fuentes termales en el área de Salve Faccha. Fotografía Panorámica con vista hacia el ESE desde el UTM WGS84. 814568E/9975183N.....	114
Figura 6. 11. Lineamientos y fuentes termales en el área de Oyacachi. Fotografía Panorámica del valle de Oyacachi tomada desde UTM WGS84. 819721E/9975685N hacia el E .....	114
Figura 7. 1. Distribución porcentual de la descarga de calor en la Caldera de Chacana según las localidades donde aparecen fuentes termales.....	120
Figura 7. 2. Utilización de la energía geotérmica a partir de la medición del caudal de entrada de agua termal en los complejos turísticos de Chacana.....	123
Figura 7. 3. Porcentaje de utilización de la energía geotérmica con respecto a la descarga mínima de calor en las fuentes termales de Chacana. ....	124
Figura 7. 4. Medidas de temperautra en fuentes termales y aguas del río Tambo. ....	131
Figura 7. 5. Concentración y cantidad de As que se vierte en las aguas del río Tambo en las fuentes termales de Cachiyacu y Jamanco.....	132

## ÍNDICE DE ANEXOS

<b>ANEXO I</b> .....	147
A1.1. MAPA DE UBICACIÓN DE LAS FUENTE TERMALES DE CHACANA 1:100000	
A.1.2. MAPA DE FALLAS Y LINEAMIENTOS DE LA CALDERA DE CHACANA 1:150000.	
 <b>ANEXO II</b> .....	 148
ESQUEMAS DE LAS FUENTES TERMALES DE LA CALDERA DE CALDERA DE CHACANA.	
Figura A2. 1. Esquema y Fotografías de la fuente termal «T1» .....	149
Figura A2. 2. Esquema y Fotografías de la fuente termal «T2».....	150
Figura A2. 3. Esquema y Fotografías de la fuente termal «T3».....	151
Figura A2. 4. Esquema y Fotografías de la fuente termal «T4».....	152
Figura A2. 5. Esquema y Fotografías de la fuente termal «T5» .....	153
Figura A2. 6. Esquema y Fotografías de la fuente termal «T6» .....	154
Figura A2. 7. Esquema y Fotografías de la fuente termal «T7» .....	155
Figura A2. 8. Esquema y Fotografías de la fuente termal «T8» .....	156
Figura A2. 9. Esquema y Fotografías de la fuente termal «T9» .....	157
Figura A2. 10. Esquema y Fotografías de la fuente termal «T10-T11» .....	158
Figura A2. 11. Esquema y Fotografías de la fuente termal «T12» .....	159
Figura A2. 12. Esquema y Fotografías de la fuente termal «T13» .....	160
Figura A2. 13. Esquema y Fotografías de la fuente termal «T14» .....	161
Figura A2. 14. Esquema y Fotografías de la fuente termal «T15» .....	162
Figura A2. 15. Esquema y Fotografías de la fuente termal «T16» .....	163
Figura A2. 16. Esquema y Fotografías de la fuente termal «T17» .....	164
Figura A2. 17. Esquema y Fotografías de la fuente termal «T18-T19» .....	165
Figura A2. 18. Esquema y Fotografías de la fuente termal «T20». ....	166
Figura A2. 19. Esquema y Fotografías de la fuente termal «T21» .....	167
Figura A2. 20. Esquema y Fotografías de la fuente termal «C1».....	168
Figura A2. 21. Esquema y Fotografías de la fuente termal «C3».....	169
Figura A2. 22. Esquema y Fotografías de la fuente termal «C4».....	170
Figura A2. 23. Esquema y Fotografías de la fuente termal «C5».....	171
Figura A2. 24. Esquema y Fotografías de la fuente termal «C6».....	172
Figura A2. 25. Esquema y Fotografías de la fuente termal «C7».....	173
Figura A2. 26. Esquema y Fotografías de la fuente termal «C9».....	174
Figura A2. 27. Esquema y Fotografías de la fuente termal «C10».....	175
Figura A2. 28. Esquema y Fotografías de la fuente termal «C11» .....	176
Figura A2. 29. Esquema y Fotografías de la fuente termal «C12».....	177



Figura A2. 30. Esquema y Fotografías de la fuente termal «C13».....	178
Figura A2. 31. Esquema y Fotografías de la fuente termal «C14».....	179
Figura A2. 32. Esquema y Fotografías de la fuente termal «O1-O2».....	180
Figura A2. 33. Esquema y Fotografías de la fuente termal «SF1».....	181
Figura A2. 34. Esquema y Fotografías de la fuente termal «SF2».....	182

### **ANEXO III** ..... 183

TABLAS DE UBICACIÓN, PARAMETROS FÍSICO-QUÍMICOS, CONCENTRACIÓN DE ELEMENTOS GEOQUÍMICOS, ELEMENTOS TRAZA, CALCULO DE GEOTERMÓMETROS, DESCARGA DE CALOR Y APROVECHAMIENTO GEOTÉRMICO DE LAS FUENTES TERMALES DE CHACANA.

Tabla A3. 1. Ubicación y Parámetro Físico-Químicos de las muestras de fuentes termales de Caldera de Chacana. Nota: Todos los datos presentados en esta tabla fueron obtenidos durante el trabajo de campo de esta investigación a excepción de valores que corresponden a la muestra SF3, que son datos obtenidos del informe realizado por Mothes y Beate, 2002. ....	184
Tabla A3. 2. Ubicación y Parámetro Físico-Químicos de las muestras de agua superficial de Caldera de Chacana. Nota: Todos los datos presentados en esta tabla fueron obtenidos durante el trabajo de campo de esta investigación. ....	186
Tabla A3. 3. Ubicación y Parámetro Físico-Químicos de las muestras de fuentes termales de Caldera de Chacana. Nota: Todos los datos de esta tabla fueron publicados por Inguaggiato et al., 2010). ....	187
Tabla A3. 4. Ubicación y Parámetro Físico-Químicos de las muestras de agua superficial de Caldera de Chacana. Nota: Todos los datos de esta tabla fueron obtenidos de Inguaggiato et al., 2010. ....	187
Tabla A3. 5. Composición química e isotópica de las aguas termales y frías de la Caldera de Chacana. La composición isotópica de $\delta D$ y $\delta^{18}O$ expresada de en V-SMOW estándar. Nota: Valores de esta tabla que corresponden a las muestras cuyo código tiene la letra “E” como por ejemplo E8, son datos obtenidos del trabajo realizado por Inguaggiato et al., 2010; Valores de esta tabla que corresponden a las muestras cuyo código tiene las letras “SF” como por ejemplo SF1, son datos obtenidos del informe realizado por Mothes y Beate, 2002; el muestreo de las aguas termales de las muestras cuyo código tiene las letras “C y T” se realizó durante el trabajo de campo de esta investigación. ....	188
Tabla A3 6. Composición de elementos traza de las aguas termales y frías de la Caldera de Chacana. Nota: Todos los datos de esta tabla fueron obtenidos de CELEC EP., 2012; el muestreo de las aguas termales de las muestras cuyo	

código tiene las letras “C y T” se realizó durante el trabajo de campo de esta investigación.....	190
Tabla A3. 7. Composición química de gas disuelto de las fuentes termales de Chacana. Los valores son expresados en cc por litro STP. Nota: Valores de esta tabla que corresponden a las muestras cuyo código tiene la letra “E” como por ejemplo E8, son datos obtenidos del trabajo realizado por Inguaggiato et al., 2010; valores de esta tabla que corresponden a las muestras cuyo código tiene las letras “C y T” como por ejemplo C1 y T16, son datos obtenidos de CELEC EP., 2012; el muestreo de las aguas termales de las muestras cuyo código tiene las letras “C y T” se realizó durante el trabajo de campo de esta investigación.....	191
Tabla A3. 8. Composición química del gas burbujeante en las muestras de aguas termales en Chacana. Los valores de O <sub>2</sub> , N <sub>2</sub> y CO <sub>2</sub> son expresados en % volumen, mientras que los valores de H <sub>2</sub> , CO y CH <sub>4</sub> son expresados en ppm vol. La composición isotópica del gas CO <sub>2</sub> son expresados en PDB estándar. Nota: Valores de esta tabla que corresponden a las muestras cuyo código tiene la letra “E” como por ejemplo E8, son datos obtenidos del trabajo realizado por Inguaggiato et al., 2010; Valores de esta tabla que corresponden a las muestras cuyo código tiene las letras “C y T” como por ejemplo C1 y T16, son datos obtenidos de CELEC EP., 2012; el muestreo de las aguas termales de las muestras cuyo código tiene las letras “C y T” se realizó durante el trabajo de campo de esta investigación. ....	192
Tabla A3. 9. Ecuaciones Geotermométricas utilizadas en las aguas de Chacana para el cálculo de la temperatura en subsuperficie. Nota: Las ecuaciones fueron obtenidas de las publicaciones realizadas por Karingithi (2009), Yock, 2009 y Orche, 2011. ....	193
Tabla A3.10. Geotermómetros de Sílice aplicados en las aguas termales de Chacana a partir de los datos de la tabla A3.5. ....	194
Tabla A3. 11. Geotermómetros de Na/K aplicados en las aguas termales de Chacana a partir de los datos de la tabla A3.5. ....	195
Tabla A3. 12. Geotermómetros de Na-K-Ca, Na/Li, K/Mg y Li/Mg aplicados en las aguas termales de Chacana a partir de los datos de la tabla A3.5.....	196
Tabla A3. 13. Cálculo de la descarga de calor natural en cada una de las fuentes termales de la Caldera de Chacana. Nota: Todos los datos presentados en esta tabla fueron obtenidos durante el trabajo de campo de esta investigación, salvo consideraciones expuestas a continuación. ....	197
Tabla A3.14. Calor Específico del agua entre 0° a 100 °C (Tomado de <a href="http://www.vaxasoftware.com">www.vaxasoftware.com</a> ).....	200
Tabla A3.15. Sumario del Potencial Térmico mínimo en base a la descarga de calor en las fuentes termales de Chacana calculada en la tabla A3.13.....	201
Tabla A3.16. Cálculo de la densidad del agua termal a partir de la fórmula de Tanaka et al., (2001).....	202

Tabla A3. 17. Uso de Calor Directo en los centros turísticos que se encuentran en la Caldera de Chacana. Tabla basada en la publicación realizada por Beate y Salgado, 2010. Nota: Todos los datos presentados en esta tabla fueron obtenidos durante el trabajo de campo de esta investigación a excepción de los valores que corresponden a La Merced, Ilaló y El Tingo fueron obtenidos de la publicación realizada por Beate y Salgado, 2010. ....	203
Tabla A3. 18. Sumario del uso de Calor Directo en los centros turísticos que se encuentran en la Caldera de Chacana a partir de la tabla A3.17. ....	205
Tabla A3. 19. Porcentaje de Utilización del uso de Calor Directo con respecto a la descarga de calor mínimo en la Caldera de Chacana. ....	205
Tabla A3. 20. Aporte mínimo de As en las aguas del río Tambo a partir de los datos de concentración de As presentados en la tabla A3.6. ....	206
Tabla A3. 21. Concentración de elementos contaminantes en las aguas del río Tambo y Sucus con respecto a los límites permisibles para el consumo establecidos por la O.M.S y el T.U.L.A.S. ....	207
Tabla A3. 22. Concentración de elementos contaminantes en las aguas termales del área de Jamanco con respecto a los límites permisibles para el consumo establecidos por la O.M.S y el T.U.L.A.S. ....	208
Tabla A3. 23. Concentración de elementos contaminantes en las aguas termales del área de Cachiyacu con respecto a los límites permisibles para el consumo establecidos por la O.M.S y el T.U.L.A.S. ....	209
 <b>ANEXO IV</b> .....	 210
<b>INTERPRETACIÓN FOTOGEOOLÓGICA</b>	
Figura A4. 1. Interpretación fotogeológica sobre la fotografía aérea 124212. ....	211
Figura A4. 2. Interpretación fotogeológica sobre la fotografía aérea 124164. ....	211
Figura A4. 3. Interpretación fotogeológica sobre la fotografía aérea 124214. ....	212
Figura A4. 4. Interpretación fotogeológica sobre la fotografía aérea 124162. ....	212
Figura A4. 5. Interpretación fotogeológica sobre la fotografía aérea 124216. ....	213
Figura A4. 6. Interpretación fotogeológica sobre la fotografía aérea 124160. ....	213
Figura A4. 7. Interpretación fotogeológica sobre la fotografía aérea 124218. ....	214
Figura A4. 8. Interpretación fotogeológica sobre la fotografía aérea 124158. ....	214
 <b>ANEXO V</b> .....	 215
<b>ESQUEMAS DE LA MEDICIÓN DE CAUDALES EN LAS PISCINAS DE LOS CENTROS TURISTICOS UBICADOS EN LA CALDERA DE CHACANA.</b>	
Figura A5. 1. Esquema de las Termas Papallacta. Medidas de los aforos y temperaturas de entrada y salida en cada piscina. ....	216
Figura A5. 2. Esquema de las Termas Jamanco. Medidas de los aforos y temperaturas de entrada y salida en cada piscina. ....	217

Figura A5. 3. Esquema de las Termas Oyacachi. Medidas de los aforos y temperaturas de entrada y salida en cada piscina.....	218
Figura A5. 4. Utilización del Recurso Geotérmico en los centros turísticos en Termas Papallacta, Termas Jamanco, Termas Oyacachi y Piscinas “El Pisque”-Guachalá. ....	219

## RESUMEN

La Caldera de Chacana se presenta como el centro volcánico riolítico más grande de los Andes del Norte; una gran cantidad de productos volcánicos diferenciados en superficie indica una anomalía térmica importante a niveles someros, situación favorable para la presencia de recursos geotérmicos hidrotermales, cuya expresión actual son los manantiales termales ubicados en la superficie. Las áreas de Jamanco y Cachiyacu, ubicadas dentro de la Caldera de Chacana son prospectos geotérmicos en pre-factibilidad inicial y parte integral del Proyecto Geotérmico Chacana que permite el análisis de la descarga de calor en la caldera y extenderse a los flancos exteriores de Chacana, a las zonas de Salve Faccha, Ilaló, Oyacachi, Tolontag y Guachalá donde se ubican fuentes termales relacionadas a la caldera.

Se realizó la caracterización de todas las fuentes termales que se encuentran en la caldera de Chacana, realizando: la interpretación fotogeológica de 14 fotografías aéreas, medición de los parámetros físico químicos de 46 fuentes termales y 18 mediciones en aguas superficiales, muestreo de agua de 37 fuentes termales y 7 superficiales para análisis de elementos mayores y trazas, muestreo de gas disuelto en 14 fuentes termales, muestreo de 8 fuentes termales de gas seco y edición de 154 fotografías.

Las aguas termales principalmente en las zonas de Jamanco, Papallacta y Cachiyacu se caracterizan por ser fluidos de alta salinidad con temperaturas de salida de 58.9°C hasta 72.9°C, conductividad entre 1500  $\mu\text{S}/\text{cm}$  a 7100  $\mu\text{S}/\text{cm}$  y pH neutros a ligeramente alcalinos. Isótopos de  $^2\text{H}$  y  $^{18}\text{O}$  muestran que las aguas termales tienen origen a partir de aguas meteóricas que se infiltran en zonas de recarga que se ubican a la altura de los 4000 m.s.n.m. de acuerdo al gradiente isotópico local de Chacana. Las concentración de elementos mayores y traza indican que las aguas termales de Jamanco, Cachiyacu, Papallacta y Tolontag son aguas sulfatadas cloruradas alcalinas de alta salinidad; las de Guachalá, Oyacachi, El Lisco, Ilaló son aguas bicarbonatadas alcalinas, mientras que las aguas de zonas de recarga son bicarbonatadas alcalino terreas. Las altas

concentraciones de Na-K y Cl en las aguas termales implican lixiviación de rocas del relleno de la caldera y su relación con intrusiones magmáticas. Las concentraciones de Li y B indican un mismo origen para las aguas termales de Jamanca y Cachiyacu y la interacción de las aguas con rocas riolíticas del reservorio. La Geotermometría indica que las temperaturas de reservorio varían entre 170°C a 280°C, estos valores presentan una alta incertidumbre ya que las aguas termales de Chacana son aguas en equilibrio parcial e inmaduras.

La caldera de Chacana se encuentra atravesada por los ramales Papallacta y Ramón Sacha que son una bifurcación al sur de la Falla Chingual. Entre estos ramales se encuentran varios lineamientos; los más representativos tienen una dirección NE-SW interpretados como fallas transcurrentes en un ambiente tectónico compresivo inverso. La tectónica transcurrente también permite la formación de ambientes de cuencas “pull apart”, rotación de bloques y fallamiento transcurrente divergente cuyas expresiones son valles y lineamientos geológicos donde se ubican las fuentes termales; ambientes que permite la apertura y reapertura de fallas y fracturas por donde circulan y ascienden los fluidos geotermales, produciendo alteración propilítica-argilítica (antigua) y formando terrazas de travertino (actual) que cubren áreas métricas. La alteración hidrotermal presenta una asociación mineral clorita-illita-smectita que indica un enfriamiento del sistema.

La mínima descarga de calor en Chacana se calcula en 19.27 MW termales, lo que equivaldría a un uso de energía anual de 274.62 TJ de los cuales solo se utiliza 16.61% a manera de piscinas en centros Turísticos ubicados dentro y en los flancos exteriores de la caldera de Chacana.

La emisión de CO<sub>2</sub> disuelto y burbujeante se calcula en 1032 toneladas por año solo de las fuentes termales. En las áreas de Jamanca y Cachiyacu el contaminante natural son las fuentes termales que aportan 145.09 mg/s (≈3 toneladas/año) de As a las aguas del río Tambo y que se acumulan en las aguas y sedimentos de la laguna de Papallacta; datos que son desconocidos por las autoridades locales y provinciales, y por los pobladores del área, por lo cual se debe dar conocimiento inmediato de estos valores.

## PRESENTACIÓN

En el Ecuador el tema del aprovechamiento de los recursos geotérmicos está tomando nuevos bríos. El Ecuador tiene un importante potencial geotérmico, el cual puede convertirse en una fuente de energía renovable y confiable que no depende del clima, de esta manera se reduciría el uso de combustible fósil para generación eléctrica y se evitaría la emisión de grandes cantidades de CO<sub>2</sub> producida por el combustible fósil hacia la atmósfera.

En todos los campos geotérmicos hidrotermales se ha realizado: la estimación del calor mínimo del sistema, estudios de ambientes tectónicos, ubicación y caracterización de fuentes termales; datos que permiten ubicar una región termal anómala, previo a la explotación y producción de un recurso geotérmico.

El presente trabajo se realizó en las áreas de Jamanco y Cachiyacu que son parte del Proyecto Geotérmico Chacana ubicado en la caldera del mismo nombre, en la cresta de la Cordillera Real a 60 Km al Este de Quito. El trabajo se extendió a las zonas de Papallacta, Oyacachi, Salve Faccha que se encuentran en el interior de la caldera y a las zonas del Lisco, Tolontag, Ilaló y Guachalá que se encuentran en los flancos Norte y Oeste de la caldera de Chacana.

Este trabajo presenta un resumen de: las geologías local y regional de la caldera de Chacana, la metodología utilizada para la realización del presente trabajo, la caracterización de las fuentes termales que incluye su ubicación, análisis de sus propiedades físicas, características químicas e isotópicas, relación con zonas de alteración hidrotermal, fallas y lineamientos, el cálculo de la descarga mínima de calor y aprovechamiento actual del recurso geotérmico en la caldera de Chacana. Además se realiza un cálculo de la descarga de As en las aguas del río Tambo por medio del caudal de las aguas termales.

# CAPÍTULO I.

## 1. INTRODUCCIÓN.

### 1.1. ANTECEDENTES.

A lo largo de los años el Ecuador ha basado su generación de energía en centrales térmicas e hidráulicas y para completar la demanda se ha visto en ocasiones en la necesidad de importar energía desde Colombia y Perú. Datos generados por el CONELEC en el 2009 y expuestos en la Conferencia Nacional de Energía Geotérmica en el Ecuador en Julio del 2010, muestran que la Potencia Eléctrica Instalada en el Ecuador en el 2008 fue de 5206 MW, de los cuales el 48% correspondieron a centrales térmicas, el 39.4% a hidroeléctricas y el 12.5% a importaciones de energía. La energía generada en el 2008 llegó a 19108.69 Gwh (Aguilera, 2010).

El Ecuador ha sufrido el impacto de crisis energéticas debido a la falta de caudal en centrales hidroeléctricas y parece absurdo el hecho de importar diesel subsidiado, para el funcionamiento de centrales térmicas. Por lo tanto el Gobierno busca el cambio de la matriz energética (Urquiza y Arcos, 2012) hacia fuentes de energía renovables (Hidroeléctrica, Eólica, Solar, Geotermia, Biocombustibles) que sustituyan los combustibles fósiles (Petróleo, Diesel, Gas Natural).

Los primeros avances de Geotermia en el Ecuador son los proyectos desarrollados entre 1978 a 1990 por el ex INECEL y OLADE, con el propósito de producir energía eléctrica que complementa a la hidroenergía, ideas que se fueron diluyendo y desapareciendo tres años después. En el año 2000 se retoma el tema geotérmico por parte del CONELEC con el afán de proveer la reactivación de la exploración geotérmica en el prospecto Tufiño, ideas que tampoco progresaron.

En el 2008 el MEER a través de ELECTROGUAYAS, lanza una nueva iniciativa para la implantación de una línea de generación geotermoeléctrica en el Ecuador,



dando nuevos bríos a la posibilidad de geotermia en el país. En esta misma idea, actualmente a través del Plan Nacional de Desarrollo el gobierno intenta cambiar su matriz energética tomando en cuenta que la geotermia es una energía independiente de las condiciones climáticas y de mínima afectación al medio ambiente. Es por eso que el MEER/IND a través de CELEC EP., realizan trabajos de exploración a nivel de pre-factibilidad inicial que incluyen la elaboración del Modelo Geotérmico Conceptual a partir de datos de superficie (geológicos, geoquímicos, geofísicos) en los Proyectos Geotérmicos Chacana y Cachimbiro ubicados en las provincias del Napo e Imbabura respectivamente y en los Proyectos Tufiño-Chiles-Cerro Negro y Chalpatán en el Carchi.

CELEC EP., requirió de geólogos que realicen estudios a nivel de Proyectos de Titulación sobre la evaluación del Potencial Geotérmico en Prospecto Geotérmico Chacana. La elaboración del estudio de fallas geológicas, fuentes termales, zonas de alteración y evaluación del aprovechamiento actual del recurso geotérmico que existe en la Caldera de Chacana es parte del Proyecto Geotérmico Chacana, estudio que se extiende a las fuentes termales dentro del Complejo Volcánico Chacana.

## **1.2. JUSTIFICATIVOS.**

La Caldera de Chacana es altamente prospectiva para recursos geotérmicos en concordancia a su actividad riolítica; nuevos datos geológicos, geoquímicos y geofísicos indican que en Chacana existe el potencial geotérmico del tipo sistemas geotérmicos hidrotermales como para sistemas geotérmicos HDR (Hot Dry Rock), debido a las manifestaciones hidrotermales que existen actualmente y al régimen tectónico en la caldera. Una vez identificada la región termal, en este caso la Caldera de Chacana, se debe utilizar todas las herramientas exploratorias disponibles, obtener datos geológicos fiables y ubicar las principales zonas de interés geotérmico.

Las áreas de Jamanco y Cachiyacu, ubicadas en la Zona Sur de la Caldera de Chacana son prospectos geotérmicos en pre-factibilidad inicial y parte integral del

Proyecto Geotérmico Chacana. En cualquier proyecto geotérmico es importante conocer cuál es la descarga de calor mínimo del sistema geotermal. La medición de caudales en fuentes termales, observaciones de campo en zonas de alteración y su relación con el fallamiento local y regional, permite identificar sitios de emplazamiento de un magmas someros y la presencia de un posible reservorio, para de esta manera poder evaluar con mayor aproximación el potencial geotérmico hipotético y el aprovechamiento actual del recurso geotérmico; además este trabajo aportaría con los primeros datos de descarga de calor en el país a través de la medida de los caudales en las fuentes termales y daría conocimiento de la cantidad de arsénico (As) que se vierten a las aguas del río Tambo.

### **1.3. OBJETIVOS.**

#### **1.3.1. OBJETIVO GENERAL.**

Determinar la descarga de calor en superficie en la Caldera de Chacana, integrando la información de fallas geológicas, manifestaciones termales y aprovechamiento actual del recurso geotérmico.

#### **1.3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS.**

- Ubicar las fuentes termales dentro y fuera de la Caldera de Chacana.
- Medir el caudal en l/s de las fuentes termales de la Caldera de Chacana.
- Medir los parámetros físico-químicos de las fuentes termales.
- Descripción de las manifestaciones termales e interpretación de datos geoquímicos utilizando geotermómetros.
- Determinar la distribución espacial de las fallas y fracturas dentro de la Caldera de Chacana.
- Correlacionar las fuentes termales con las fallas existentes y zonas de alteración hidrotermal.
- Determinar la descarga de calor en superficie de la Caldera de Chacana.
- Evaluar el aprovechamiento actual del recurso geotérmico en Chacana.

#### **1.4. ALCANCE.**

Este proyecto de titulación es un estudio basado en recopilación bibliográfica y análisis de datos obtenidos en campo, que permiten obtener datos reales de aprovechamiento geotérmico actual en Chacana, utilizando la Geoquímica de Fluidos, Tectónica, y Geotermia como líneas de investigación. Las campañas de campo se enfocaron en zonas donde se encontraban fuentes de agua termal, en las áreas de Termas de Papallacta, Cachiyacu, Jamanco, Oyacachi y Salve Faccha ubicadas dentro de la caldera. Los trabajos de campo permitieron ubicar las fuentes termales, describirlas y medir sus parámetros físico-químicos y sus caudales en un solo momento o tiempo único. En este trabajo se realizó el muestreo de los fluidos termales y superficiales para el análisis de geoquímica de aguas; datos que fueron parte del informe geoquímico del Proyecto Geotérmico Chacana. Publicaciones internacionales permitieron obtener datos geoquímicos de las aguas de las fuentes termales ubicadas fuera de la caldera. Mediante la interpretación fotogeológica se obtuvo un mapa de fallas y lineamiento 1:100000 que se limita al área de la Caldera de Chacana. La descarga de calor y la evaluación del recurso geotérmico actual se realizaron a través de los datos obtenidos de la medición de los caudales y utilizando estos datos en fórmulas matemáticas publicadas por el Congreso Mundial de Geotermia realizado en Bali-Indonesia en el 2010.

#### **1.5. METODOLOGÍA.**

En este punto se dará a conocer la metodología general utilizada para la realización del presente trabajo, el cual se desarrolló en cuatro fases:

**FASE I.-** se realizó la recopilación de información existente y elementos cartográficos con respecto al área de estudio como: libros, publicaciones nacionales e internacionales, informes técnicos inéditos, tesis de grado, mapas geológicos y topográficos, fotografías aéreas e imágenes satelitales, que permitan tener una base para el desarrollo del proyecto. En esta fase se realizó el análisis fotogeológico de fallas, lineamientos y zonas de alteración en el área de estudio.

**FASE II.-** corresponde al trabajo de campo, donde se localizó y describió las fuentes termales, dentro y fuera de la caldera. Se tomaron los parámetros físicos y químicos de las aguas termales como temperatura, conductividad, pH y Eh, y se realizó el aforo de las fuentes termales dentro y fuera de la caldera. Además se realizó visitas a complejos turísticos de aguas termales dentro de la caldera para determinar el uso actual de la energía geotérmica en la caldera de Chacana.

**FASE III.-** corresponde a la reducción e interpretación de datos de campo y laboratorio. En esta fase se realizó la interpretación de los análisis físico-químicos de las aguas de las fuentes termales, la categorización de fallas y lineamientos y su relación con zonas de alteración hidrotermal y fuentes de aguas termales. También se realizó el cálculo de la descarga de calor y aprovechamiento actual del recurso geotérmico.

**FASE IV.-** en esta fase se realizó la redacción del informe final donde se da a conocer el aprovechamiento del recurso geotérmico, que incluye tablas y figuras, descripción de las fuentes termales dentro y fuera de la Caldera de Chacana, mapa resumen 1:50000 de fallas, lineamientos, fuentes termales y alteración hidrotermal, y el planteamiento de las conclusiones y recomendaciones.

## **1.6. ÁREA DE ESTUDIO.**

### **1.6.1. UBICACIÓN.**

El área de estudio es la Caldera de Chacana que se muestra en la Figura 1.1. La caldera está ubicada entre las provincias de Napo y Pichincha a 60 km al Este de la ciudad de Quito y a 20 km al Noreste de la ciudad de Baeza, en la cresta de la Cordillera Real, dentro de la Provincia Riolítica Ecuatoriana (Hall et al., 2008). Dentro de la caldera se ubican las siguientes zonas de interés geotérmico y tomadas en cuenta para el presente estudio.

**Cachiyacu.-** Ubicada en el extremo Sur de la caldera a 5.5 km al Suroeste del Caserío El Tambo, el cual está en el km 55 de la vía interoceánica.

**Jamanco.-** Ubicada a la zona meridional de la caldera en el valle del río Tambo, en el kilómetro 60 de la vía Interoceánica.

**Papallacta.-** Ubicada en el borde Este meridional de la caldera, donde se encuentran las Termas Papallacta a 67 km de la ciudad de Quito.

**Oyacachi.-** Ubicado en el borde Noreste de la caldera, sobre el valle del río Oyacachi donde se asientan las Termas Oyacachi a 20 km en línea recta al Norte de Papallacta y a 19 km al Sur de la población de Cangahua.

**Salve Faccha.-** Se encuentra en la parte Norte de la Caldera de Chacana, al Sureste del cerro Yarangala y al Este de la actual presa Salve Faccha a 17 km al Noroeste en línea recta de Papallacta y 9 km al Oeste de Oyacachi.

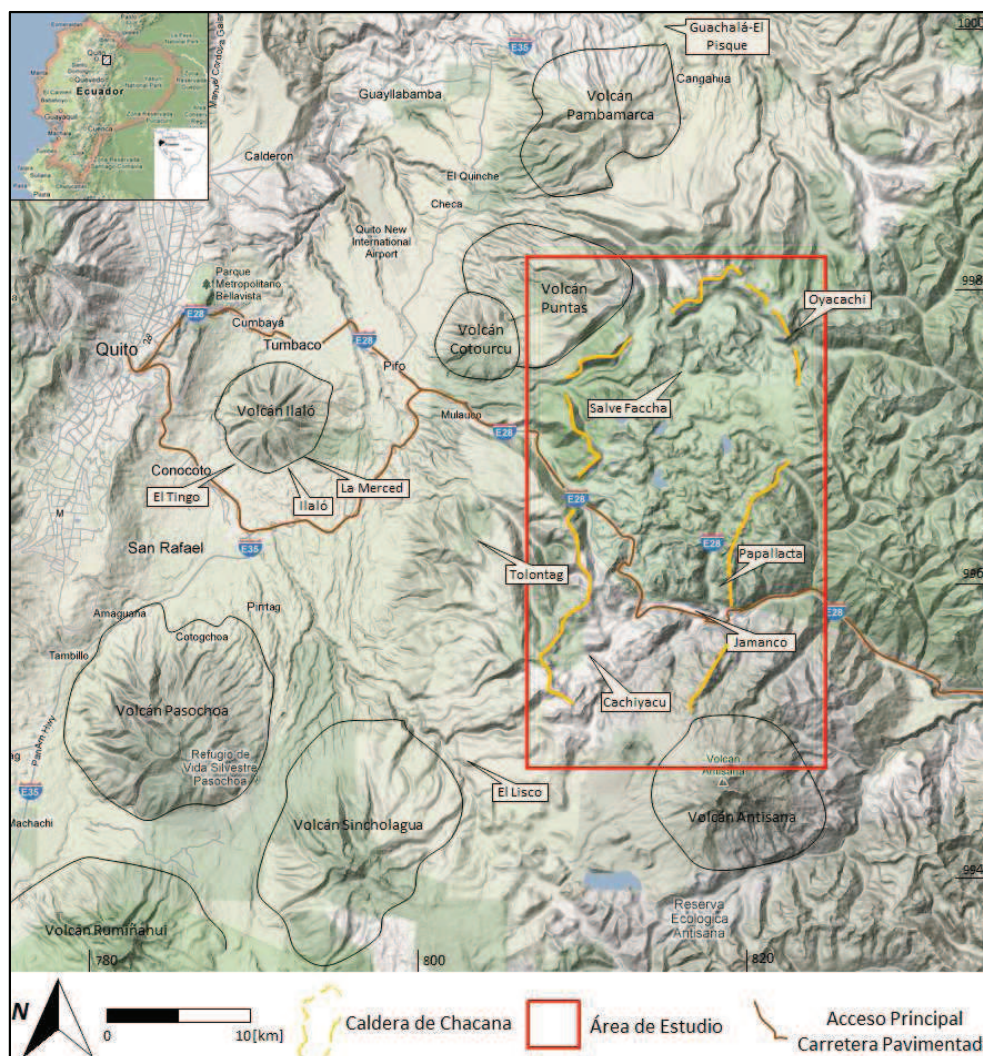


Figura 1. 1. Ubicación del área de estudio en la Caldera de Chacana. (Imagen de fondo tomado de Google Maps, 2012).

**Fuentes Termales Exteriores.-** La fuente del Pisque se encuentra a 700 metros al Norte de la línea equinoccial que pasa por Guachalá. Los balnearios de La

Merced, Ilaló y El Tingo se encuentran al pie Sur del volcán Ilaló, a 24 km al Oeste del borde de la Caldera de Chacana y a 11 km al Este de Quito. La Fuente de la Calera de Tolontag se encuentra a 9 km al Oeste del borde de la caldera, y a 8 km de Pintag. La vertiente del Lisco se encuentra al pie Noreste del Sincholagua, a 8.5 km al Suroeste del borde de la Caldera de Chacana y aproximadamente a 12.5 km al Sureste del poblado de Pintag.

### **1.6.2. MORFOLOGÍA.**

El área de estudio corresponde a la Caldera de Chacana la cual se encuentra en la cresta de la Cordillera Real entre las alturas comprendidas de 5704 a 3171 m.s.n.m., que corresponden a las altitudes del volcán Antisana y la población de Oyacachi respectivamente. El borde topográfico de la caldera presenta una forma irregular alargada de 35 km en dirección N-S por 10 a 15 km en dirección E-O y constituye la parte central y somital del complejo volcánico Plio-Cuaternario Chacana (Beate, 2010). Este borde es reconocible en la parte Norte y Oeste de la caldera cuyas cotas varían entre 4000 a 4300 m.s.n.m., el resto de la caldera ha sido modificado por la acción de la erosión y por centros de emisión volcánica que han formado una serie de lomas y cerros. La glaciación es otro factor modelador de la topografía en la caldera, que ha modificado varias elevaciones y ha formado valles en forma de U, circos, morrenas y valles colgados. Entre los puntos más alto se encuentran cerros y volcanes como: El Yarangala (4492 m), Potrerillos (4360 m), Plaza de Armas (4620 m), Chusalongo (4840 m) y Antisana (5704 m). Varios domos y flujos de lava forman lomas dentro de la caldera y recorren los valles glaciares. En las depresiones se han formado cuerpos de agua importantes como las lagunas de Nunalviro, Yuyos, Boyeros, Loreto, Sucus, Parcacocha, Papallacta, Tumiguina, Santa Lucia, La Encantada y los río de Oyacachi, Papallacta, Tambo, Tumiguina, Chalpi, Blanco y Sucus, cuyas aguas migran hacia el Oriente. Flujos recientes del Antisana han suavizado la topografía en la parte Sur de la caldera, de igual manera ocurre al Norte con flujos de lava que recorren el área de Salve Faccha de Oeste a Este y cuyos centros de emisión se ubican a la altura de la laguna de Nunalviro.

### **1.6.3. VÍAS DE ACCESO.**

La carretera de acceso principal al área de estudio es la carretera Interoceánica Quito-Baeza, la cual atraviesa la Caldera de Chacana desde su borde Noroeste después de Pifo hasta la población de Papallacta al Sureste (ver mapa 2, anexo 1). Esta vía permite el acceso a la zona de Jamanco en el kilómetro 65; una vía de segundo orden lastrada permite el acceso a las Termas Papallacta 2 km al Norte del poblado Papallacta. No existe acceso vial a Cachiyaqu, por lo que desde el caserío El Tambo ubicado en la vía interoceánica se debe tomar la “Ruta del Condor” en rumbo Noroeste para acceder a las fuentes termales Cachiyaqu. A Oyacachi se puede acceder de dos maneras: la primera es tomando la vía a Cayambe y a nivel del poblado Guachalá se toma el desvío hacia Cangahua desde allí 15 km hasta Oyacachi sobre una vía lastrada, la segunda manera es tomando la ruta de segundo orden de 44 km denominado cruce Oyacachi-Papallacta que atraviesa el páramo Salve Faccha, vía que también permite el acceso a la zona de estudio Salve Faccha ubicada en el kilómetro 16 partiendo desde Oyacachi hasta el desvío a la Presa Salve Faccha. Existe una red vial de primer orden en el valle de Tumbaco que permite el acceso a las fuentes termales exteriores a la caldera.

### **1.6.4. CLIMA, FLORA Y FAUNA.**

La zona de estudio se encuentra en las estribaciones y cresta de la Cordillera Real por lo que el clima es muy variable en la zona de estudio. El invierno (época de lluvia) es frío y lluvioso y se extiende desde Junio a Agosto; el verano (época de menos lluvia) se extiende desde diciembre hasta marzo, el resto de meses son de transición entre invierno y verano. Las temperaturas oscilan entre 8.4°C y 22°C en zonas bajas, en el área del páramo las temperaturas son bajas e incluso llegan a 0°C durante la noche (Figura 1.2) y donde existen fuertes vientos y la precipitación anual alcanza los 1525 mm (Allpahuasi, 2011).

Las áreas de interés se encuentran dentro de la Reserva Ecológica Cayambe-Coca (RECC) y la Reserva Ecológica Antisana (REA), aquí se encuentra el Complejo de Humedales Ñucanchi-Turopamba y el Páramo Papallacta. Estas

reservas ecológicas tienen la biodiversidad más alta de entre las áreas protegidas del Ecuador y estas áreas ayudan a la conservación de la flora y fauna.

Las formaciones vegetales pertenecen principalmente a la zona de vida del bosque muy húmedo montano (Lasso, 2009) en donde se encuentran: El páramo de pajonal, el páramo de almohadillas caracterizado por ser más pantanoso y anegado (Figura 1.2), Bosques de *Escallonia* y *Polylepis* conocido como árboles de papel, Bosque Montano Alto (entre los 2.900 y 3.500 m.s.n.m.), Bosque Aliso caracterizado por presentar una densa capa de musgos y abundantes epífitas, y el Bosque Montano (Lasso, 2009). A los alrededores de comunas se encuentran áreas de vegetación creadas por el hombre, como potreros, chacras abiertas en el claro del bosque y bosques secundarios que se encuentran en sucesión en áreas que han sido taladas o en donde se han formado claros por efecto de la naturaleza.

En cuanto a la fauna, se ha registrado 17 especies de mamíferos, 48 especies de aves, 2 especies de anfibios y 435 especies de insectos. Los animales más representativos son: el oso de anteojos (Figura 1.2), el puma, el venado de cola blanca, el ciervo enano, el tapir andino y las aves como el cóndor andino, los colibríes, tangaras y tiranos (Lasso, 2009; Allpahuasi, 2011).

La quema del páramo y del bosque nativo, práctica frecuente en varias poblaciones andinas ha producido la pérdida de achupallas tiernas que son el principal alimento de los osos de anteojos. Por este motivo, el oso andino recurrió a alimentarse del ganado de la zona, hecho que ha conducido a la matanza de varios osos andinos llevándolos al borde de su extinción (Lasso, 2009). De igual manera la desaparición de ganado tierno se le ha atribuido a la presencia de cóndores por lo que la población ha optado por envenenarlos, siendo esta una especie casi extinta pero muy emblemática para el país.





Figura 1. 2. Superior Izquierda. Amanecer en el campamento Cachiyacu, donde se observa una capa de hilo sobre el suelo y tiendas de campaña lo que indica que la temperatura la noche anterior fue inferior a los 0°C. Superior Derecha. Páramo de pajonales intercalados con bosque montano alto en el área de Aguirre (Muestra de agua C2). Inferior Izquierda. Pantanos en el páramo de almohadillas que se deben cruzar para acceder al área de Cachiyacu. Inferior Derecha. Achupallas comidas por osos de anteojos, principal alimento para estos mamíferos.

#### 1.6.5. POBLADOS PRINCIPALES.

Los principales poblados que se encuentran dentro de la caldera son: La Parroquia de Papallacta, La Comuna del Valle del Tambo, La Comuna Jamanca, y la Comunidad de Oyacachi (P.R.A.A; ver Mapa 2, Anexo 1).

Papallacta es la primera población en la entrada a la Amazonía por la vía interoceánica, que cuenta con 806 habitantes blanco-mestizos campesinos que se dedican a la agricultura con la siembra de papas y a la ganadería con producción de leche, además complementan su actividad económica con el turismo enfocado en el Centro Municipal Turístico de Papallacta. Esta parroquia cuenta con escuelas, centros médicos y junta parroquial. La población económica activa se emplea también en labores educativas o relacionadas con las empresas asentadas en la zona (ECOLUZ, EMAAPQ, TERMAS PAPALLACTA, PETROLERAS).

La Comuna de Jamanco está constituida por 56 comuneros, jefes de familia que poseen un territorio comunal de 1650 hectáreas parcelados para cultivo. Su actividad económica se basa en agricultura y pastoreo de ganado. Una parte de su territorio al Oeste de la Laguna Papallacta ha sido utilizado para la construcción del Complejo de Termas Jamanco lo que ha impulsado el turismo en el sector.

La Comunidad Valle del Tambo es un asentamiento poblado indígena de 37 familias y el número de habitantes es cercano a 180 personas. Los jefes de familia son en su mayoría asociados a la Cooperativa San José del Tablón y su territorio comunal consta de 2000 hectáreas donde se desarrolla el pastoreo de ganado de leche y seco, a la agricultura para autoconsumo y a la piscicultura en baja escala, actividad que realizan utilizando aguas del río Tambo las cuales están contaminadas por As debido a la presencia de fuentes termales que se vierten al río (ver literal 7.6); muy pocos habitantes ofrecen servicio de comida.

Oyacachi es una comunidad de indígenas quichuas con apenas 400 habitantes, repartidos aproximadamente en 120 familias que para vivir se dedican a la agricultura de subsistencia, a la elaboración de artesanías en madera de aliso, al turismo y a la ganadería.

A pesar de la cristianización de la población, todavía se cuentan historias de la adoración de cabezas de oso y de danta, se hace mucha referencia a las lagunas de altura, de ahí el nombre de algunas lagunas como la laguna La Encantada (Lasso, 2009).

## **1.7. TRABAJOS PREVIOS.**

La mayoría de estudios realizados en la Caldera de Chacana son vulcanológicos como los de Hall (1977), Pozo (1982), Pérez (1986), Carrasco (1987), Hall y Mothes (2001), Hall et al. (2008) y Villares (2010) entre otros, donde se destacan los estudios de Hall y Beate (1991), Hall y Mothes (2001, 2008) quienes proponen a Chacana como una caldera activa desde el Plioceno Tardío – Cuaternario y señalan que es un centro riolítico Pleistocénico – Holocénico cuyos flancos están

compuestos por ignimbritas de 1 Ma y presenta una actividad efusiva entre 20 y 40 Ka con flujos de lava históricos del siglo XVIII.

En los últimos años con la búsqueda de un recurso geotérmico se han realizado estudios para formular un modelo geotérmico en Chacana. Los estudios relevantes son referenciados a continuación.

- Cumbal et al. (2006) publican un estudio acerca del origen del arsénico en las aguas y sedimentos de la laguna de Papallacta, encontrando que las concentraciones de arsénico en las aguas termales del río Tambo y Sucus oscilan entre 1.1 y 7.8 ppm y que éstas son las principales fuentes naturales de arsénico de la laguna de Papallacta.
- Beate (2009) presenta la geología de la Caldera de Chacana, generando un mapa 1:100000, donde incluye la geología, zonas de alteración hidrotermal y fuentes termales de Oyacachi, Papallacta, Jamanco, Oyacachi y fuentes exteriores de la caldera.
- Inguaggiato et al. (2010) publican un estudio de la caracterización isotópica y geoquímica de los fluidos descargados desde el arco volcánico ecuatoriano, donde incluye las fuentes termales internas y exteriores de la Caldera de Chacana. Señalando que las aguas de las fuentes termales de Chacana son bicarbonatadas alcalinas caracterizadas por altos contenidos de CO<sub>2</sub> disuelto y He, con firmas isotópicas características de un arco volcánico activo.
- Beate et al. (2010), publican el estudio del Prospecto Geotérmico Cachiyacu en Chacana, donde realizan un bosquejo conciso de la evolución y geología regional de la Caldera de Chacana con énfasis en el área de Cachiyacu. Publican datos geoquímicos de las fuentes termales de Chacana y realizan un modelo geotérmico preliminar para el área de Cachiyacu, donde asumen que el reservorio se encuentra en secuencias volcánicas pre-caldera de 1 a 2 km de espesor y estiman temperaturas del reservorio entre 210 a 300°C, en exceso a 200°C.
- Villares (2010) realiza un estudio geovulcanológico de la zona Sur de la Caldera de Chacana, generando un mapa geológico 1:25000 donde incluye

zonas de alteración hidrotermal y fuentes termales en Cachiyacu y Jamanco, además propone un potencial geotermoeléctrico hipotético/especulativo de 142 MWe para Jamanco y de 171 MWe para Cachiyacu.

- Beate y Salgado (2010) realizan una actualización de su publicación del 2005 acerca del estado actual de la geotermia del Ecuador o resumen – país, ubicando a Chacana como el tercer prospecto geotérmico en importancia para país por detrás de Tufiño y Chachimbiro e indican que existe una importante anomalía geotérmica en Chacana evidenciada por la persistente actividad volcánica cuaternaria de la caldera que presenta extrusión de magmas dacíticos y riolíticos.
- Beate (2010) para el Ministerio de Electricidad y Energía Renovable (MEER) realiza el “Plan de Aprovechamiento de los recurso geotérmicos en el Ecuador” proponiendo un plan de acción a corto plazo para los prospectos Chacana-Jamanco/Chacana-Cachiyacu, Chalpatán, Chalupas, Guapán, Chachimbiro y Tufiño y donde detalla los Prospectos Geotérmicos de Cachiyacu, Jamanco y Oyacachi y considera como tal el Prospecto Geotérmico Chacana cuyo reservorio alojaría  $107.7 \times 10^{18}$  Joules, con un potencial de energía eléctrica hipotética/especulativa de 1480 MWe, en un lapso de 30 años.

## **1.8. ASPECTOS CONCEPTUALES.**

A continuación se presenta un resumen de los conceptos relacionados a energía geotérmica. Estos conceptos fueron obtenidos de Sierra y Pedro (1998), Dickson y Fanelli (2004) y Orche (2011).

### **¿Qué es la Energía Geotérmica?**

Es la energía calorífica contenida en el interior de la Tierra, que se evidencia por la surgencia de agua caliente en manantiales termales, fumarolas y erupciones volcánicas. El término energía geotérmica es utilizado para indicar la porción de calor de la Tierra que puede o podría ser recuperado y explotado por el hombre.

Las técnicas actuales permiten extraer el calor del suelo o del agua del subsuelo por debajo de 350 a 400°C hasta 5000 metros de profundidad, sea cual sea la temperatura a la que se encuentre, por lo tanto cualquier terreno con o sin agua, es un yacimiento geotérmico potencial.

### **Fuentes Internas del Calor Terrestre.**

Las placas litosféricas se desplazan lentamente sobre la Astenósfera plástica, separándose o colisionando unas con otras. En los bordes de estas placas y en su interior, cuando el espesor está anómalamente adelgazado, se presentan importantes anomalías térmicas que dan lugar a los principales yacimientos geotérmicos de alta temperatura (Figura 1.3).

Así pues, las fuentes de la energía geotérmica son las siguientes:

- *Desintegración de isótopos radioactivos.* Se estima que alrededor del 50% del flujo total de calor procede de la desintegración de isótopos radioactivos de vida larga presentes en la corteza y el manto.
- *Calor inicial.* Energía residual liberada durante el período de formación de la Tierra, hace 4500 millones de años, y que todavía está llegando a la superficie.
- *Movimientos diferenciales.* Energía liberada por las fricciones tectónicas y el calor latente liberado por la cristalización de las rocas fundidas al enfriarse cuando se acercan a la superficie.
- *Calor latente de cristalización del núcleo externo.* En la zona de contacto o transición entre el núcleo interno sólido y el externo líquido existe una continua cristalización generando una importante fuente de calor.



**Figura 1. 3. Placas litosféricas, dorsales oceánicas, fosas oceánicas, zonas de subducción y campos geotérmicos.1) Campos geotérmicos que producen electricidad; 2) Dorsales meso-oceánicas cruzadas por fallas transcurrentes 3) Zona de subducción, donde la placa subducida se inclina hacia abajo y se recicla en el manto (Dickson y Fanelli, 2004).**

### **Gradiente Geotérmico.**

La cantidad de calor que llega a la superficie cada segundo se estima en  $42 \times 10^{12} \text{ J}$ , de los cuales el 15% proviene de la corteza, el 59% de manto y el restante 26% del núcleo. Dicho flujo conductivo produce un gradiente geotérmico cuyo efecto en la temperatura de la superficie permite calcular la del subsuelo profundo. El valor medio del gradiente a la escala del planeta es de  $2-4^\circ \text{ C}$  por cada 100 metros de profundidad. Este flujo no es regular puesto que hay determinadas zonas en donde su valor es anómalamente elevado, superando en diez o más veces el flujo medio. Estas zonas coinciden con fenómenos como actividad sísmica elevada, formación de cordilleras en épocas geológicas recientes y actividad volcánica actual que evidencian la liberación de la energía interna de la Tierra (Figura 1.4).

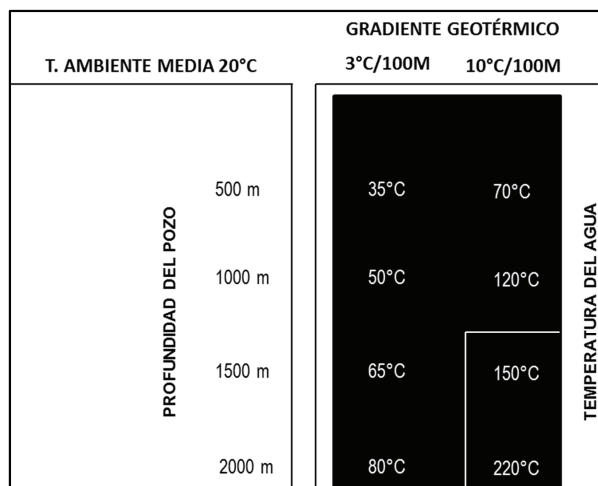


Figura 1. 4. Temperatura correspondiente a distintos gradientes (Orche, 2011).

### Recursos Geotérmicos.

La corteza terrestre puede dividirse en áreas geológicamente inestables de flujo calórico alto y en áreas estables de flujo calórico bajo. Los recursos geotérmicos ubicados en cada una de ellas serán por lo tanto de alta temperatura cuyos fluidos geotérmicos en forma de agua-vapor son utilizados para generar electricidad en centrales apropiadas y de baja temperatura donde el calor del agua se aprovecha directamente. El uso del recurso geotérmico está limitado a áreas en donde las condiciones geológicas permiten que un elemento transmisor (agua o vapor de agua) lleve calor a la superficie o cerca de ella.

### Utilización de la Energía Geotérmica.

Los usos del agua caliente natural son muy antiguos y el empleo muy variado. Se conoce el uso de aguas termales por parte de los etruscos, romanos, griegos, turcos, mejicanos, japoneses y maoríes desde el siglo XVIII a la actualidad. El empleo de las aguas termales pasa por la balneología, servicio doméstico, extracción de minerales, calefacción de viviendas y generación eléctrica que es la forma de utilización más eficiente (costo/beneficio alto) de los recursos geotérmicos. En la actualidad existe gran cantidad de usos de la energía geotérmica en función de la temperatura del agua (Figura 1.5).

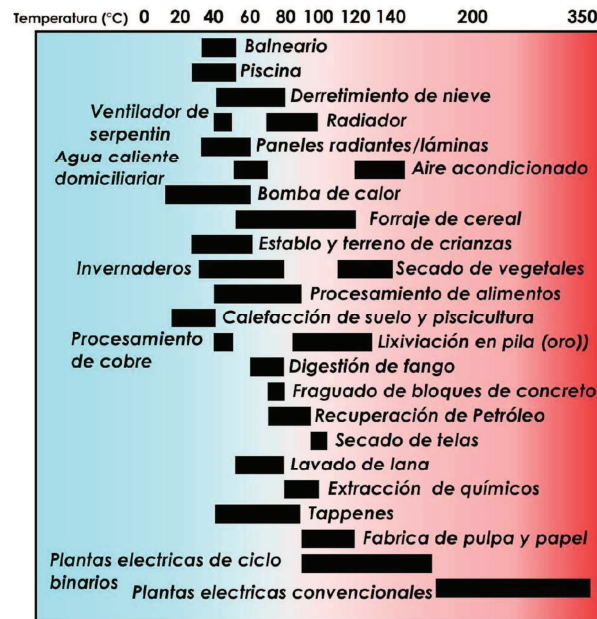


Figura 1. 5. Diagrama que muestra la utilización de los fluidos geotérmicos (Dickson y Fanelli, 2004).

## 1.9. DESARROLLO DE ESTE TRABAJO.

En los siguientes capítulos se presenta los siguientes temas:

- Resumen del Marco Geológico Regional y Local de la Caldera de Chacana.
- La metodología aplicada durante el trabajo de campo y para la obtención y tratamiento de datos.
- La ubicación de las fuentes termales en la Caldera de Chacana y sus características físico-químicas y geoquímicas.
- La relación entre las fallas geológicas y lineamientos de la Caldera de Chacana con las fuentes termales y alteraciones hidrotermales.
- La evaluación de la descarga de calor en la Caldera de Chacana y el uso actual del recurso geotérmico en el área de estudio.
- Por último adjunta anexos que respalda los datos y resultados obtenidos.



## **CAPÍTULO II.**

### **2. MARCO GEOLÓGICO REGIONAL Y LOCAL DE LA CALDERA DE CHACANA.**

#### **2.1. INTRODUCCIÓN.**

En este capítulo se presenta un resumen del marco geológico regional y local de la Caldera de Chacana que involucra una breve descripción de: las regiones naturales del Ecuador, la geología de la Cordillera Real sobre la cual se asienta la caldera de Chacana, de las Estructuras Regionales y del Marco Geodinámico del Ecuador. Además se realizará un resumen de la litoestratigrafía presente en la Caldera de Chacana a partir de trabajos geológicos anteriores realizados en la caldera.

#### **2.2. MARCO GEOLÓGICO REGIONAL.**

El Ecuador se encuentra en la parte Noroeste de Sudamérica y consiste de cuatro regiones naturales de las cuales tres están en la parte continental y una es insular.

La Cuenca Oriente se ubica en la región amazónica del Ecuador entre la cordillera andina y el escudo brasileño. Está constituida por una región de tierras bajas al Este que es la cuenca propiamente dicha y una zona subandina hacia el Oeste. La cuenca Oriente se encuentra rellena por 324 a 1000 metros de espesor de sedimentos marinos cretácicos, seguidos por 4500 metros de espesor de sedimentos marinos someros y facies de agua dulce del Terciario (Tschopp, 1953). La zona subandina alcanza 2000 metros de altura donde se exponen las unidades que rellenan la cuenca oriente. Esta zona comprende el Levantamiento Napo al Norte y el Levantamiento Cutucú al Sur (Baldock, 1982) divididas por la depresión Pastaza.

La Zona Andina es la región constituida por una cadena montañosa de 650 km de largo y 150 km de ancho que atraviesan al Ecuador longitudinalmente y está dividida en dos cordilleras paralelas. La Cordillera Real está constituida por una cadena de rocas metamórficas de edad paleozoica a mesozoica tempranas y por terrenos alóctonos del Cretácico Superior (Litherland et al., 1994), afectadas por varios procesos orogénicos e intruidas por complejos de granitoides de tipo S e I (Aspden et al., 1992). La Cordillera Occidental está constituida en su base por rocas máficas y ultramáficas del Cretácico Tardío de afinidad geoquímica a un fondo oceánico (Vallejo, 2007), acrecionadas en el Cenozoico Temprano (Litherland et al., 1994), cubiertas por secuencias de rocas basálticas a andesíticas y volcano-sedimentos del Eoceno Temprano y posteriormente intruidas por granitoides del Terciario. La cordillera de los Andes del Ecuador presenta una altura entre 3000 a 4000 metros, la mitad Norte presenta un arco volcánico continental constituido por 68 volcanes entre no activos, de actividad holocénica y actividad histórica (Hall et al., 2008), algunos de ellos alcanzan los 6000 metros de altura. La parte Sur no presenta un arco volcánico activo debido a un "flat slab" de la Placa Nazca bajo el continente y que se extiende hasta el Perú (Gutscher, 1999). La actividad terciaria y cuaternaria cubre gran parte de las dos cordilleras y rellena el valle interandino que se forma entre ellas, el cual es una depresión topográfica que se desvía hacia el Oeste en su parte Sur, en dirección al Golfo de Guayaquil.

Al Suroeste del Ecuador se encuentra el Bloque Amotape-Tahuín (BAT), constituido por rocas metamórficas del Precámbrico (las más antiguas del país), intrusiones y rocas metamórficas del Paleozoico y ofiolitas del Cretácico (Feininger, 1987).

La costa es una cuenca ante-arco, región de tierras bajas que se encuentra entre los Andes y el Océano Pacífico, constituida por un basamento de pillow lavas de afinidad geoquímica a un piso oceánico denominado Bloque Piñón (Luzieux, 2006, Goosens y Rose, 1973), sobreyacidas por sedimentos pelágicos, rocas volcanoclásticas y rocas de afinidad a un arco de isla (Jaillard et al., 1995; Reynaud et al., 1999).

A 950 km sobre el océano pacífico, al Oeste de la costa del Ecuador se encuentran la región insular constituida por las Islas Galápagos, que son producto de un punto caliente bajo la Placa Nazca y cuya historia geológica se refleja en la Cordillera de Carnegie (Feighner y Richards, 1994).

## **2.2.1. GEOLOGÍA DE LA CORDILLERA REAL.**

### **2.2.1.1. Terrenos Metamórficos de la Cordillera Real (Basamento Metamórfico).**

Los centro volcánicos de la Cordillera Real sobreyacen cinco Terrenos Lito-Tectónicos (Figura 2.1) de edad Paleozoica y Mesozoica que constituyen el basamento de la región, separados por cuatro fallas regionales. Estos terrenos son:

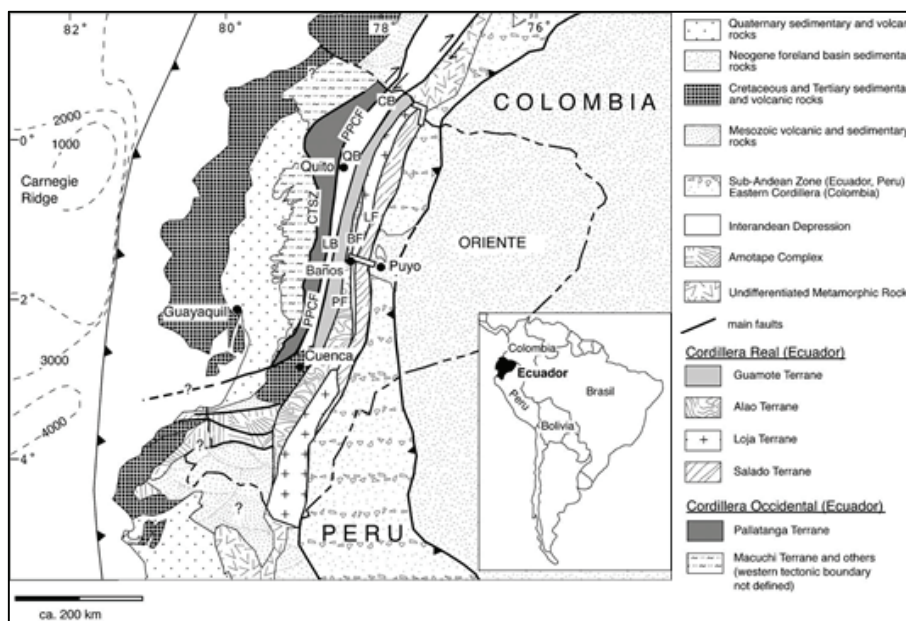
**Terreno Guamote.-** Se encuentra definido entre la falla Ingapirca al Este y la falla Peltetec al Oeste. Constituido por cuarcitas y pizarras de la Subdivisión Punín y ortocuarcitas intercaladas con filitas de la Subdivisión Cebadas y Guasuntos (Litherland et al., 1994).

**Terreno Alao.-** Se encuentra definido entre el Frente Baños al Este y la falla Peltetec al Oeste. Constituido de un cinturón de rocas verdes intercaladas con esquistos verdes, grafitosos y pelíticos de la Subdivisión Alao-Paute, metasedimentos de la Subdivisión El Pan; metaturbiditas y metavolcánicos de la unidad Maguazo y el cinturón ofiolítico a lo largo de la Falla Peltetec (Litherland et al., 1994).

**Terreno Loja.-** Se encuentra limitado por el Frente Baños al Este y por la Falla Llanganates al Oeste. Constituido por cuarcitas y filitas negras de la Subdivisión Chiguinda, esquistos pelíticos con moscovita y granate de la Subdivisión Agoyán, esquistos anfibolíticos de la Subdivisión Monte Olivo que cortan a manera de sill a los sedimentos pre-metamórficos Agoyán y Chiguinda (Litherland et al., 1994). Estas subdivisiones están intruidas por granitos tipo S, Tres Lagunas y Sabanillas (Aspden et al., 1992a, b).

**Terreno Salado.-** Se encuentra definido entre las fallas Llanganates y Cosanga-Méndez al Este y Oeste respectivamente. Constituido por un cinturón de rocas verdes andesíticas y metasedimentos de la Subdivisión Upano, metasedimentos de la Subdivisión Cuyuja y mármoles de la Subdivisión Cerro Hermoso (Litherland et al., 1994).

**Terreno Amazónico.-** Se define como el borde occidental del cratón amazónico pero no es parte del cratón, limitado hacia el Oeste por la Falla Cosanga-Méndez y al Este por la Cuenca Oriente. Constituido por volcánicos no diferenciados de la Unidad Misahualli, metasedimentos continentales de la Unidad Isimanchi y secuencias volcano sedimentarias continentales y marinas de la Unidad Piuntza. Estas secuencias son intruidas por dioritas y granodioritas tipo I del Complejo de Batolitos Zamora (Aspden et al., 1992b).



**Figura 2. 1. Mapa Geológico simplificado del Ecuador. Muestra los Terrenos Tectono-estratigráficos de la Cordillera Real y Cordillera Occidental, también la localización de la Depresión Interandina y la zona subandina del tras-arco. Fallas: BF, Falla Baños; CTSZ, Zona de Cizalla Chimbo-Toachi; LF, Falla Llanganates; PF, Falla Pelitetec; PPCF, Falla Pallatanga-Pujilí-Calacalí. Cuencas: CB, Cuenca del Chota, LB, Cuenca Latacunga, QB, Cuenca de Quito (Spikings y Crowhurst, 2004).**

### 2.2.1.2. Terreno Pallatanga (Basamento Océánico).

Este terreno no se expone en la Cordillera Real, pero se asume como parte del basamento de la Caldera de Chacana (Villares, 2010). El límite Este del terreno, al Norte de los 2°S es la falla Calacalí-Pujilí-Pallatanga (Aspden y Litherland,

1992) y su límite al Oeste es la falla Chimbo-Toachi (Kerr, 2002). Se define como pillow lavas basálticas, hialoclastitas, doleritas con secuencias de secuencias volcánicas y sedimentarias, cubiertos por abanicos turbidíticos y brechas con conglomerados de la Formación Silante (Vallejo, 2007). De acuerdo a la geoquímica el Terreno Pallatanga presenta una afinidad a un plateau oceánico de edad cretácica entre  $123\pm 7$  Ma y  $90\pm 9$  Ma (Mamberti et al., 2003), el cual colisionó contra el margen ecuatoriano en el Campaniano entre 83 a 74 Ma (Kerr, 2002).

### 2.2.2. VOLCANISMO TERCIARIO.

Durante el Mioceno el volcanismo fue activo en el Norte de los Andes, desde Colombia hasta el Perú, (Barberi et al., 1988; Lavenu et al., 1992). Un cambio importante ocurrió hace 5 Ma, donde la actividad volcánica se detuvo en la parte Sur del país, mientras que en la parte Norte aparentemente nunca se detuvo el volcanismo. Las rocas volcánicas del arco ecuatoriano se clasifican como andesitas básicas, andesitas y dacitas calco-alcalinas, con escasos basaltos y riolitas, que presenta un enriquecimiento general en MgO así como en Ni y Cr, un enriquecimiento relativo en Nb y un empobrecimiento generalizado en tierras raras pesadas (HREE) e Y, característica que ha llevado a proponer un carácter adakítico para el magmatismo ecuatoriano (Bourdon et al., 2003a; Bourdon et al., 2003b; Samaniego et al., 2005).

**Formación Pisayambo.-** Son secuencias volcánicas constituidas por piroclastos en su mayoría son brechas, tobas y lavas en la base y flujos lávicos andesíticos masivos en la parte superior (Bristow y Hoffstetter, 1975; Baldock, 1982), que afloran sobre las crestas de las Cordillera Occidental y Real. Dataciones realizadas por Barberi et al. (1988) sugieren que la parte basal de la Formación Pisayambo tiene 6-5 Ma de edad.

### 2.2.3. VOLCANISMO CUATERNARIO.

Este volcanismo es característico por la presencia de numerosos estratovolcanes cuyos productos volcánicos varían en rangos calco-alcalinos, estos volcanes en el Ecuador se distribuyen en tres franjas lineales de dirección Norte-Sur. Tanto la

franja occidental como la central son casi paralelas, a diferencia de la tercera franja que se encuentra sobre la Cordillera Real que no presenta un patrón de distribución definido (Hall y Beate, 1991).

**Formación Cangahua.-** Es producto de la actividad volcánica producida durante la segunda glaciación, que rellena la depresión interandina caracterizado como una toba eólica (Sauer, 1965). Consiste de gran parte de ceniza y polvo volcánico, compuesto por vidrio volcánico, pómez, cristales de plagioclasa, augita, biotita horblenda y escasos fragmentos de líticos (Sauer, 1965; Vera y López 1986). La fase principal de depositación parece haber sido durante el Pleistoceno, pero la redeposición o depositación renovada es evidente en el Holoceno (Bristow y Hoffstetter, 1977).

#### **2.2.4. VOLCANISMO ACTUAL.**

Los volcanes sobre la Cordillera Real han sido más activos durante el Holoceno. Hall y Beate en 1991 consideran al menos 26 edificios volcánicos como potencialmente activos. Entre la Caldera de Chalupas y el Complejo Volcánico Chacana se identifican edificios volcánicos jóvenes riolíticos. El Cotopaxi y Tungurahua han sido periódicamente activos en intervalos entre 100 a 150 años (Hall et al., 2008), siendo la última erupción del primero en 1880 y el segundo es activo actualmente. Mientras que el Cayambe y Antisana presenta periodos de erupción menos frecuentes, los volcanes Sangay y Reventador presentan periodos de recurrencia similares a los anteriores. Los productos más jóvenes de erupciones varían entre altos y bajos contenidos de sílice en andesitas de afinidad calco-alkalina, aunque se han reportado abundantes dacitas y riolitas en los volcanes Cayambe y Cotopaxi.

#### **2.3. MARCO GEODINÁMICO ACTUAL.**

Evidencia global y regional han determinado que la fragmentación a principios del Mioceno de la Placa Farallón en las Placas Cocos y Nazca (Lonsdale, 2005) ha formado un sistema de interacción entre las Placas Nazca, Caribe, Cocos y Sudamericana que controla la deformación cortical, la alta sismicidad y el

volcanismo en el Bloque Norandino (Figura 2.2). La Placa Nazca converge a una velocidad de aproximadamente 6.0 cm/año con la Placa Sudamericana en zona Norte de Sudamérica (Schellart et al., 2007). El estado de esfuerzos en la parte Sur de la latitud 5°N es homogéneo y presenta una régimen compresivo E-W, produciendo deformación a escala crustal (Ego, 1996).

La influencia del Ridge de Carnegie se evidencia en la deformación sísmica tectónica y en arco volcánico del país (Gutscher et al., 1999). Su subducción y prolongación se evidencia por levantamiento de terrazas marinas y terremotos marinos Pleistocénicas (Cantalamesa y Di Celma, 2004). Las tasas de levantamiento frente al eje del Ridge de Carnegie en la zonas costera varían entre un mínimo de 0.10 mm/año a un máximo de 0.42 mm/año (Pedoja et al., 2006). La segmentación geodinámica y la geoquímica anómala del arco volcánico implica uno o más segmentos litosféricos en la prolongación de Carnegie lo que justifica la producción de magmas adakíticos (Gutscher et al., 1999).

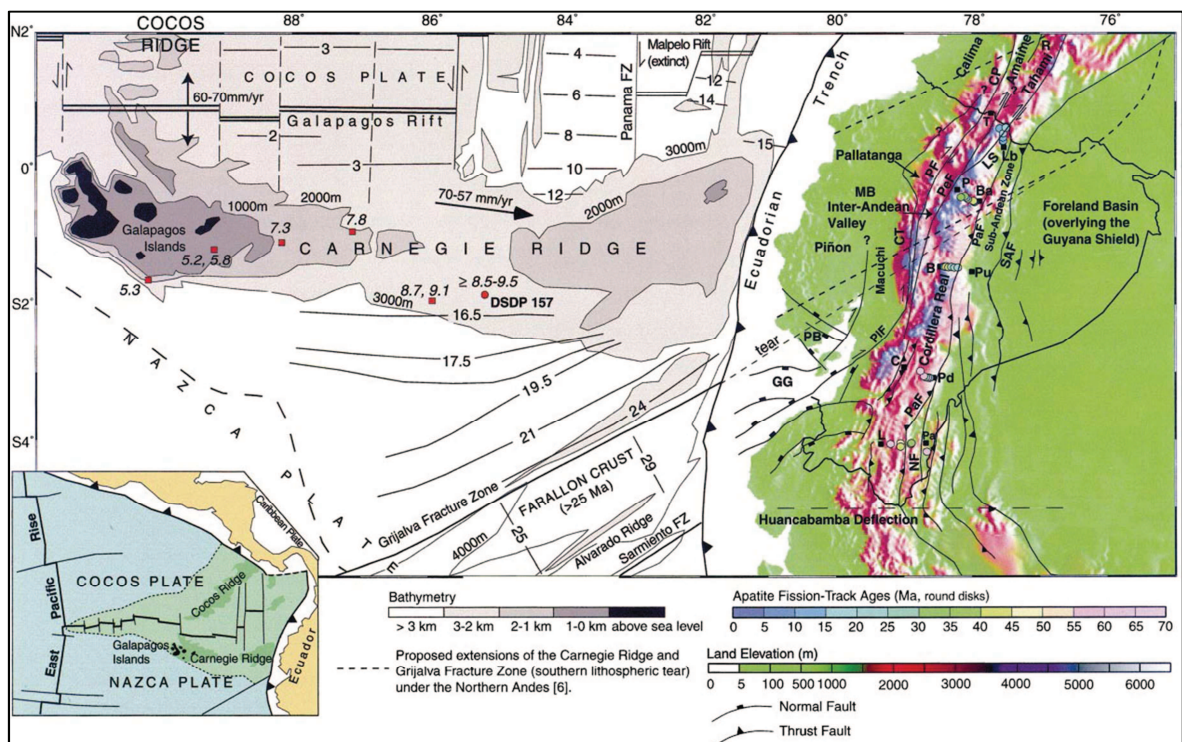


Figura 2. 2. Modelo de elevación Digital de los Andes Ecuatorianos. Abreviaturas: CP, Falla Cauca; CT, Zona de Cizalla Chimbo-Toachi; GG, Golfo de Guayaquil; LS, Falla La Sofía; MB, Cuenca de Manabí; NF, Falla Nangaritzá; PB, Cuenca Progreso; PaF, Falla Palanda; PeF, Falla Peltetec; PF, Falla Pujilí; PIF, Falla Pallatanga ; R, Falla Romeral; SAF, Falla Sub Andina. (Spikings et al., 2001).

Los principales elementos estructurales consisten en elementos tectónicos y neotectónicos que controlan la forma de los Andes Ecuatorianos y los Valles Interandinos. Los principales sistemas tectónicos son: La Falla Pallatanga (Figura 2.2) que se conecta al Norte con el sistema Calacalí-Pujilí-Palenque y al Sur con la zona de fallas Guayaquil que controlan la depositación de sedimentos en el Golfo de Guayaquil (Lavenu, 1994; Benítez, 1995). El Frente Baños es una sutura cuya expresión actual es la Falla Baños (Figura 2.1) y que se relaciona con la Falla Las Aradas en el Perú (Aspden et al., 1992a). La Sutura de Peltetec (Figura 2.2) es una estructura por la cual se acrecionó el Terreno Guamote (Aspden et al., 1997).

Estudios de neotectónica realizado por Soulas et al. (1991) indican la presencia de tres sistemas mayores de tipo dextral sinistral que se encuentran entre la parte Norte de Ecuador y Sur de Colombia. Estos sistemas son: El sistema mayor dextral que involucra los segmentos Algeciras, Sibundoy y Afiladores de Colombia, prolongándose hacia el Ecuador en el segmento Chingual y la Zona Transpresiva Baeza los cuales atraviesan el área donde se asienta la Caldera de Chacana (ver literal 6.2) y continua hacia el Sur con los segmentos Macuchi y Pallatanga. El Sistema sinistral Cauca-Patia en Colombia (Figura 2.2) que se prolonga al Norte de Ecuador en los segmentos Guachucal-Cumbal, Tulcán y San Isidro. El tercer sistema es el frontal de pie de monte andino oriental de carácter inverso e involucra las fallas de la Cordillera Oriental de Colombia y a las fallas del frente subandino del Ecuador.

## **2.4. GEOLOGÍA LOCAL DE LA CALDERA DE CHACANA.**

### **2.4.1. GEOMORFOLOGÍA.**

Los rasgos geomorfológicos característicos de la caldera son: El borde topográfico, los flancos exteriores y el área central de la caldera. En la Figura 2.3 se muestran estos rasgos y morfología glaciaria distinguida durante el análisis fotogeológico realizado en este estudio.



El borde topográfico de la Caldera de Chacana mide 35 km de largo (N-S) por 10-15 km de ancho (E-W). En el borde Norte de la caldera los relieves como el Cerro Pucará Chico, Loma Yunguillas, Loma Corrales Pugro alcanzan cotas entre 3300 y 4300 metros de altura. En el borde occidental los rasgos morfológicos más característicos son: La Cordillera Yanahurco, las Lomas Tabla Rumi, el Singunay, la Cadena Shayana, Gumanichupa, Machipungo, Quincharumi, Predicador y Plaza de Armas cuyas cotas están entre 4000 y 4500 m.s.n.m., (este borde sirve como el divorcio continental de aguas). El borde oriental ha sido afectado por erosión y fallamiento, y es poco distinguible, en este destacan los Cerros Chimbourco y Cufurcu cuyas cotas varían entre 4000 a 4200 m.s.n.m. El borde Sur destaca por el estratovolcán Antisana con una altura de 5704 m.s.n.m. y con menos altura destacan las lomas de Chusalongo Grande y Sunfohuaycu.

Los flancos externos de la caldera se inclinan entre 15° a 20° y cuentan con hasta 18 km de longitud de sucesiones volcánicas de andesitas, dacitas, riolitas y vitrófiros. Esta sucesión al Norte llega hasta volcán Pambamarca, al occidente desaparece bajo el valle interandino y al Sur llega hasta el volcán Sincholagua.

Dentro de la caldera se encuentran distribuidas otras elevaciones como las lomas de Baños, Ventanillas, Chaupiruco, Salazar Sucho, Cojanco, Yanaurco, San Clemente, El Tambo y Juña; muchos de estos son domos, flujos y remanentes de edificios volcánicos que han sido afectados por glaciación y erosión, además se presentan centros de emisión como los de Yarangala y Callejones al Norte, Potrerillos y Sucus al centro, y al Sur el del flujo Papallacta.

Entre los ríos importantes están el Oyacachi, Chalpi, Tambo, Tumiguina y Blanco, cuyas aguas desembocan en el río Papallacta y migran hacia la Cuenca Oriente. Los sistemas lagunares como Yuyos-Boyeros, Nunalviro, Mogotes, Loreto, Sucus Papallacta y Parcacocha se concentran en la zona meridional Norte de la caldera. Al Norte se distingue la laguna de Angas y al Sur las Lagunas de Tumiguina y Santa Lucía.

Los periodos de glaciación han dejado rasgos característicos como valles colgados, circos y morrenas laterales, frontales y terminales que se encuentran

distribuidas en los valles del Tambo, Cachiyacu, Salve Faccha y Oyacachi e intercaladas con bosques, pajonales y pantanos que suavizan la topografía.

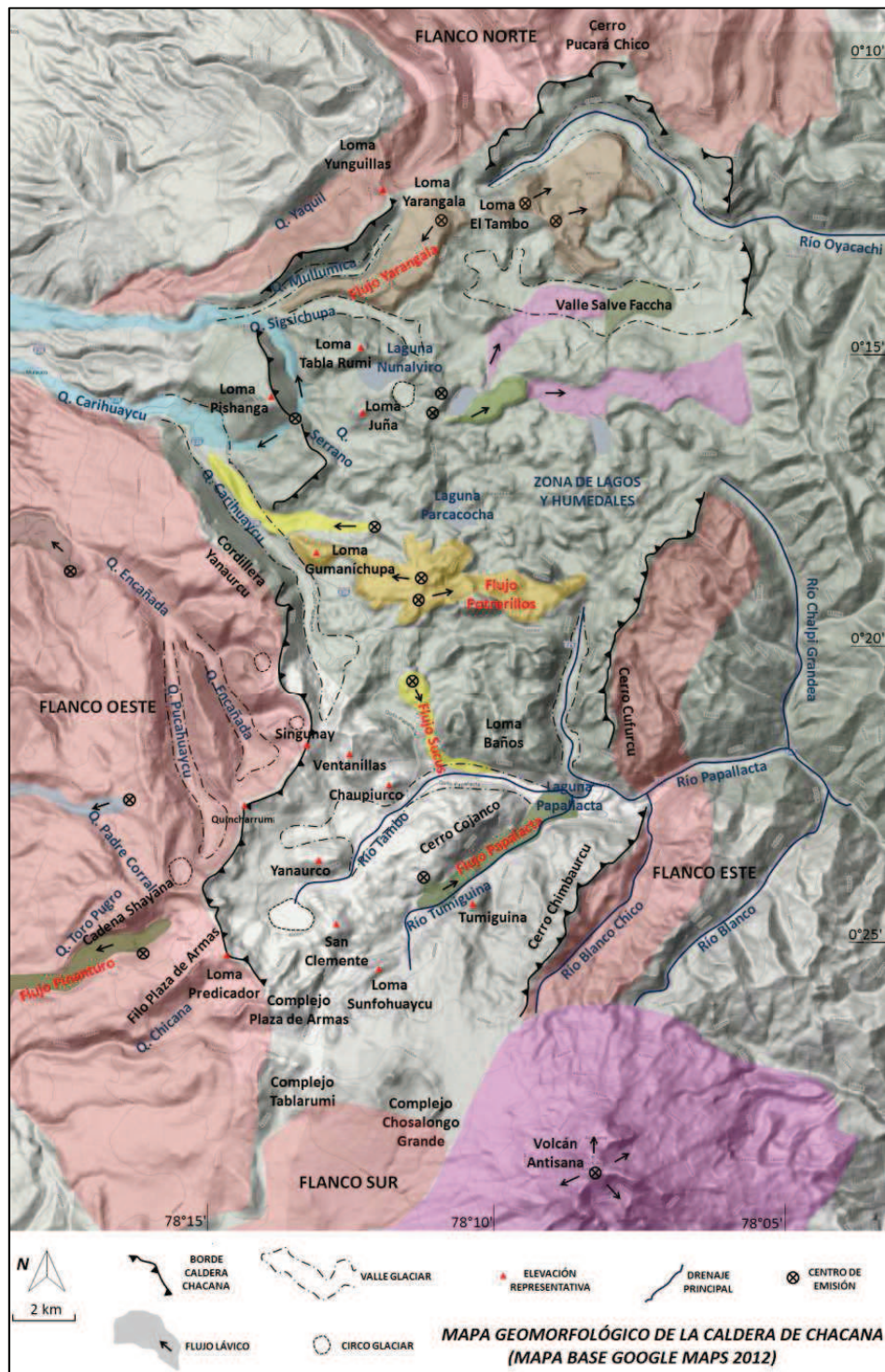


Figura 2. 3. Geomorfología de la Caldera de Chacana. (Modificado de CELEC EP., 2012)

## 2.4.2. ESTRATIGRAFÍA DE LA CALDERA DE CHACANA.

Para la descripción de esta sección se ha considerado la siguiente cartografía geológica con su respectiva descripción, dada en los trabajos escritos adjuntos a cada mapa:

- MAPA GEOLÓGICO DE LA CALDERA DE CHACANA, 1:100000, WGS 1984 zona 17S, (PROYECTO GEOTÉRMICO CHACANA, ELECTROGUAYAS S.A. Julio 2009, Beate et al., 2009).
- MAPA GEOLÓGICO DE LA ZONA SUR DE LA CALDERA DE CHACANA, 1:25000, WGS 1984 zona 17S (TESIS DE GRADO, Villares, 2010)
- MAPA GEOLÓGICO PROYECTO GEOTÉRMICO CHACANA, 1:25000, WGS 1984 zona 17S (CELEC EP., 2012).

La Figura 2.4 muestra un resumen de las unidades estratigráficas de la Caldera de Chacana en orden cronológico.

### 2.4.2.1. Unidades del Basamento.

El basamento de la Caldera de Chacana está constituido por tres unidades de rocas que son: Basamento Metamórfico, Basamento Oceánico del Terreno Pallatanga y Formación Pisayambo.

#### *Unidad 1.1 Basamento Metamórfico.*

Constituido por rocas metamórficas del Paleozoico al Mesozoico, que afloran en la población de Papallacta y en el margen Este del río Papallacta. Litológicamente constituyen granitos gnéisicos de cuarzo azul del Granito Tres Laguna, esquistos de granate-moscovita de la Subdivisión Agoyán y esquistos pelíticos grafitosos y gneises de la Subdivisión Cuyuja (Villares, 2010).

#### *Unidad 1.2. Basamento Oceánico.*

La descripción litológica e interpretación de este terreno se encuentra en el literal 2.2.1.2. Se considera como el borde estructural occidental de la caldera hacia el Oeste (Villares, 2010).

### Unidad 1.3. Formación Pisayambo.

Esta se encuentra presente en el borde Suroeste del flanco exterior de la Caldera, en la Quebrada Chacaurcu, al Sur de la laguna Tipo Pugro y Secas en la vía que esta entre Pintag y el Antisana (Villares, 2010), también aflora a 9 km al Oeste de la caldera en la Hacienda Pinanturo bajo las brechas Niñarumi (Pérez, 1986).

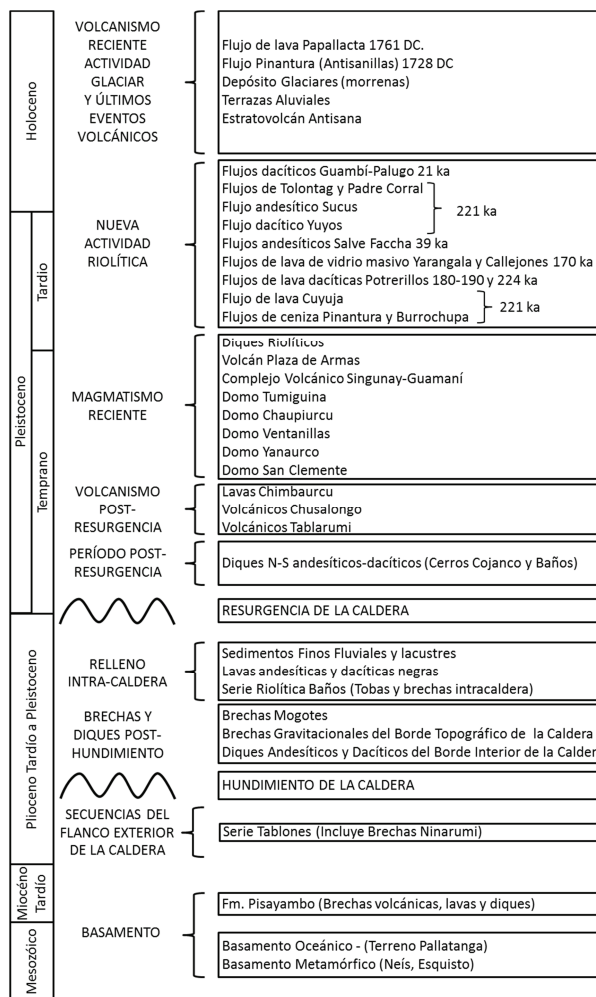


Figura 2. 4. Resumen de la Estratigrafía de la Caldera de Chacana. (Modificado de CELEC EP., 2012)

#### 2.4.2.2. Unidades volcánicas que conforman los Flancos Externos del Edificio Chacana (Serie Tablones).

Cubren de manera radial la caldera con más de 1250 metros de espesor. Sobre esta serie al Este de la caldera se ubican las fuentes termales de Tolontag “E9” y El Lisco “E19” (ver Figura 1.1). Esta serie está conformada por ignimbritas, tobas soldadas, lavas y tobas de composición dacítica a riolítica (Hall et al., 2008).

### 2.4.2.3. Hundimiento de la Caldera y Unidades Post-Hundimiento.

Rocas asociadas al hundimiento de la Caldera son: Diques Andesíticos y Dacíticos del Borde Interior de la Caldera, Brechas Gravitacionales del Borde Topográfico de la Caldera y Brechas Mogotes.

*(Unidad 3.1) Diques Andesíticos y dacíticos del Borde Interior de la Caldera.*

Afloran en el ByPass de Papallacta junto al límite con rocas metamórficas (CELEC EP., 2012), también aparecen en la carretera interoceánica en la Quebrada Carihuaycu, en la salida del túnel Quito (Beate, 2009). Constituyen andesitas y dacitas de grano fino de color gris claro, medio y verduzco a veces con fenocristales de plagioclasa (CELEC EP., 2012), formados por el emplazamiento de magma en las cavidades y estructuras por donde se produjo el colapso de la caldera (Villares, 2010).

*(Unidad 3.2) Brechas Gravitacionales del Borde Topográfico de la Caldera.*

Aflora en ByPass Papallacta cerca al río Tumiguina cortados por los diques andesíticos y dacíticos descritos anteriormente (CELEC EP., 2012). Constituidas por clastos angulares y subangulares de andesitas, dacitas, riolitas, tobas y líticos metamórficos. Se propone que esta unidad está sobre el basamento metamórfico y en contacto lateral con las secuencias volcánicas que forman los flancos exteriores de la caldera (Villares, 2010).

*(Unidad 3.3) Brechas Mogotes.*

Esta unidad se encuentra cartografiada desde el sector de Mogotes hasta Papallacta (Beate, 2009; Villares, 2010). Se presentan como escombreras polimícticas masivas y competentes, constituidas por clastos volcánicos andesíticos, dacitas negras, dacitas grises, andesitas porfíricas, riolitas, tobas, obsidiana y cuarzo, algunos afloramientos presentan una leve alteración propilítica (Villares, 2010; CELEP EP., 2012).

#### 2.4.2.4. Unidades que conforman el Relleno de la Caldera.

Está constituida por tres unidades que son: La inferior y más vieja que la Serie Riolítica Baños, la intermedia que son Lavas Andesíticas y dacíticas negras y la superior que son Sedimentos Lacustres.

##### *(Unidad 4.1) Serie Riolítica Baños “SRB”*

Se encuentra expuesta en el túnel Baños a 3700 m.s.n.m., donde se observa que ha sufrido una extensa alteración hidrotermal (Hall et al., 2008), también se encuentran en la carretera antigua hacia la Laguna Papallacta y existen afloramientos aislados en el Cerro Cojanco (ver Figura 6.4). En la vía Interoceánica existen afloramientos de rocas piroclásticas donde subyacen a las lavas andesíticas y dacíticas negras, y piroclastos riolíticos, también afloran a lo largo de la carretera que conduce a Salve Faccha (CELEC EP., 2012). Constituida principalmente de ignimbritas, tobas soldadas, lavas, tobas de composición dacítica a riolítica y brechas con clastos de obsidiana, vitrófiros y pedazos de ignimbritas. Se considera que esta serie se formó a través de sills y cuellos volcánicos que cortaron depósitos jóvenes de relleno de la caldera, contemporáneos a las erupciones que formaron los flancos de la caldera (Hall et al., 2008).

##### *(Unidad 4.2) Lavas andesíticas y dacíticas negras.*

Estas lavas son características por su color negro. Ventanas de esta unidad se observan en los cortes de la vía entre Las Termas Papallacta y la estación de entrada a la Reserva Cayambe-Coca (Beate, 2009; CELEC EP., 2012). Las fracturas en estas rocas permiten la salida de varias fuentes termales en el área de Jamanco (ver Figuras A2.3; A2.17). Constituidas principalmente de lavas de composición andesítica a dacítica, negras porfíricas con fenocristales de plagioclasa de composición andesítica a dacítica. Se sugiere que estas lavas corresponden a un grupo de flujos de lava, cuyo centros de emisión serían fracturas centrales en el interior de la caldera, extruidos en al menos seis ciclos entre 2.6 a 1.5 Ma (Hall et al., 2008) y contemporáneos con el volcanismo efusivo que dio origen a los flancos de la caldera.

*(Unidad 4.3) Sedimentos Lacustres.*

Afloramientos de esta secuencia se encuentran junto a la carretera Quito-Papallacta a la subida antes de llegar a La Virgen, también existen ventanas a lo largo de la carretera interoceánica entre Sucus y el Tambo (CELEC EP., 2012). Constituyen principalmente una secuencia estratificada de lutitas, areniscas finas y conglomerados cuyos aporte son andesitas, dacitas, en menor cantidad riolitas; sobreyacen e intercalan hacia la base a las andesitas negras (Villares, 2010).

**2.4.2.5. Resurgencia de la Caldera y Diques del Período Post-Resurgente.**

La sucesión y distribución tanto horizontal como vertical de los sedimentos lacustres apoyan el modelo de resurgencia de la caldera (Hall, 2008). Los diques N-S formados posterior a la resurgencia son asociados a un rift o fractura denominado “Rift Chacana” (ver Anexo A1.2, CELEC EP., 2012). El centro de resurgencia de la Caldera se ubica a lo largo de la fractura N-S que pasa por el Cerro Potrerillos; evento que sucedió entre 1.5 a 0.44 Ma (Hall et al., 2008).

*(Unidad 5.1) Cerro Baños.*

Al Norte de la carretera Interoceánica se encuentra el Cerro Baños constituido por la Serie Riolítica Baños a la base y domos o cuellos volcánicos alimentados por diques de composición andesítica, dacítica y riolítica, orientados N-S. El Cerro Baños está constituido por cuatro picos, que morfológicamente presentan escarpes abruptos y pendientes muy fuertes ( $<50^\circ$ ), cuyas bases son superiores a 1 km<sup>2</sup> y sus alturas promedian los 4100 metros; constituidos por rocas andesíticas-dacíticas de coloración rojiza y verde con texturas porfirítica y microcristalina. (CELEC EP., 2012). Al pie Oriental y Sur de este cerro se encuentran los Complejos Turísticos de Papallacta y Jamanco (ver Figura 5.3).

*(Unidad 5.2) Cerro Cojanco.*

Este cerro se encuentra entre los ríos Tumiguina y El Tambo al Sur de la carretera Interoceánica cuya cumbre tiene una altura de 4131 m.s.n.m. Afloramientos importantes existen en cortes de la carretera Interoceánica y en la cumbre, donde

se registran diques de composición andesítica y dacítica con textura porfirítica, con cristales de plagioclasas, cuarzo y pocos máficos (CELEC EP., 2012). Entre el Cerro Cojanco y Baños se encuentran las fuentes termales de Jamanco que desaguan en los ríos Tambo y Sucus (ver Figura 5.1)

#### **2.4.2.6. Volcanismo Post-Resurgencia.**

*(Unidad 6.1) Volcánicos Tabla Rumi.*

Villares (2010) describe los Volcánicos Tabla Rumi ubicados en borde SW de la caldera, como un edificio volcánico con un grupo de flujos de lavas riodacíticas y diques riolíticos de origen fisural.

*(Unidad 6.2) Volcánicos Chusalongo.*

Se encuentra al Sur de la caldera, cuyas lavas de composición andesítica a dacítica descienden y desaparecen hasta coluviales del río Tumiguina entre los Domos Tumiguina y volcánicos de Plaza de Armas. Esta unidad es un remanente de un estratovolcán en el margen exterior Sur de la caldera cuya morfología particular es de una herradura abierta hacia el Sur, producto del colapso del flanco. (CELEC EP., 2012).

*(Unidad 6.3) Lavas Chimbaurcu.*

Villares (2010) las describe como Secuencia Volcánica Chimbaurcu dentro de la Serie Tablones, constituyendo el borde topográfico Sur de la Caldera de Chacana, que afloran al Sur del río Tumiguina desde 3400 a 4040 m.s.n.m. Constituidas por sucesión de flujos de lava andesítica de color gris azulado.

#### **2.4.2.7. Domos y Edificios volcánicos relacionados al magmatismo reciente.**

La actividad magmática en la caldera más reciente tiene su expresión en la formación de domos y centros volcánicos. El trabajo de campo del equipo geológico de CELEC EP/SYR, ha permitido caracterizar estos domos y centros volcánicos.



*(Unidad 7.1) Domo San Clemente.*

Ubicado al Sur la cuenca Cachiyacu en el Sur de la Caldera, constituido por dacitas porfiríticas masivas con matriz afanítica, cuya edad es  $<3$  Ma (CELEC EP., 2012).

*(Unidad 7.2) Domo Yanaurcu.*

Ubicado en el centro de la cuenca Cachiyacu al Norte del río Tambo, constituido por dacitas y riolitas dentro de una matriz porfirítica microcristalina. La edad del domo es  $< 3.08 \pm 0.04$  Ma (CELEC EP., 2012). Entre los Domos San Clemente y Yanaurcu se encuentran las fuentes termales de Cachiyacu (ver Figura 5.2).

*(Unidad 7.3) Domo Ventanillas.*

Está ubicado al Norte de la cuenca Cachiyacu constituido por dacitas competentes con una matriz afanítica microcristalina. Este domo es producto de la intrusión de magmas (CELEC EP., 2012).

*(Unidad 7.4) Domo Chaupiurcu.*

Se ubica junto al domo Ventanillas con una altura de 3865 metros. Según la morfología existen dos domos, el domo Sur está constituido por andesitas y dacitas y el domo Norte está constituido por riolitas (Villares, 2010).

*(Unidad 7.5) Domo Tumiguina.*

Ubicado junto al río Tumiguina, a 2 km al Noreste de la laguna del mismo nombre. Constituido por rocas menos diferenciadas a los domos anteriores, siendo andesitas ricas en Si con plagioclasas y anfíbol de color gris oscuras (CELEC EP., 2012).

*(Unidad 7.6) Complejo Singunay-Guamaní.*

Este se encuentra ubicado en el borde Sur-Occidental de la caldera constituida por dos cerros. El Cerro Singunay tiene 4277 metros de altura, constituido por dacitas pobres en sílice (CELEC EP., 2012), con matriz vítrea que sobreyacen

sedimentos intra-caldera; el Cerro Guamaní tiene 4189 metros de altura, constituido por dacitas masivas. Villares (2010) interpreta que los flujos del Singunay tienen un origen fisural.

*(Unidad 7.7) Volcánicos Plaza de Armas.*

Se presenta como un centro volcánico ubicado en borde Sur de la caldera. Villares (2010) describe a este complejo como “domos colada” de composición andesítica en la base y riolítica en la parte superior. Dataciones  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  aseguran una edad de  $726\pm 5$  ka para este volcán (CELEC EP., 2012).

*(Unidad 7.8) Diques Riolíticos.*

Estos diques y flujo de lava riolíticos se encuentran en fracturas W-E cortando la pared SW de la caldera en el río Tambo a la altura de la zona de Jamanco, instruyendo las lavas andesíticas-dacíticas negras. Constituyen riolitas masiva con textura porfírica y presentan minerales de alteración como pirita y clorita debido a la influencia de los fluidos termales (CELEC EP., 2012).

#### **2.4.2.8. Nueva actividad riolítica (Flujos Lávicos Plio-Pleistocénicos y Holocénicos)**

La resurgencia de la caldera a lo largo de las fracturas N-S por intrusión de un nuevo magma además de levantar el relleno intra-caldera, produjo una actividad riolítica importante donde se distinguen los siguientes flujos y depósitos volcánicos:

- Flujo de lava de Cuyuja.
- Flujos de ceniza de Pinantura y Burrochupa.
- Flujos en el centro de la caldera del Cerro Potrerillos.
- Flujos de Yarangala y Callejones.
- Flujo Yuyos.
- Flujo Sucus.
- Flujos de Guambi y Palugo.

Varios de estos flujos se encuentran trazados en la figura 2.3

#### **2.4.2.9. Volcanismo Reciente y Actividad Glaciar.**

Los Glaciares del Máximo Glaciar Tardío (LGM), invadieron y erosionaron la morfología de la caldera entre 34 a 14 ka, dejando morrenas con relieves entre 25 y 100 metros en los ríos Tumiguina, Tambo y Papallacta.

La Glaciación Younger Dryas ocurrió entre 11 a 10 ka sobre los 3900 m.s.n.m, afectando a la cuenca Cachiyacu y erosionó levemente los domos silíceos. En el área del Lago Sucus dejó morrenas laterales y terminales de 5 a 10 metros de espesor y erosionó las crestas de la Loma Baños y Cojanco (Clapperton et al., 1997).

El volcán Antisana es un estratovolcán construido sobre el basamento metamórfico que alcanza los 5758 m.s.n.m, siendo activo en los últimos 14 ka (Bourdon et al., 2002). Al menos existen 21 erupciones en los últimos 5 ka durante el Holoceno, formando una superficie plana actualmente cubiertas por vegetación (CELEC EP., 2012). Sus productos volcánicos son flujos de lava, flujos piroclásticos y caídas de ceniza de composición andesítica básicas a ácidas.

#### **2.4.2.10. Últimos Eventos Volcánicos (Flujos Históricos).**

El Flujo Papallacta data de 1773 DC (Reiss citado por Wolf 1892), rellena el valle Tumiguina y bloquea drenajes, formando lagos y lagunas como la de Papallacta. Presenta la misma geoquímica y mineralogía que el flujo de lava Pinantura en Muerte Pungo y que el Flujo Sucus por lo que se determina su relación con en el Rift Chacana y cuyo centro de emisión es una fractura al Sureste del cerro Cojanco. Constituido por andesitas negras con plagioclasa, piroxeno, olivino y xenocristales de cuarzo en una matriz vítrea (Villares, 2010; CELEC EP., 2012).

El Flujo de lava Pinantura de Pintag 1728 DC (Hall y Mothes, 1991), fue descrito anteriormente por Pérez (1986) como Flujo Antisanilla. Está ubicado sobre el flanco exterior Oeste de la caldera y desciende por el valle glaciar Muerte Pungo. Su centro de emisión está en el sector Muerte Pungo (Villares, 2010). Está constituido por andesitas grises oscuras y rojizas con plagioclasa, anfíbol y xenocristales en una matriz microcristalina (Pérez, 1986).

## **CAPÍTULO III.**

### **3. CARACTERÍSTICAS DE LOS SISTEMAS GEOTÉRMICOS ASOCIADOS A VOLCANISMO.**

#### **3.1. INTRODUCCIÓN.**

Los sistemas geotérmicos ocurren frecuentemente en regiones de actividad volcánica recientemente y actual (Henley y Ellis, 1983), por lo tanto se encuentran en limitadas regiones con un gradiente geotérmico normal o levemente superior, especialmente en los márgenes de placas donde el gradiente geotérmico puede ser significativamente más alto que el valor promedio. (Sierra y Pedro, 1998; Dickson y Fanelli, 2004). Existen sistemas geotérmicos que están asociados a calderas como por ejemplo en los complejos caldericos de Rotorua y Okataina en Nueva Zelanda, Valle de Yellowstone, Long Valley, Coso en EE.UU y Krafla en Islandia. Se ha dado a conocer que probablemente existe una penetración profunda de fluidos meteóricos para el establecimiento de un campo geotérmico durante un periodo extensivo de fractura cortical profunda relacionada con la formación de la caldera (Henley y Ellis, 1983).

En este capítulo se dará conocer a manera de resumen las características de los sistemas geotérmicos relacionados a volcanismo con enfoque a: los sistemas hidrotermales, a las características de los fluidos geotérmicos y a la alteración hidrotermal relacionada a estos, con la finalidad de que el lector de este trabajo tenga un mayor entendimiento previo a la descripción de las fuentes termales de Caldera de Chacana.

#### **3.2. ELEMENTOS DE UN SISTEMA GEOTÉRMICO.**

Un sistema geotérmico se define como “agua convectiva” en la corteza superior de la Tierra, la cual es el vehículo que transporta el calor desde una fuente de calor hasta un sumidero, usualmente ubicado en la superficie libre” y está

constituido principalmente por la fuente de calor, reservorio y fluido. Generalmente el reservorio está cubierto por rocas impermeables o poco permeables y está conectado a un área de recarga superficial (Dickson y Fanelli, 2004). La Figura 3.1 muestra un sistema geotérmico ideal.

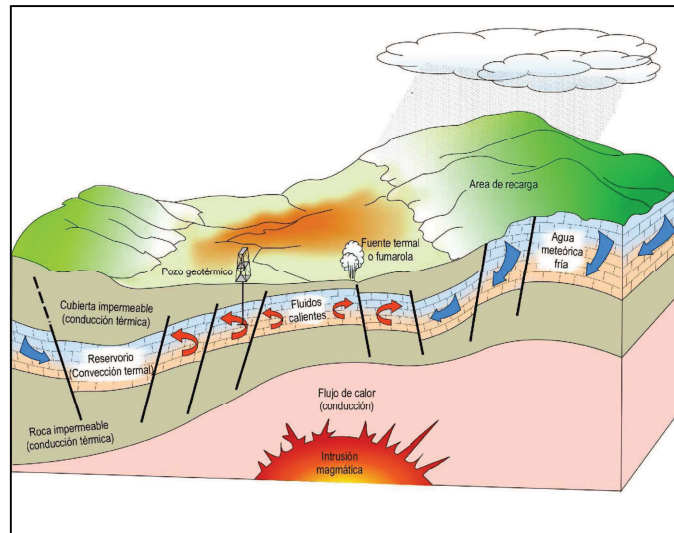


Figura 3. 1. Representación esquemática de un sistema geotérmico ideal (Dickson y Fanelli, 2004).

### 3.2.1. FUENTE DE CALOR.

En general la fuente de calor en los sistemas geotermiales es una masa de magma a alta temperatura (600-900°C) a profundidades del orden de los 7-15 km. de la superficie terrestre (Sierra y Pedro, 1998). En Sistemas Geotérmicos existe activa intrusión continua o enfriamiento de grandes plutones dentro de la parte superior de la corteza (10 km de profundidad) que provee energía termal al sistema (Henley y Ellis, 1983). La fuente natural de calor en un sistema geotérmico es imprecisamente conocida y esta debe ser necesariamente natural (Dickson y Fanelli, 2004). En Chacana se asume que la fuente de calor es un son cuerpos someros magma (Beate et al., 2011) en proceso de desgasificación y enfriamiento con alto contenido de volátiles (ver literal 5.7).

### 3.2.2. RESERVORIO.

El reservorio geotérmico está formado por roca de alta permeabilidad, con un volumen suficiente para contener una cantidad de fluido (Sierra y Pedro, 1998). Este elemento puede ser artificial si las condiciones son favorables, de ser así el

caso, se puede bombear agua a alta presión a través de pozos hasta un cuerpo de rocas calientes y compactas, causando así su fracturamiento hidráulico como en el campo de Los Alamos, Nuevo México, USA (Dickson y Fanelli, 2004). En sistemas geotérmicos volcánicos el reservorio pueden alcanzar temperaturas aproximadas de 350°C a profundidades <2.5 km (Henley y Ellis, 1983).

En Chacana el reservorio estaría constituido por secuencias volcánicas pre-caldera asociadas al colapso de la caldera (Villares, 2010; Beate et al., 2011) y secuencias de relleno de la caldera como la Serie Riolítica Baños y Lavas andesíticas-dacíticas negras (ver literal 2.4.2.4.), las cuales presentan fracturas por donde circularían los fluidos geotérmicos.

### **3.2.3. CAPA SELLO.**

La impermeabilidad o poca permeabilidad sobre el reservorio es el resultado de la actividad hidrotermal, que precipita minerales a partir de los fluidos geotérmicos o por la alteración hidrotermal en rocas por donde estos fluidos circulan (Sierra y Pedro, 1998).

En Chacana la capa sello estaría constituida por rocas del relleno de caldera syn-colapso como lavas andesíticas dacíticas negras que han sufrido un auto-sellamiento (Villares, 2010; Beate et al., 2011) debido a que han sufrido alteración hidrotermal de tipo propilítica con formación de smectita (ver literal 6.5)

### **3.2.4. FLUIDO GEOTÉRMICO.**

Es agua en la mayoría de los casos de origen meteórico (ver literal 3.5), ya sea en la fase líquida o en la fase vapor, dependiendo de su temperatura y presión. El flujo del agua caliente es controlado por la permeabilidad de la corteza y por la permeabilidad secundaria, especialmente fracturas (Henley y Ellis, 1983); el calor es la energía que acciona el sistema. El fluido calentado de menor densidad tiende a ascender y a ser remplazado por fluido frío de mayor densidad, provenientes de los márgenes del sistema (Dickson y Fanelli, 2004). La caracterización de los fluidos geotérmicos asociados a volcanismo se presenta en el literal 3.4.

### 3.2.5. MANIFESTACIONES SUPERFICIALES.

En algunos sistemas geotérmicos el fluido alcanza la superficie a través de fallas en la capa rocosa originando manifestaciones en superficie, estos son: fuentes termales, géiseres, fumarolas entre otros (Sierra y Pedro, 1998). La composición química de las mismas depende de la temperatura y el estado físico del fluido en profundidad (agua o vapor). La caracterización de las fuentes termales en Chacana se presenta en el capítulo 5.

### 3.2.6. RECARGA.

Existen zonas a través de la cual el agua meteórica percola y reemplaza los fluidos que se escapan del reservorio a través de las fuentes termales o que son extraídos mediante pozos (Dickson y Fanelli, 2004). La recarga en Chacana corresponde a aguas lluvia y de escorrentía superficial, la cual ingresa al sistema a través del sistema de falla que atraviesan la caldera (Villares, 2010). En el área de la caldera de Chacana se ha registrado una precipitación media anual de 1525 mm (Allpahuasi, 2011), lo que garantiza la recarga al sistema.

## 3.3. TIPOS DE SISTEMAS GEOTÉRMICOS.

Sierra y Pedro (1998), clasifican los sistemas geotérmicos según el mecanismo de transferencia de calor en:

- 1) **Sistemas geotermiales convectivos** en los cuales la convección es el mecanismo más importante de transferencia de calor, debido a la circulación de fluido. Se pueden distinguir:
  - a) **Sistemas hidrotermales**, generalmente relacionados a intrusiones magmáticas. Estos a su vez se clasifican de acuerdo al tipo de fluido que producen en:
    - i) *Campos que producen agua caliente.*- El agua del reservorio tiene una temperatura entre 60-100°C. Pueden encontrarse en áreas de flujo de calor normal o ligeramente superior al normal. Hay campos de este tipo

en Argentina, Uruguay, Hungría, Francia, Islandia, Unión Soviética, Italia

*ii) Campos que producen vapor húmedo.*- En estos campos conocidos como de "líquido-dominante", el reservorio contiene agua a una temperatura mayor de 100°C y una pequeña cantidad de vapor. Como ejemplo pueden citarse los campos de Wairakei en Nueva Zelandia, Cerro Prieto en México, Salton Sea en EE.UU., Otake en Japón y Ahuchapán en El Salvador.

*iii) Campos que producen vapor sobrecalentado.*- Estos campos también denominados de "vapor-dominante", producen vapor seco generalmente sobrecalentado, con una relativa alta cantidad de gases incondensables, como: H<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, H<sub>2</sub>S, CO<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>, entre los más importantes. Los campos que producen vapor sobrecalentado son: Larderello y Monte Amiata (Italia), Matsukawa (Japón), The Geysers (EE.UU.) y Copahue (Argentina).

**b) Sistemas de circulación**, en los que las aguas alcanzan alta temperatura debido a la circulación profunda en áreas con flujo de calor normal o mayor.

2) Sistemas geotermales conductivos: el mecanismo principal de transferencia de calor es la conducción. Pueden ser:

**a) Acuíferos profundos** en lechos sedimentarios donde, si bien la formación es permeable, la transferencia de calor convectivo es baja debido a bajas temperaturas y espesor pequeño del horizonte permeable.

**b) Roca seca caliente.** La formación es impermeable y el agua debe introducirse a través de fracturas producidas artificialmente.

### 3.4. CARACTERÍSTICAS DE LOS FLUIDOS GEOTÉRMICOS RELACIONADOS A VOLCANISMO.

Estudios de isótopos estables y análisis de gases raros en zonas de descarga geotermal han mostrado que las aguas convectivas en sistemas geotérmicos son en gran parte derivadas de agua meteórica saturada en aire (ASW) que ha penetrado en la corteza ocupando los sistemas de refrigeración magmáticas. En



regiones volcánicas de alto relieve topográfico, flujos laterales extensos de agua caliente pueden ocurrir por encima de los 20 km desde el centro de campo geotérmico, como en El Talio en Chile y Aguachapán en El Salvador (Henley y Ellis, 1983).

Los fluidos geotérmicos por mantenerse en contacto con las rocas en el subsuelo, disuelven cantidad de compuestos de manera que su composición química depende en gran medida del equilibrio roca/fluido (Orche, 2011). Los compuestos disueltos pueden presentarse en forma catiónica (Na, K, Li, Mg, B, NH<sub>3</sub>, Cs, Mn, Fe) aniónica (SO<sub>4</sub>, Cl, HCO<sub>3</sub>, F, Br), o neutra (SiO<sub>2</sub>).

La concentración de sales en general aumenta con la temperatura y varía en rangos de cientos de ppm a 300000 ppm (Orche, 2011).

El pH de los fluidos geotérmicos varía desde alcalino hasta ácido, como ejemplo de aguas alcalinas son las de Wairakei y Broadlands en Nueva Zelanda con pH de 8.6. Aguas Ácidas son las de los campos de Marsukawa en Japón y las de Salton Sea en California, EE.UU. con pH de 5 y 4.7 respectivamente. Aguas muy ácidas son como las del campo de Tatun en Taiwain cuyo pH es de 1.5 (Henley y Ellis, 1983; Orche, 2011)

Los gases y elementos volátiles participan en reacciones químicas entre los fluidos termales y rocas del acuífero (Orche, 2011). En general la concentración de gases en fases de vapor es aproximadamente de entre el 0.01% a varias decenas de porcentaje siendo los gases más comunes el CO<sub>2</sub> y H<sub>2</sub>S, incluyendo también CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>, NH<sub>3</sub> y trazas de gases raros como He, Ne, Ar Kr y Xe (Henley y Ellis, 1983). Estos gases pueden provenir de:

- Hidrólisis del agua (H<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>)
- Reacciones minerales (CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>S, H<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>)
- Descomposición de materia orgánica (CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>S, N<sub>2</sub>, NH<sub>3</sub>, C<sub>x</sub>H<sub>x</sub>O<sub>x</sub>)
- Desintegración Radioactiva (H<sub>2</sub>, Ar, Rn)
- De la atmósfera (H<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>, Ar, CO<sub>2</sub>, Ne, He, Kr, H<sub>2</sub>, Xe)
- Emanaciones magmáticas (H<sub>2</sub>S, HCl, HF, CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, H<sub>3</sub>BO<sub>3</sub>)

De acuerdo al contenido de sales y tipo dominante de aniones que les acompañan, las aguas de sistemas geotérmicos de alta temperatura pueden dividirse en cuatro grupos (Orche, 2011):

- **Aguas Bicarbonatadas:** Estos fluidos son ricos en sodio y bicarbonato, que se originan por la condensación de vapor geotérmico en aguas relativamente profundas pobres en  $O_2$  o por disolución de  $CO_2$ . Las aguas que presentan bicarbonato sódico se presentan en zonas de condensación de campos de vapor dominante y zonas marginales de campos de agua dominante. Las aguas que contienen bicarbonato cálcico se presentan en manantiales termales formando travertino como es el caso de las fuentes termales de Chacana (ver Anexo 2).
- **Aguas ácido sulfatadas:** Son fluidos producidos a partir de la ebullición que transfiere  $CO_2$  y  $H_2S$  a la fase de vapor. Estos vapores se condensan a medida que alcanzan la superficie o se condensan en agua superficiales más someras, calentándolas y oxidando el  $H_2S$  a ácido sulfúrico formando aguas sulfatas ácidas. Estas se caracterizan por ser pobres en cloro con un pH muy ácido (0-3) y los cationes con sílice provienen de la lixiviación de rocas por donde circulan.
- **Aguas ácidas sulfatadas cloruradas:** Se forman normalmente por la mezcla de aguas cloruradas y sulfatadas a profundidades variables. También se origina cuando un flujo de gases magmáticos ácidos se introducen en el sistema clorurado sódico neutro.
- **Aguas cloruradas sódicas:** Son aguas encontradas a grandes profundidades en yacimientos de agua dominante. Su pH es casi neutro en el acuífero pero se vuelve ligeramente alcalinas al perder  $CO_2$  al llegar a la superficie. Contiene principalmente de 1000 a 10000 mg/l de cloro y gas  $CO_2$ . El origen de estas aguas se le atribuye a la absorción de volátiles magmáticos como  $HCl$ ,  $CO_2$ ,  $SO_2$  y  $H_2S$  por parte de aguas meteóricas que se percolan profundamente.

Aguas de menor temperatura se dividen en tres grupos (Orche, 2011):

- Bicarbonatadas: Aguas frías poco profundas con salinidades generalmente inferiores a 1g/l, relacionadas a depósitos aluviales, materiales volcánicos y formaciones carbonáticas.
- Sulfatadas: Aguas de temperatura media de profundidad media con salinidades comprendidas entre 0,5 a 3 g/l, relacionadas a rocas carbonatadas y evaporíticas.
- Cloruradas: Aguas de circulación profunda relacionadas con rocas de basamento regional.

Las características físicas y químicas de los fluidos termales de la caldera de Chacana se presentan en el capítulo 5.

### **3.5. ORIGEN DE LOS FLUIDOS GEOTÉRMICOS.**

Las aguas termales pueden formarse a partir de 4 tipos de aguas que son: aguas meteóricas, aguas magmáticas, aguas de formación y aguas fósiles (Fagundo y Gonzáles, 2000).

#### **3.5.1. ORIGEN 1. AGUAS METEÓRICAS.**

En zonas de recarga de un sistema geotérmico, las aguas meteóricas se infiltran hacia la sub-superficie por gravedad, elevando su temperatura a medida que alcanzan mayor profundidad (Figura 3.2). Estas aguas después de ser calentadas suben y pueden circular por los acuíferos subterráneos y llegar a la superficie a través de fisuras y fracturas abiertas existentes en rocas (Pinuaga, 2008). Este es el origen más frecuente de las aguas termales en un sistema geotérmico, evidente en la concentración isotópicas de  $^2\text{H}$  y  $^{18}\text{O}$  en las aguas termales (Marini, 2000).

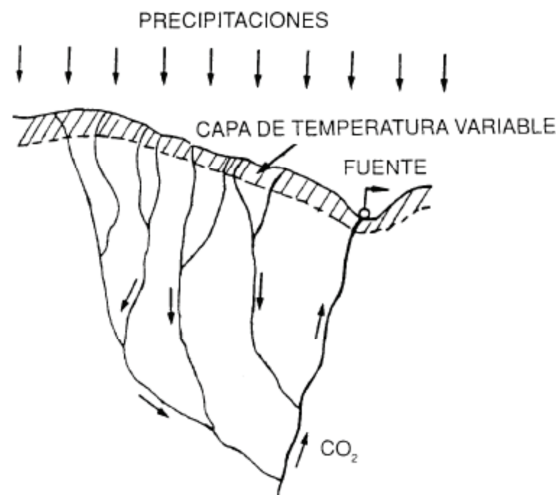


Figura 3. 2. Esquema del origen meteórico de las aguas termales (Pinuaga, 2008).

### 3.5.2. ORIGEN 2. AGUAS MAGMÁTICAS.

Las aguas de origen magmático podrían generarse durante la cristalización de magmas que liberan volátiles que escapan a la superficie en forma de fumarolas, compuestas esencialmente de vapor de agua junto con elementos como flúor, cloro, carbono, fosforo y boro. Se ha calculado que al fundirse  $1 \text{ km}^3$  de granito liberaría 26 millones de toneladas de agua lo que quiere decir que un kilogramo de granito produce 10 gramos de agua; de igual manera se ha confirmado que una intrusión magmática con 1000 metros de potencia contendría un 5% en peso de agua y al enfriarse podría producir 23.8 litros de agua por minuto y por kilómetro cuadrado durante un millón de años (Pinuaga, 2008).

### 3.5.3. ORIGEN 3. AGUAS DE FORMACIÓN.

Este tipo de aguas juveniles o endógenas proceden de la consolidación de lavas y del vapor de agua de origen volcánico, acompañados generalmente de gases como anhídrido carbónico, nitrógeno, sulfhídrico y fluorhídrico. La composición de estas aguas en sales y la temperatura son relativamente constantes y de carácter hipertermal.

### 3.5.4. ORIGEN 4. AGUAS FÓSILES.

Proviene de las reacciones químicas de carácter intenso en el seno de la corteza que liberan agua y de procesos de oclusión de aguas debido a la depositación de

sedimentos sobre los fondos marinos. Estas aguas son particularmente ricas en cloruro de sodio, bromo y yodo.

Hay que tomar en cuenta que muchas aguas juveniles profundas proceden de consolidación de lavas y de vapor de agua de origen volcánico, además que existen ciertas reacciones químicas de carácter intenso en profundidad que pueden liberar agua (Pinuaga, 2008). Lo más común en aguas termales es un origen mixto, por mezcla de aguas meteóricas de infiltración con aguas endógenas de formación y enfriamiento de magmas (Figura 3.3).

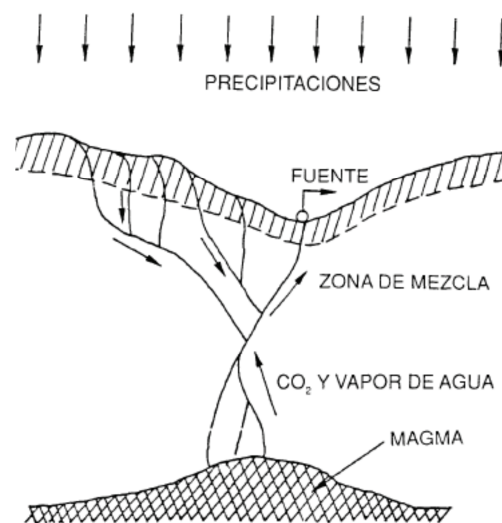


Figura 3. 3. Esquema del origen mixto de las aguas termales (Pinuaga, 2008).

### 3.6. MECANISMOS DE SURGENCIA DE LOS FLUIDOS GEOTÉRMICOS.

Los sistemas geotérmicos presentan fuentes termales en superficie debido a factores hidrológicos y físicos que permiten el ascenso de aguas termales a la superficie. Entre los factores que influyen a la salida de agua termal y su circulación descritos por Pinuaga (2008) están:

- Gradiente Hidráulico
- Expansión del vapor de agua
- La acción de gases ocluidos y disueltos
- La acción de la temperatura (aguas calientes ascienden).

El **gradiente hidráulico** afecta a la circulación de aguas subterráneas sean estas termales o no. Este factor explica que zonas de recarga se encuentran en zonas de mayor altitud que zonas donde se encuentran las fuentes de aguas termal.

La **expansión del vapor** es un factor que entra en acción cuando el agua entra en contacto con rocas a alta temperatura produciéndose vaporización de agua y la disociación del agua con la fijación del oxígeno. Este factor es evidente en géiseres, fumarolas y en la surgencia de fuentes hipertermales.

La **acción de gases ocluidos y disueltos** actúa en la dinámica y física de los fluidos hidrotermales, cambiando el peso específico del agua y por otro lado la presión de los gases suspende el agua y provoca su ascenso. Al cambiar la densidad del agua, cambia la velocidad del flujo de los caudales de gas y líquido, modificando la carga hidráulica.

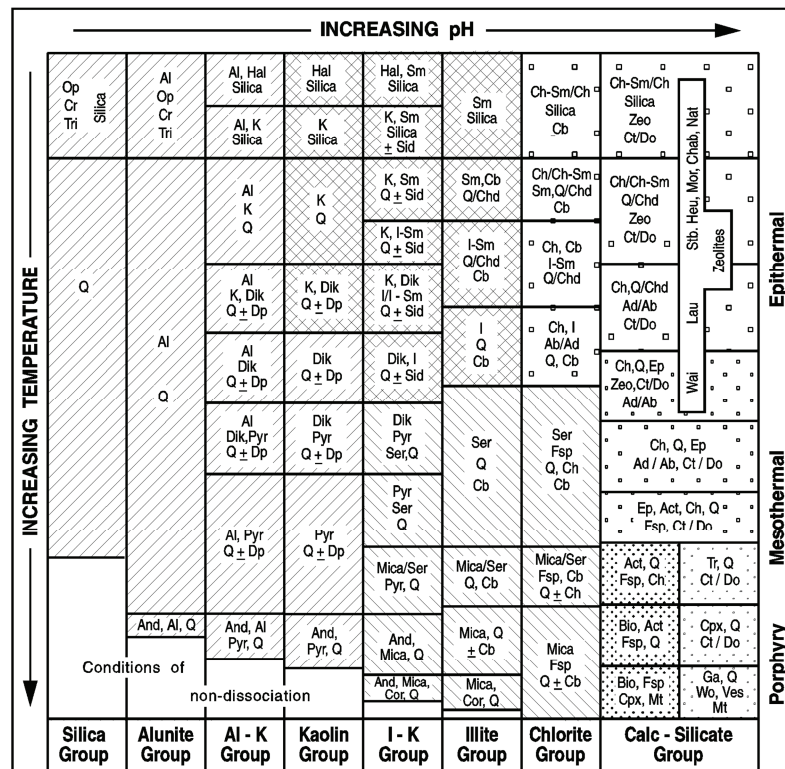
La **temperatura** actúa variando la masa específica del agua y su viscosidad, de manera que si el gradiente de temperatura supera el límite conocido como gradiente adiabático, el fluido en profundidad se vuelve inestable y tiende a fluir por convección térmica hacia la superficie. A su vez la diferencia de densidad entre agua fría y caliente provoca un fenómeno típico de termosifón, que crece con el caudal. Además al aumentar la temperatura, la viscosidad del agua disminuye, por lo que el coeficiente de permeabilidad aumenta y eso produce un aumento en la velocidad de circulación del agua. Por lo tanto estos factores son los que permiten el apareamiento de fuentes termales en Chacana.

### **3.7. ALTERACIÓN HIDROTHERMAL RELACIONADA A SISTEMAS GEOTÉRMICOS.**

En general las asociaciones minerales en zonas de alteración hidrotermal profundas en sistemas geotérmicos relacionados a volcanismo dependen de la temperatura del punto de ebullición de los fluidos geotérmicos y el contenido de gas que estos presenten. En una segunda fase la pérdida de vapor con CO<sub>2</sub> y H<sub>2</sub>S y otros gases disueltos controlan el incremento de pH y el desarrollo de asociaciones minerales, particularmente en zonas de flujo ascendente (Henley y

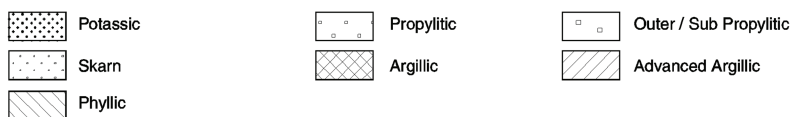
Ellis, 1983). El estudio de sistemas geotermales fósiles profundamente erodados tales como pórfidos de cobre o depósitos epitermales pueden ser instructivos en consideración a estructuras termales y asociaciones minerales de alteración hidrotermal en profundidad y superficie de los sistemas geotérmicos actuales (Corbett y Leach 1998).

Corbett y Leach (1998) publicaron un diagrama de clasificación de tipo de alteración para sistemas hidrotermales en que se incluyen los principales tipos clásicos de tipos de alteración, ordenados en función del pH de y de la temperatura (Figura 3.4).



**Mineral Abbreviations :**

Ab - albite; Act - actinolite; Ad - adularia; Al - alunite; And - andalusite; Bio - biotite; Cb - carbonate (Ca, Mg, Mn, Fe); Ch - chlorite; Chab - chabazite; Chd - chalcedony; Ch-Sm - chlorite-smectite; Cor - corundum; Cpx - clinopyroxene; Cr - cristobalite; Ct - calcite; Do - dolomite; Dik - dickite; Dp - diaspore; Ep - epidote; Fsp - feldspar; Ga - garnet; Hal - halloysite; Heu - heulandite; I - illite; I-Sm - illite-smectite; K - kaolinite; Lau - laumontite; Mt - magnetite; Mor - mordenite; Nat - natrolite; Op - opaline silica; Pyr - pyrophyllite; Q - quartz; Ser - sericite; Sid - siderite; Sm - smectite; Stb - stilbite; Tr - tremolite; Tri - tridymite; Ves - vesuvianite; Wai - wairakite; Wo - wollastonite; Zeo - zeolite

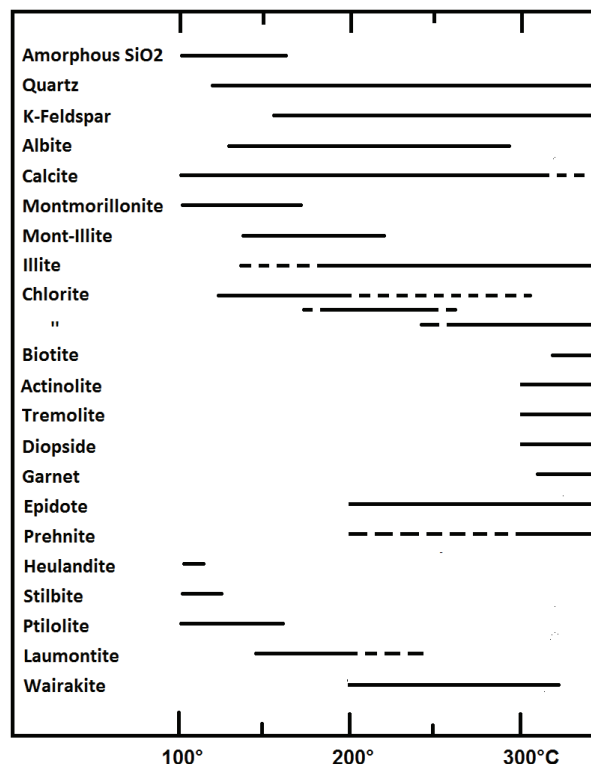


**Common Alteration Mineralogy in Hydrothermal Systems**

FIG. 4.1

**Figura 3. 4. Asociaciones de minerales de alteración comunes en sistemas hidrotermales (Corbett y Leach, 1998)**

En resumen generalizado la gama de temperaturas en las que aparecen minerales de alteración en áreas geotérmicas se muestra en la Figura 3.5. El diagrama indica cuales pueden ser los minerales que se producen a diferentes temperaturas en la alteración hidrotermal. La presencia o ausencia de un mineral en particular depende de una serie de parámetros cinéticos, como la cantidad de  $\text{CO}_2$  y  $\text{H}_2\text{S}$  disueltos en los fluidos que altera la roca o el pH de la solución (Henley y Ellis, 1983).



**Figura 3. 5. Resumen generalizada de la gama de temperaturas en las que aparecen minerales de alteración. La línea sólida indica la gama de temperatura más comúnmente observadas en campos geotérmicos (Henley y Ellis, 1983).**

La susceptibilidad a la alteración es variable en los minerales primarios de las rocas. El más reactivo es el vidrio volcánico, frecuentemente alterado primero a ópalo, smectita, calcita o zeolita y luego a minerales de arcilla. En términos generales se puede establecer un orden relativo de susceptibilidad a la alteración de los minerales, a saber: Olivino > magnetita > hiperstena > hornblenda > biotita = plagioclasa. El cuarzo es resistente a la alteración hidrotermal y no es afectado hasta temperaturas de 300°C, pero hay evidencias de re-cristalización del cuarzo a mayores temperaturas como en el campos de Cerro Prieto, México (Henley y Ellis, 1983).



## **CAPÍTULO IV.**

### **4. METODOLOGÍA PARA LA OBTENCIÓN Y TRATAMIENTO DE DATOS.**

#### **4.1. INTRODUCCIÓN.**

En este capítulo se presenta la metodología utilizada para caracterizar las fuentes termales, el reconocimiento de fallas geológicas, la evaluación de la descarga de calor y del aprovechamiento actual del recurso geotérmico en la caldera de Chacana.

#### **4.2. IDENTIFICACIÓN DEL PROBLEMA.**

En la caldera de Chacana no hay una estimación de la descarga de calor en superficie, no existe una estimación del uso del recurso geotérmico y no existe un estudio que relacione las fuentes termales y las fallas geológicas. No existen estudios similares en el país y los datos obtenidos en esta investigación son nuevos y parte complementaria del Proyecto Geotérmico Chacana.

#### **4.3. HIPÓTESIS DE LA INVESTIGACIÓN.**

La caldera de Chacana presenta una evolución desde el Plioceno al Cuaternario, que incluye el emplazamiento de magmas diferenciados a niveles someros que generaría un flujo de calor importante en sub-superficie y cuya expresión en superficie son flujos y domos de composición riolítica relacionados a una tectónica activa. La interacción del nivel freático que se encuentra casi en la superficie con el flujo de calor forma sistemas geotérmicos, cuyos fluidos hidrotermales en convección, circulan y ascienden por fallas y fracturas abiertas formando manantiales termales en superficie; esta descarga de calor que están siendo aprovechadas en la actualidad en una proporción mínima como recurso turístico (piscinas, agua caliente en tubería, calefacción), pero obtenida de niveles más

profundos podría ser aprovechada como recurso geotérmico renovable muy importante.

#### **4.4. TIPOS DE INVESTIGACIÓN DESARROLLADA.**

Para cumplir con los objetivos trazados se realizó estudios exploratorios, descriptivos, correlacionales y explicativos.

El estudio exploratorio se trata de la investigación de un tema del cual no se tiene mucho conocimiento. Por lo dicho anteriormente el tema de geotermia en el Ecuador está tomando nuevos bríos, y no existe investigación que evalué la descarga de calor y el aprovechamiento geotérmico en un área determinada mediante la caracterización de fuentes termales y estudio de fallas geológicas.

El estudio descriptivo busca especificar las propiedades y caracterizar los perfiles importantes en la investigación. Las campañas de campo permitieron reconocer el área de estudio, evaluar la geología local, visitar las fuentes termales y obtener los datos necesarios de estas para caracterizar sus propiedades y posteriormente poder evaluar la descarga y aprovechamiento geotérmico.

El estudio de correlación busca la relación de variables en una investigación. Los datos obtenidos mediante la investigación bibliográfica y los trabajos de campo permitirán relacionar los aspectos geológicos de la Caldera de Chacana (Fallas y lineamientos, Alteraciones Hidrotermales, Geoquímica de aguas, Tectónica) con las fuentes termales.

El estudio explicativo se centra en explicar los fenómenos y condiciones en que se dan estos. En esta investigación se plantearán conclusiones que abarcarán la reducción de los datos obtenidos y los resultados de los estudios de correlación.

#### **4.5. FUENTES DE DATOS.**

Los datos primarios utilizados para la investigación son todos los obtenidos en las campañas de campo que caracterizan y describen las fuentes termales, más la

fotogeología realizada para la descripción de fallas y zonas de alteración hidrotermal.

Los datos secundarios incluyen la bibliografía y datos de estudios anteriores en la Caldera de Chacana enfocados en la geología local y regional que incluyen:

- Cartografía geológica de la Caldera de Chacana.
- Descripción de las Zonas de Alteración Hidrotermal.
- Geoquímica de aguas y gases.
- Modelos Geotérmicos preliminares de Chacana.

#### **4.6. DISEÑO DE LA INVESTIGACIÓN.**

Este se define como el plan o la estrategia que se debe desarrollar para obtener la información y datos necesarios para la investigación.

Para la presente investigación se realizó un estudio no experimental transeccional descriptivo. Se tomaron los datos sin manipulación de estos y en su estado natural (no experimental). La caracterización de las fuentes termales involucra la obtención de sus parámetros descriptivos, físico y químicos de manera directa, in-situ y sin alterar su estado natural. La evaluación de la descarga y aprovechamiento del calor es una consecuencia de la caracterización de las fuentes termales. Los datos obtenidos se tomaron en un solo momento o tiempo único (transeccional o transversal). Parámetros como aforo y la geoquímica de las fuentes termales se tomaron solo una vez independientemente del clima y estado del nivel freático. Los datos de temperatura, conductividad, pH, potencial redox proporcionan más variables y mayor detalle de las aguas de las fuentes termales (descriptivo).

#### **4.7. RECOLECCIÓN DE DATOS.**

Para la recolección de datos se realizó las siguientes actividades: Selección del instrumento, métodos de recolección, aplicación del instrumento y observaciones,

registros y mediciones obtenidas. Es necesario que los instrumentos utilizados para la recolección de datos en campo sean confiables y muestren resultados válidos.

#### **4.7.1. INSTRUMENTOS Y CARTOGRAFÍA UTILIZADOS.**

##### **Para la Caracterización de Fuentes Termales:**

La ubicación de las fuentes termales en campo, así como de los accesos a estas, se utilizó las siguientes hojas topográficas:

- PAPALLACTA (CT-ÑIII-D2a) escala 1:25000
- PAPALLACTA (CT-ÑIII-D2-3993-I) escala 1:50000
- OYACACHI (CT-ÑIII-B4-3992-II) escala 1:50000

Las coordenadas UTM se tomaron con un GPS MAP 62 (Garmin) con precisión de 1 a 3 metros configurado en los sistemas WGS 1984 Zona 17S.

La medida de los parámetros físico-químicos en las aguas termales se realizó con el siguiente equipo portátil:

- Thermo Orion 210 A+ portátil básico para medir conductividad y Temperatura, provisto con electrodo combinado con cuerpo de epoxi resistente, no recargable, modelo 910600.
- Thermo Orion 230 A+ medidor portátil básico de temperatura/pH/mV/Rel mV/ORP con electrodos Hamilton.

##### **Para la identificación de Fallas y Lineamientos.**

En la fotointerpretación se utilizó 2 y 3 juegos lineales de 9 y 5 fotografías aéreas respectivamente que cubren toda el área de la Caldera de Chacana.

##### **Para la evaluación de la Descarga y Aprovechamiento del recurso geotérmico.**

En el aforo de fuentes termales y toma del caudal de entrada a una piscina se utilizó:

- 2 Baldes graduados (con capacidad de 7 y 17 litros)
- 3 Tubos PVC (de 3,4 y 6 pulgadas de diámetro y largo de 70 cm)
- Cronómetro
- Equipo utilizado en la medición de temperatura

#### 4.7.2. TRABAJO DE CAMPO.

##### 4.7.2.1. Caracterización de las Fuentes Termales.

###### *Medición de los Parámetros Físico Químicos.*

La medición de estos parámetros se realizó en todas las fuentes termales accesibles y en aguas frías donde se descargan las aguas termales (Figura 4.1), antes y después del sitio donde se encuentran los ojos de agua termal (aberturas en superficie por donde se vierten las aguas termales). Los parámetros obtenidos fueron:

- Temperatura en °C
- pH
- Conductividad en  $\mu\text{S}/\text{cm}$
- Potencial Redox (Eh) en mV



Figura 4. 6. Fotografías tomadas durante la medición de los parámetros físico-químicos. Izquierda. Fuente de las Termas Oyacachi (UTM WGS84 824137E/9976120N); Derecha. Fuente C10 con el equipo Thermo Orion Portátil en el área de Cachiyacu (UTM WGS 84. 808865E/9954280N).

###### *Muestreo del agua termal y superficial para análisis geoquímico.*

El muestreo de agua se realizó mediante el siguiente criterio:

- Accesibilidad a la fuente termal (llegar lo más cerca al ojo de agua termal).
- Temperatura de la fuente termal (las de mayor temperatura).

Mediante este criterio se tomó 13 muestras de agua termal y 5 muestras de agua superficial (Figura 4.2). El muestreo en cada locación consistió de 5 envases de 50 ml que permiten obtener:

- 2 Muestras de agua para obtención de cationes (Na, K, Mg, Ca) y aniones (Cl, SO<sub>4</sub>, HCO<sub>3</sub>).
- 1 muestra agua filtrada y acidificada con ácido nítrico puro para obtención de F-Br-Li.
- 1 muestra agua filtrada y acidificada con ácido clorhídrico puro para obtención de B-Si-NH<sub>3</sub>.
- 1 muestra agua filtrada y acidificada con ácido nítrico puro para obtención de elementos traza (Al, Ti, V, Cr, Mn, Fe, Co, Ni, Cu, Zn, As, Se, Rb, Sr, Mo, Cd, Sb, Cs, Ba, Pb, Th, U).



Figura 4. 7. Izquierda Fotografía tomada durante el muestreo de agua de la Fuente C5 en el área de Cachiyacu (UTM WGS84. 808787E/9954836N); Derecha. Muestras de agua de la fuente termal T15 (J6 es el código utilizado en el informe geoquímico del CELEC EP., para la muestra T15), las dos primeras a la izquierda son para gas disuelto y las restantes son para composición química de la fuente termal.

#### *Muestreo de Gas Disuelto y Burbujeante.*

Este muestreo de gas disuelto se realizó paralelamente al muestreo de aguas (solo de aguas termales) en envases de vidrio sin permitir la entrada de aire (Figura 4.3), obteniendo:

- 1 muestra de agua de 120 ml para obtención de la composición química, isotópica y concentración de C.
- 1 muestra de agua de 250 ml para obtención de la composición química, e isotópica y concentración de He.

El muestreo de gas burbujente se realizó en fuentes termales donde existan burbujas. Realizando 3 muestreos de este gas que consistió de:

- 2 muestras de gas seco en fracos simples de doble válvula.
- 1 muestra de gas en frascos Giggenbach en solución de  $\text{AgNO}_3$ .
- 1 muestra de gas en frascos Giggenbach en solución de  $\text{NaOH}$ .

Este muestreo se realizó en 3 fuentes termales para la obtención del porcentaje en volumen de  $\text{O}_2$ ,  $\text{N}_2$  y  $\text{CO}_2$ , concentración en ppm de  $\text{CH}_4$ ,  $\text{CO}_2$  y  $\text{H}_2$  y relaciones R/Ra y He/Ne.

El muestreo de agua termal, gas disuelto y burbujeante se realizó solo en las áreas de Jamanca y Cachiyacu por ser parte del componente geoquímico del Proyecto Geotérmico Chacana.



Figura 4. 8. Fotografías tomadas para el muestreo de gas seco. Izquierda. Muestreo de gas en la fuente termal C5. Derecha Superior. Muestreo de gas en la fuente termal T16. Derecha Inferior. Gas que entra al envase Giggenbach con solución de  $\text{AgNO}_3$  en  $\text{NaOH}$ .

*Descripción del Afloramiento.*

La descripción de las fuentes termales se realizó durante todas las campañas de campo, esta descripción consiste de:

- Ubicación de la fuente termal.
- Dimensiones del afloramiento por donde sale el agua caliente.
- Tipo de roca encajante donde se ubica la vertiente termal.
- Estructuras locales del afloramiento.
- Número de ojos de agua la fuente termal aforados y no aforados.
- Descripción de la precipitación y alteración local relacionada a la fuente termal.

#### **4.7.2.2. Caracterización de Fallas y Lineamientos.**

Posterior a la identificación de fallas y lineamientos mediante fotointerpretación, en el campo se realiza una verificación de las principales estructuras locales relacionadas a las fallas y lineamientos, para posteriormente relacionarlos con las fuentes termales. Además se realizó un registro fotográfico panorámico que permita visualizar las principales fallas y lineamientos en las zonas de interés.

#### **4.7.2.3. Evaluación de la descarga de calor.**

El trabajo de campo que involucra la descarga de calor se basa principalmente en el aforo y la medición de la temperatura en cada fuente termal, esta última obtenida en la caracterización de las fuentes termales.

##### *Aforo de la fuente termal.*

Muchas de las fuentes termales son accesibles, estas permiten medir su caudal sin ningún problema, pero varias se encuentran en pendientes fuertes del cauce del río en las cuales se debió estimar su caudal, por lo que se realizó un conteo de los ojos de agua y la estimación del caudal respectivo. El aforo se realizó de dos o más ojos encausando el flujo de agua termal hacia un punto de aforo, dependiendo de la cercanía entre ojos de agua termal y accesibilidad a las fuentes termales (Figura A2.24).



Una vez colocado el tubo PVC en el punto de aforo, se observó que toda el agua cruce por el tubo sin dejar escapar el agua termal por los costados, luego se dejó correr el agua hasta que se estabilice el caudal. Se marcó una medida en el balde graduado dependiendo del flujo del agua y se introdujo rápidamente de manera horizontal bajo la caída del agua termal, al mismo tiempo que se acciona el cronómetro (Figura 4.4). Una vez alcanzada la marca en el balde por el agua termal se detiene el cronómetro y se marca la medida de tiempo y volumen. En cada fuente se realizaron 10 medidas y el caudal se obtuvo mediante el método de media aritmética.

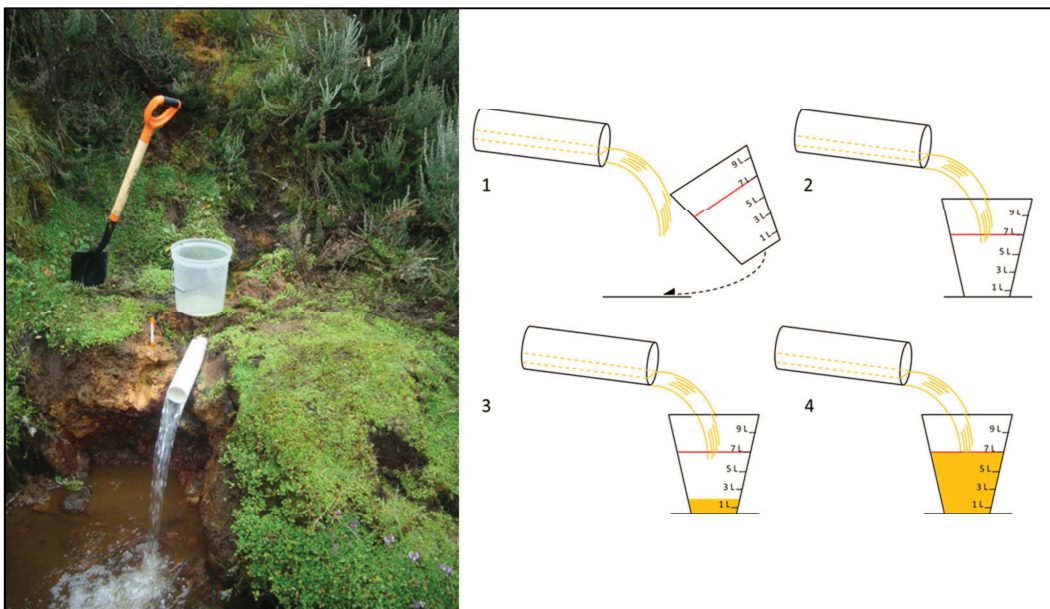


Figura 4. 9. Izquierda. Fotografía tomada durante la preparación del aforo en la fuente termal C4; Derecha. Esquema que muestra la metodología para la obtención del caudal 1) Instante de estabilidad del caudal en el tubo PVC, 2) Introducción del balde graduado bajo el tubo PVC e inicio de medición con el cronómetro. 3) Transcurso del llenado del balde con agua termal. 4) Instante donde se detiene el cronómetro y se toma el volumen y tiempo transcurrido.

#### *Estimación del Caudal y Temperatura en fuentes termales no accesibles*

Varias fuentes termales se encuentran ubicadas en pendientes fuertes del valle del río, a nivel o por debajo de las aguas del río o en la otra orilla del río, por lo que no fue posible medir su temperatura y mucho menos su caudal. A pesar de esto se realizó un conteo del número de fuentes termales no aforadas y se realizó la estimación del caudal a través de la apreciación visual. La estimación de la temperatura se realizó mediante la media aritmética de las temperaturas de las

fuentes termales que si pudieron ser medidas, de acuerdo al área donde se encuentren los manantiales termales.

#### **4.7.2.4. Aprovechamiento del Recurso Geotérmico.**

El trabajo de campo en este punto es similar al realizado para la descarga de calor, con la diferencia de que el aforo y la medición de temperaturas se realizan en las vertientes de entrada y salida de las piscinas de los centros turísticos de la Caldera de Chacana.

#### **4.7.3. TRABAJO GEOQUÍMICO DE LABORATORIO.**

Las muestras de agua termal y superficial tomadas durante el trabajo de campo de esta investigación, fueron analizadas en Laboratorios de Geoquímica de Fluidos del Instituto Nacional de Geofísica y Vulcanología en Palermo (Italia), dirigido por el Dr. Salvatore Inguaggiato.

La preparación y calibración de los equipos para la recolección y medición de los fluidos (aguas termales y gases burbujeantes), se realizaron en el Laboratorio Químico de la Escuela Politécnica Nacional de Quito, por parte del Dr. Salvatore Inguaggiato.

#### **4.8. ANÁLISIS DE DATOS.**

Los datos obtenidos se presentan en tablas, gráficos y descripciones en los siguientes capítulos, y su análisis permitirá evaluar la descarga de calor y evaluar la utilización actual del recurso geotérmico en la Caldera de Chacana y además una visualización y conteo de las fuentes termales de la caldera.

Como se espera los valores obtenidos en campo no son del todo precisos o exactos. Durante el proceso de obtención de datos se presentaron errores ya sea por causa de manipulación de los materiales, lectura de volúmenes, imperfecciones en las herramientas de trabajo o por que se dejó escapar cierta cantidad de volumen de agua termal, por lo tanto esto genera un error durante la

manipulación de datos el cual es considerado y será debidamente presentado en los resultados.

En la caracterización de las fuentes termales, los parámetros físico-químicos e isotópicos se analizarán en gráficas como:

- Conductividad vs. Temperatura, para observar la relación salinidad vs. temperatura.
- Conductividad vs. pH, para observar la relación salinidad con el pH.
- Potencial Redox vs. Temperatura, para analizar aguas en zonas oxidantes o reductoras.
- $\delta D$  (‰, SMOW) vs.  $\delta^{18}O$  (‰, SMOW), para analizar el origen de las aguas termales.
- Elevación vs.  $\delta D$  (‰, SMOW), para observar la cota de zonas de recarga.

Para el análisis geoquímico de aguas termales y frías se utilizó:

- Diagramas ternarios Na+K-Ca-Mg para análisis de cationes.
- Diagramas ternarios de Giggenbach (1988) para análisis de aniones y clasificación del tipo de aguas según la concentración de Cl, SO<sub>4</sub> y HCO<sub>3</sub>.
- Diagramas binarios Cl vs Na, Cl vs SO<sub>4</sub>, Cl vs Ca, Na vs K, para mostrar el origen de aguas termales e influencia de las rocas sobre estas.
- Diagramas de Piper-Hill-Langelier y Langelier-Ludwig para clasificar las aguas termales acorde al contenido de sales y cationes dominantes.
- Diagrama ternario Na-K-Mg de equilibrio de Giggenbach (1988), para saber qué aguas están en equilibrio completo, parcial o son aguas inmaduras.
- Diagramas ternarios Cl-Li-B de Giggenbach y Goguel (1989) que permite saber el tipo de rocas que interactúan con las fuentes termales.
- La estimación de la temperatura de las aguas en el reservorio se realizó mediante Geotermómetros de Silice, Na/K, Na-K-Ca, Li/Mg, Na/Li y K/Mg.

La caracterización de fallas y lineamientos se representarán en un mapa 1:100000 y cuyo análisis e interpretación se encuentra en el capítulo 5.

La estimación de la descarga de calor se toma a partir de los datos de caudal utilizando la siguiente ecuación.

$$Q = q \times Cp \times \Delta T$$

Donde:

$Q$  = Cantidad de Calor por convección.

$q$  = Caudal de salida de la fuente termal obtenida mediante la media aritmética.

$Cp$  = Calor específico del agua a diferentes temperaturas.

$\Delta T$  = Diferencia de temperatura entre el agua termal y superficial.

El cálculo del aprovechamiento geotérmico se realiza mediante la ecuación de uso directo del calor obtenido del trabajo de Beate y Salgado publicado para el Congreso Mundial de Geotermia del 2010.

$$\text{Capacidad Instalada [MWt]} = qm \times (Te - Ts) \times 0,004184$$

$$\text{Uso de Energía [TJ/año]} = qp \times (Te - Ts) \times 0,1319$$

$$\text{Factor de Capacidad} = \frac{\text{Capacidad Instalada}}{\text{Uso de Energía}} \times 0,03171$$

Donde:

$qm$  = caudal máximo en l/s

$qp$  = caudal promedio anual en l/s

$Te$  = temperatura de entrada a la piscina en °C

$Ts$  = temperatura de salida de la piscina en °C

Los resultados obtenidos se encuentran detallados en los siguientes capítulos y anexos.

## **CAPÍTULO V.**

### **5. UBICACIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE LAS FUENTES TERMALES DE LA CALDERA DE CHACANA.**

#### **5.1. INTRODUCCIÓN.**

Las fuentes termales dentro y fuera de la Caldera de Chacana son características por los rasgos superficiales que presentan y por su composición química. En este capítulo se presenta la ubicación de las fuentes termales que permite relacionar las descargas de los fluidos con zonas de fallas e identificar uno o varios sistemas hidrotermales y los rasgos geoquímicos que caracterizan a las fuentes termales. Estos fluidos se componen de agua en distintos grados de pureza ya que se mantienen en contacto con rocas del subsuelo, disolviendo e incorporando una cantidad de compuestos de manera que su composición química depende en gran medida del equilibrio roca/fluido (Orche, 2011).

La geoquímica de aguas es una herramienta que permite clasificar y caracterizar los distintos tipos de fluidos que salen hacia la superficie en la Caldera de Chacana. Los datos geoquímicos utilizados para el presente trabajo fueron obtenidos de muestras de aguas tomadas durante Agosto del 2011 por el autor de este trabajo y analizados por el Dr. Salvatore Inguaggiato para CELEC EP/SYR. Los datos geoquímicos de las fuentes exteriores de la caldera fueron obtenidos del trabajo realizado por Inguaggiato et al. en el 2010 sobre los fluidos termales del arco volcánico del Ecuador. Los esquemas y descripción de cada una de las fuentes termales reconocidas en la Caldera de Chacana se encuentran descritos en detalle en el Anexo 2, que fue parte del informe geoquímico para el Proyecto Geotérmico Chacana de CELEC EP., que incluye las áreas de Jamanco y Cachiyacu.

## **5.2. UBICACIÓN DE LAS FUENTES TERMALES EN LA CALDERA DE CHACANA.**

Para la ubicación de las fuentes termales se tomó las coordenadas UTM en el sistema WGS 1984 (Tabla A3.1; A3.3) y se consideró la siguiente cartografía editada por el Instituto Geográfico Militar (IGM):

- PAPALLACTA (CT-ÑIII-D2a) escala 1:25000
- PAPALLACTA (CT-ÑIII-D2-3993-I) escala 1:50000
- OYACACHI (CT-ÑIII-B4-3992-II) escala 1:50000
- SANGOLQUÍ (CT-ÑIII-B3-3993-III) escala 1:50000
- PINTAG (CT-ÑIII-D1-3992-IV) escala 1:50000

### **5.2.1. ÁREA DE JAMANCO.**

Los manantiales termales en esta área se encuentran a lo largo de río Tambo y Sucus en un tramo de aproximadamente de 900 metros, entre las cotas 3600 a 3400 m.s.n.m. en la zona central Sur de la Caldera de Chacana. Los ojos de aguas termales se ubican en grietas y fracturas en las andesitas y dacitas negras que forman los cauces de los ríos mencionados y en los flancos laterales del Flujo de lava Sucus. La accesibilidad a estas fuentes es por medio de la Carretera Quito-Papallacta en primera instancia y cuyo trazo es paralelo al río Tambo en el área de Jamanco (Figura 5.1); luego por senderos y trochas que se adentran en el cauce del río donde se encuentran las fuentes termales.

### **5.2.2. ÁREA DE CACHIYACU.**

En Cachiyacu las fuentes termales se ubican en el valle Cachiyacu donde nace el río Tambo y a la base de los domos San Clemente y Yanaurco. Estas fuentes se encuentran dispersas en un área aproximada de 0.3 km<sup>2</sup> en la zona del extremo Sur de la Caldera de Chacana a 4000 m.s.n.m. Los ojos de agua termal se ubican en morrenas del valle Cachiyacu y en fracturas de andesitas-riolitas del domo Yanaurco. Para acceder a las fuentes se debe viajar a pie a lo largo del río Tambo desde el área de Jamanco a 3 km hacia el Sur por la denominada “Ruta del

Cóndor” o se puede acceder a caballo subiendo al domo Yanaurco y luego descendiendo hacia el valle Cachiyacu (Figura 5.2).

#### **5.2.1.    ÁREA DE PAPALLACTA.**

En el valle del río Papallacta se encuentran fuentes termales donde se asienta el conocido centro turístico “Termas Papallacta”, ubicado sobre terrazas fluviales del río Papallacta por detrás de la Loma Baños en la zona central-Este de la Caldera de Chacana a la cota de 3280 m.s.n.m. En esta zona el valle se encuentra cubierto por morrenas glaciares, donde se ubican los ojos de agua termal. Para acceder a estas fuentes se toma la Carretera Quito-Papallacta hasta la población de Papallacta y luego se toma una carretera de segundo orden durante 2 km, trazada paralelamente al río Papallacta al Norte de la población de Papallacta (Figura 5.3).

#### **5.2.2.    ÁREA DE OYACACHI.**

Las fuentes termales en esta área se encuentran sobre las terrazas del río Oyacachi, donde se ha construido el complejo turístico Termas Oyacachi en la cota de 3171 m.s.n.m. en el borde Nororiental de la Caldera de Chacana (Figura 5.4). En la zona se encuentra bloques de secuencias volcánicas de relleno de la caldera, andesitas y dacitas negras sobre morrenas que son probablemente donde se ubican las fuentes termales. Para acceder a estas fuentes se puede tomar la Carretera que va hacia el Norte desde las Termas Papallacta, pasando por Salve Faccha hasta Oyacachi, o la Carretera que cruza las poblaciones de Guachalá, Cangahua y Oyacachi.

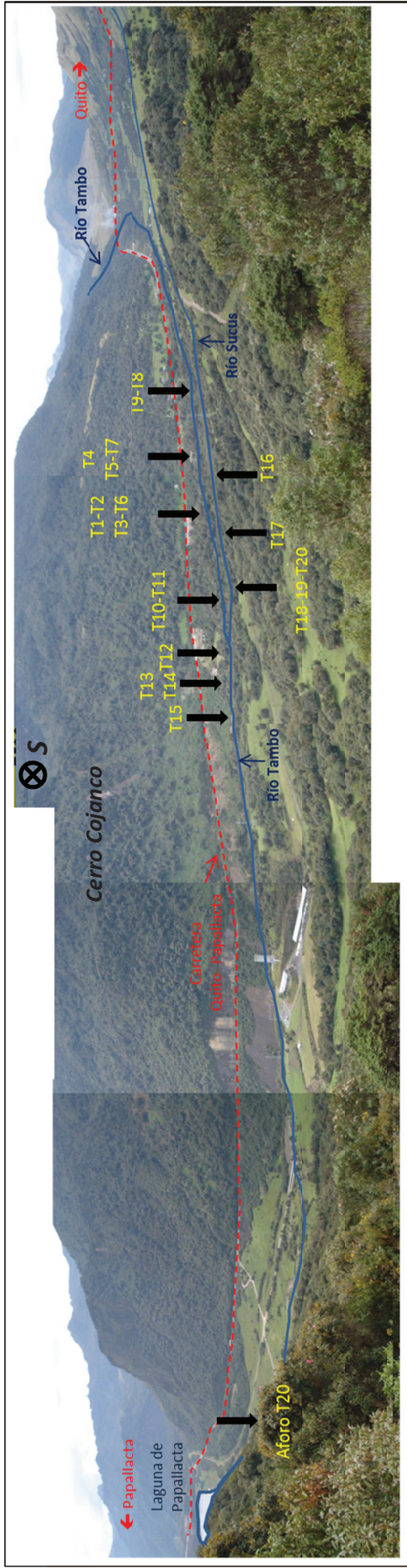


Figura 5. 1. Fotografía panorámica del área del Jamanco tomada desde la Loma Baños hacia el S desde el UTM WGS84. 813723E/9959755N; donde se ubican las fuentes termales que desaguan en el río Tambo y Sucus.

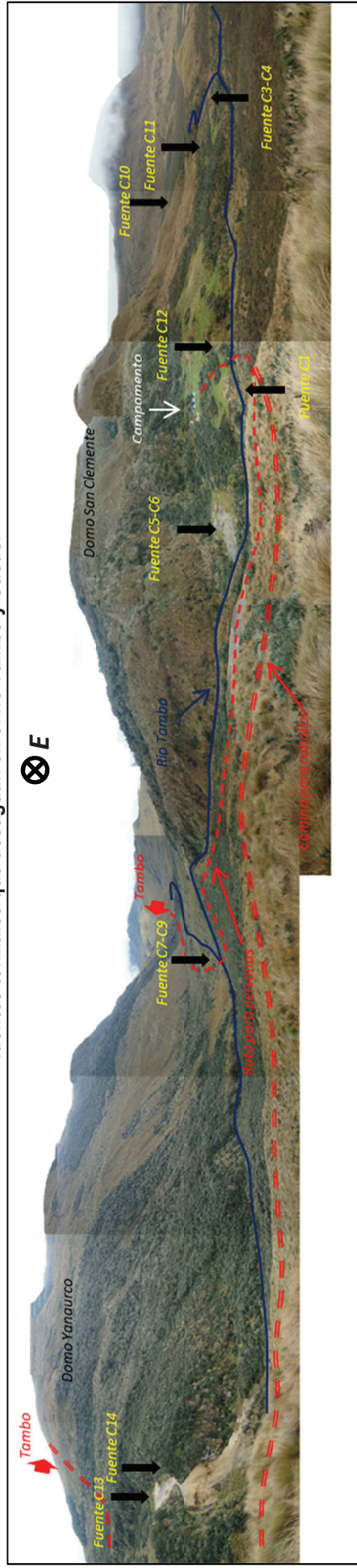


Figura 5. 2. Fotografía panorámica del área de Cachiyacu con vista hacia el E desde el UTM WGS84. 808415E/9955320N; donde se muestra la ubicación de las fuentes termales.



### **5.2.3.     ÁREA DE SALVE FACCHA.**

Actualmente las fuentes termales denominadas Salve Faccha se encuentran bajo las aguas de la Represa Salve Faccha de la EMAAP-Q quedando en evidencia solo las fuentes Chimborazo Tola Alta y Mapayacu (agua sucia) cuyos ojos de agua se ubican en un complejo de morrenas al pie del cerro Yarangala, a lo largo del río Mapayacu en la zona Noroeste de la Caldera de Chacana entre las cotas 3970 y 4010 m.s.n.m. (Figura 5.5). El acceso a estas fuentes en primera instancia es a través de la carretera de segundo orden Oyacachi-Salve Faccha-Papallacta, llegando a la represa Salve Faccha donde se debe tomar un bote hacia el Oeste y atravesar la laguna formada por la represa o rodear la laguna a pie hasta llegar al río Mapayacu.

### **5.2.4.     FUENTES TERMALES EN LOS FLANCOS EXTERIORES DE LA CALDERA DE CHACANA.**

Alrededor de la Caldera de Chacana se encuentran varias fuentes termales las cuales son conocidas debido a que son aprovechadas como complejos de piscinas (Figura 5.6).

Guachalá-El Pisque: Es un balneario ubicado a 2636 m.s.n.m., aproximadamente a 19 km del borde Norte de la Caldera de Chacana y a 700 metros de la línea equinoccial que pasa por la población de Guachalá. El balneario se ubica sobre brechas volcánicas con clastos riolíticos que forman el cañón del río Pisque, donde además hay abundantes cantos rodados de rocas metamórficas y graníticas.

Calera Tolontag: Esta fuente se encuentra a 4.5 km al Este de la Población de Tolontag, sobre el Flanco Oeste del Complejo Chacana en un afluente de la Quebrada Zunfohuaycu en la cota de 3426 m.s.n.m. Los ojos de agua termal se encuentran en rocas de la Serie Tablones. El acceso a esta fuente es a través de la carretera entre Pintag y La Calera al pie de los Páramos de Tolontag.

La Merced, Ilaló y El Tingo: Son balnearios muy concurridos, ubicados al pie Sur de la Loma Ilaló, el borde Oeste de la Caldera de Chacana se encuentra a 17 km de La Merced e Ilaló y a 22 km de El Tingo; y a 26 y 31 km al Oeste del área de Jamanco respectivamente. Los balnearios se encuentran contruidos sobre rocas andesíticas del estrato-volcán Ilaló y volcánicos de la Formación Cangahua que rellenan el valle de los Chillos, que son las rocas donde se ubican las fuentes termales. La red vial del valle de Tumbaco permite el acceso a estos balnearios tomando como referencia la Urbanización de la Armenia.

El Lisco: Es una vertiente termal que se encuentra en el río Lisco a 11 km al Suroeste del área de Cachiyacu y a 1.6 km al Norte del flujo de lava Pinantura en la cota de 3458 m.s.n.m. La vertiente se encuentra en depósitos aluviales y coluviales del río Lisco que se encuentran sobre la Serie Tablones. El acceso a esta fuente es por medio de la carretera que pasa por Pintag hacia el Sur pasando por La Cocha-Secas hasta El Peñón del Lisco. En la Figura 5.6 se muestra la ubicación de las fuentes termales exteriores de la Caldera de Chacana.

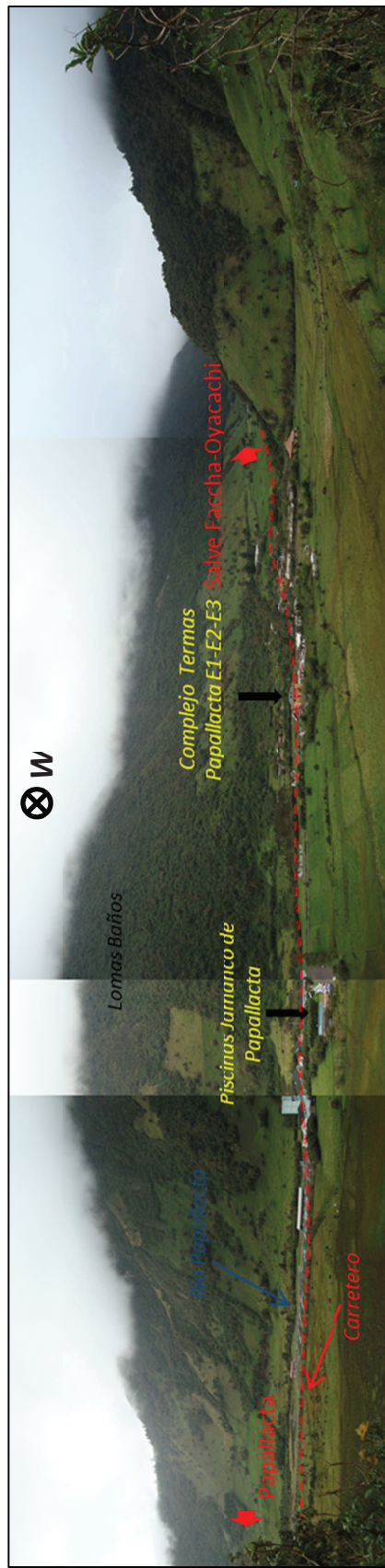


Figura 5. 3. Foto Panorámica del valle de Papallacta desde el UTM WGS84. 817905E/9959663 hacia el W; donde se ubican las Termas Papallacta.



Figura 5. 4. Izquierda. Foto Panorámica del valle de Oyacachi en el borde Noreste de la Caldera de Chacana desde el UTM WGS84. 819721E/9975685N hacia el E. Derecha. Foto Panorámica del Poblado de Oyacachi desde el UTM WGS84. 822830E/9976510N; donde se ubican las Termas Oyacachi.



Figura 5. Izquierda. Fotografía Panorámica con vista hacia el ESE desde el UTM WGS84. 814568E/9975183N que muestra la ubicación de las fuentes termales Salve Faccha y Mapayacu en el valle de Salve Faccha. Derecha Fotografía Panorámica con vista hacia el W desde el UTM WGS84. 814850E/9975026N que muestra la ubicación la fuente termal Chimborazo Tola al pie del cerro Yarangala.



Figura 5. 6. Fotografía Panorámica con vista hacia el E desde el mirador de la Armenia; de las fuentes termales exteriores de la Caldera de Chacana en su flanco Oeste.

### **5.3. CARACTERÍSTICAS FÍSICO-QUÍMICOS DE LAS AGUAS TERMALES EN LA CALDERA DE CHACANA.**

Las características físico-químicas de estas aguas en fuentes termales vienen dadas de los terrenos por donde estas circulan. Por ello, su contenido en sales, su temperatura y las características hidrológicas son muy variables. Se consideraron 52 fuentes termales de agua donde se tomaron los parámetros físicos químicos de las aguas dentro de la Caldera de Chacana para este trabajo; los datos de las fuentes termales externas (Tabla A3.1; A3.3) se tomaron del estudio nacional de aguas termales que realizó Inguaggiato et al. (2010).

#### **5.3.1. TEMPERATURA.**

En la Tabla A3.1 se observa que las temperaturas más altas de salidas termales son en el área de Jamanco donde se registraron 72.9 °C, mientras que las más bajas se encuentran en Salve Faccha entre 6.8 a 16 °C, aunque previo a este estudio se registraron temperaturas de 49.1 °C en manantiales termales al pie del cerro Cuya en el área de Salve Faccha, actualmente cubiertas por aguas de la represa (Mothes y Beate, 2002). En Cachiyacu y Papallacta las altas temperaturas de salida son similares entre 58.9 a 63.6°C. Las fuentes exteriores a la caldera tienen temperaturas que varían entre 27 y 42°C. Temperaturas relativamente bajas alrededor de 23.3°C pudieron ser afectadas por mezcla con aguas superficiales. Las aguas superficiales varían su temperatura de acuerdo a cada localidad pero estas no sobrepasan en rango de 5 a 12°C.

#### **5.3.2. pH.**

El pH de la mayoría de las fuentes termales dentro de la caldera y en las fuentes exteriores, varía entre 7.65 y 5.9 indicado que presentan un pH similar a las aguas de escorrentía superficial, saliendo de este rango la fuente termal T1 (río Tambo) cuyo valor es de 8.69 presentando un ligero aumento en su alcalinidad (Tabla A3.1).

### 5.3.3. CONDUCTIVIDAD.

La conductividad de las fuentes termales dentro de la caldera y en las fuentes exteriores es  $>1000 \mu\text{S/cm}$ , llegando hasta los  $7100 \mu\text{S/cm}$  registrados en fuentes de Jamanco siendo esto característico de las aguas termales de la zona (Tabla A3.1). Las conductividades más bajas se registran en Salve Faccha cuyos valores son  $<205 \mu\text{S/cm}$ , aun así son ligeramente mayores a los valores registrados en aguas superficiales que llegan hasta  $150 \mu\text{S/cm}$ . Existen conductividades de  $1000$  hasta  $1500 \mu\text{S/cm}$  en aguas del río Tambo y Sucus, esto es debido a que la mayoría de las fuentes termales desaguan en las aguas de estos ríos, aumentando la concentración de sólidos disueltos en las aguas superficiales.

### 5.3.4. POTENCIAL REDOX (Eh).

El potencial redox de las fuentes termales varía entre  $30$  a  $-170 \text{ mV}$ , saliendo de este rango las fuentes de Salve Faccha cuyos valores son similares a los medidos en aguas superficiales que van entre  $23.5$  a  $190 \text{ mV}$ . (Tabla A3.1).

La relación entre los parámetros físico-químicos indica que las aguas termales han sufrido un proceso de interacción agua/roca, además que las aguas superficiales varían en sus valores por que se mezclan con aguas termales. Las altas temperaturas de las aguas permiten disolución de sales provenientes de la pared de rocas, los pH indican que la mayoría de las fuentes termales son neutras. La relación conductividad vs. temperatura permite clasificar de acuerdo a la salinidad las diferentes muestras de agua (Figura 5.7).

- Baja Salinidad para las aguas meteóricas
- Alta Salinidad para manantiales termales

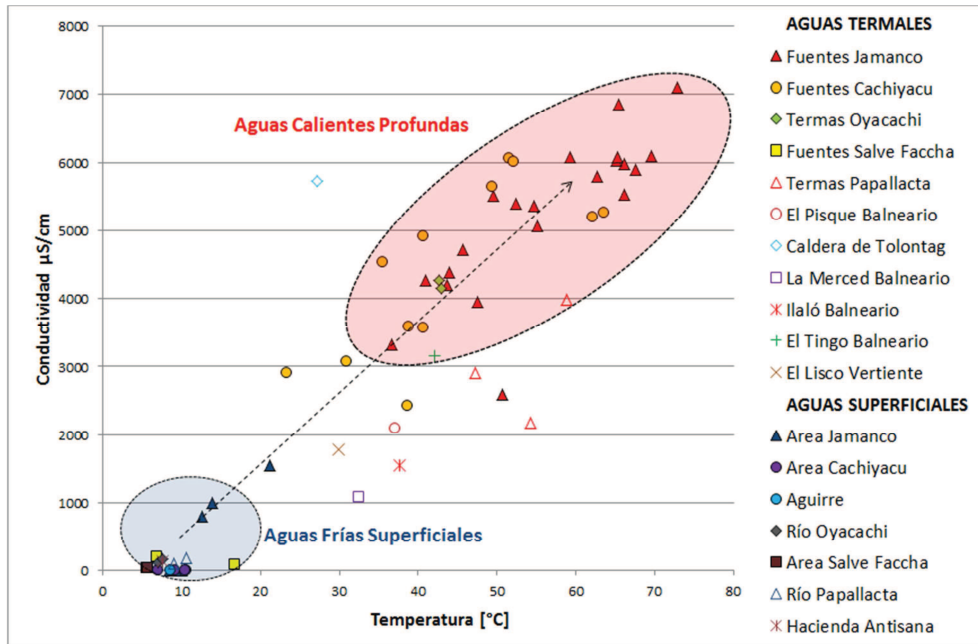


Figura 5. 7. Conductividad Eléctrica vs Temperatura de Salida de las vertientes termales.

La relación entre el pH y la conductividad (Figura 5.8) permite notar que las aguas termales con alta salinidad presentan pH relativamente bajos con relación a las aguas superficiales, lo que indica que la acidez de las fuentes termales es producto de la interacción agua/roca (Orche, 2011) ya que presenta más iones disueltos, a diferencia de las aguas superficiales que son poco agresivas evidente por sus pH relativamente neutro (7.5).

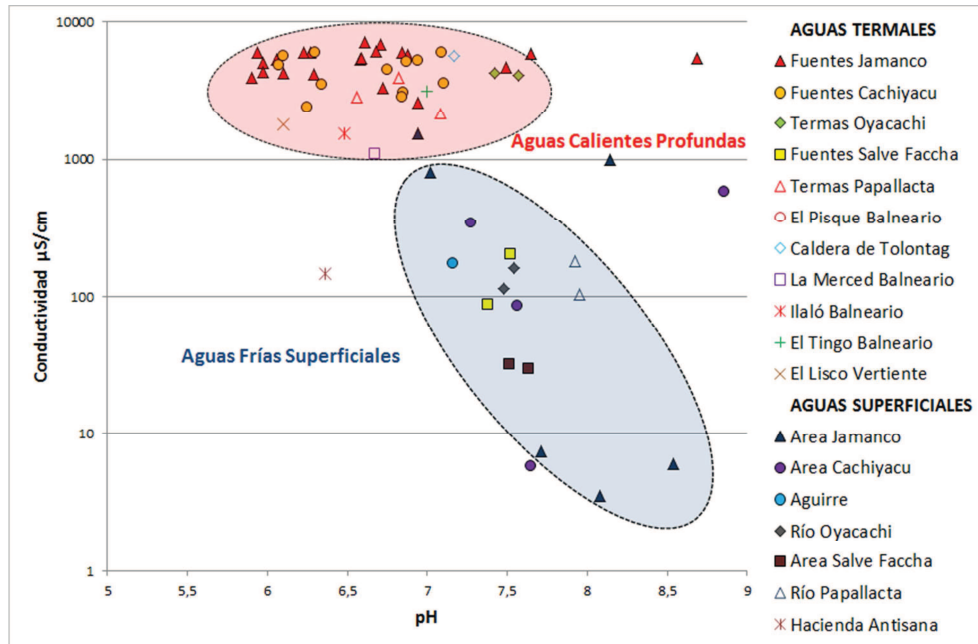


Figura 5. 8. Conductividad Eléctrica vs pH de las vertientes termales.

La relación Temperatura vs. Eh indica que los fluidos hidrotermales son sustancias reductoras caracterizadas por valores negativos de Eh y altas temperaturas, a diferencia del sistema de aguas superficiales que son aguas oxidantes con bajas temperaturas y valores positivos de Eh (Figura 5.9).

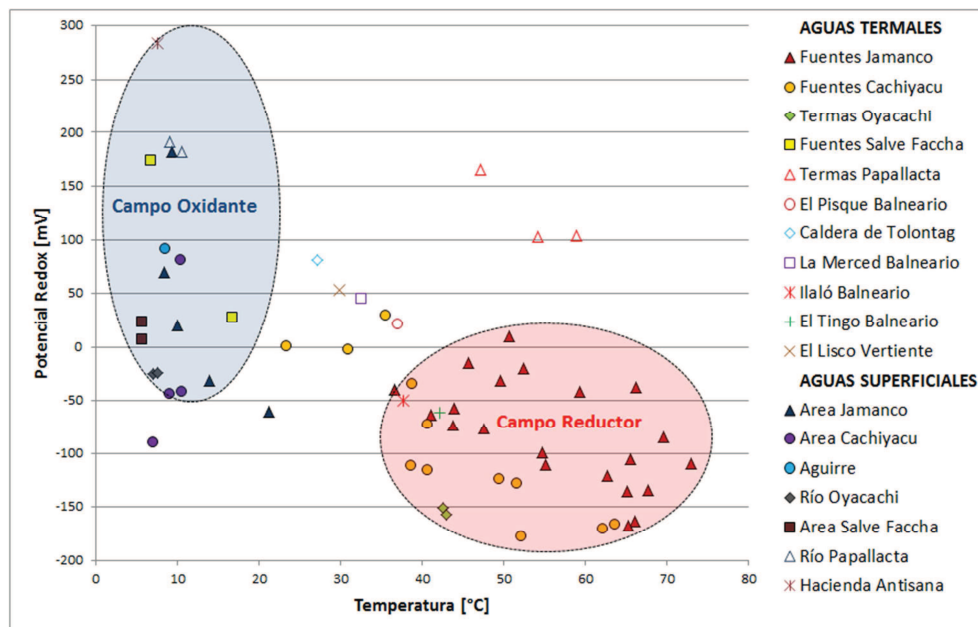


Figura 5. 9. Condición Redox vs Temperatura de salida de las vertientes.



#### 5.4. ISÓTOPOS DE HIDRÓGENO Y OXÍGENO.

Se tomaron 18 muestras de agua entre termales y meteóricas que fueron analizadas para la parte geoquímica del proyecto Geotérmico Chacana del CELEC EP. Los datos de isótopos de las fuentes termales externas se tomaron del estudio nacional de aguas termales publicado en el 2010 por Inguaggiato et al. (Tabla A3.5).

El estudio de los isótopos de  $^2\text{H}$  (Deuterio) y  $^{18}\text{O}$  permiten determinar el origen del agua geotérmica, las zonas de recarga y fenómenos de vaporización e intercambio isotópico con la roca por donde circula el agua de acuerdo a la relación  $^{18}\text{O}/\text{D}$ . Los análisis isotópicos en las aguas de fuentes termales de Chacana muestran que los valores de  $\delta\text{D}$  varían entre -81.6 a -89.4 delta por mil y los valores de  $\delta^{18}\text{O}$  varían entre -10.46 a -12.35 delta por mil versus V-SMOW (Vienna-Standard Mean Ocean Water). Los valores isotópicos de la mayoría de fuentes termales caen sobre la Línea (línea azul) de las Aguas Meteóricas Mundial ( $\delta\text{D}=8\delta^{18}\text{O}+10$ ), esto implica que su origen es superficial (Marini, 2000). Las aguas termales de Cachiyacu, Oyacachi y Tolontag muestran una leve concentración mayor de  $\delta^{18}\text{O}$  lo que implicaría una mayor interacción entre agua/roca e incluso una mezcla con aguas de origen magmático o metamórfico (Marini, 2000., Figura 5.10).

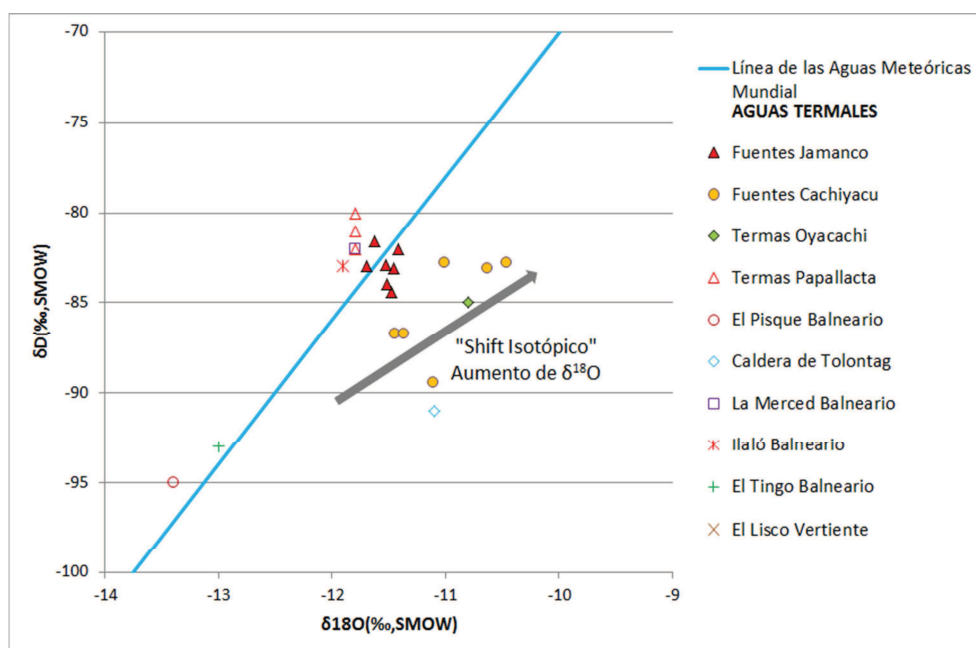


Figura 5.10. Composición Isotópica de las aguas termales ( $\delta\text{D}$  vs  $\delta^{18}\text{O}$ )

La relación  $\delta D$  vs. altitud, así como la línea de gradiente isotópico para Ecuador (Inguaggiato et al., 2010), permite ver cuales son las zonas de recarga para las aguas termales. Las fuentes de Cachiyacu y Jamanco caen sobre la línea de gradiente isotópico, lo que indica que sus zonas de recarga están a una altitud de 3900, 3500 y 3300 m.s.n.m respectivamente. Las demás fuentes termales caen por debajo de la Línea del Gradiente Isotópico, lo que implica que sus zonas de recarga están a mayor altitud de acuerdo a la proyección de los valores isotópicos de estas fuentes sobre la línea del Gradiente Isotópico (Inguaggiato et al., 2010). Las zonas de recarga para el las fuentes de El Pisque, El Tingo, El Lisco y Tolontag están a una altitud mayor a los 4000 m.s.n.m., mientras que para las fuentes de Oyacachi, Ilaló, La Merced y Papallacta sus zonas de recarga están alrededor de los 3500 m.s.n.m. (Figura 5.11).

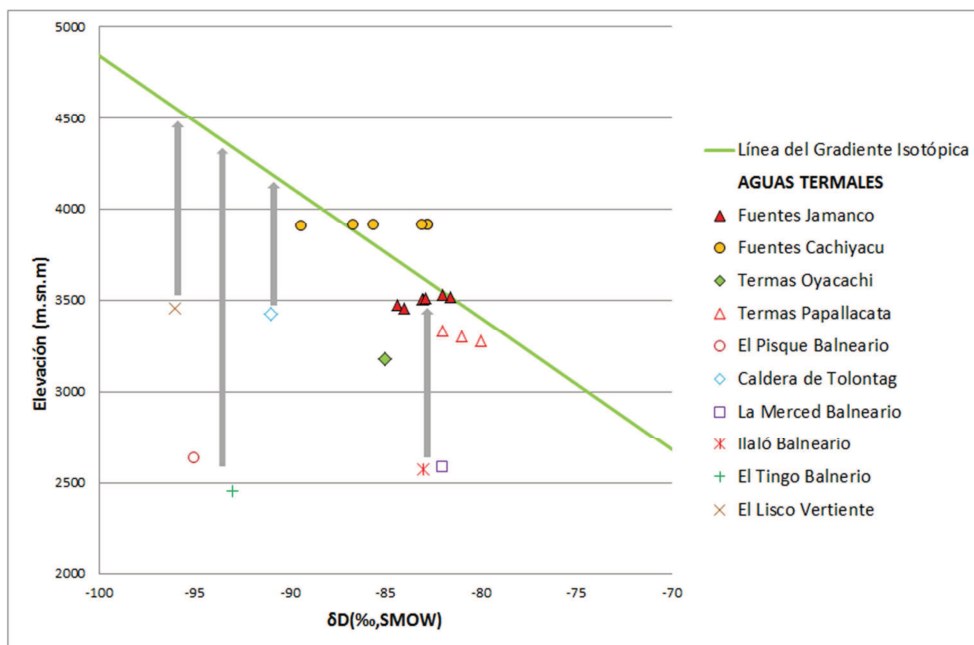


Figura 5. 11. Elevación de las fuentes termales vs Composición Isotópica  $\delta D$ .

## 5.5. GEOQUÍMICA DE AGUAS.

La clasificación geoquímica de las aguas en este estudio se ha realizado por varias técnicas. Los aniones y cationes mostrados en la Tabla A3.5., permiten clasificar las aguas termales y superficiales utilizando diferentes tipos de diagramas.

### 5.5.1. CATIONES.

Entre los cationes más significativos encontrados en todas las fuentes termales están el Na, Ca, Mg; también el K, pero en menor proporción. El Ba, Sr y Li, se encontraron en proporciones menos significativas.

Con los resultados de los análisis mostrados en la tabla A3.5 se traza la Figura 5.12, donde se puede apreciar que las aguas termales, dentro y fuera de la Caldera de Chacana son más enriquecidas en Na y K, con respecto al Ca y Mg. Esto implica una interacción de agua/roca en zonas donde existe alteración de feldespatos tipo plagioclasa u ortoclasa de rocas ígneas (Marini, 2000). Una vez disuelto el Na y K, permanece en ese estado mientras se mantengan las condiciones normales del agua. La presencia predominante de Na y K caracteriza a las fuentes termales de Chacana como fluidos geotérmicos de mediana a alta temperatura.

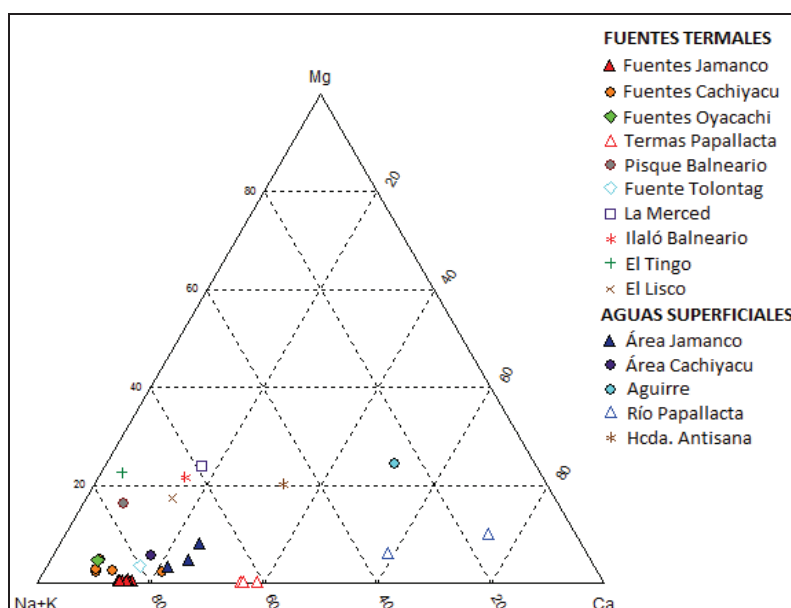


Figura 5. 12. Diagrama ternario Na+K-Ca-Mg, de las muestras de fuentes termales y frías de la Caldera de Chacana.

### 5.5.2. ANIONES.

Los resultados de los análisis químicos descritos en la Tabla A3.5., fueron utilizados para elaborar el diagrama ternario de Giggenbach de 1988 (Figura

5.13), las aguas son divididas dentro de los siguientes tipos hidroquímicos, sobre la base de las concentraciones de Cl, SO<sub>4</sub> y HCO<sub>3</sub>.

- Aguas Cloruradas Profundas: (Fuentes de Jamanco y Cachiyacu) posiblemente relacionadas a un reservorio profundo, a este grupo se le adhiere las fuentes de Papallacta que además de Cl presentan una concentración de SO<sub>4</sub>, probablemente relacionado a condensados volcánicos o aguas de formación.
- Aguas Bicarbonatadas: (Fuentes de Tolontag, Chimborazo Tola Alta, Oyacachí, El Pisque, El Tingo, Ilaló, El Lisco) posiblemente calentadas por vapores condensados de origen volcánico así como podría estar asociado a componentes de aguas freáticas.
- Aguas Mezcladas Cloruradas Bicarbonatadas: (Fuente Salve Faccha) Estas aguas podrían resultar de una mezcla por disolución de los gases volcánicos en las aguas del reservorio.
- Aguas Sulfatadas: (Fuente Mapayacu) Estas aguas podrían resultar de una mezcla por disolución de los gases volcánicos en las aguas del reservorio frías de baja conductividad, y sufrir un calentamiento a través de vapores condensados de origen volcánico.

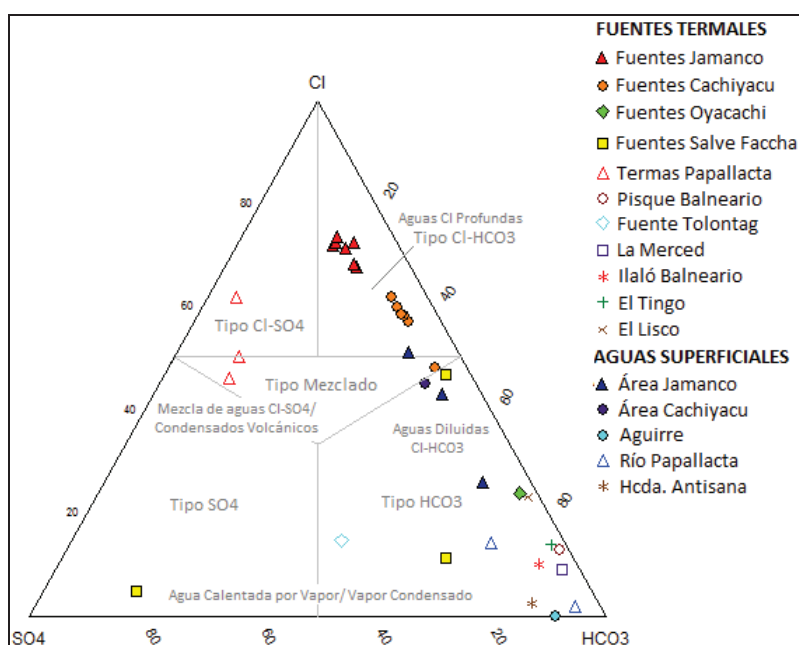


Figura 5. 13. Diagrama ternario Cl-SO<sub>4</sub>-HCO<sub>3</sub> de Giggenbach (1988), de las muestras de fuentes termales y frías de la Caldera de Chacana.

### 5.5.3. REPRESENTACIÓN DE LA COMPOSICIÓN ANIÓNICA Y CATIONICA DE LAS MUESTRAS DE AGUAS.

Los diagramas binarios Na vs. Cl, Ca vs. Cl,  $\text{SO}_4$  vs. Cl y Na vs. K, presentan una relación lineal entre todas las muestras de aguas (Figura 5.14). Las altas concentraciones de Cl estarían relacionadas con intrusiones magmáticas, evidenciando un origen de estas aguas a niveles profundos (Orche, 2011). Además el Cl es un elemento altamente móvil en fluidos y su saturación se da en ambientes muy peculiares como en sistemas geotérmicos (Marini, 2000).

El incremento del Na, Ca y K junto con el Cl implica disolución de feldespatos, piroxeno y anfíboles por aguas cloruradas calientes a profundidad (Figuras 5.14; 5.15; 5.16). La concentración de  $\text{SO}_4$ , proviene probablemente de oxidación de sulfuros por aguas que se infiltran en zonas de recarga y posteriormente se incorporan con aguas cloruradas. La grafica Cl vs.  $\text{SO}_4$  muestra la influencia clorurada-sulfatada en el agua (Figuras 5.16).

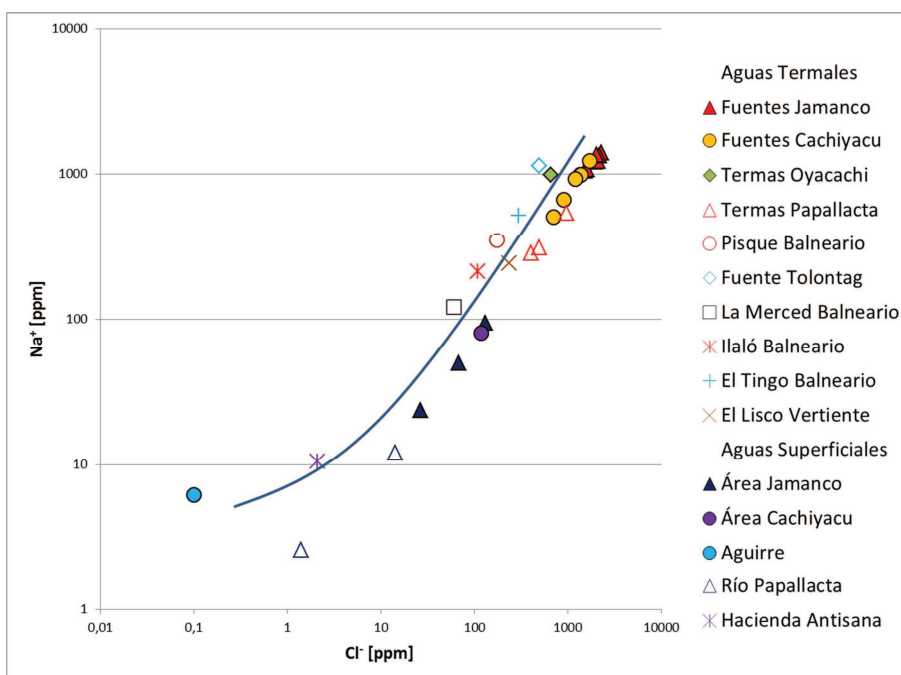


Figura 5. 14. Diagramas binarios Cl vs Na en ppms, de las fuentes termales y frías de la Caldera de Chacana.

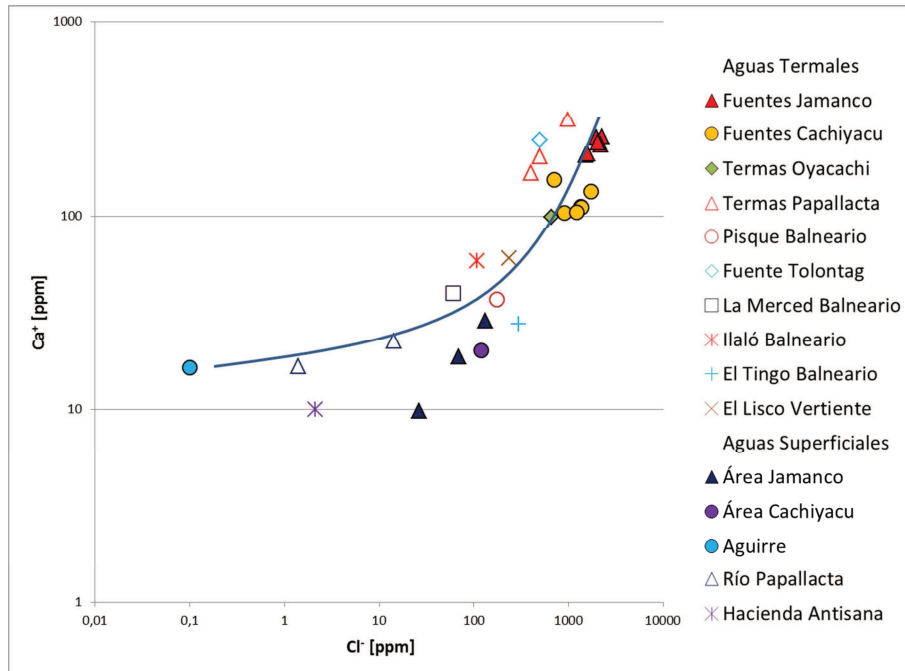


Figura 5. 15. Diagrama binario Cl vs Ca en ppm, de las fuentes termales y frías de la Caldera de Chacana.

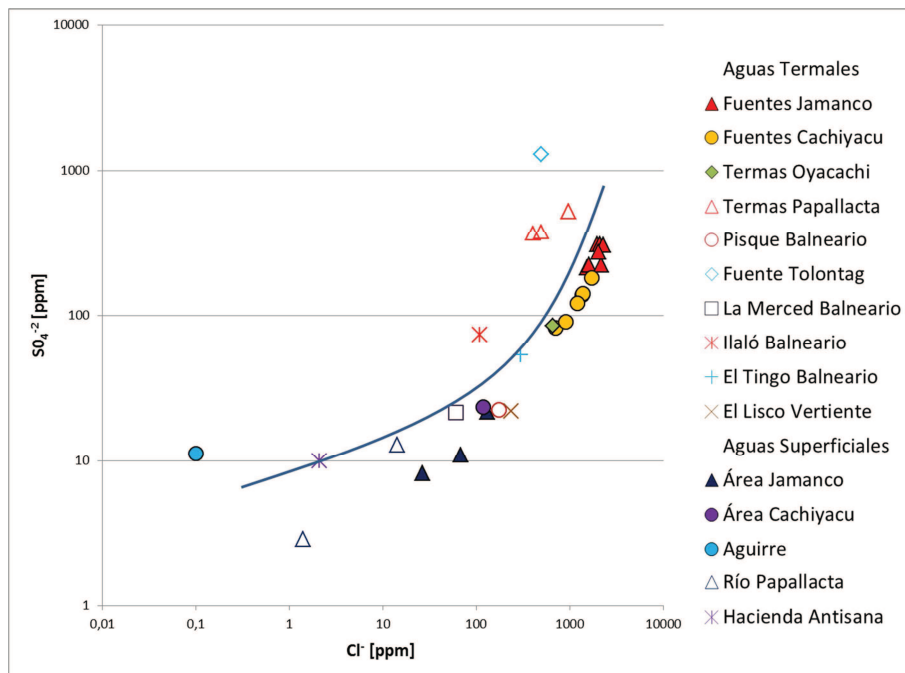


Figura 5. 16. Diagrama binario Cl vs SO₄ en ppm, de las fuentes termales y frías de la Caldera de Chacana.

La presencia de altas concentraciones de Na y K implican lixiviación de rocas ígneas en zonas de alteración de feldspatos (Muñoz, 2011; Figura 5.17).

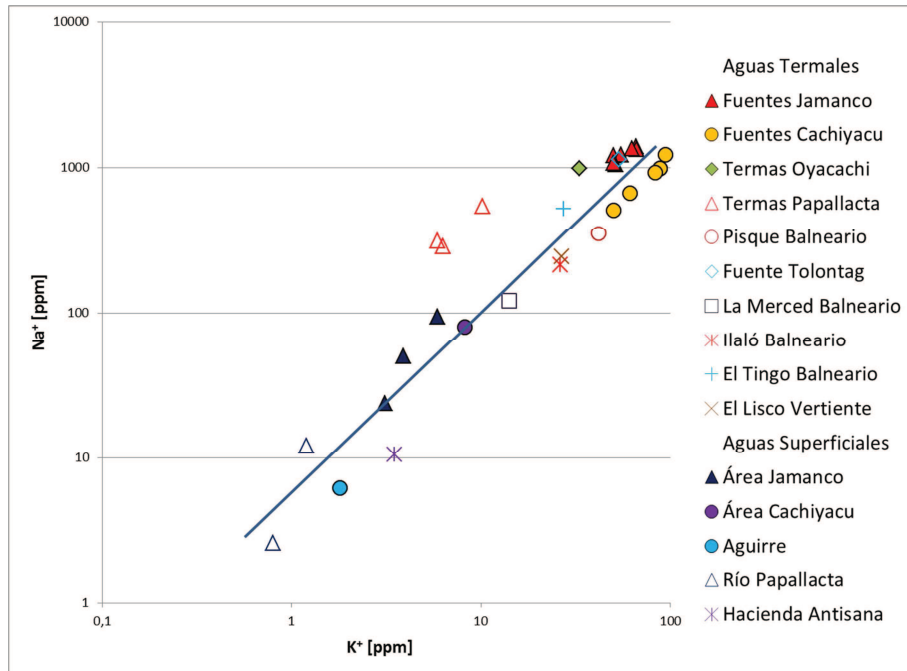


Figura 5. 17. Diagramas binarios Na vs K en ppms, de las fuentes termales y frías de la Caldera de Chacana.

Los diagramas de Piper y Langelier-Ludwig que es una variación del diagrama de Piper, (Figuras 5.18; 5.19) permiten clasificar las aguas termales y superficiales de acuerdo al contenido de sales y el tipo dominante de aniones y cationes.

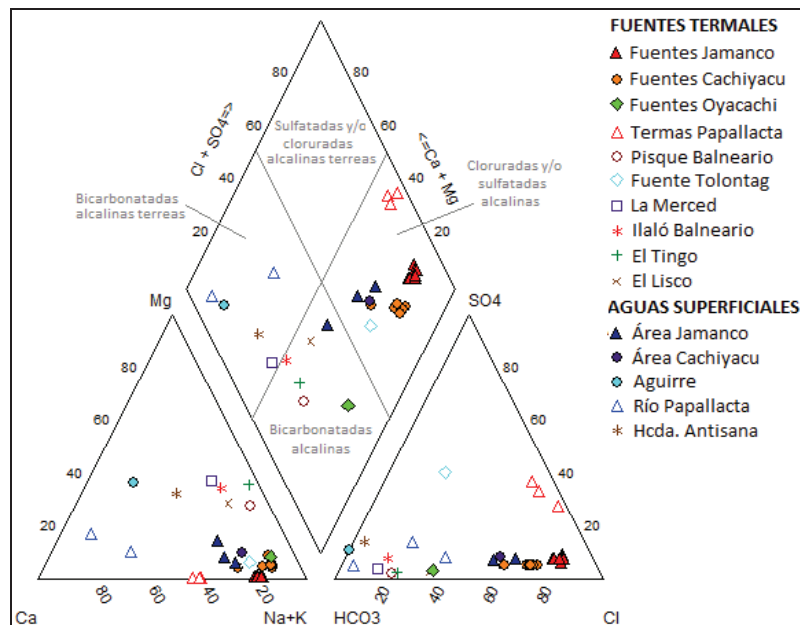


Figura 5. 18. Diagrama de Piper-Hill-Langelier, para clasificación de las aguas frías y termales de Chacana.

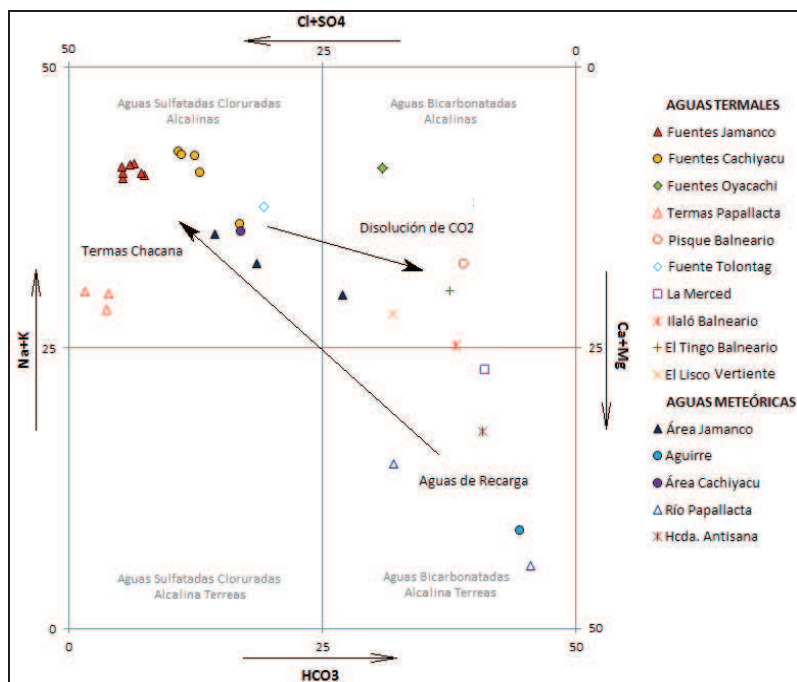


Figura 5. 19. Diagrama de Langelier-Ludwig, para clasificación de las aguas frías y termales de Chacana.

Aguas bicarbonatadas alcalino terreas son las aguas de zonas de recarga frías de baja salinidad como las muestras de Aguirre (C2), Río Papallacta (E5) o Hacienda Antisana (E18).

Las Fuentes Termales de Jamanco (T1 a T21), Cachiyacu (C1 a C14, excepto C2 y C8 que son muestras superficiales), Papallacta (E1, E2 y E3) y Tolontag (E9) son aguas sulfatadas cloruradas alcalinas de alta salinidad (>5000 mg/l), muestran como elemento dominante el Na-Cl en su composición química. Este tipo de aguas provienen desde reservorios geotermales de elevada entalpia relativamente profundos que posiblemente estén asociados a rocas del relleno de la caldera.

Las Fuentes Termales de El Pisque (E8), Oyacachi (O1 y O2), El Lisco (E19), La Merced (E10), Ilaló (E11), El Tingo (E12) son aguas bicarbonatadas alcalinas originadas por disolución de gases que llevan  $\text{CO}_2$  o por condensación del vapor geotérmico cuya salinidad es alta (>4000 mg/l), típicas de las zonas marginales de los campos de agua dominante.



El diagrama ternario Na-K-Mg (Figura 5.20) es usado para la clasificación de aguas dentro del equilibrio total, equilibrio parcial y aguas inmaduras. Además permite ver con mejor claridad el origen de las aguas, si el fluido tiene equilibrio con minerales hidrotermales y predecir las temperaturas de equilibrio.

Las Fuentes Termales de Jamanco y Papallacta se encuentran en equilibrio parcial. Las Fuentes Termales de Cachiyacu, Oyacachi y Tolontag se encuentran cerca de la línea de equilibrio parcial. Las demás fuentes termales así como las muestras superficiales caen en el campo de aguas inmaduras que presentan relativamente concentraciones elevadas de Mg, elemento que es soluble a bajas temperaturas, sugiriendo que las temperaturas a las que circulan este grupo de aguas termales a profundidad es menor a 100°C, lo que indica que estas aguas son el resultado de la mezcla de un acuífero termal con uno superficial de baja temperatura.

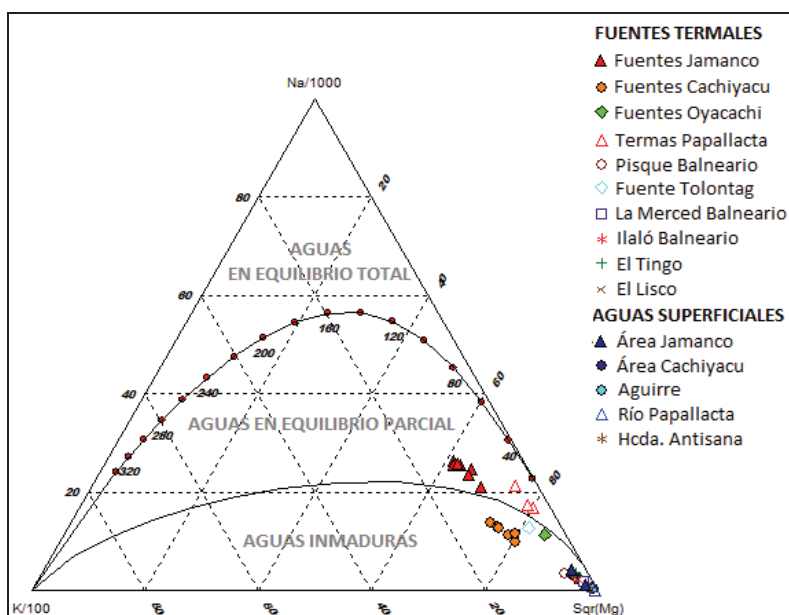


Figura 5. 20. Diagramas Triangular de Gignebach (1988) de las aguas termales y frías de Chacana.

#### 5.5.4. ELEMENTOS EN TRAZAS.

En la Tabla A3.6 se muestra la concentración de elementos traza en las aguas termales de las áreas de Jamanco y Cachiyacu, siendo el más considerable el As que varía entre 6.49 y 2.81 mg/l para las fuentes termales y entre 333 a 144 mg/l para aguas del río Tambo y Sucus. La muestra tomada en Aguirre (C2) muestra una concentración de 1.98 µg/l en As, por debajo del estándar dado por la OMS

(Organización Mundial de la Salud) de 0.05 mg/l de As para aguas aptas para el consumo humano; valor que implica que en Aguirre no existe influencia de aguas termales, a diferencia de las fuentes termales de Jamanco y Cachiyacu que desaguan en el río Tambo y Sucus, principales afluentes de la laguna de Papallacta donde se reportan 0.39 a 0.67 mg/l (Cumbal et al., 2006). La presencia de As podría estar relacionado a sulfuros (pirita, calcopirita, marcasita, galena) del sistema hidrotermal de Chacana (Litter, 2009; ver literal 7.6).

Otros elementos traza presentan concentraciones entre 5 a 11 mg/l para el Li y Sr y hasta 25 mg/l para el B. El Sr se comporta de manera similar al Ca y podría estar sustituyendo a este en carbonatos. El B y el Cl pueden ser introducidos a un fluido termal con un contenido determinado de Li, por la absorción de vapores magmáticos a altas temperaturas en forma de HCl y  $H_3BO_3$  respectivamente o pueden incorporarse por lixiviación de la roca junto al Li. El B además es un indicativo de la existencia de fallas en profundidad y lixiviación de rocas marinas (Sánchez et al., 2004) que en el caso de Chacana el B provendría de la lixiviación de rocas metamórficas de origen marino que conforman el basamento de la caldera. La presencia del Li está confinada a aguas profundas que han tenido circulación lenta y por lo tanto mayor interacción agua/roca (Sánchez et al., 2004).

La variación similar entre el Li y B (Figura 5.21), indica un mismo origen para las aguas termales de Jamanco y Cachiyacu. Tanto el Li como el B presentan una alta movilidad en aguas geotérmicas y flujos regionales. Aguas cloruradas sulfatas de la caldera presentan alta salinidad y por lo tanto relativamente altos contenidos de B y Li.

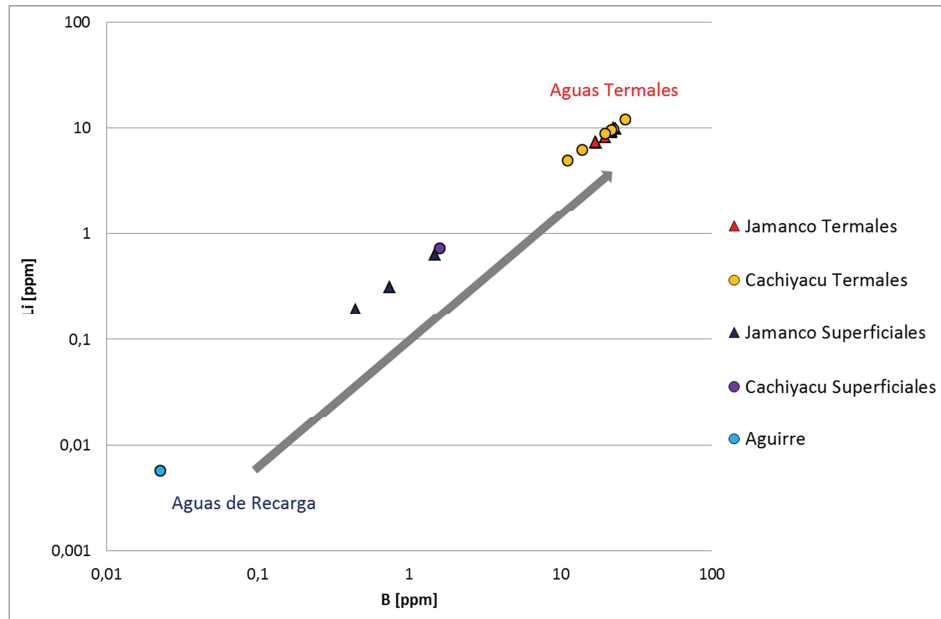


Figura 5. 21. Diagrama binario de Li vs B, para aguas termales y frías del área de Jamanco y Cachiycu.

En el diagrama Cl-Li-B (Figura 5.22), donde se consideran algunos de los campos definidos por Giggenbach y Goguel (1989), las aguas termales ubicadas en Jamanco y Cachiycu, muestran una interacción con rocas riolíticas, que serían rocas del relleno intra-caldera y que tienden a absorber vapor.

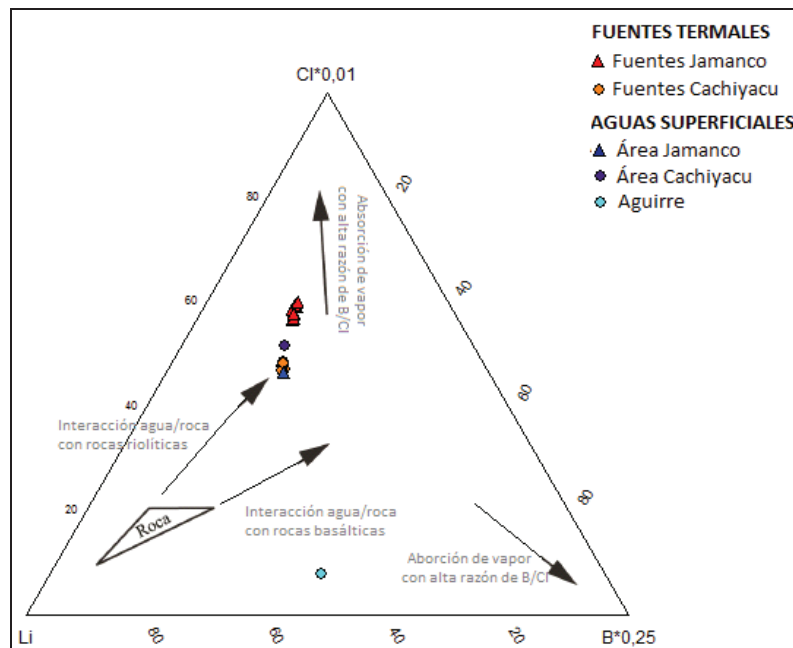


Figura 5. 22. Uso del diagrama ternario de Giggenbach y Goguel (1989), para aguas termales y frías del área de Jamanco y Cachiycu.

## 5.6. GEOTERMÓMETROS HIDROQUÍMICOS.

El propósito de la termometría hidroquímica es que mediante la química de las aguas termales muestreadas, se establezca esencialmente la temperatura a la cual se forman los equilibrios termodinámicos entre el agua y la roca en el acuífero o reservorio termal base. Los geotermómetros son ecuaciones analíticas deducidas en forma teórica y experimental a partir de la composición química de los fluidos termales, de las constantes de equilibrio de las reacciones química mineral solución, datos calorimétricos y estudios de interacción roca-agua en condiciones de equilibrio químico y termodinámico (Orche, 2011).

Los geotermómetros son probablemente las herramientas más importantes en la fase de prospección e incluso muy útiles durante la explotación geotérmica, principalmente durante el monitoreo del reservorio geotérmico. Cuando los fluidos geotérmicos alcanzan la superficie se enfrían por pérdida conductiva de calor ya que pasan por rocas más frías o por ebullición, debido a un decrecimiento en la hidrostática en la superficie. El enfriamiento conductivo puede causar modificaciones en la composición química del agua ascendente por disolución o precipitación de minerales porque al enfriarse un fluido geotermal puede cambiar su grado de saturación con respecto a los minerales primarios y secundarios, y puede afectar el cálculo de la temperatura estimada. Los procesos de ebullición también causan cambios en la composición de los fluidos ascendentes, porque la temperatura decrece y la saturación varía por lo que la precipitación y disolución de minerales puede afectar a la estimación de la temperatura (Henley y Ellis 1983; Marini, 2000). Otro proceso importante es la mezcla con agua superficial que puede diluir y enfriar los fluidos hidrotermales ascendentes.

Los geotermómetros dependen primordialmente de uno o más constituyentes disueltos en los fluidos geotérmicos cuyas concentraciones varían acorde a la temperatura de los fluidos en el reservorio. La química de los geotermómetros depende de la existencia en profundidad de equilibrio fluido-mineral, el cual debe mantenerse durante el ascenso del fluido a la superficie (Yock, 2009). Este concepto debe tomarse siempre en cuenta y comprende las siguientes presunciones:

- Existe equilibrio fluido-mineral en profundidad.
- Una temperatura en función de la reacción en profundidad.
- Un suministro adecuado de fase sólida que sature el fluido con relación a los componentes destinados para la Geotermometría.
- Re-equilibrio insignificante con el agua que fluye en superficie.
- No existe disolución o mezcla de aguas calientes y frías.

De estas conjeturas las tres primeras se pueden cumplir en muchos lugares. Las dos restantes no son válidas para muchos fluidos geotérmicos ya que el muestreo de los fluidos geotérmicos es en las partes superficiales del sistema donde existe agua superficial.

#### **5.6.1. LIMITACIONES DE LOS GEOTERMÓMETROS HIDROQUÍMICOS.**

Durante el ascenso de las aguas termales hasta su llegada a la superficie, pueden cambiar las condiciones físicas y químicas, lo que puede modificar el quimismo y conducir a estimaciones y cálculos erróneos en la aplicación de geotermómetros. Como por ejemplo el enfriamiento puede causar cambios en la composición química del fluido ascendente, por disolución o precipitación de algún mineral, o la ebullición puede causar pérdida de agua en forma de vapor, lo que conlleva al incremento de la concentración de solutos en la fase líquida (Yock, 2009).

Las temperaturas que muchas veces son calculadas no son necesariamente las máximas que existen en el reservorio. En el mejor de los casos indican la temperatura a la que se alcanzó el equilibrio. La dispersión de resultados al aplicar varios geotermómetros implica que: no existe equilibrio químico, existe mezcla de aguas e incluso una falla durante el muestreo del agua (Orche, 2011). Estas consideraciones condicionan y limitan el uso de los geotermómetros de tal manera que los hacen prácticamente inviables en ciertas áreas. Cabe notar que Chacana presenta una alta humedad y que el nivel freático está casi en la superficie por lo que una mezcla de agua superficial con agua procedente del subsuelo es un factor que puede causar errores en la aplicación de

geotermómetros en esta área, además que las aguas termales presentan un equilibrio parcial y no completo (ver figura 5.20).

Cada geotermómetro presenta restricciones y limitaciones para su uso conforme a la estimación de errores calculados por cada autor, en concordancia a condiciones de equilibrio asumidas en laboratorio y a la cantidad elementos disueltos en el agua. Estas limitaciones se encuentran publicadas en los trabajos de Fournier y Truesdell (1974), Karingithi (2009), Marini (2000), Orche (2011) y se resumen a continuación.

Los geotermómetros de sílice se deben emplear con temperaturas inferiores a 250°C. Por debajo de los 180°C se puede originar precipitaciones de sílice, aunque la velocidad de precipitación disminuye muy rápido a temperaturas bajas. Estos geotermómetros no funcionan bien en aguas con pH ácido, ni cuando existen bajas concentraciones de ion Cl, debido a que aguas cercanas a los 100°C de temperatura atacan a las rocas silicatadas, alcanzando valores altos de concentración de SiO<sub>2</sub> amorfo, que es muy soluble.

Los geotermómetros de Na/K no tienen un carácter universal, ya que en teoría este geotermómetro depende del intercambio iónico de Na y K en presencia de feldespatos alcalinos (albita-ortoclasa sus polimorfos), minerales que no siempre están presentes en rocas que conforman los sistemas geotérmicos. Estos geotermómetros son aplicables con aguas a alta temperatura obtenidas en sondeos profundos ya que alcanzan el equilibrio a altas temperaturas y son poco precisos en aguas de manantiales superficiales, lo que quiere decir que dan pobres resultados por debajo de los 100°C. Además la relación Na/K no puede ser utilizada cuando la relación de valores molares de Ca y Na es mayor que la unidad. También estos geotermómetros son aplicables si las aguas contienen bajas concentraciones de Ca y con aguas cloruradas con pH neutro.

Los Geotermómetros de Na-K-Ca, pueden presentar resultados erráticos debido a: elevadas presiones parciales de CO<sub>2</sub>, reacciones de intercambio entre Na, K, Ca con otros iones como el Mg o por la precipitación de Ca en forma de carbonato durante el ascenso de agua, por lo que estos geotermómetros no deben aplicarse

en aguas ricas en Mg. Estos geotermómetros no pueden ser aplicados en aguas ácidas que no estén en equilibrio con los feldespatos, ni son aplicables a los sistemas de agua en las rocas con concentraciones inusualmente altas o bajas de un determinado elemento alcalino. La pérdida de CO<sub>2</sub> causa la precipitación de calcita lo que provoca que las temperaturas medidas por este geotermómetro sean muy altas.

Otros geotermómetros como los de K/Mg y Li/Mg son óptimos para situaciones donde el Na y Ca no equilibran rápidamente y donde existe reacciones que involucran Mg, debido a que el Mg reacciona rápidamente a temperaturas bajas, por lo tanto se puede obtener temperaturas de la última ebullición. Geotermómetros de Na/Li son sensibles a la lixiviación del Li de las rocas circundantes debido a que un pequeño cambio en la concentración de este elemento cambia el resultado de geotermómetro incluso si su aplicación se realiza en la misma muestra de agua.

#### **5.6.2. APLICACIÓN DE LOS GEOTÉRMÓMETROS HIDROQUÍMICOS EN LAS AGUAS DE LAS FUENTES TERMALES DE CHACANA.**

Con los datos disponibles de la Tabla A3.5 se realizó el cálculo de los geotermómetros de acuerdo a las fórmulas descritas en la Tabla A3.9 obtenidas de los trabajos de Karingithi (2009), Yock (2009) y Orche, (2011).

Geotermómetros de Sílice (Tabla A3.10) estiman temperaturas que varía entre 120°C a 140°C en el área de Jamanca, entre 170°C a 130 °C en Cachiyacu, entre 115°C a 100 °C en Papallacta, entre 150°C a 170°C en Oyacachi y entre 160°C a 120°C para fuentes termales exteriores. Estos resultados implican que la solubilidad de sílice está regida por las fases de calcedonia y cuarzo, además que podría existir precipitación de sílice, aunque la velocidad de precipitación disminuye muy rápidamente a temperaturas más bajas (Marini, 2000). La cristobalita precipita muy rápidamente del agua al ser un sílice amorfo, lo que significa, que no se encuentran los manantiales sobresaturados en esta fase y por lo tanto los geotermómetros de cristobalita  $\alpha$  y  $\beta$  estiman temperaturas muy bajas (<100°C). En Chacana existe una alta humedad en superficie, y por lo tanto agua

superficial en grandes cantidades. Aguas frías contiene concentraciones muy bajas de sílice, éstas aguas podrían mezclarse con manantiales superficiales, mezclando las concentraciones de sílice dando valores de temperatura inferiores a los reales (Orche, 2011).

Geotermómetros de Na/K (Tabla A3.11) estima temperaturas que varían alrededor de 180°C y 120°C en el área de Jamanca, entre 230°C a 170°C en Cachiyacu, alrededor de 110°C en Papallacta, entre 170°C a 150°C hasta 110°C en Oyacachi y entre 200°C a 250°C para fuentes termales exteriores. Estos geotermómetros presentan ventajas cuando se utilizan en manantiales termales como los de Chacana, ya que durante el ascenso de las aguas hacia la superficie sufren enfriamiento o en ciertos casos ebullición por lo que las reacciones de intercambio que regulan las relaciones molares de Na/K son más lentas, que las que regulan la solubilidad de sílice (Marini, 2000; Orche 2011). Por eso las condiciones profundas se mantienen durante más tiempo, lo que significa que el geotermómetro Na/K es más fiable en cuanto a valorar la temperatura profunda, que las de los geotermómetros de sílice, proporcionando temperaturas superiores a las de este (Karingithi, 2009), evidentes en los resultados obtenidos.

Los geotermómetros de Na/K sobre estiman sistemáticamente las temperaturas de los sistemas geotérmicos de baja o media entalpía ( $T < 160^\circ\text{C}$ ). Como se observa los resultados, las temperaturas estimadas son dispersas por debajo de los 250°C, las cuales podrían confluir a medidas que la temperatura aumenta hasta llegar a los 300°C, rasgo característico en estos geotermómetros (Marini, 2011).

Geotermómetro de Na-K-Ca (Tabla A3.12) estiman temperaturas que varía alrededor de 280°C en el área de Jamanca, 340°C en Cachiyacu, 200°C en Papallacta, 260°C en Oyacachi y entre 280°C y 340°C para fuentes termales exteriores. Todos estos valores superan los 200°C, rasgo característico de estos geotermómetros y proporcionan mejores resultados que los de Na/K, aunque hay que considerar que la precipitación de carbonatos (travertino) en las fuentes termales de Chacana podría proporcionar temperaturas anómalas y erróneas (Fournier y Truesdell, 1974; Karingithi, 2009).



Otros geotermómetros catiónicos (K, Li, Na, Mg, Ca) estiman temperaturas entre 150°C a 230°C hasta los 500°C e incluso bajan hasta los 100°C. Esta discrepancia entre los valores resultantes puede deberse a una mezcla de diferentes aguas sin que se haya alcanzado el equilibrio agua-roca después de la mezcla. Los geotermómetros que involucran Mg son buenos indicadores de la última temperatura de equilibrio agua-roca, pero en Chacana no existen aguas que se encuentren en equilibrio total por lo que las concentraciones relativamente altas de Mg estarían dadas por el aporte de las aguas frías en las aguas termales en la superficie o muy cerca de esta (Marini, 2000).

Los valores óptimos de temperatura del reservorio a considerar son de las aguas termales que se encuentran en equilibrio total, las cuales no existen en Chacana (Yock, 2009). Las más cercanas a este parámetro son aguas en equilibrio parcial de Jamanco y Papallacta (Figura 5.20). Los valores determinados con los geotermómetros de sílice en las aguas de Jamanco y Papallacta no son viables a considerar ya que existe una alta humedad en Chacana y por lo tanto una mezcla de las concentraciones de sílice entre aguas superficiales y termales (Orche, 2011). Los geotermómetros de Na/K no son viables a utilizar cuando las concentraciones de CO<sub>2</sub> son altas, por lo que los resultados obtenidos con estos geotermómetros en el área de Jamanco y Cachiyacu no son confiables (Karingithi, 2009), a diferencia de los valores obtenidos en el área de Papallacta que varían entre 150°C a 170°C de temperatura para el reservorio y cuyas aguas termales presentan concentraciones de CO<sub>2</sub> relativamente bajas (ver Figura 5.23). Los geotermómetros de Na-K-Ca dan excelentes resultados por lo que las temperaturas del reservorio variarían hasta 280°C en Jamanco y 260°C en Papallacta, pero estos datos deben manejarse con precaución ya que es difícil evaluar el efecto de dilución (efecto que aumenta a medida que existe mayor incorporación de agua fría en el sistema. Orche, 2011). Los geotermómetros que incorporan Li-Mg-K indican que las últimas temperaturas de equilibrio agua-roca en Jamanco y Papallacta son de 160°C y 135°C respectivamente (Orche, 2011). En suma, las temperaturas a las que se encuentra el reservorio de acuerdo a la utilización de los geotermómetros con sus respectivas restricciones variarían entre

los 170°C a 280°C, valores obtenidos a partir de las aguas en equilibrio parcial de Jamanco y Papallacta.

En general la ausencia de equilibrio total en los fluidos geotérmicos de la Caldera de Chacana, induce una alta incertidumbre en los resultados geotermométricos obtenidos, ya que las aguas termales pueden haber incorporado Ca, Na, Mg a niveles someros (Marini, 2000).

### **5.7. GEOQUÍMICA DE GASES (GAS BURBUJEANTE Y DISUELTO).**

Los gases en fuentes termales son trazadores geoquímicos debido a su alta movilidad, ya que en muchos sistemas geotérmicos controlan en mayor o menor medida el régimen de descarga en manantiales y pozos. En muestras de gas disuelto se dispone del contenido en cc/litre STP (Estándar de Temperatura y Presión) de He, H<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>, CO, CH<sub>4</sub> y CO<sub>2</sub> (Tabla A3. 7). Los valores CO<sub>2</sub> son elevados en aguas termales con respecto al agua en equilibrio con la atmósfera (CELEC EP, 2012). En la Figura 5.23 se puede observar que existe un enriquecimiento de CO<sub>2</sub> y altos contenidos de He en aguas termales con respecto al agua saturada en aire (ASW), lo que implica una contribución de fluidos volátiles en el sistema e interacción agua-agua y agua-gas en subsuperficie a excepción de las muestras de Papallacta que presentan un ligero empobrecimiento en CO<sub>2</sub> con respecto a las demás, probablemente porque existe menor permeabilidad en la zona lo que impide el ascenso de gas en la zona o existe una mayor incorporación de CO<sub>2</sub> en las aguas superficiales (Marini, 2000; Inguaggiato et al., 2010).

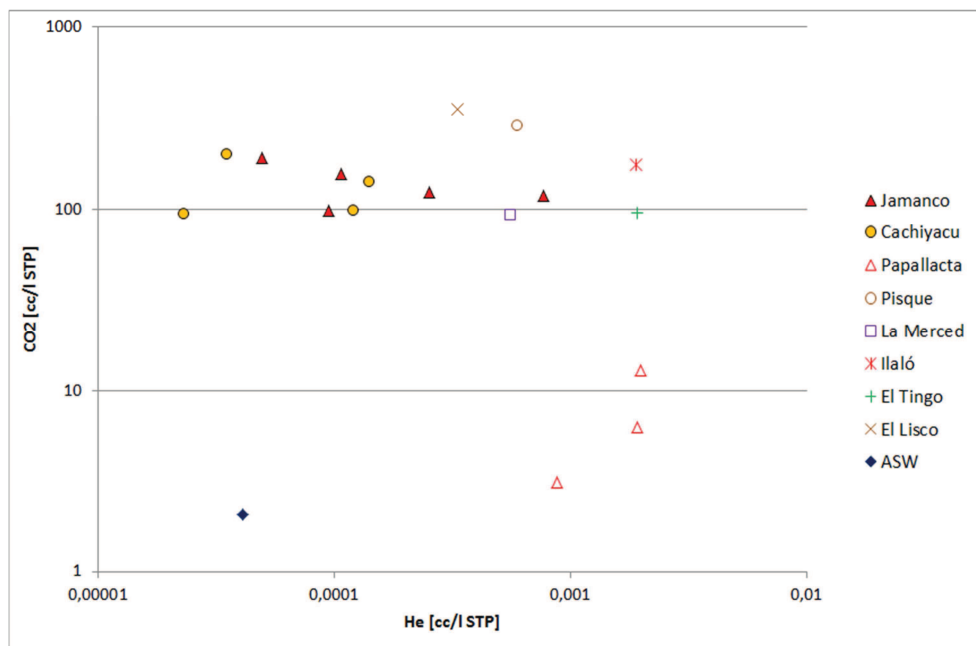


Figura 5. 23. Diagrama binario CO<sub>2</sub> vs He en aguas termales con gas disuelto. Las muestras presentan enriquecimiento en el contenido de He y CO<sub>2</sub> con respecto al agua saturada en aire (ASW).

Varias fuentes termales en todas las áreas dentro de Chacana muestran gas burbujeante (Figura 5.24), con altos contenidos de CO<sub>2</sub> y He. En el área de Salve Faccha incluso existe salida de H<sub>2</sub>S evidenciado por su olor hediondo característico.



Figura 5. 24. Izquierda. Salida de gas a manera de burbujas en la Fuente Termal C6 (UTM WGS 84. 808787E/9954836N) en el área de Cachiyacu; Derecha. Salida de gas frío (H<sub>2</sub>S) a manera de burbujas en la Fuente Termal SF2 (UTM WGS 84. 814588E/9975183N) en el área de Salve Faccha.

En muestras de gas burbujeante se dispone del contenido de O<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub> en % de volumen, de CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> en ppms de volumen e isotopos de He y CO<sub>2</sub> expresados en R/Ra y delta por mil vs. PDV respectivamente (Tabla A3.8). Los valores isotópicos de He y CO<sub>2</sub> muestran un origen magmático de estos fluidos ya

que sus valores son cercanos a la firma isotópica de los MORB (Figura 5.25). Esto implica que existe un magma joven en proceso de desgasificación y enfriamiento con alto contenido de volátiles, evidente en los altos contenidos de He y que este magma es la fuente de calor en el sistema (CELEC EP., 2012).

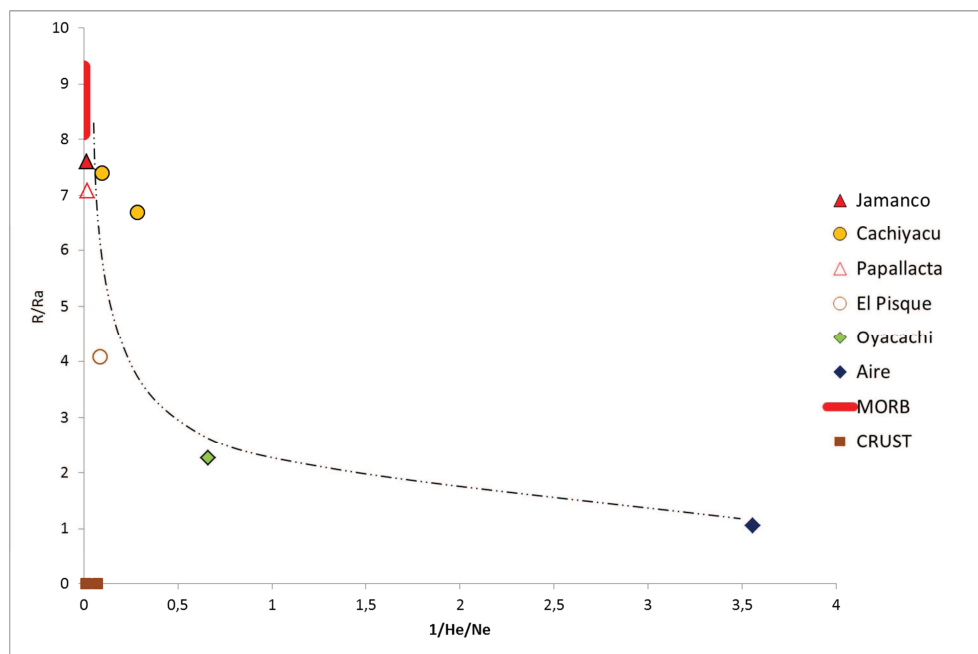


Figura 5. 25. Diagrama Binario de la Relación R/Ra (He) vs 1/He/Ne. Las muestras sugieren una firma muy "magmática" de las aguas de las muestras.

## 5.8. DEPÓSITOS SUPERFICIALES (TRAVERTINO).

El rápido enfriamiento y desgasificación de las aguas termales de Chacana al llegar a la superficie, permiten la precipitación de las sales disueltas con el consecuente depósito de travertino. En el área de Salve Facha existe precipitación de azufre elemental alrededor de los ojos de agua específicamente en las fuentes de Chimborazo Tola Alta (SF2) y Mapayacu (SF1) cuyas aguas no sobrepasan los 15°C de temperatura, la concentración de Cl no es mayor a los 2.5 mg/l y su pH es neutro entre 7.3 y 7.5 (Tablas A3.1; A3.5). Estas aguas podrían ser calentadas por vapores geotérmicos; vapores que al ascender no llevan Cl pero sí H<sub>2</sub>S, que al oxidarse en superficie producen una pátina de sulfato o azufre elemental (Figura 5.26).



**Figura 5. 26. Precipitación de Azufre elemental en la Fuente Mapayacu “SF1” (UTM WGS84. 814951E/9975026N).**

Existen amplios depósitos de travertino cubriendo aproximadamente áreas de 400 m<sup>2</sup> en el área de Cachiyacu (Figura 5.27), constituyen depósitos subhorizontales con respecto a la pendiente de hasta 10 cm de espesor, estos se encuentran en su mayoría sobre depósitos de morrena cuyo color es un castaño claro. Las terrazas de travertino cerca al pie del domo Yanaurco se encuentran sobre andesitas del domo y junto a rocas alteradas con sílica masiva, en zonas planas forman cochas alrededor de los ojos de agua termal. (Figura A2.24).



**Figura 5. 27. Formación de terrazas de travertino en las fuentes termales de Cachiyacu; Izquierda. Terraza de Travertino formada por las fuentes termales C5 y C6; Derecha. Terraza de Travertino Formada por las fuentes termales C13 y C14.**

En los cañones de los ríos Tambo y Sucus en Jamanco el travertino se presenta como manchas de coloración ocre intenso con aureolas de color verde donde se ubican los ojos de agua termal (Figura 5.28). En zonas donde se han construido

balnearios el travertino se precipita en los alrededores de tuberías y piscinas (Termas Jamanco, Papallacta y Oyacachi) las cuales deben ser limpiadas periódicamente (en Jamanco el mantenimiento de tuberías se realiza cada 6 meses).



**Figura 5. 28.** Izquierda. Cochas de lodo formadas alrededor de la fuente termal C9 (UTM WGS84. 809068E/9955157N); Derecha. Precipitación de travertino alrededor de los ojos de agua termal ubicados en el cauce del río Tambo, cercanos a la fuente termal T14 (UTM WGS84. 813988E/9958412N).

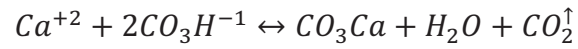
En general el travertino se presenta a manera de capas laminadas milimétricas de carbonato cálcico, con laminación subhorizontal y escalonada con pequeños crecimientos subsféricos, en ocasiones aparece denso, duro, no poroso o frágil y poroso. (Figura 5.29).



**Figura 5. 29.** Izquierda. Travertino formado por las fuentes termales C13 y C14 con crecimientos subsféricos (UTM WGS84. 808623E/9955152N); Derecha. Travertino laminar formado alrededor de la fuente termal C1 (UTM WGS84. 808743E/ 9954811N).

La precipitación de travertino se produce a partir de aguas neutras a alcalinas con altas actividades de  $\text{Ca}^{2+}$  y  $\text{CO}_3^{2-}$ , además la temperatura juega un papel importante en el control de la precipitación; por enfriamiento se logra la

sobresaturación del carbonato al perder CO<sub>2</sub> (Echeveste, 2005) como se muestra en la siguiente ecuación:



Por lo tanto los depósitos de travertino son rasgos característicos para la localización de las fuentes termales en Chacana y relacionarlos con el marco tectónico de la caldera, ya que las fallas son los principales canales de circulación de las agua termales que al alcanzar la superficie y perder el CO<sub>2</sub> disuelto, precipitan el carbonato de calcio formando los niveles de travertino.

## **CAPÍTULO VI.**

### **6. RECONOCIMIENTO FOTOGEOLOGICO DE ZONAS DE ALTERACIÓN HIDROTERMAL Y FALLAS GEOLÓGICAS EN LA CALDERA DE CHACANA.**

#### **6.1. INTRODUCCIÓN.**

La comprensión de la distribución espacial de las fallas y fracturas y su relación con la litología es un aspecto importante en la exploración geotérmica. A través de estas se infiltran fluidos meteóricos que recargan el sistema geotérmico y posteriormente ascienden debido i) a la diferencia de presión generada por fases de ebullición o expansión de gases ii) o la diferencia de densidades entre fluidos fríos y calientes, formando un ambiente convectivo.

En este capítulo se presenta la caracterización de fallas, fracturas y zonas de alteración hidrotermal, existentes en la Caldera de Chacana, a través de la interpretación fotogeológica que permite ubicar rasgos lineales los cuales son asociados a fallas y fracturas que influirían en la permeabilidad de un sistema geotérmico. El análisis fotogeológico tiene relevancia para identificar potenciales sistemas hidrotermales en subsuperficie, debido a que evidencian zonas donde se cumpla la ocurrencia a la vez de i) descargas de calor a través de fuentes termales, ii) permeabilidad dada por el cruce de falla y iii) asociaciones mineralógicas de alteración y depósitos superficiales.

#### **6.2. SISTEMAS DE FALLAS QUE ATRAVIESAN LA CALDERA DE CHACANA.**

La Placa Nazca converge con la Placa Sudamericana a una rata de 6.0 cm/año de manera ortogonal (Schellart et al., 2007) generando un sistema regional compresivo E-W. Esto genera a su vez el sistema de fallas transcurrentes de dirección NNE-SSW. Uno de estos sistemas es el Sistema Chingual-Pallatanga-Guayaquil que es una prolongación Sur del Sistema Mayor Dextral Algeciras-



Sinbunday-Falla de Afiladores de Colombia. La Falla Chingual se bifurca hacia el Sur a los segmentos Falla Pallatanga y Falla Illinizas, formando una asociación compleja de fallas transcurrentes, y de fallas inversas u oblicuas que atraviesan la Cordillera Real y por tanto también la Caldera de Chacana (Soulas et al., 1991).

En el estudio realizado por Yepes et al. (2000) para la EMMAP-Q, se interpretó que la prolongación Sur de la Falla Chingual es un sistema de fallas en echelón dextral, que se identifica al Norte, desde el sector de Oyacachi donde el ramal de la Falla Chingual se bifurca en al Suroeste en dirección a la Falla Ramón Sacha y hacia el NE-SW hacia la Falla Papallacta (Figura 6.1).

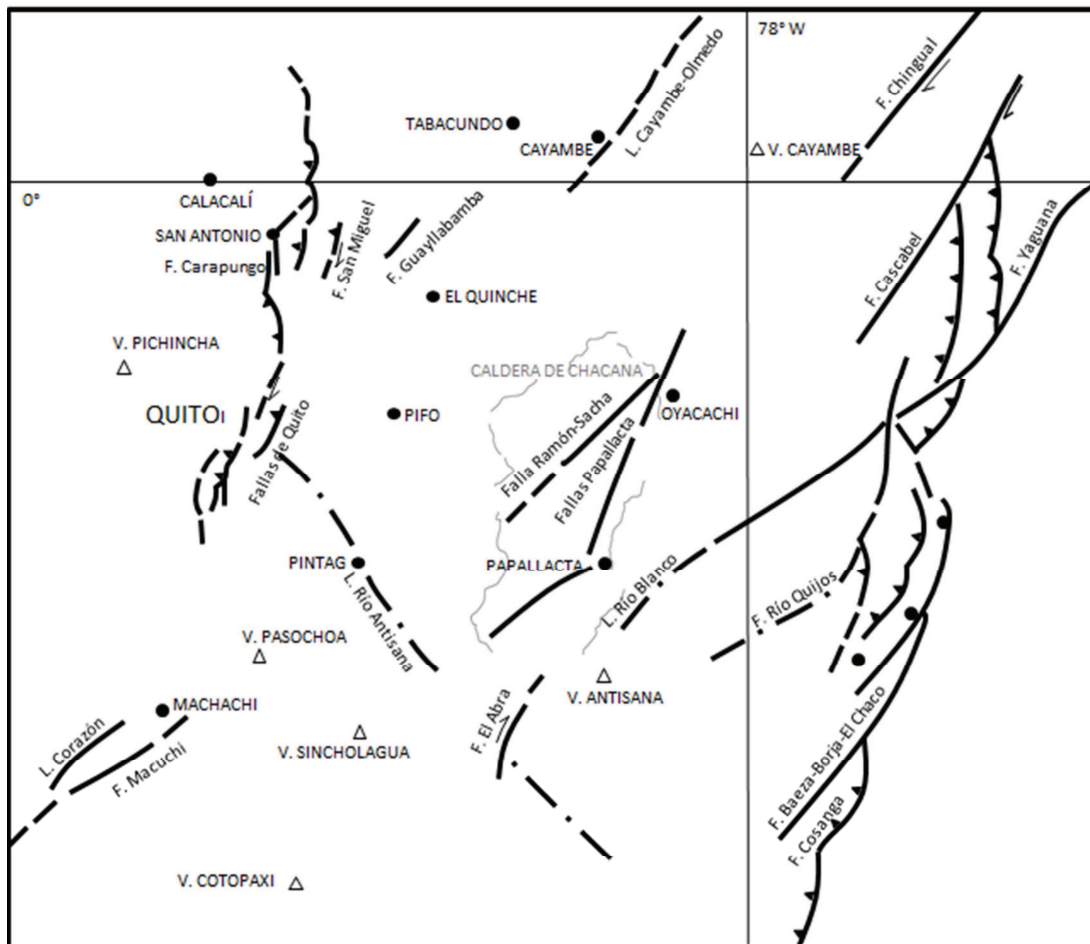


Figura 6. 1. Sistema de Fallas Regionales que atraviesan la Caldera de Chacana (Proyecto Ríos Orientales, 2000).

### **6.3. ESTRUCTURAS RELACIONADAS A LINEAMIENTOS FOTOINTERPRETADOS.**

El análisis de las fotografías aéreas (Anexo 4) ha mostrado rasgos geomorfológicos que confirman la presencia de lineamientos que pueden ser interpretados como fallas y que han sido identificados también en estudios previos. Las principales estructuras identificadas en la Caldera de Chacana se describen a continuación.

**Falla Ramón Sacha.-** definida por Yepes et al. (2000) presenta una dirección NE-SW y es un ramal de la bifurcación de la falla Chingual hacia el Sur. Se extiende desde Oyacachi en el borde Noreste de la caldera hacia la zona Norte del cerro Potrerillos. Rasgos morfológicos de esta falla son escarpes alineados entre la zona de Salve Faccha y al Norte de la laguna de Parcacocha (ver Figuras A4.2, A4.3, A4.4.). Yepes et al. (2000) relacionan a estas fallas con zonas de milonitización, alteración hidrotermal y diaclasas en dirección preferencial N20E y N30E.

**Falla Sucus.-** lineamientos de escarpes al Norte de la laguna Sucus define esta falla que se extiende desde esta zona en dirección SW (ver Figuras A4.3, A4.5.). Yepes et al. (2000) evidencian una dirección N85W y un buzamiento entre 75° y 90° de esta falla con componente sinistral en el sector de La Virgen relacionada a zonas milonitizadas, alteración hidrotermal y un juego de fallas conjugadas. Además se ha evidenciado que los depósitos glaciares del valle y el drenaje mismo, se ven afectados por la falla.

**Falla Ramal Papallacta.-** Es un lineamiento identificado por Yepes et al. (2000) cuya dirección es N20E y es discontinuo debido a que se encuentra cubierto por material morrénico. En el borde Este de la caldera paralelo al valle de Papallacta persisten algunos escarpes que lo sugieren como una falla. Este se extiende desde la zona Sur de Oyacachi hasta el sector Norte del poblado Papallacta. (Figuras A4.4, A4.6).

**Falla Papallacta (Contacto Basamento-Borde Este de Chacana).**- El cambio brusco de Oeste a Este en la zona de Papallacta de rocas volcánicas a metamórficas se asume como evidencia de una falla que marca el borde estructural de la caldera y que se define como una falla NNE-SSW que forma el contacto entre el basamento de edad Mesozoica y la Caldera de Chacana (CELEC EP., 2012). Este contacto está relacionado a brechas de colapso y brechas de diatremas freatomagmáticas locales. En el sector del río Papallacta se observan varios lineamientos en dirección NE-SW con continuidad morfológica, afectados por actividad glaciaria con presencia de varios escarpes que se encuentran en el borde Este del valle del río (ver Figuras A4.3, A4.6.).

**Falla Río Blanco.**- se define por el valle del río Blanco sobre un lineamiento en dirección NE-SW (ver Figura A4.8.), que se extiende por al menos 40 km, desde el río Papallacta, atravesando por debajo del volcán Antisana, continúa por el valle Diguche hasta el flanco Nor-Occidental de la Caldera de Chalupas, presentando un desplazamiento dextral (CELEC EP., 2012). Posiblemente se extiende hacia el Norte tomando el nombre de Falla Yaguana y hacia el Sur por debajo del volcán Antisana, conectándose con la Falla El Abra (Figura 6.1).

**Falla Tumiguina.**- se localiza subparalela a la falla Río Blanco y Tambo, en el valle del río Tumiguina donde se localizan varios escarpes (ver Figura A4.6, A48). Esta falla se extendería al NE cortando el del valle glaciario donde se ubican las Termas Papallacta y que podría prolongarse al SW por debajo de Plaza de Armas definiendo y afectando dextralmente al lineamiento del río Antisana. (Beate y Villares, 2010; CELEC EP., 2012).

**Falla Tambo.**- Yepes et al. (2000), identifican lineamientos con dirección E-W ESE-WNW; interpretados como fallas normales con una importante componente normal. A estos lineamientos los denomina Falla El Tambo y las asocia con estrías, fuentes termales y zonas de milonización con un ancho de 100 metros en el valle del río Tambo (sector de la laguna de Papallacta) que evidencian la presencia de esta falla. Posteriormente la falla del Tambo se la presenta como una estructura de más de 50 km de largo, subparalela a la Falla Tumiguina, que se alinea con el río Tambo, atravesando los valles del Tambo y Cachiyacu,

alineando las fuentes termales de Jamanco, Cachiyacu y el Lisco (ver Anexo 1.2, Figura A4.5); esta falla puede ser trazada hacia el SW donde corta y desplaza dextralmente el lineamiento río Antisana. (CELEC EP., 2012).

**Falla Jamanco.-** se encuentra a la base Sur de la loma Baños en dirección WNW-ESE, que se extiende desde el sector de Papallacta al Este, hasta el flujo de Sucus e intercepta el Rift Chacana (Villares 2010; CELEC EP., 2012). A ésta se asocian zonas de alteración hidrotermal en el borde Norte de la Laguna de Papallacta (ver Figura A4.6). Soulas et al. (2001) fotointerpretan tres lineamientos en dirección WNW-ESE con un fuerte control morfológico que coincidirían con la Falla Jamanco.

**Falla San Clemente.-** Se trata de una estructura a manera de loma de falla localiza claramente en fotos aérea (ver Figura A4.5); se extiende desde el valle de Cachiyacu en dirección E-W hasta el borde Norte de la laguna Tumiguina entre los domos Yanaurco y San Clemente (Villares, 2010; CELEC EP., 2012).

**Rift Chacana.-** define un eje de dirección N-S que pasa por los centros eruptivos de Sucus, Potrerillos y Yarangala extendiéndose hasta la Caldera de Chalupas, siendo esta fractura, el medio por donde se ha suministrado materiales eruptivos a muchos centros de emisión volcánica a lo largo de toda su extensión por más de 200 ka y asociado con la resurgencia de la Caldera de Chacana (Hall et al., 2008).

En este trabajo se localizaron lineamientos y fallas que se describen a continuación, utilizando 2 y 3 juegos lineales de 9 y 5 fotografías aéreas respectivamente que cubren toda la Caldera de Chacana y que se resumen en un mapa 1:100000 y se caracterizan en el Anexo 4.

**Lineamientos NE-SW.-** estos se encuentran a lo largo de toda la Caldera de Chacana en dirección entre N30E a N70E, la mayoría de estos siguen valles y ríos, donde se exponen escarpes que se alinean con lomas de falla. Existen juegos de estos lineamientos paralelos a la quebrada Mullumica que se alinea con el río Oyacachi en el borde Noroeste de la caldera de dirección N60E, más hacia el Sur otro juego atraviesa el Rift Chacana sin afectarlo por la zona de la laguna

Nunalviro y el sector de Chusigviro hasta el valle de Salve Faccha, los cuales coinciden con la Falla Ramón Sacha. Lineamientos similares se encuentran cortando el borde Oeste de la caldera hacia la parte meridional de la misma de dirección N35E, los cuales son subparalelos a las fallas del Tambo la cual se observó que se alinea con afluentes del río Chalpi y Papallacta en el borde Este de la caldera.

Entre los valles de los ríos Blanco Chico y Tumiguina existen otros lineamientos subparalelos a la falla Tumiguina de dirección N45E, otros con dirección N70E que pasan por el pie Sur del domo Tumiguina y al pie Norte de la Loma Chusalongo Grande hasta el borde Este de la caldera.

**Lineamientos E-W.-** Estos se concentran en la parte meridional de la caldera cortando el rift Chacana. Al Norte se ubica este tipo de lineamientos en la Quebrada Sigsichupa que se alinea con el río que alimenta la presa Salve Faccha, más hacia el Sur se alinean varios bordes de lagos y valles en dirección ENE-WSW los cuales cortan y cambian de rumbo siendo continuidades de los lineamientos NE y SW. Otros similares se encuentran en la zona de Cachiyacu entre los Domos San Clemente y Yanaurco coincidentes con la Falla San Clemente.

Al borde exterior Suroeste de la caldera existen lineamientos E-W coincidentes con las quebradas Antisanillas y Chicana; otro juego de lineamientos de este tipo se observaron al borde Norte y Oeste del volcán Antisana.

**Lineamientos NW-SE.-** Son menos frecuentes, se encuentran visibles en la zona Norte de la caldera a manera conjugada con los lineamientos NE-SW, estos se encuentran en dirección N40W, siendo el más representativo el que alinea las fuentes termales de Salve Faccha y que continua por el valle del río Chalpi Grande. En el valle del río Tambo al pie Sur de la loma Baños se encuentra un lineamiento de dirección N70W coincidente con la Falla Jamanco. Varios de estos lineamientos cruzan el borde Suroeste de la caldera, coincidentes con la Quebrada Encantada atravesando el Complejo Singunay hasta los pies Norte y Sur del domo Yanaurco en dirección N25W. Otros lineamiento pocos extensos

cruzan transversalmente los valles de los ríos Blanco Chico y Tumiguina al Sureste de la caldera, que principalmente son lineamientos que siguen afluentes hacia estos ríos.

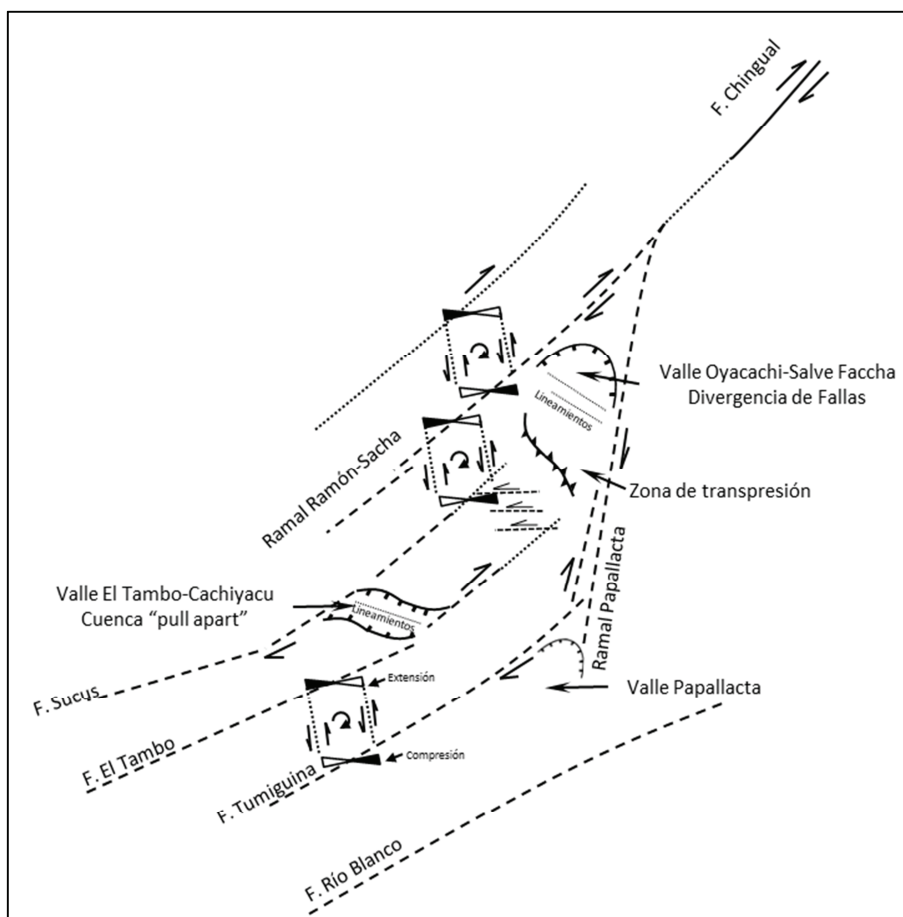
**Lineamientos N-S.-** Estos se encuentran en el borde Este de la caldera coincidentes con el contacto entre basamento y los volcánicos de la caldera. De Norte a Sur se encuentran lineamientos topográficos concordantes con escarpes que atraviesan ortogonalmente el río Oyacachi, alineados con el valle del río Chalpi, más hacia el Sur el lineamiento del río Papallacta subparalelo a lineamientos del borde topográfico Este de la caldera. Al Sur de la caldera existen pocos lineamientos N-S, los más visibles son los que se extienden desde la laguna Santa Lucia hasta el río Tumiguina y que se alinean con otros lineamientos más al Sur que cortan el pie Oeste del Antisana.

#### **6.4. TECTÓNICA.**

El sistema dextral que atraviesa la Caldera de Chacana (Bifurcación de la Falla Chingual), inducen a su vez fallamiento de menor extensión. Soulas et al. (1991), notan que prácticamente todas las fallas activas que atraviesan la zona Este de la Cordillera Real son transcurrentes, de orientación NNE-SSW a NE-SW, o inversas de orientación aproximada N-S. En referencia a la zona de Chacana se interpreta a la zona hacia el Sur de Cayambe como un segmento en echelón dextral y parcial bifurcación en cola de caballo que luego se proyecta hacia la falla Macuchi (Soulas et al., 1991). Observaciones de campo realizadas por Yepes et al. (2000) para el proyecto de Ríos Orientales muestran varias zonas de milonitización relacionados a escarpes de fallas inversas con componentes conjugados. Adicionalmente, Yepes et al. (2000) sugieren la formación de cuencas “pull apart” en el valle del río Sucus. Este sistema de cuenca en transpresión es notado también por Villares (2010) entre las fallas regionales Peltetec y Chingual lo que habría permitido las condiciones para el ascenso de magma y formación de la caldera.

En base a las investigaciones previas se asume, para este estudio, una tectónica transcurrente a lo largo de la Caldera de Chacana, que presentaría varias estructuras asociadas y que podrían evidenciarse en lineamientos trazados en este trabajo (Anexo 1.1). La compresión E-W en el borde continental es concordante con la formación de grandes sistemas de fallas transcurrentes, entre los cuales la formación de cuencas tipo “pull apart” es posible, aunque no es el único mecanismo para la apertura de espacios entre fallas transcurrentes.

La presencia de un sistema de divergencia de fallas y rotación de bloques entre fallamiento transcurrente, permitirían la presencia de zonas de extensión y compresión, asociado a fallamiento sinistral e inverso y en echelón, formando espacios para la formación de valles y permitiendo el ascenso de magmas (Figura 6.2).



**Figura 6. 2. Esquema de estructuras presentes en la Caldera de Chacana.**

La presencia de escarpes alineados NE-SW, que serían las expresiones topográficas de las fallas transcurrentes; los valles presentes indicarían zonas en

extensión por donde se produce el ascenso de magmas y su posterior recorrido a manera de flujo sobre los valles; fallamiento en echelón entre fallas transcurrentes es evidente en el desplazamiento de cuchillas que se relacionaría a una posible rotación de bloques; el lineamiento de zonas en extensión en un modelo de rotación de ejes podría explicar la distribución lineal de centros de emisión. Muchos de los rasgos asociados a una tectónica transcurrente en la Caldera de Chacana probablemente fueron borrados por erosión u ocultos por la actividad riolítica de la misma caldera, dejando solo expresiones como lineamientos y valles.

## **6.5. ALTERACIÓN HIDROTHERMAL.**

La alteración hidrotermal como término general es la respuesta mineralógica, textural y química de las rocas debido a la interacción de estas con agua caliente, vapor o gas y es un proceso que acompaña a la mineralización, producto de fluidos calientes asociados a una mena (Park, 1964).

Con altas temperaturas en áreas geotermales las reacciones entre roca y agua caliente o vapor de agua, resulta en una serie de alteraciones hidrotermales como silicificación, carbonización, argilitización e hidratación, procesos en los cuales existe intercambio de iones, algunos son removidos, otros son añadidos y otros restituidos. El área de roca alterada presenta un zonado con el incremento de profundidad, temperatura, porosidad y cambio de condiciones químicas. La alteración hidrotermal depende de varios factores como:

- Características de la roca original
- Características del fluido o vapor de alteración.
- Temperatura y Presión a la cual se producen las distintas reacciones en el momento de la alteración.
- Tiempo de reacción.
- Rata del flujo del agua o vapor
- Permeabilidad, fisuramiento o porosidad de la roca.



En zonas como en Chacana donde existen varios centros volcánicos, los magmas que ascienden contienen componentes gaseosos denominados volátiles, componentes fugitivos o mineralizadores, el más importante es el vapor de agua que contiene dióxido de carbono y compuestos de cloro, fluor, boro y azufre.

Los volátiles no entran en la composición de minerales que cristalizan primero y se concentran en el material residual que posterior al estado pegmatítico, reaccionarán con la roca caja sufriendo cambios físicos y químicos por procesos hidrotermales hasta alcanzar un equilibrio bajo las condiciones que prevalezcan.

No existe una generalidad para demostrar diversos procesos de alteración, pero sin embargo un fluido es capaz de transportar grandes cantidades de minerales y de reaccionar lo suficiente con la roca caja para originar depósitos hidrotermales.

En Chacana los depósitos hidrotermales aparecen cercanos a centros de emisión e intrusiones magmáticas, por lo tanto es posible que los fluidos sean inyectados a la roca caja por oleadas a diferentes presiones y temperaturas, y los productos de alteración estarán relacionados a los lugares donde los fluidos tuvieron las mismas vías de migración.

La alteración hidrotermal se denotará a partir del mapa de Alteración Hidrotermal para el Proyecto Geotérmico Chacana (CELEC EP., 2012), donde se analizaron 40 muestras utilizando espectrometría de refractancia.

#### **6.5.1. ALTERACIÓN HIDROTERMAL EN EL VALLE DE CACHIYACU.**

En el borde Suroeste de la caldera se ha registrado alteración hidrotermal de tipo sílica masiva y sílica alunita sobre brechas volcánicas de la Formación Ninarumi y sobre volcánicos del volcán Plaza de Armas los cuales son instruidos por diques dacíticos y riolíticos que probablemente son los ventos de ascenso de fluidos hidrotermales para la alteración de estas rocas. La mineralogía presenta plagioclasa, piroxenos, cuarzo, magnetita y opacos en una matriz poikilítica microcristalina con vidrio volcánico (Villares, 2010). La asociación mineralógica de alteración encontrada en estas rocas es sílice-smectita, sílice-smectita-clorita, sílice-alunita-illita (CELEC EP., 2012).

Esto indica que existieron procesos de argilitización en plagioclasas y opacos alterados a smectita e illita en condiciones de alta a media temperatura respectivamente, reduciendo la permeabilidad de la roca y tornándola en una color verde a blanquesino. También existe cloritización de piroxenos y minerales opacos, donde el hierro y cromo remplazan al magnesio y aluminio, alteración común en andesitas y dacitas. La alunitización se presenta por la formación de sulfato de alumina (alunita) por acción de las disoluciones ácidas, formando masas de color rosado. El sílice es generalmente abundante, su variedad finogranular es asociado a un origen hidrotermal.

Entre los domos San Clemente y Yanaurco donde se ubican las fuentes termales de Cachiyacu se encuentra alteración hidrotermal de tipo sílica masiva y subpropilitica (Figura 6.3) sobre rocas dacíticas y riolíticas brechosas con abundante cuarzo y biotita. La asociación mineralógica de alteración que se encuentra es smectita-clorita-sílice y una amplia precipitación de travertino documentada anteriormente (ver literal 5.8).



Figura 6. 3. Izquierda. Alteración Hidrotermal sílica masiva al pie del domo Yanaurco (UTM 1984. 0808623E/9955132N). Derecha. Muestra de brecha volcánica tomada al pie del domo San Clemente que muestra una matriz silicificada y formación de estibnita (UTM 1984. 0808758E/9954778N).

Esto implica que existe un metasomatismo en la roca por donde circulan los fluidos y lixiviación de cationes alcalinos y alumina, formando una textura porosa. La silicificación afecta principalmente a la matriz de brechas al pie de los domos endureciendo a la roca (Figura 6.3). La alteración subpropilitica se evidencia por la formación de clorita y smectita por la alteración de plagioclasas, piroxenos, hornblendas y vidrio volcánico, lo que implica un enfriamiento del sistema hidrotermal (la clorita es un mineral de alta temperatura mientras que la smectita

es una arcilla de temperatura baja). La presencia de biotita en zonas al Norte de los domos, podría ser producto de una alteración potásica donde la hornblenda se altera a biotita producto de un metasomatismo potásico en rocas aluminosilicatadas.

### 6.5.2. ALTERACIÓN HIDROTHERMAL EN EL VALLE DEL TAMBO BAJO.

A lo largo de la carretera Interoceánica en la localidad de Jamanca las rocas del relleno de la caldera presentan alteración hidrotermal característica por la coloración verde y tonos amarillentos de la roca en los afloramientos del corte de la carretera. (Figura 6.4). Esta alteración se extiende hasta el valle del río Tambo esparciéndose alrededor de las fuentes termales. La asociaciones minerales descritas son: travertino-smectita-clorita, jaspe-smectita-clorita-goetita, illita-clorita-caolinita, smectita-yeso-goetita-clorita-calcita y calcita-smectita/clorita-goetita-silice (Figura 6.5). Esta asociación implica una alteración propilitica y argilítica por la presencia de minerales del grupo de la clorita e illita-caolinita.

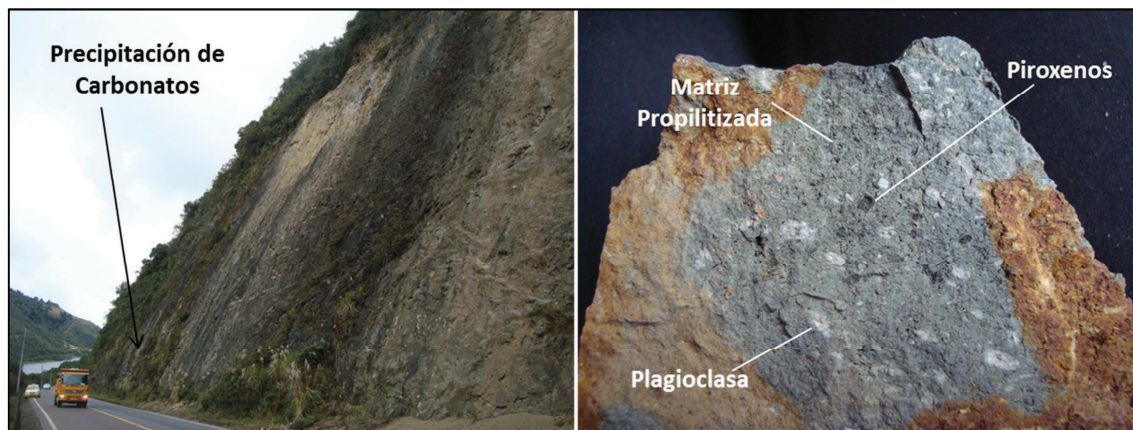


Figura 6. 4. Izquierda. Afloramiento de rocas alteradas en la carretera Interoceánica área de Jamanca al pie del cerro Cojanco (UTM 0814480E/9958120N) Derecha. Muestra de mano del afloramiento mostrado a la izquierda donde se nota piroxenos y plagioclasas dentro de una matriz propilitizada tornando la roca en un color verdoso.

Esto indica que existe una lixiviación significativa de Ca, Na y Mg en rocas andesíticas y dacíticas de la zona de Jamanca, remplazando illita, smectita y caolinita a las plagioclasas, lo que implica un enfriamiento del sistema donde la illita se forma a una temperatura de 200°C, luego la smectita a  $\leq 150^{\circ}\text{C}$  y a temperaturas bajas la caolinita, lo que indica un grado medio de hidrólisis sobre

las rocas; más bajo grado de hidrólisis en zonas donde las condiciones son levemente ácidas a neutras, minerales del grupo de la clorita coexisten con la illita, formando alteración propilítica en andesitas al pie del Cojanco y dacitas en el valle del río Tambo.



Figura 6. 5. Alteración Hidrotermal en las fuentes termales del río Tambo área de Jamanco.

Sobre el cerro Cojanco, y relacionado a diques, se encuentra alteración hidrotermal de tipo Argílica Intermedia sobre rocas la Serie Riolítica Baños y Lavas Andesíticas Negras. Las asociaciones minerales encontradas son smectita-clorita-caolinita, smectita caolinita, illita-clorita y smectita-clorita-caolinita-illita, además se encuentra pirita diseminada. La presencia de clorita, illita, smectita es un indicativo que el sistema se enfrió.

## 6.6. RELACIÓN DE FUENTES TERMALES, FALLAS Y ZONAS DE ALTERACIÓN.

Las fuentes termales están relacionadas al concepto de ascensión de fluidos calientes, por lo que deben existir fracturas abiertas relacionadas a un contexto tectónico y geológico local que favorezca la circulación del agua (Pinuaga, 2008). Las estructuras geológicas que deben existir son:

- Fallas en material frágil para aumentar la permeabilidad.
- Contactos geológicos.
- Diques y Filones eruptivos.
- Diaclasas y fisuras finas.

- Filones metalíferos.

Estás estructuras son evidentes en la Caldera de Chacana, pero no solo deben existir las estructuras aisladamente, éstas deben estar relacionadas con una tectónica activa para que estas estructuras se encuentren abiertas y permitan la surgencia de agua termal.

Estudios en geología estructural muestran que estructuras geológicas abiertas primitivas y posteriormente ampliadas, desarrollan circulación de agua subterránea que puede colmarse de depósitos minerales, pero que puede reactivarse el flujo de fluidos por fases tectónicas posteriores.

Diaclasas y fisuras finas no constituyen el origen principal de circulación de aguas termales, aunque en el área de Jamanco existen muchas fuentes termales cuyos ojos de agua se localizan en diaclasas columnares del Flujo Sucus. Principalmente la circulación de fluidos es más común en fallas abiertas, siendo óptimas fallas en distensión e intersección de fallas, de preferencia jóvenes.

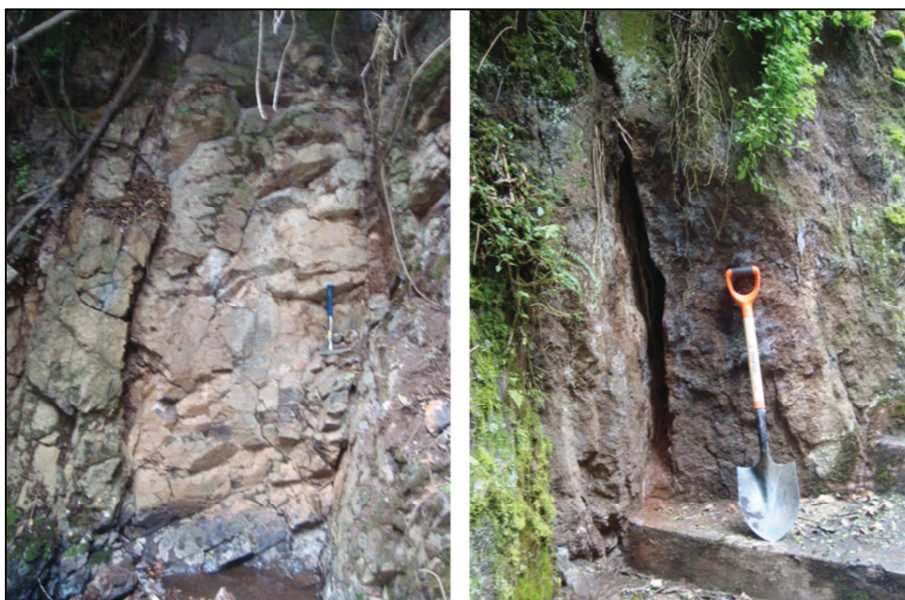
En la Caldera de Chacana prevalecen rocas volcánicas de composición andesítica, dacítica hasta riolítica; rocas que como tal presentan una baja porosidad. Por lo tanto fracturas abiertas y planos de falla abiertos, con intersección de sus líneas, permitirán aumentar la porosidad y permeabilidad de las rocas (CELEC EP., 2012).

La presencia de fracturas relacionadas a fallas en la caldera es muy discreta debido a que la zona se encuentra cubierta por vegetación de páramo, sin embargo existen afloramientos importantes localizados en las áreas de Jamanco y Cachiyacu que evidencia fracturas las cuales tendrían relación con fallas y por ende con el ascenso de fluidos termales.

Los lineamientos descritos anteriormente (ver literal 6.3) y muchos de ellos interpretados como fallas NE-SW con movimiento dextral y altos buzamientos, sugirieren un régimen tectónico transcurrente que involucran tanto esfuerzos extensivos como compresivos generando fracturamiento por tensión y cizallamiento. La intersección de estas fallas con fallas menores locales, proveería

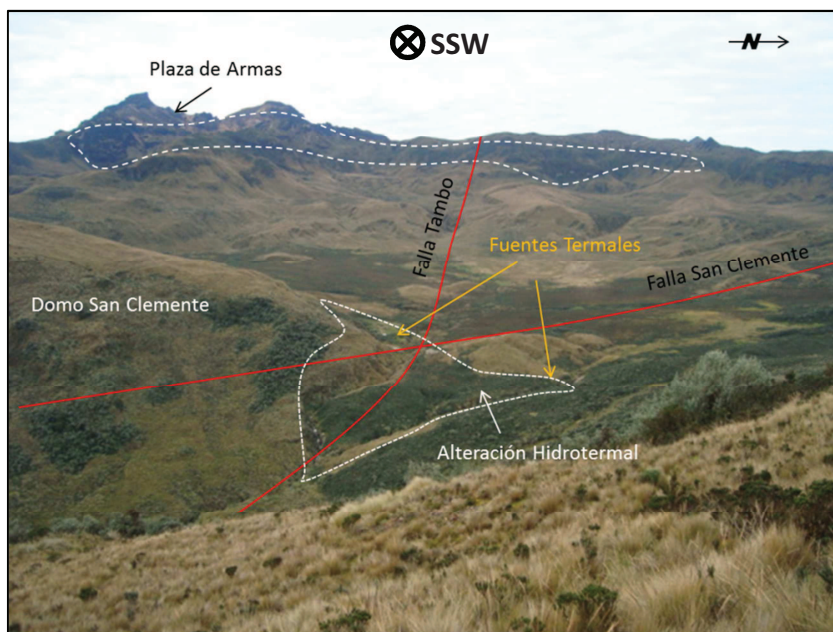
de una red de fracturas las cuales serían conductos para el movimiento de fluidos termales que además de descargar calor alterarían las rocas circundantes. La presencia de cuencas “pull apart” y rotación de ejes entre fallas transcurrentes, permitiría el ascenso de magmas y además la reapertura de fallas y fracturas preexistentes por donde ascenderían las aguas termales. Este tipo de fracturamiento es evidente en zonas del valle del río Tambo (Figura 6.6).

En la zona de Cachiyacu la mayoría de ojos de agua termal se ubican en la intersección de la Falla del Tambo y la Falla San Clemente (Figura 6.7), alrededor de esta zona se encuentra aureolas de alteración hidrotermal sílica masiva (antigua) junto a terrazas de travertino (actual).



**Figura 6. 6. Izquierda. Fracturas en el valle del río Tambo en la zona de la volqueta caída junto a la fuente termal T3 (UTM WGS84. 813572E/9958400N); Derecha. Fractura abierta en la en la zona de la hostería en el río Tambo en la bajada hacia la fuente termal T14 (UTM WGS84. 813988E/9958412N).**

Existen varios lineamientos en el valle de Cachiyacu y al pie del domo Yanaurcu, que intersecan con estas fallas lo que indicaría zonas de fracturamiento y donde se ubican varios ojos de agua termal, fuera de la zona de intersección de las fallas (Figura A2.31). Esta zona es la parte Suroeste de la cuenca “pull apart” interpretada por Yepes et al. (2000).



**Figura 6. 7. Fallas y zonas de alteración hidrotermal en el área Cachiycu. Fotografía panorámica tomada desde la cumbre del domo Yanaurcu (UTM WGS84. 809640E/9955903N) en dirección SSW.**

En la zona de Jamanco las fuentes termales se ubican en el valle del río Tambo que es paralelo a la Falla Jamanco e interseca con la Falla el Tambo. La ocurrencia de estas fallas sugiere un fracturamiento en la zona, el cual es evidente en varios afloramientos de lavas andesíticas y dacíticas negras del relleno de la caldera que están fracturadas y donde se ubican los ojos de salida del agua termal (ver Figura A2.9). Alrededor de estos se encuentran varias aureolas de alteración hidrotermal subpropilítica que se extiende hasta el pie Norte del cerro Cojanco (Figura 6.8). Esta zona es la parte Noreste de la cuenca “pull apart” interpretada por Yepes et al. (2000).

En el valle de Papallacta las fuentes termales se encuentran cercanas a la intersección del lineamiento N-S Papallacta con la falla Tumiguina de dirección NE-SW sobre morrenas del valle el cual se encuentra cubierto por zonas de cultivo y vegetación de páramo lo que no permite observar alteración hidrotermal relacionada a las fuentes termales (Figura 6.9).

Los afloramientos que presentan alteración hidrotermal propilítica más cercanos son los relacionados con los centros de emisión sobre la loma Baños. Esta zona podría existir divergencia de fallamiento transcurrente entre el ramal Papallacta y

la falla Tumiguina lo que permitiría la apertura de espacios que a su vez permitan el ascenso de agua termal relacionado también a la intersección de fallas.

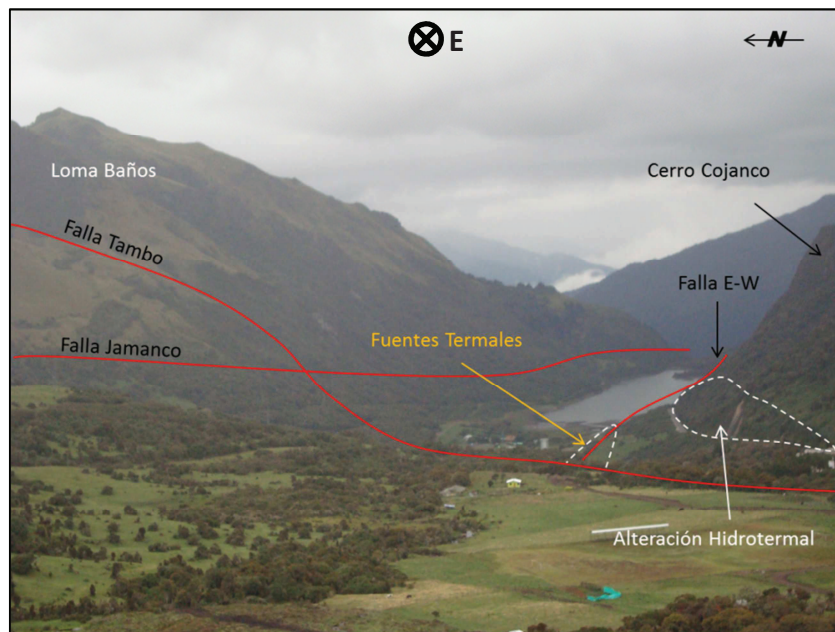


Figura 6. 8. Fallas y zonas de alteración hidrotermal en el área Jamanco. Fotografía panorámica tomada desde el Caserío El Tambo (UTM WGS84. 812469E/9958620N) hacia el E.

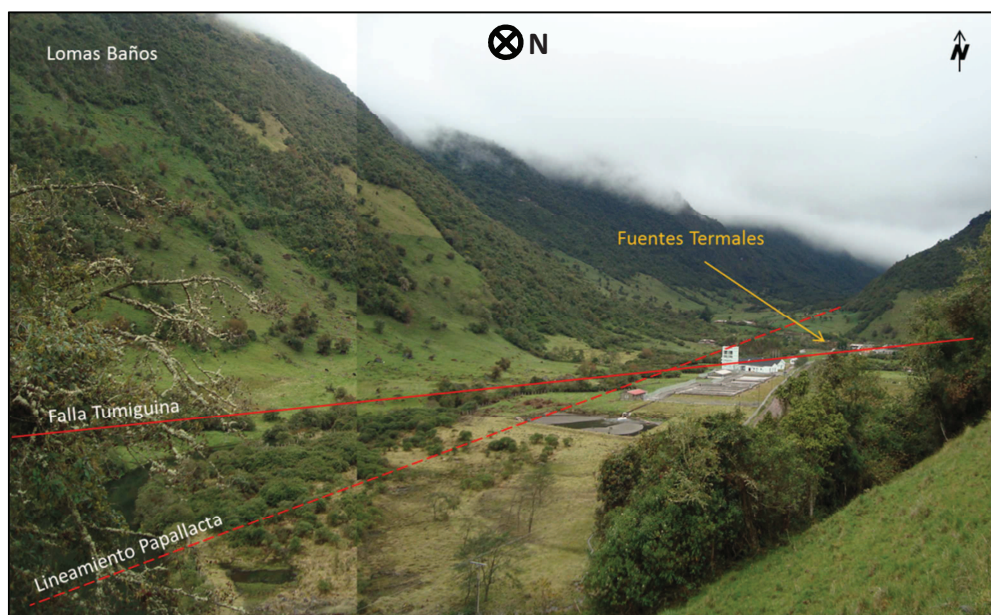


Figura 6. 9. Fallas y lineamientos en el valle de Papallacta. Fotografía panorámica tomada desde el borde Sur del valle de Termas Papallacta (UTM WGS84. 817711E/9959010N) hacia el N.

En Salve Faccha las fuentes termales se alinean en dirección NW-SE, este lineamiento es interpretado como falla aunque no existe evidencia que lo sea (Anexo A1.2). Lineamientos de dirección NE-SW y E-W intersecan la falla donde se ubican las fuentes termales (Figura 6.10). La zona se encuentra cubierta de



por vegetación de paramo lo que no permite evidenciar alteración hidrotermal y fracturamiento.

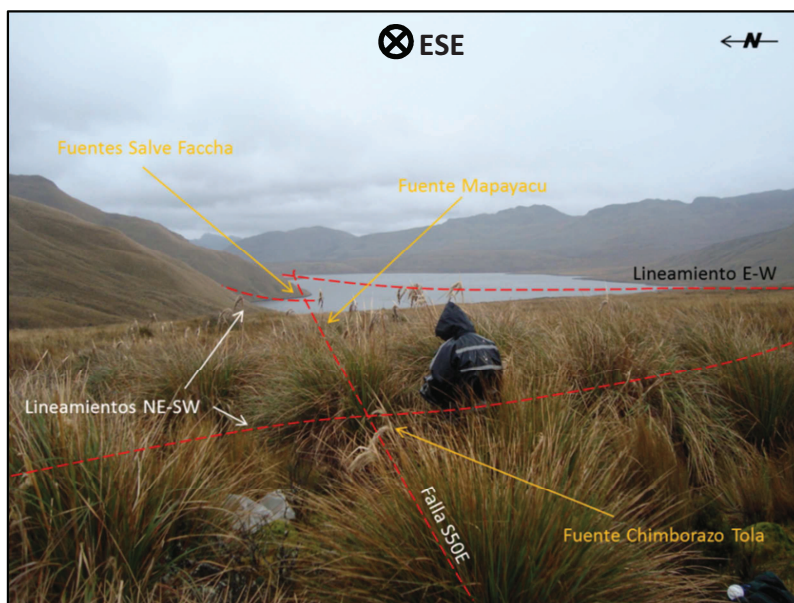


Figura 6. 10. Lineamientos y fuentes termales en el área de Salve Faccha. Fotografía Panorámica con vista hacia el ESE desde el UTM WGS84. 814568E/9975183N

Las Termas de Oyacachi se encuentran sobre el lineamiento E-W del valle Oyacachi el cual es cortado por lineamientos N-S del borde topográfico noreste de la caldera y lineamientos NW-SE (Figura 6.11). No se ha registrado zonas de alteración localmente, aunque existen varios bloques con alteración propilitica en el poblado de Oyacachi, removidos por obras civiles en la población.

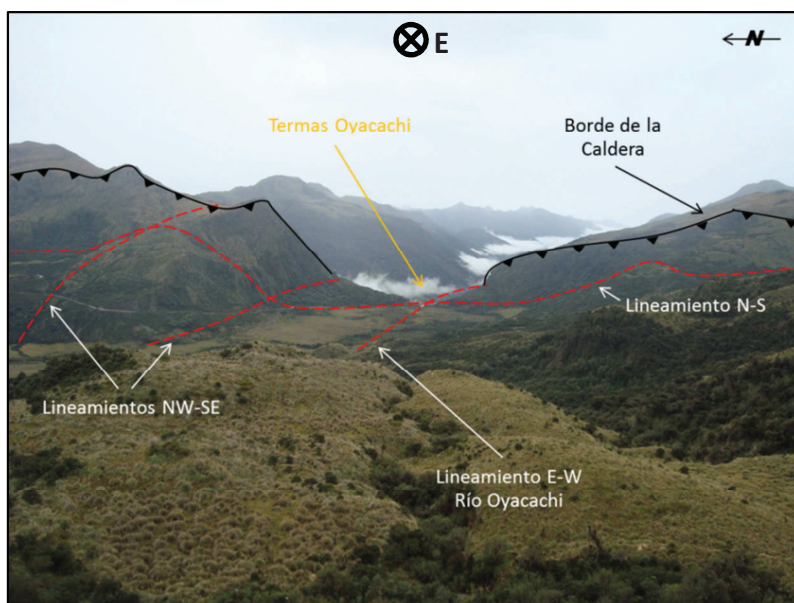


Figura 6. 11. Lineamientos y fuentes termales en el área de Oyacachi. Fotografía Panorámica del valle de Oyacachi tomada desde UTM WGS84. 819721E/9975685N hacia el E

Además de lineamientos y fallas, el ascenso de fluidos termales puede estar relacionado a contactos geológicos que pueden ser vías de circulación de los fluidos geotérmicos. Esto puede darse en el contacto entre rocas dacíticas-riolíticas como los domos Yanaurco y San Clemente con rocas del relleno de la caldera. Del mismo modo existen varios filones y diques a lo largo de la caldera que favorecen la salida de agua termal como puede ser el caso de las fuentes de Jamanca. En resumen el apareamiento de fuentes termales en Chacana está determinado por tres condiciones:

- La fracturación intensa relacionada a varias fases tectónicas y a su vez con la actividad volcánica riolítica evidente en la evolución cuaternaria de la caldera.
- La intersección de fallas y lineamientos, que permiten crear zonas en extensión para el ascenso de aguas termales.
- La presencia de valles y depresiones donde se localizan las fuentes termales.

## **CAPÍTULO VII.**

### **7. DETERMINACIÓN DE LA DESCARGA DE CALOR EN LA CALDERA DE CHACANA Y EVALUACIÓN ACTUAL DEL RECURSO GEOTÉRMICO.**

#### **7.1. INTRODUCCIÓN.**

El calor que emana desde el interior de la Tierra podría remplazar en gran porcentaje la energía producida actualmente, por la combustión de combustibles fósiles. El calor de la Tierra es un recurso renovable cuya utilización prácticamente no genera emisiones de gas de efecto invernadero, siendo una solución casi perfecta para las necesidades de generación eléctrica sostenible y sustentable no solo para el Ecuador, si no también para el mundo. Pero para el aprovechamiento de este recurso se deben superar varios obstáculos tecnológicos y económicos de gran magnitud.

En el 2008 ELECTROGUAYAS, ahora parte de CELEC EP., realizó una evaluación preliminar optimista del potencial geotérmico en tres zonas dentro de la Caldera de Chacana. El estudio indicó que Cachiyacu alcanzaría 379 MWe, Jamanco 129 MWe y Oyacachi 100 MWe, dando un total de 606 MWe como recurso hipotético en la Caldera de Chacana. Tomando en cuenta toda la Caldera de Chacana este valor podría ser más alto dada la presencia externa de productos volcánicos altamente evolucionados y persistentes en el tiempo, lo cual indicaría la presencia potencial de una anomalía térmica a niveles someros de la corteza; permitiendo reevaluar el valor de las reservas probables, cuyo valor hipotético (especulativo) podría ascender hasta los 1480 MWe en Chacana (Beate et al., 2011).

La descarga de calor natural en Chacana se puede dar a través de la radiación, evaporación y de fuentes termales. En este capítulo se presentan nuevos datos de la descarga de calor natural que existe en la Caldera de Chacana solo por fuentes termales y una reevaluación de la utilización actual del recurso geotérmico

en los complejos turísticos por medio de la medición de caudales en fuentes termales.

## **7.2. DETERMINACIÓN DE LA DESCARGA DE CALOR NATURAL.**

Los fluidos termales cercanos a la superficie presentan elevadas temperaturas, las cuales pueden ser cambiantes debido a perturbaciones como:

- Variación de la temperatura periódica en la superficie (Ciclos de temperatura anual).
- Cambio en los parámetros de la roca del reservorio.
- Movimientos horizontales y ocasionalmente verticales de aguas meteóricas o fluidos termales.

Si los movimientos horizontales de los fluidos están ausentes, las medidas de temperatura sobre la tabla de agua pueden ser usadas para el mapeo de estructuras termales (Hochstein, 1982).

### **7.2.1. CÁLCULO DE LA DESCARGA DE CALOR.**

El calor es una forma de energía debida a la agitación de las moléculas que constituyen una sustancia, éste siempre pasa del cuerpo más caliente al más frío, a través de toda materia. La unidad de calor es la caloría, siendo la cantidad de calor que debe suministrarse a 1 gramo de agua, a la presión atmosférica, para elevar su temperatura de 14.5°C a 15.5°C (Castillo y Meligeni, 2011).

La forma de transmisión del calor está dada por conducción, convección y radiación. En Chacana uno de los métodos que transmite el calor a la superficie, es la convección; en zona de recarga se infiltra el agua hacia la subsuperficie donde se calienta y vuelve a salir a manera de fuente termal. El calor el cual se evalúa con la siguiente ecuación.

$$Q = m \times C_p \times \Delta T$$

Donde:

$Q$  = Cantidad de calor en J

$m$  = masa en kg

$C_p$  = calor específico en kJ/kg°C

$\Delta T$  = variación de temperatura en °C

Esta ecuación fue aplicada para cada muestra termal aforada como se muestra a continuación y tomando en cuenta que:

- La cantidad de calor se expresa se empresa en kJ (1 kcal = 4187 J).
- La masa es obtenida a partir de caudal de agua termal que sale en el punto de aforo dada en l/s y es igual a 1kg/s, asumiendo que la densidad del agua termal es de 1kg/l.
- El calor específico se toma de acuerdo a la temperatura de salida como se muestra en la Tabla A3.14.
- La variación de temperatura es la diferencia que existe entre la temperatura de salida en el ojo del agua termal (T) con la temperatura ambiental ( $T_a$ ) en cada área (ver literal 7.5.4).

Como ejemplo de toma la muestra termal T20 cuyos parámetros son:

Parámetro	$q$	T	$T_a$	$C_p$	$\Delta T$	Q
Valor	6,62	72,9	7	4,192	65,9	1828,79
Unidades	kg/s	°C	°C	kJ/kg°C	°C	kJ

La Tabla A3.13 muestra la descarga de calor en cada fuente termal expresada en kJ que sale en cada segundo. Estos valores han sido obtenidos solo a partir de los caudales de salida medidos en las fuentes termales. La Tabla A3.15 muestra un resumen del potencial térmico de Chacana a partir de la descarga de calor y cuál sería el factor o capacidad de planta hipotética si se utilizaría este recurso geotérmico en un período de un año. Estos cálculos se realizan acorde a los parámetros establecidos en el Congreso Mundial de Geotermia realizado en Bali-Indonesia en el 2010 (Beate y Salgado, 2010).

Jamanco al presentar más fuentes de agua termal, presenta mayor cantidad de salida calórica lo que representa un potencial térmico mínimo de 5234/07 kJ/s; teniendo en cuenta que 1J/s es igual a 1W, Jamanco presenta 5.23 MW térmicos y un potencial calórico de 91.07 TJ/año con un factor de capacidad de 0.539. Además en Jamanco se contabilizaron 23 fuentes de aguas termales que no fueron posibles de aforar por el acceso a estas fuentes termales. Estos presentan un caudal estimado menor a 0.5 l/s en cada fuente termal no aforada de acuerdo a apreciación visual, por lo tanto, existe un mínimo 7 l/s de agua termal extra en el área de Jamanco a una temperatura promedio de 56.2°C, lo que añade 1.65 MW térmicos a la capacidad termal de Jamanco, que en total sumaría 7.14 MW térmico y que equivale a un uso de 121.36 TJ/año de energía calórica con un factor de planta de 0.539 (54%).

Cachiyacu presenta 12 fuentes de agua termal cuyos caudales medidos suman 7.39 l/s, los cuales representan 1344.97 kJ/s de calor lo que equivale a 1.34 MW térmicos de capacidad y a 24.46 TJ/año de energía calórica con un factor de capacidad de 0.577.

En el área de Papallacta acorde a comunicación personal en Termas Papallacta de quienes controlan las fuentes termales, el caudal de salida en las fuentes termales es de 21 l/s, que representan una salida de calor de 4050.53 kJ/s lo que equivale a 4 MW térmicos de capacidad y a 80.45 TJ/año de energía calórica, con un factor de capacidad de 0.630.

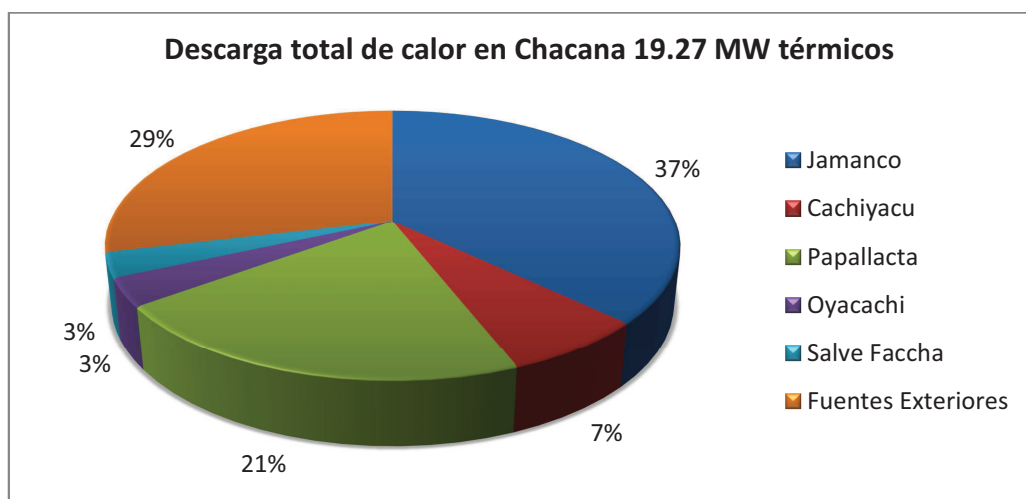
Oyacachi presenta una fuente termal con varios ojos de agua que alimentan las Termas Oyacachi de los cuales salen 4.58 l/s de agua a 43°C que representa una salida de calor de 645.59 kJ/s, los que equivalen a 0.65 MW térmicos de capacidad y a 12.84 TJ/año de energía calórica con un factor de capacidad de 0.631.

En Salve Faccha existen tres zonas donde existen fuentes termales. En Mapayacu y Chimborazo Tola se pudo aforar las fuentes termales, en las fuentes Salve Faccha (actualmente bajo las aguas de la presa) se estimó el caudal en informes anteriores (Mothes y Beate, 2000). En total el caudal de salida sería de

3.5 l/s, lo que representa una capacidad termal de 569.16 kJ/s lo que equivale a 0.57 MW térmicos y a 5.73 TJ/año de energía calórica con un factor de capacidad de 0.319.

Los caudales medidos en fuentes termales exteriores fueron los de las localidades de: Tolontag, El Lisco y Guachalá. Información no publicada y obtenida de estudios en el acuífero de Tumbaco muestra que el caudal en el pozo del balneario del Tingo presenta un caudal es de 45 l/s medidos con caudalímetro, valor que sumado con el resto de fuentes termales representan una salida de calor de 5526.18 kJ/s los que equivalen a 5.5 MW térmicos de capacidad y a 94.758 TJ/año de energía calórica con un factor de capacidad de 0.544.

En total para todas las fuentes termales de Chacana se calcula una salida de calor de 19275.58 kJ/s a partir de 112.79 l/s, los que equivalen a 19.27 MW térmicos de capacidad y a un uso de energía de 274.62 TJ/año (Figura 7.1; Tabla A3.15) lo que equivale a 170777 barriles de petróleo al año. En el 2004 EE.UU reportó un uso directo del recurso geotérmico a través de bombas de calor con una producción anual de 13392 TJ (Orche, 2011). Esto implica que en Chacana la descarga de calor mínimo es el 2.05% del recurso geotérmico utilizado por EE.UU a través de bombas de calor.



**Figura 7. 1. Distribución porcentual de la descarga de calor en la Caldera de Chacana según las localidades donde aparecen fuentes termales.**

### 7.3. EMISIÓN DE CO<sub>2</sub> EN LA CALDERA DE CHACANA.

El flujo de CO<sub>2</sub> es importante para saber la existencia de desgasificación en un área e identificar zonas de baja permeabilidad (fracturas y fallas). El análisis del flujo de CO<sub>2</sub> en Chacana se realizó a partir de la concentración de gas disuelto y burbujeante en las aguas termales de Chacana mediante el procedimiento detallado en la publicación de Inguaggiato et al. (2005).

Estudios realizados por Inguaggiato et al. (2010) y CELEC EP. (2012), acoplan el contenido de CO<sub>2</sub> y HCO<sub>3</sub> disuelto en el agua termal con el caudal de las fuentes termales de Chacana. Se ha calculado un flujo total de 275.4 y 101.6 toneladas por año para las áreas de Jamanca y Cachiyacu respectivamente, considerando solo el carbono total de las fuentes totales muestreadas (CELEC EP., 2012). Tomando en cuenta el caudal del resto las fuentes termales (no muestreadas) y el promedio total del carbono disuelto (CO<sub>2</sub>+HCO<sub>3</sub>) se estimó una contribución adicional de 69.1 y 74.1 toneladas por año para las áreas de Jamanca y Cachiyacu respectivamente. Considerando las muestras de gas burbujeante de Jamanca (T4 y T16) y Cachiyacu (C1 y C6) se ha estimado adicionalmente una contribución de 1.0 y 1.1 toneladas para estas áreas.

En total se ha calculado una emisión de CO<sub>2</sub> de 345 y 177 toneladas por año para las áreas de Jamanca y Cachiyacu respectivamente (CELEC EP., 2012).

En las fuentes termales de Papallacta (E1, E2 y E3), Tolontag (E9), Lisco, (E19) y Oyacachi (O1 y O2) se ha estimado una salida de 500 toneladas por año de CO<sub>2</sub> en total de estas fuentes, siendo Oyacachi el área que emite más CO<sub>2</sub> con 375 toneladas por año (CELEC EP., 2012).

Las fuentes termales de Oyacachi (O1 y O2) muestran un fuerte burbujeo de gas respecto a las fuentes termales de Jamanca (J16) y Cachiyacu (C1), adicionando 10 toneladas por año a la emisión de CO<sub>2</sub>.

Esto implica que solo de las fuentes termales de Chacana, existe un aporte total de CO<sub>2</sub> de 1032 toneladas por año entre disuelto y burbujeante, valor que equivale a 1092.2 toneladas de petróleo.



Hay que tomar en cuenta que el área donde se encuentra la Caldera de Chacana se caracteriza por una precipitación fuerte durante todo el año, por lo que la cantidad de agua en el suelo es muy alta. La superficie de la Chacana se encuentra saturada de agua, lo que no permite un proceso de desgasificación normal de CO<sub>2</sub> del suelo (similar a cero). La presencia de una gran cantidad de agua en los acuíferos atrapa el CO<sub>2</sub> debido a su alta solubilidad y reactividad de carbón en el agua, distorsionándose el flujo de CO<sub>2</sub> hacia la superficie (CELEC EP., 2012).

#### **7.4. UTILIZACIÓN GEOTÉRMICA POR USO DE CALOR.**

Información aportada por el Congreso Mundial Geotérmico celebrado en Turquía en el 2005, muestra que en ese año, 72 países manejaban proyectos de uso directo del calor geotérmico y que en conjunto representaban una capacidad instalada de 28268 MW térmicos, de los cuales utilizaron 273372 TJ (75943 GWh) de energía en forma de calor, por lo tanto ahorrando el equivalente anual de 170 millones de barriles de petróleo (25.4 millones de toneladas), y de 24 millones de toneladas de emisiones de CO<sub>2</sub> a la atmósfera (Llopis y Rodrigo, 2008).

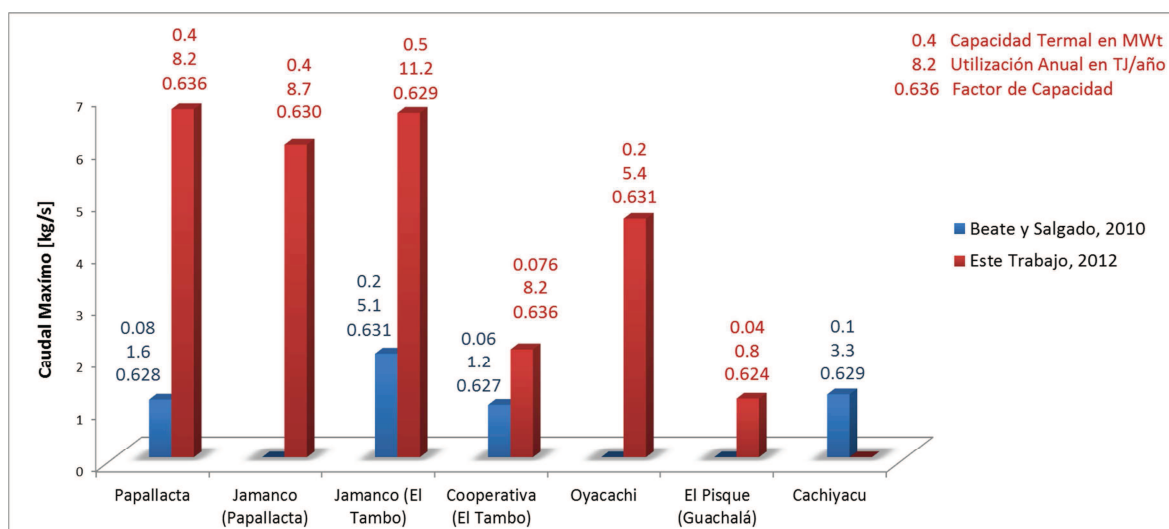
La utilización directa del calor ha sido en pequeña escala con algunos proyectos que permiten la generación de energía. Datos publicados en el 2005 proporcionados por 60 países del mundo que usan el calor directo, a nivel de spa y resorts, muestran que la utilización en ese año fue de 83018 TJ (2306 GWh/año), lo que equivale a una capacidad conjunta de producción de calor de 5401 MW termales, cifras que representan el 19.1% del valor total de todos los usos directos de calor (Orche, 2011).

En el Ecuador el uso directo de calor se limita a piscinas (ver Anexo 5), los cuales han ampliado la utilización del recurso junto a la modernización de sus instalaciones. Dentro de la Caldera de Chacana las Termas Papallacta son el complejo de piscinas termales más conocidas, posteriormente se desarrollaron los Complejos de Jamanco y Oyacachi. En el año 2010 en el Congreso Mundial Geotérmico celebrado en Indonesia, Beate y Salgado (2010) publican una

estimación de la utilización del calor directo en varios complejos turísticos del Ecuador, incluyendo Termas Papallacta, Jamanco, Ilaló, Cununyacu, El Tingo y las áreas de El Tambo y Cachiyacu que en conjunto representaban una capacidad instalada de 1.35 MW térmicos, una utilización anual de 26.74 TJ/año y un factor de capacidad de 0.633 (Beate y Salgado, 2010).

En este estudio se realizó visitas a cada complejo turístico, y se tomó la medida de la temperatura de entrada y salida del agua en las piscinas y duchas, junto con el caudal de entrada (Anexo V), datos que permiten calcular con mayor aproximación la utilización del calor geotérmico en Chacana (Tablas A3.17; A3.18).

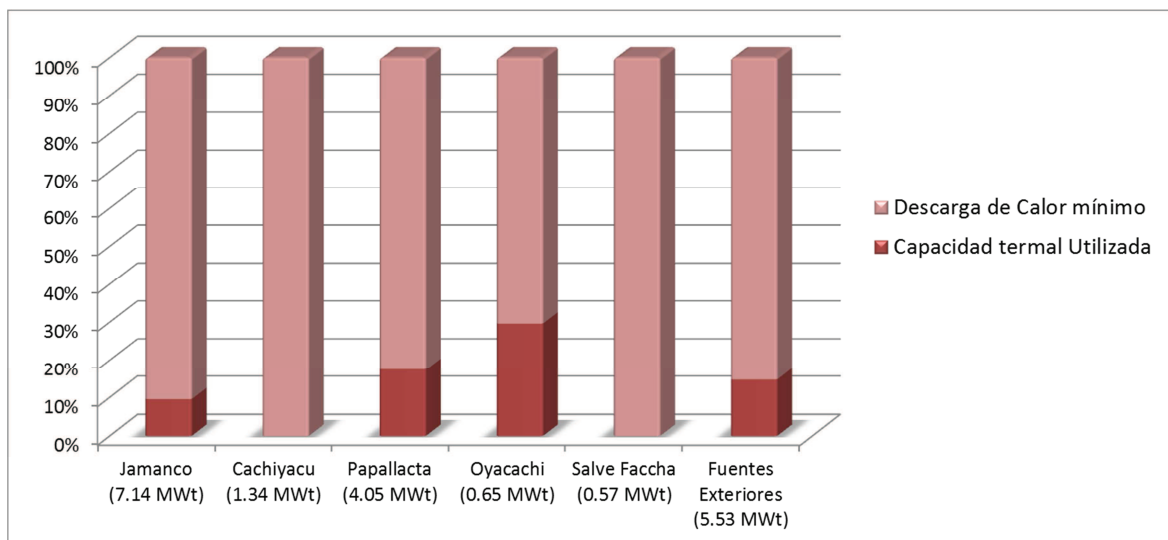
En la Figura 7.2 se muestran los resultados obtenidos durante este estudio y su comparación con los resultados expuestos por Beate y Salgado en el 2010.



**Figura 7. 2. Utilización de la energía geotérmica a partir de la medición del caudal de entrada de agua termal en los complejos turísticos de Chacana.**

Cabe notar que el cálculo de la utilización de energía geotérmica en los balnearios de la Merced, Ilaló y el Tingo, realizados por Beate y Salgado (2010), fueron tomados para el cálculo total de la utilización geotérmica en Chacana (Tabla A3.18). Como dato adicional cabe notar que en el Complejo de Termas Papallacta utilizan el calor a manera de vapor que emanan las aguas termales como calefacción para las habitaciones del Hotel, utilización que no fue estimada en este estudio.

Tomando en cuenta la descarga de calor mínimo en las fuentes termales y la utilización de energía geotérmica calculada se puede concluir que solo un 16.61% de la capacidad mínima termal es utilizada en los complejos turísticos de la Caldera de Chacana (Figura 7.3; Tabla A3.19).



**Figura 7. 3. Porcentaje de utilización de la energía geotérmica con respecto a la descarga mínima de calor en las fuentes termales de Chacana.**

## 7.5. ESTIMACIÓN DEL ERROR EN LOS DATOS.

Para estimar la salida de calor en la caldera se asumió condiciones constantes de las aguas termales y de la atmósfera, lo que implicaría condiciones ideales. Esto genera un error en los resultados el cual debe ser cuantificado.

### 7.5.1. ERROR EN LA MEDICIÓN DEL CAUDAL.

No todos los datos obtenidos de caudales son precisos o exactos. Durante el proceso de obtención de datos se consideran errores determinados, ya sea por causa de manipulación de los materiales, visualización incorrecta en la lectura de volúmenes, imperfecciones en la metodología aplicada o por que se dejó escapar cierta cantidad de volumen de agua termal, por lo tanto esto genera un error durante la manipulación de datos el cual se debe considerar.

Está probado estadísticamente que el error disminuye si se realiza varias veces la medición, y se toma como valor más probable la media aritmética de los valores

obtenidos; cuanto mayor sea el número de lecturas, el valor medio de ellas se aproxima más al verdadero (Caballero, 1975). La Tabla A3.13 muestra los valores obtenidos del caudal en l/s de las fuentes termales con el error del valor medio y el error relativo, los cuales se obtuvieron para cada medición de la siguiente forma:

Datos de la medición del caudal de la fuente termal T20		
n	$X_i$	$X_i^2$
1	6.17	38.12
2	6.69	44.82
3	6.40	40.96
4	5.84	34.11
5	5.48	30.05
6	6.74	45.42
7	6.85	46.95
8	6.55	42.85
9	8.58	73.55
10	6.90	47.64
$\Sigma$	66.21	444.47

Medía aritmética ( $X_p$ ):

$$X_p = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i = \frac{66.21}{10} = 6.62$$

Por lo tanto:

$$\sum X_i^2 = 66.21^2 = 4383.37$$

Para el cálculo del error del valor medio se necesita la raíz cuadrada de la varianza ( $s^2$ ):

$$s = \sqrt{\frac{\sum X_i^2 - (\sum X_i)^2/n}{n-1}} = \sqrt{\frac{444.47 - 4383.37/10}{9}} = 0.83$$

Error del valor medio (E):

$$E = \frac{s}{\sqrt{n-1}} = \frac{0.83}{\sqrt{9}} = 0.28$$

Valor verdadero:

$$X = 6.62 \pm 0.28$$

Error Relativo:

$$Er = \frac{E}{Xp} = \frac{0.28}{6.62} = 0.0416 = 4.16 \%$$

En este ejemplo el error de 4.16% implica que la salida de calor en la fuente T20 que es de 1637.31 kJ/s desciende a 1569.19 kJ/s o asciende a 1705.42 kJ/s. Sumando los valores de descarga de calor ascendentes o descendentes con respecto al cálculo de error en cada fuente, se calculó el porcentaje de error de descarga de calor en cada área. Jamanco presenta un margen de error de 2.36%, Cachiyacu 0.84%, Oyacachi 1.52%, Salve Faccha 0.05% y en las Fuentes exteriores 0.06%. Por lo tanto los rangos de error en la medición del caudal son bajos y aceptables.

### 7.5.2. ERROR EN LA RELACIÓN MASA - CAUDAL.

Para el cálculo de la salida de calor es necesario obtener la masa del objeto o sustancia por donde se transmite el calor (ver literal 7.2.1), que para el presente estudio sería la masa del agua termal asumida como el caudal medido. Esto genera un error debido a que la densidad del agua termal difiere de 1kg/l y las condiciones de presión y temperatura ambiental no son ideales y constantes.

La Guía Metas (2005) publica ecuaciones obtenidas por Tanaka et al. (2001) generan para la obtención de la densidad del agua a partir de la abundancia isotópica de  $^2\text{H}$  y  $^{18}\text{O}$  para aguas a cierta temperatura y a una presión atmosférica determinada.

$$\rho = a'_5 \left[ 1 - \frac{(T + a_1)^2(T + a_2)}{a_3(T + a_4)} \right]$$

Donde:

$\rho$  [kg/m<sup>3</sup>] = densidad

$T$  [°C] = Temperatura del agua

$$a1 [^{\circ}\text{C}] = -3.983035 \pm 0.00067$$

$$a2 [^{\circ}\text{C}] = 301.797$$

$$a3 [^{\circ}\text{C}] = 522528.9$$

$$a4 [^{\circ}\text{C}] = 69.34881$$

$$a5 [\text{kg}/\text{m}^3] = 999.974950 \pm 0.00084$$

Donde  $a'_5$  es el parámetro modificado, y los valores de  $\delta^{18}\text{O}$  y  $\delta\text{D}$  expresados en partes por mil (‰), son definidos por las relaciones isotópicas de un elemento en una muestra y se reporta como la desviación de una muestra relativa a un patrón como VSMOW (*Estándar de Viena del Agua del Océano Promedio*).

$$a'_5 = a5 + 0.233 \cdot 10^{-3} \delta^{18}\text{O} + 0.233 \cdot 10^{-3} \delta\text{D}$$

Para agua saturada en aire:

$$\Delta\rho (\text{kg}/\text{m}^3) = S_0 + S_1 T$$

Donde:

$$S_0 [\text{kg}/\text{m}^3] = -4.612 \cdot 10^{-3}$$

$$S_1 [\text{kg}/\text{m}^3] = 0.106 \cdot 10^{-3}$$

Factor de compresibilidad para la corrección de la presión:

$$fc = [1 + (k_0 + k_1 T + k_2 T^2) \Delta p]$$

Donde:

$$\Delta p [\text{Pa}] = p - 101325 [\text{Pa}]$$

$$k_0 [1/10^{-11} \text{Pa}^{\circ}\text{C}] = 50.74$$

$$k_1 [1/10^{-11} \text{Pa}^{\circ}\text{C}] = -0.326$$

$$k_2 [1/10^{-11} \text{Pa}^{\circ}\text{C}] = 0.00416$$

El valor corregido de la densidad sería:

$$\rho = \rho' \cdot fc + \Delta\rho$$

En las muestra de agua termal de Chacana que presentan análisis isotópico se les aplicó el procedimiento anterior para determinar el error al estimar que la densidad del agua termal es igual a 1kg/l (Tabla A3.16), obteniendo que existe

una variación de densidad entre 0.99998915 a 0.9998527 kg/l, lo que implica un error no mayor al 0.0001 % con respecto a la densidad asumida para el cálculo del descarga del calor. Por lo tanto es un error muy bajo y despreciable.

### **7.5.3. ERROR DEL CALOR ESPECÍFICO.**

Los valores de calor específico del agua a diferentes temperaturas fueron obtenidos de la Tabla A3.14. Hay que tomar en cuenta que estos valores son estándares del calor específico para agua pura. Este parámetro va a depender de la masa del agua y por lo tanto de la concentración de elementos químicos que esta tenga. Las aguas de Chacana presentan un origen meteórico (agua lluvia) de acuerdo a las concentraciones de isótopos estables (ver literal 5.4) por lo que se puede asumir un calor específico similar a los valores estándar, factor que no tendrá una influencia determinante en el cálculo de la descarga de calor.

### **7.5.4. ERROR EN LA MEDIDA DE LA TEMPERATURA DE LAS AGUAS TERMALES Y AMBIENTAL.**

La temperatura de las aguas termales y de escorrentía superficial fueron medidas con un equipo eléctrico Thermo Orion 210 A (ver literal 4.7.1) el cual mide rangos de temperatura entre -5 a +105 °C con sensibilidad de 0,1°C y una exactitud de  $\pm 0.1$  °C, lo que representa alrededor de 0.19% de error en la medida; error que no influye en el cálculo de la descarga de calor.

El gradiente de temperatura vertical para el Ecuador (descenso de la temperatura a mayor altura) fue calculada en 3°C/500m y la temperatura ambiental media anual en Papallacta a 3150 m.s.n.m fue calculada en 9,4°C (S.E.P.A.E.S., 1987). A partir de estos datos se generó la temperatura ambiental media anual para cada área en la Caldera de Chacana acorde a su altitud (Tabla A3.13). Hay que tomar en cuenta que los parámetros meteorológicos son homogéneos en zonas bajas a diferencia de las zonas montañosas donde se forman microclimas, debido a la intensidad de los vientos, humedad, precipitaciones, entre otros factores que modifican la temperatura ambiental.

La diferencia entre la temperatura de las termales con la ambiental es un factor relevante en el cálculo de la descarga de calor. Si el valor de temperatura de las aguas termales es preciso y exacto, el factor dependerá de la temperatura ambiental tomada, por lo que muy altos o muy bajos valores de temperatura ambiental con respecto a la media anual determinarían un error considerable en la sumatoria de la descarga de calor en la caldera. Por ejemplo si tomamos una temperatura ambiental de 10°C para el cálculo de la descarga de calor de la fuente termal T20 que está a 72.9°C, obtendríamos una descarga de calor de 1745.54 kJ/s que difiere en 159.32 kJ/s al valor obtenido en este estudio para la fuente termal T20 que es de 1904.87 kJ/s, generando un error aproximado del 5% en cada fuente el cual es considerable si tomamos en cuenta que existen más de 50 fuentes termales en Chacana.

## **7.6. CONTAMINACIÓN CALÓRICA Y QUÍMICA.**

La contaminación calórica o térmica y química está definida como la reducción de la calidad del agua causada por el incremento de temperatura y cambio en la composición química del agua debido a vertientes antrópicas dentro de un sistema hidrográfico. Las aguas termales son un contaminante natural dentro de la cuenca alta y baja del río Tambo, en el río Oyacachi, en el valle Papallacta, en la cuenca Salve Facha y en el valle de Tumbaco, por lo que su control sería complejo al intentar evitar su salida a la superficie.

Se considera una contaminación calórica cuando aguas superficiales aumentan su temperatura sobrepasando los 20°C, en la Figura 7.4 se puede observar que la temperatura en aguas superficiales del río Tambo en Cachiyacu aumentan en alrededor de 2°C en aproximadamente 500 metros después del desfogue de las aguas termales en el río, sin tomar en cuenta las variaciones ambientales. La temperatura del agua debido a afluentes del río Tambo y temperatura ambiental (alrededor de los 9°C) diluye el calor ganado rápidamente hasta llegar a la zona de Jamanco donde aumenta nuevamente debido a la entrada de aguas termales que se vierten naturalmente en el río llegando hasta los 13.9 °C, temperatura registrada aguas abajo del río. Por lo tanto considerando que la temperatura del



agua en el río Tambo en zonas altas está entre 5 a 7 °C y alcanza un máximo de 13.9 °C en zonas bajas se puede asumir que existe un aumento de temperatura de casi el 100% en una distancia de 7 km, tomando en cuenta solo la temperatura del agua. Este aumento a pesar de ser considerable en porcentaje, es poco considerable con respecto a un efecto al medio ambiente a diferencia de la contaminación química donde se nota la alta concentración de arsénico.

La Figura 7.5 muestra la concentración de As, en muestras de agua tomadas durante este estudio geoquímico del Proyecto Geotérmico Chacana. Las Tablas A3.21, A3.22 y A3.23 muestran los contenidos de As en las aguas de los ríos Tambo y Sucus y en las fuentes termales de las áreas de Jamanco y Cachiyacu. Los valores de As superan considerablemente los límites permisibles dados por la regulación ambiental ecuatoriana y por la Organización Mundial de la Salud de 0.05 mg/l (Guevara, 1996; T.U.L.A.S., 2003). En aguas superficiales del río Tambo y Sucus la concentración varía entre 0.333 a 0.099 mg/l. Si tomamos como referencia la muestra tomada en Aguirre (C2) como una muestra no contaminada con As (1.95 µg/l), podemos afirmar que existe un aumento en la concentración de As de 1 a 2 veces el orden de magnitud más alto que el valor que presenta una muestra de agua local no contaminada y este valor sobrepasa en más del 300% el límite permisible de aguas para el consumo dado por la O.M.S. Las muestras de agua termal presentan una concentración entre 3 a 6.5 mg/l de As, lo que implica un aporte al sistema hídrico superficial de 75.96 mg/s de As a un caudal total de 19.57 l/s, solo de las muestras tomadas donde se realizó análisis de elementos traza. El caudal total de Jamanco más Cachiyacu suman 36.75 l/s; a este valor le restamos 19.57 l/s y la diferencia la multiplicamos por el promedio de la concentración de As que es de 4.02 mg/l obtendríamos el aporte de As de las fuentes restantes que es de 69.13 mg/s. En suma el aporte de As de las fuentes termales al río Tambo es de 145.09 mg/s. Tomando en cuenta el caudal promedio anual de las fuentes termales de Cachiyacu y Jamanco (23.15 l/s) y el promedio de concentración de As, obtendríamos que anualmente se vierten 2897.51 kg (≈3 toneladas/año) de As al río Tambo y que se acumulan en los sedimentos de la laguna de Papallacta. La laguna de Papallacta se formó

aproximadamente hace 200 años lo que implica que se han acumulado alrededor de 600 toneladas de As en la laguna (Tabla A3.20).

Cumbal et al. (2006) mencionan que el As de las fuentes termales es de tipo As (III) y As (V) y calculan un concentración de As en los sedimentos de la laguna de Papallacta de 60 a 630 mg/kg, una concentración en las aguas superficiales de la laguna de 0.22 a 0.37 mg/l y en profundidad de 0.29 a 0.35 mg/l. El As (III) se presenta debido a que las aguas en subsuperficie presentan un ambiente reductor que favorece a la desorción del arsénico de los óxidos minerales y por la disolución reductiva de los óxidos de hierro y manganeso. El As (V) se presenta como una oxidación del As (III) al salir el agua termal a la superficie (Litter et al., 2009).

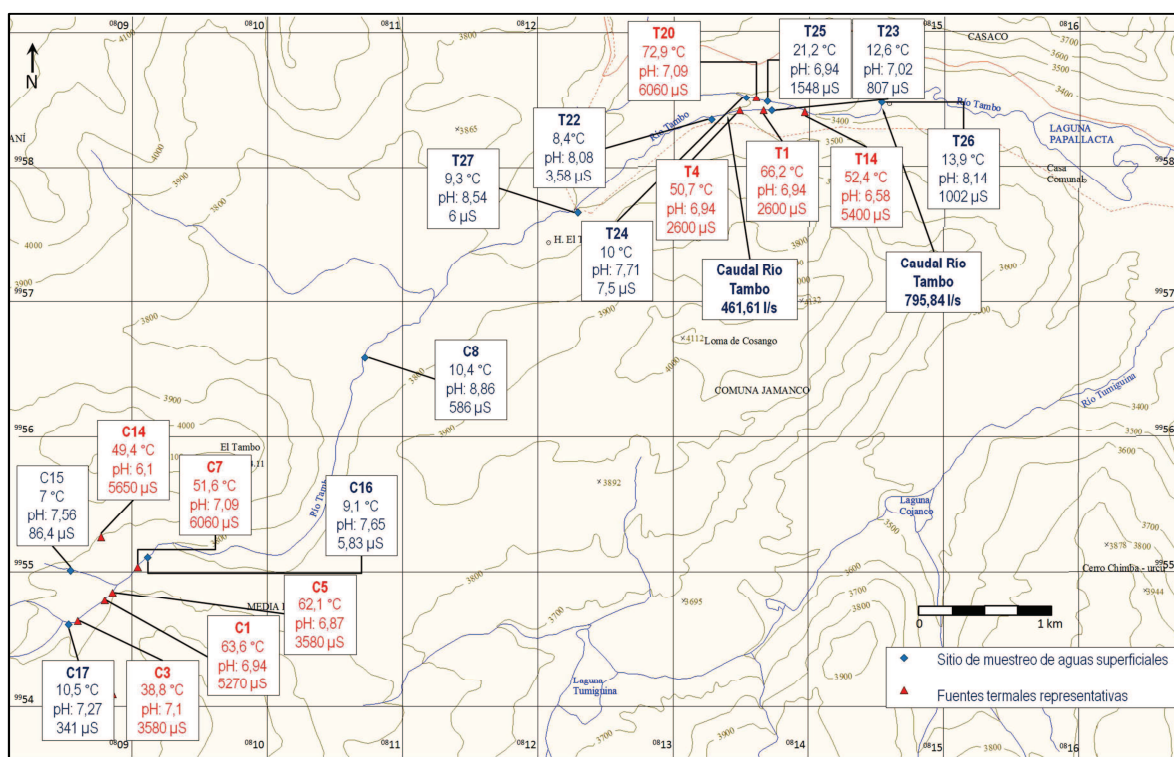
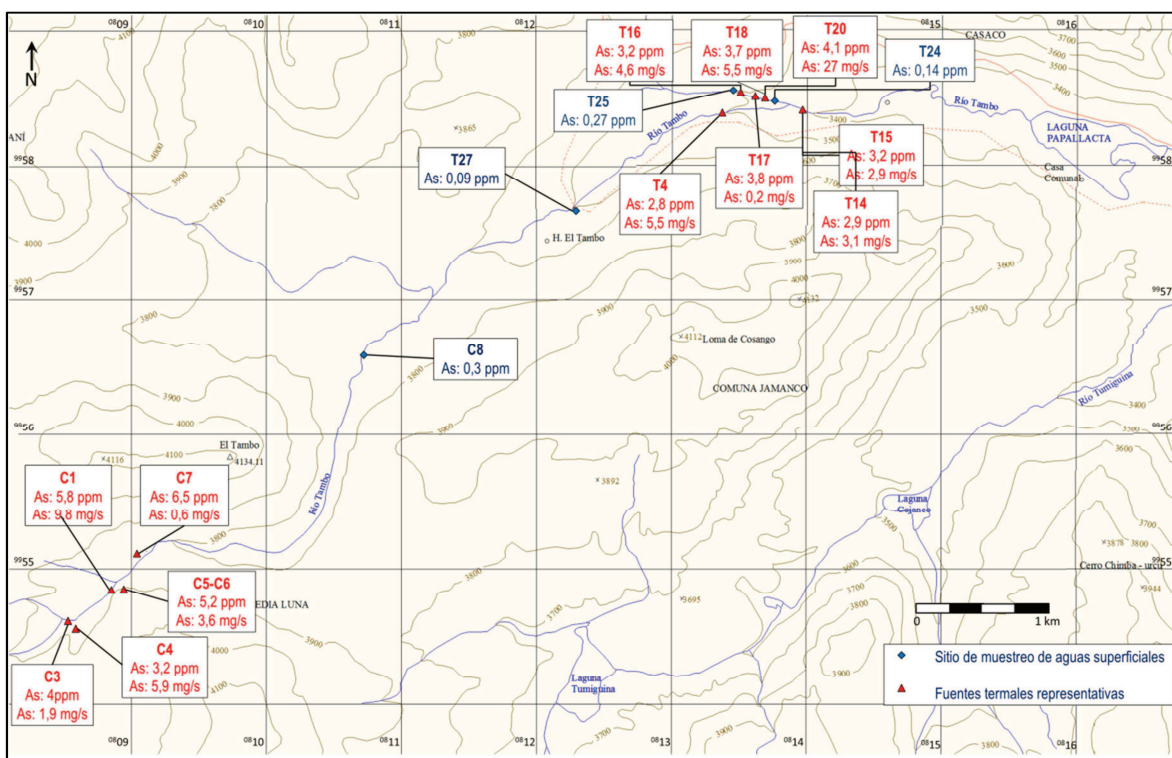


Figura 7. 4. Medidas de temperatura en fuentes termales y aguas del río Tambo.

Con respecto a otros parámetros como el pH, conductividad y Eh no existe cambios considerables en las aguas superficiales por presencia de aguas termales. El pH de las aguas del río Tambo no sale del rango de 6 a 8,5, la conductividad no sobrepasa los 1500 µS/cm y el Eh es mayor a -50 mV, lo que implica que las aguas son alcalinas no perjudiciales, con una concentración de

sales disueltas aceptables y son aguas oxidantes normales con respecto a aguas superficiales no contaminadas locales.



**Figura 7. 5. Concentración y cantidad de As que se vierte en las aguas del río Tambo en las fuentes termales de Cachiycu y Jamanco.**

Los análisis de elementos traza indican que existen elementos tóxicos además del As en las aguas del río Tambo y Sucus como Cr, Se, Cd, Ba y Pb pero cuyas concentraciones no sobrepasan e incluso están muy por debajo de los límites permisibles para el consumo potable acorde a los parámetros expuestos por la O.M.S (Tablas A3.21). Esto quiere decir que los aportes físicos y químicos de las fuentes termales hacia las aguas superficiales se diluyen o bajan su concentración por el volumen del agua del río y por la alta cantidad de afluentes hacia el río Tambo, a excepción del As. Elementos como Li, B, Mn, Fe, Na, Ca, Cl y SO<sub>4</sub>, sobrepasan sus concentraciones en las aguas termales con respecto a los límites permisibles (Tablas A3.22; A3.23), que además de ser aguas tóxicas por el contenido de As, son salobres y turbias afectando la potabilidad de las aguas del río Tambo.

## CAPÍTULO VIII.

### 8. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.

#### 8.1. CONCLUSIONES.

La caldera de Chacana presenta evidencias de un flujo de calor importante a niveles someros; la presencia de domos y diques de composición dacítica y riolítica, y flujos de obsidiana de edad cuaternaria, permite concluir que existe el emplazamiento a niveles someros de magmas evolucionados que aporta calor a reservorios de sistemas geotérmicos en la caldera.

Las características físico químicas indican que las aguas termales con mayor temperatura son las que se encuentran en Jamanco (72.9°C), seguidas por las aguas termales de Cachiyacu y Papallacta (entre 63.6 y 58.9°C). Las zonas de Guachalá, Oyacachi y Salve Faccha presentan fuentes termales de menor temperatura (<40°C) las cuales están se asociadas a otros sistemas geotérmicos dentro de la caldera. Los flujos Pinantura y Padre Corral están asociados a una anomalía térmica en los flancos de la caldera de Chacana y a los cuales se relacionarían las fuentes termales de El Lisco, Tolontag e Ilaló.

Las aguas termales se caracterizan por presentar un alto contenido de sales disueltas. Su conductividad es superior a 1500  $\mu\text{S}/\text{cm}$  y llega hasta 7100  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , lo que quiere decir que existe un incremento del 900% del valor registrado en aguas de escorrentía superficial (150  $\mu\text{S}/\text{cm}$ ). Las aguas termales según el ph varían de neutras a ligeramente ácidas (5.9 a 7.65) a excepción de la fuente T1 que son aguas alcalinas (8.69).

Los valores isotópicos de  $^2\text{H}$  y  $^{18}\text{O}$  de la mayoría de fuentes termales caen sobre la Línea de las Aguas Meteóricas Mundial, lo que implica que el origen de las aguas termales es a partir de aguas meteóricas. Las aguas como Tolontag, Oyacachi y Cachiyacu presentan un leve enriquecimiento en  $^{18}\text{O}$  lo que implica

que tienen un mayor recorrido y contacto con rocas o que presentan un aporte de aguas magmáticas o metamórficas.

Las Fuentes de Jamanca, Cachiyaçu, Papallacta y Tolontag son aguas sulfatadas cloruradas alcalinas de alta salinidad (>5000 mg/l), que muestran como elementos dominantes el Na-Cl por lo que se asumen que son aguas provenientes de un reservorio geotermal profundo de alta entalpía; las fuentes termales Chimborazo Tola Alta, Oyacachi, El Pisque, El Tingo, Ilaló y El Lisco son aguas bicarbonatadas alcalinas de alta salinidad (>4000 mg/l), calentadas por gases volcánicos que aportan Cl y SO<sub>4</sub>, típicas de las zonas marginales de los campos de agua dominante; las aguas de la Fuente Salve Faccha son aguas cloruradas bicarbonatadas que resultan de una mezcla de gases volcánicos disueltos en aguas del reservorio; la aguas de la fuente Mapayacu son aguas sulfatadas con un pH neutro (7.34) que resultan de la mezcla de gases disueltos volcánicos con aguas del reservorio frías de baja conductividad.

El cálculo de geotermómetros en aguas que se encuentran en equilibrio parcial de Jamanca y Papallacta, indican que las aguas superficiales se infiltran en un reservorio y se calientan a temperaturas que varían entre 170 a 280°C. Pero aguas en equilibrio Parcial e Inmaduras aportan incertidumbres altas en el cálculo de los geotermómetros.

Los depósitos de travertino presentan una textura laminar subhorizontal con pequeños crecimientos subsféricos. Estos son rasgos característicos de las fuentes termales en Chacana los cuales evidencian pérdida de CO<sub>2</sub> y sobresaturación de Ca en las aguas termales al llegar a la superficie y enfriarse.

Lineamientos NW-SE son concordantes con la tectónica transcurrente en Chacana; estas estructuras permitirían la formación de valles relacionados a eventos “pull apart”, rotación de bloques entre fallas transcurrentes y divergencia de fallas, los cuales a su vez permiten la apertura y reapertura de fallas y fracturas por donde circulan y ascienden los fluidos geotérmicos desde el reservorio.

La alteración hidrotermal encontrada en la Caldera de Chacana es del tipo propilítica-argilítica con una asociación mineral clorita, illita, smectita, lo que indica

que el sistema se enfrió. Esta alteración hidrotermal es antigua mientras que la precipitación del travertino es un evento actual.

La presencia de varias fuentes termales en diferentes sitios indica a su vez varios sitios de emplazamiento de magmas someros. La mayor descarga de calor es en el área de Jamanca en la zona central de la caldera donde el calor que sale es de 7.13 MWt. Seguida por las fuentes exteriores que suman 5.52 MWt. En Papallacta la salida de calor es de 4.051 MWt, en Cachiyacu 1.34 MWt, en Oyacachi 0.64 MWt y en Salve Faccha es de 0.56 MWt.

La energía calórica aprovechada actualmente es mínima. La utilización del recurso geotérmico se da sólo en centros turísticos de tipo balneológico (piscinas y duchas), sumando un potencial termal instalado de 2.58 MWt y una utilización anual de 51.38 TJ/año, lo que representa una utilización del 16.61% de la descarga de calor mínima que se produce en la caldera de Chacana.

Los errores de medición al obtener: el volumen, temperatura, densidad y la masa del agua termal para el cálculo de la descarga de calor, son bajos y aceptables por lo que no influyen considerablemente en los resultados finales obtenidos. La temperatura ambiental es un parámetro a considerar ya que la variación en su valor en el orden de unidades, generaría un error considerable en los resultados.

La contaminación calórica en aguas del río Tambo y Sucus es poco considerable debido a que el calor se diluye rápidamente, ya que el caudal total de las aguas termales de Jamanca y Cachiyacu (36.75 l/s) que desaguan en el río Tambo es relativamente insignificante con respecto al caudal del río (795.84 l/s).

Las concentraciones de As en las aguas del río Tambo (0.099 a 0.333 mg/l) sobrepasan el nivel permisible para el consumo, uso doméstico e industrial (0.05 mg/l dado por la OMS), debido a que las aguas termales se vierten en la cuenca hidrográfica del Tambo. Las concentraciones de As en las aguas termales están entre 3 y 6.5 mg/l. El caudal de las fuentes termales permite indicar que se vierten al río Tambo 145.09 mg/s de As, lo que equivale a 2897.51 kg/año ( $\approx$ 3 toneladas/año), y que a su vez serían 600 toneladas de As en 200 años que se han acumulado desde la formación de la laguna de Papallacta.

## 8.2. RECOMENDACIONES.

- Para próximos estudios se recomienda un monitoreo de las fuentes termales durante intervalos de tiempo (semanalmente o mensualmente), para incluir las variaciones de temperatura y caudal durante diferentes épocas del año, que permitan una mayor aproximación en los valores de la utilización y descarga de calor anual del recurso geotérmico.
- Se recomienda realizar un estudio Geovulcanológico de la zona Norte de la Caldera de Chacana, que permita identificar el grupo de rocas de relleno de la caldera y zonas de alteración hidrotermal para relacionarlas con las fuentes termales de Salve Faccha y Oyacachi y que permita dilucidar la circulación de fluidos bajo estas zonas e identificar otras posibles fuentes termales.
- Se recomienda realizar un estudio tectónico, neotectónico y sísmico que permita confirmar la existencia de cuencas extensionales, rotación de ejes o divergencia de fallas a lo largo de la caldera de Chacana, por donde circulan y se ubican los fluidos geotérmicos.
- Se recomienda estudios de perforación en zonas como Jamanco y Papallacta que permitan identificar la anomalía térmica a partir de la fuente de calor e identificar las temperaturas y rocas de reservorio por donde circulan los fluidos termales.
- Se recomienda realizar un estudio geoquímico en aguas termales de Salve Faccha y Oyacachi que incluyan concentración elementos traza para identificar si existe altos contenidos de As que pueden contaminar las aguas de las cuencas hidrográficas Salve Faccha y Oyacachi.
- Se recomienda un análisis de isótopo de tritio ( $^3\text{H}$ ) en las aguas de las fuentes termales de Chacana preferentemente en las zonas de Jamanco y Papallacta, para determinar la edad de las aguas termales, posibles mezclas de estas con otras recientes y el tiempo de residencia de las aguas en el reservorio.
- Se recomienda un aviso inmediato a las autoridades locales y provinciales quienes gobiernan y administran el territorio donde se ubican los poblados de Papallacta, La Comuna del Valle del Tambo y La Comuna Jamanco, y

a los pobladores acerca del As que se encuentra en las aguas del río Tambo y Laguna de Papallacta que podrían estar siendo utilizadas para el consumo humano y agrícola y que ciertamente son utilizadas para la piscicultura.

- Se recomienda perforaciones intermedias entre Chacana e Ilaló para identificar si los aportes de As en el acuífero de Tumbaco provienen de la Caldera de Chacana.



## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aguilera E. (2010). Geotermia en el Ecuador: Una hoja de ruta para su desarrollo sustentable., Primera Conferencia Nacional de Energía Geotérmica en el Ecuador., MEER, CEPAL, SENPLADES, GPI., Ibarra, Ecuador., 45 p.
- Allpahuasi - Papallacta (2011). "Acerca de Papallacta" en:  
<http://papallacta.info/Acerca-de-20Papallacta.html>.
- Aspden J.A., Fortey N., Litherland M., Viteri F. y Harrison S.M. (1992a). Regional S-Type granites in the Ecuadorian Andes: Possible remnants of the breakup of western Gondwana. *Journal of South American.*, Vol6, No3, pp. 123-132.
- Aspden J.A., Harrison S.H. y Rundle C.C. (1992b). New geochronological control for the tectono-magmatic evolution of the metamorphic basement, Cordillera Real and El Oro Province of Ecuador., *Journal of South American Earth Sciences.*, Vol 6, N° 1/2., pp. 77-96.
- Aspden J.A. y Litherland M. (1992). The geology and Mesozoic collisional history of the Cordillera Real., Ecuador, *Tectonophysics.*, 205, pp. 187-294.
- Baldock J.W. (1982). Geología del Ecuador. Boletín de la explicación del Mapa Geológico de la República del Ecuador Escala 1:1000000., Dir. Gen. Geol y Minas, Quito (no publicado).
- Barberi F., Coltelli M., Ferrara G., Inocenti F., Navarro J. y Santacroce R. (1988). Plio-Quaternary volcanism in Ecuador., *Geol. Mag.* 125 (1), pp. 1-14.
- Beate B. (2010). Plan para el aprovechamiento de los recursos geotérmicos en el Ecuador., Informe técnico preparado para el MEER (Ministerio de Electricidad y Energía Renovable). Quito, Ecuador.
- Beate B. y Salgado R. (2005) Geothermal Country Update for Ecuador; 2000-2005"., *Proceedings World Geothermal Congress 2005.*, Antalya, Turkey. 12 p.
- Beate B., Inguaggiato S., Villares F. (2009). Proyecto Geotérmico Chacana: Estudio de Pre-factibilidad inicial., ELECTROGUAYAS S.A., Quito, Ecuador. pp. 7-109. (no publicado).
- Beate B. y Salgado R. (2010). Geothermal Country Update for Ecuador; 2005-2010"., *Proceedings World Geothermal Congress 2010.*, Bali, Indonesia. 16 p.

- Beate B., Inguaggiato S., Villares F., Benitez S. y Hidalgo S. (2010). The Cachiyacu Geothermal Prospect, Chacana Caldera, Ecuador., Proceedings World Geothermal Congress., Bali, Indonesia., 10 p.
- Beate B., Villares F., Inguaggiato S., Hidalgo S. y Benitez S. (2011). Modelo Geotérmico Preliminar de tres áreas de interés en la Caldera Cuaternaria Resurgente de Chacana y estimación teórica de su potencial geotermoeléctrico., EPN., Revista Politécnica., Vol 30, N°1, pp: 64-85
- Benítez S. (1995). Évolution géodynamique de la province côtière sud-équatorienne au Crétacé supérieur-Tertiaire., Géologie Alpine. T, 71.p. 3-163.
- Bourdon E., Eissen J.P., Monzier M., Robin C., Martin H., Cotten J. y Hall M.L. (2002). Adakite-like Lavas from Antisana Volcano (Ecuador): Evidence for Slab Melt Metasomatism Beneath the Andean Northern Volcanic Zone., Journal of Petrology., Volume 43. Number 2.
- Bourdon E., Eissen J., Gutscher M., Monzier M., Hall M.L. y Cotten J. (2003a). Magmatic response to early aseismic ridge subduction: the Ecuadorian margin case (South America), Earth and Planetary Science Letters 205. pp: 123-138.
- Bourdon E., Thirlwall M.F., Monzier M., Eissen J., Samaniego P., Robin C. y Cotten J. (2003b). Magnesian andesites: geochemical and isotopic clues for the involvement of a slab melt component. State of the Arc 2003, Portland, 16-21.
- Bristow C.R. y Hoffstetter R. (1977). Lexique Stratigraphique, Amérique Latine, Fascicule 5 a2 Ecuador, Segunda Edición., CNRS, Paris, 410 p.
- Caballero W.A. (1975). Introducción a la Estadística., Instituto Interamericano de Ciencias Agrícolas., Costa Rica. 289 p.
- Cantalamesa G. y Di Celma C. (2004). Origin and chronology of Pleistocene marine terraces of Isla de la Plata and flat, gently dipping surface of the southern coast of Cabo San Lorenzo (Manabí, Ecuador), Journal of South American Earth Sciences. 16., pp: 663 – 648.
- Castillo M. y Meligene D. (2011) Introducción a la Química-Modulo de Seminarios de problemas y trabajos prácticos de laboratorio., Universidad FASTA., Mar del Plata Argentina. PDF en:  
[http://www.ufasta.edu.ar/biblioteca/files/2011/04/Intr\\_a\\_la\\_quim\\_Sem\\_Probl\\_y\\_TP\\_de\\_lab\\_2011.pdf](http://www.ufasta.edu.ar/biblioteca/files/2011/04/Intr_a_la_quim_Sem_Probl_y_TP_de_lab_2011.pdf)

- CELEC EP. (2012). Estudio de Pre-factibilidad Inicial para la Elaboración del Proyecto Geotérmico Chacana-Cachiyacu y Jamanco. Informe Técnico Inédito preparado por SYR (Servicios y Remediación, SA), Quito, Ecuador. Sección Geología: Dr. Hall M.L y Villagómez D., Sección: Geoquímica de Fluidos Dr. Inguaggiato S.
- Clapperton C., Hall M., Mothes P., Hole M., Still J., Helmens K., Kuhry P., Gemmell A., (1997). A Younger Dryas ice cap in the equatorial Andes. *Quaternary Research* 47, 13-28. doi: 10.1093/ptrology/egl006.
- Corbett G.J. y Leach T.M. (1997). Southwest Pacific Rim Gold-Copper Systems: Structure, Alteration and Mineralization. Society of Economic Geologist, Special Publication Number 6., pp: 237.
- Cumbal L., Aguirre V., Tipán I., Murgueitio E. y Chávez C. (2006). El origen del arsénico en las aguas y sedimentos de la laguna de Papallacta., Centro de Investigaciones Científicas de la Escuela Politécnica del Ejército., Revista Ciencia., Vol 9,2, pp: 123-147.
- Dickson M.H. y Fanelli M. (2004). ¿Qué es Energía Geotérmica?., Instituto di Geocienze e Georisorse., CNR, Pisa, Italia., 62 p. PDF en: [http://www.geothermal-energy.org/314,what\\_is\\_geothermal\\_energy.html](http://www.geothermal-energy.org/314,what_is_geothermal_energy.html).
- Echeveste H. (2005). Travertinos y Jaspoides de Manatíal Espejo, un ambiente de hot spring Jurásico. Macizo del Deaseado Provincia de Santa Cruz, Argentina., *Latin American Journal of Sedimentology and Basin Analysis.*, Vol 12(1), pp: 33-48. PDF en: <http://www.scielo.org.ar/pdf/lajsba/v12n1/v12n1a04.pdf>
- Ego F., Sébrier M., Lavenu A., Yépez H. y Egüez A. (1996). Quaternary state of stress in the Northern Andes and restraining bend model for the Ecuadorian Andes., *Tectonophysics.*, 259, pp:101-116.
- Ellis A.J y Mahon W.A.J. (1977). Chemistry and Geothermal Systems., Energy science and engineering Asa Research in Social Anthropology., Universidad de Wisconsin – Madison., 392 p.
- Fagundo J.R. y González P. (2000). La Hidrología y Ciclo del agua en la Naturaleza-Clasificación de las aguas por su origen. Vicedirección de Termalismo., Centro Nacional de Medicina Natural y Tradicional. Ministerio de Salud Pública de Cuba. PDF en:

[http://www.sld.cu/galerias/pdf/sitios/mednat/curso\\_de\\_termalismo.pdf](http://www.sld.cu/galerias/pdf/sitios/mednat/curso_de_termalismo.pdf)

Feighner M.A. y Richards M.A. (1994). Lithospheric structure and compensation mechanism of the Galápagos Archipelago., *Journal of Geophysical Research*, Vol 99, N° B4., pp: 6711-6729.

Feininger T. (1987). Allochthonous terranes in the Andes of Ecuador and northwestern Peru. *Can. J. Earth Sci.*, 24, pp. 266-278.

Fournier R.O. y Truesdell A.H. (1974). Geochemical Indicators of Surface Temperature Part 2, Estimation of Temperature and Fraction of hot water mixed with cold water. *Jour Research U.S. Geol. Survey.*, Vol.2 ,N°.3, 263-270 pp. PDF en:

<http://download.egi.utah.edu/geothermal/GL03742/GL03742-2.pdf>

Gailler A., Charvis P. y Flueh E.R. (2007). Segmentation of the Nazca and South America plates along the Ecuador subduction zone from wide angle seismic profiles., *Earth and Planetary Science Letters.*, 260, pp: 444-464.

Goosens P.J. y Rose W. (1973). Chemical Composition and Age determination of tholeiitic Rocks in the Basic Igneous Complex-Ecuador., *Bull. Geolo. Soc. Am.*, 84., pp: 1043-1052.

Guevara A. (1996). Control de Calidad del Agua-Análisis de las normas de control de la calidad de las aguas. Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente., Lima, Peru, OPS/CEPIS/96. PDF en:

<http://www.bvsde.paho.org/bvsacd/scan2/031279/031279.pdf>

Gutscher M., Malavieille J., Lallemand S. y Collot J. (1999). Tectonic segmentation of the North Andean margin: impact of the Carnegie Ridge collision. *Earth and Planetary Science Letters* 168., pp: 245-2477.

Hall M.L. (1977). El volcanismo en el Ecuador. Instituto Panamericano de Historia y Geografía., Biblioteca Ecuador, Quito.

Hall M.L. y Beate B. (1991). El Volcanismo Plio-cuaternario en los Andes del Ecuador., *Estudios. Geográficos.*, Corporación Editora Nacional, Quito, 4, pp: 5-17.

Hall M.L., Samaniego P., Le Pennec y Johnson J.B. (2008). Ecuadorian Andes volcanism: A review of Late Pliocene to present activity., *Journal of Volcanology and Geothermal Reseach* 176., pp: 1-6.

- Hall M.L, Mothes P. y Cotten J. (2008). Poster "El Complejo Caldérico de Chacana-Ecuador"., Instituto Geofísico-EPN, Quito, Ecuador.
- Henley R.W y Ellis A.J. (1983) Geothermal Systems Ancient and Modern: A Geochemical Review. *Earth Science Reviews.*, 19, pp: 1-50.
- Hochstein, M.P., (1982). "Introduction to Geothermal Prospecting". Chapter 8: Thermal Methods. Geothermal Institute University of Auckland, NZ. 129-131 p.
- Inguaggiato S., Martin-Del Pozzo A.L., Aguayo A., Capasso G., y Favara R. (2005). Isotopic, chemical and dissolved gas constraints on spring water from Popocatepetl (Mexico): evidence of gas-water interaction magmatic component and shallow fluids: *J.Volcanol.Geoth.Res.*, v. 141, p. 91-108.
- Inguaggiato, S., Hidalgo, S., Beate, B. y Bourquin, J. (2010). Geochemical and isotopic characterization of volcanic and geothermal fluids discharged from the Ecuadorian volcanic arc., *Geofluids*, doi: 10.111/j.1468-8123.2010.00315.x.
- Jaillard E., Ordoñez M., Benítez S., Berrones G., Jiménez N., Montenegro G. y Zambrano I. (1995). Basin development in an accretionary, oceanic-floored forearc setting: Southern coastal Ecuador during late Cretaceous to late Eocene time., *American Association of Petroleum Geologists Memoir*, 62, pp: 615-631.
- Karingithi C.W. (2009) Chemical Geothermometer for Geothermal Exploration. UNU-GTP, KenGen and GDC, at Lake Naivasha, Kenya., pp: 1-22. PDF en: <http://www.os.is/gogn/unu-gtp-sc/UNU-GTP-SC-10-0603.pdf>
- Kerr A.C., Aspden J.A., Tarney J. y Pilatasig L.F. (2002). The nature and provenance of accreted oceanic terranes in western Ecuador: geochemical and tectonic constraints. *Journal of the Geological Society, London.*, Vol. 159, pp: 577-594.
- La Guía Metas (2005). Presión atmosférica, presión barométrica y altitud Conceptos y aplicaciones. Año 05 # 02.-Febrero. PDF en: <http://www.metas.com.mx/guiametras/La-Guia-MetAs-05-02-presion-atmosferica.pdf>
- La Guía Metas (2010). Densidad del agua. LGM-10-06. PDF en: <http://www.metas.com.mx/guiametras/La-Guia-MetAs-10-06-densidad-agua.pdf>
- Lasso G. (2009). Guía Turística de la Reserva Ecológica Cayambe-Coca. 78 p. PDF en:

<http://www.ambiente.gob.ec/wpcontent/plugins/download/monitor/download.php?id=797&force=1>.

- Lavenu A. (1994). La neotectónica. Ejemplos en el Ecuador., Estudios Geográficos., Corporación Editora Nacional, Quito 6, pp: 5-30.
- Litherland M., Aspden J. y Jemielita R. (1994). The Metamorphic belts of Ecuador. British Geological Survey., Overseas Memoir 11, 147 p.
- Litter M.I., Armienta M.A. y Farías S.S. (2009). Metodologías analíticas para la determinación y especiación de arsénico en aguas y suelos., IBEROARSEN., 239 p. PDF en:  
<http://www.cnea.gov.ar/xxi/ambiental/iberoarsen/docs/Libro%20Ars%C3%A9nico.pdf>.
- Lonsdale P. (2005). Creation of Cocos and Nazca plates by fission of the Farallon plate. Tectonophysics 404., pp: 237 – 264.
- Luzieux L.D.A., Heller F., Spikings R., Vallejo C.F. y Winkler W. (2006). Origin and Cretaceous tectonic history of the coastal Ecuadorian forearc between 1°N and 3°: Paleomagnetic, radiometric and fossil evidence., Earth and Planetary Science Letters 249., pp: 400-414.
- Llopis G y Rodrigo V. (2008). Guía de Energía Geotérmica., Dirección General de Industria, Energía y Minas., Consejería de Economía y Consumo, Comunidad de Madrid., p 185. PDF en:  
[http://www.miliarium.com/ATECOS/HTML/Soluciones/Fichas/Energia\\_Geotermica.PDF](http://www.miliarium.com/ATECOS/HTML/Soluciones/Fichas/Energia_Geotermica.PDF).
- Mamberti M., Hernandez J., Lapierre H., Bosch D., Jaillard E., Ethien R. y Polvé M (2003). Accreted fragments of the Late Cretaceous Caribbean-Colombia Plateau in Ecuador. Lithos 66, pp: 173-199.
- Marini L. (2000). Geochemical Techniques for the Exploration of Geothermal Energy., Ciencia Abierta., Vol 11. PDF en:  
<http://cabierta.uchile.cl/revista/11/articulos/pdf/articulo6.pdf>
- Mothes P. y Beate B. (2002). Informe sobre el muestreo de los manantiales termales en la zona de Salve Faccha., Instituto Geofísico EPN. IG-268-2002 (no publicado)
- Muñoz M.E. (2011) Sistema Geotermal Asociado al volcán Sierra Nevada: Estudio Geoquímico de Aguas y Gases Termales. Universidad de Chile., Facultad de

Ciencias Físicas y Matemáticas., Departamento de Geología. Santiago de Chile. 119 p. PDF en:

[http://www.tesis.uchile.cl/tesis/uchile/2011/cf-munoz\\_mm/pdfAmont/cf-munoz\\_mm.pdf](http://www.tesis.uchile.cl/tesis/uchile/2011/cf-munoz_mm/pdfAmont/cf-munoz_mm.pdf)

Orche E. (2011). Energía Geotérmica., UD Proyectos, E.T.S.I Minas – Universidad Politécnica de Madrid, Madrid., 286 p.

Park C.F y MacDiarmid R.A. (1964). Ore Deposits., Series of books in geology – Universidad de Michigan., 475 p.

Pedoja K., Ortlieb L., Dumont J.F., Lamothe M., Ghaleb B., Auclair M. y Labrousse B. (2006). Quaternary coastal uplift along the Talara Arc (Ecuador, Northern Perú) from new marine terrace data. *Marine Geology* 228, pp: 73 – 91.

Pérez V. (1986). Studio Geológico-Vulcanológico de la parte S-SE del Proyecto Geotérmico Valle de los Chillos., Tesis de Grado – EPN, Quito, 214 p.

Pinuaga J.I. (2008). Infraestructuras Hidrotermales., Instituto Tecnológico GeoMinero de España., 9 p. PDF en:

[www.docstoc.com/.../INFRAESTRUCTURA-HIDROTERMAL-Intro](http://www.docstoc.com/.../INFRAESTRUCTURA-HIDROTERMAL-Intro).

Pozo M. (1982). Geología del Valle Carihuaycu y sus alrededores al SE de Pifo. Provincia de Pichincha., Tesis de Grado – EPN, Quito, 147 p. (no publicado).

P.R.A.A. Perfil de inversión para el Piloto en ecoturismo en la microcuenca de Papallacta Anexo 3. Doc en:

[www.comunidadandina.org/.../20111210203137Anexo%203%20ec](http://www.comunidadandina.org/.../20111210203137Anexo%203%20ec).

Reynaud C., Jaillard E., Lapierre H., Mamberti M. y Mascle G.H. (1999). Oceanic plateau and island arcs of southwestern Ecuador: their place in the geodynamic evolution of northwestern South America., *Tectonophysics* 307, pp: 235-254.

Samaniego P., Martin H., Monzier M., Robin C., Fornari M., Eissen J.P. y Cotten J. (2005). Temporal Evolution of Magmatism in the Northern Volcanic Zone of the Andes: The Geology and Petrology of Cayambe Volcanic Complex (Ecuador). *Journal of Petrology*. doi:10.1093/petrology/egi053.

Sánchez F., Pulido A., Vallejos., Molina A. y Gisbert J. (2004). Rasgos hidroquímicos de las aguas termales en los acuíferos carbonatados de Bajo Andarax (Almería). *Geogaceta*, 35, pp: 171-174.

Sauer W. (1965). Geología dl Ecuador., Ministerio de Educación, Quito, Ecuador, 383 p.

- Schellart W.P., Freeman J., Stegman D.R., Moresi L. y May D. (2007). Evolution and diversity of subduction zones controlled by slab width. Vol 446/doi:10.1038/nature05615.
- Secretaría Ejecutiva para Asuntos Económico y Sociales (S.E.P.A.E.S), Departamento de Desarrollo Regional Washinton D.C., (1987). Comisión Mixta de Cooperación Amazónica, Ecuador-Colombia., Plan de Ordenamiento y Manejo de las Cuencas de los Ríos San Miguel y Putumayo. En:  
<http://www.oas.org/dsd/publications/Unit/oea32s/begin.htm>
- Sierra, J.L y Pedro, G.E. (1998). Energía Geotérmica. 58 p. PDF en:  
[www.epen.gob.ar/archivos/educativo/geotermia.pdf](http://www.epen.gob.ar/archivos/educativo/geotermia.pdf)
- Soulas, J., Egúez, A., Yépez, H. y Pérez, H. (1991). Tectónica activa y riesgo sísmico de los andes ecuatorianos y en el extremo sur de Colombia. Bol.Geo.Ecuat., Vol.2, N°1, pp: 3-11.
- Spikings R.A., Winkler W., Seward., y Handler R. (2001). Along-strike variation in the thermal and tectonic response of the continental Ecuadorian Andes to the collision with heterogeneous oceanic crust., Earth and Planetary Science Letters 186, pp: 57-73.
- Spikings R.A. y Crowhurst P.V. (2004). (U-Th)/He thermochronometric constraints on the late Miocene-Pliocene tectonic development of the northern Cordillera Real and the Interandean Depression, Ecuador., Journal of South American Earth Science 17, pp: 239 - 251.
- Tanaka M., Girard G., Davis R., Peuto A., Bignell N., [NMIJ, BIPM, IMGIC, NML], (2001). "Recommended table for the density of water between 0 °C and 40 °C based on recent experimental reports"., Metrología, 2001, 38, N°4, pp: 301–309.
- Tschopp H. (1953). Oil Explorations in the Oriente of Ecuador., 1938-1950., Bull. AAPG, 37, N°10, pp: 2303-2347.
- T.U.L.A.S (2003). Texto Unificado de Legislación Ambiental del Ecuador. Libro IV Anexo 1. Archivo ZIP en:  
[http://www.quitoambiente.gob.ec/web/index.php?option=com\\_k2&view=item&id=125%3Atexto-unificado-de-legislaci%C3%B3n-ambiental-secundaria-del-ministerio-de-ambiente-tulas&lang=es](http://www.quitoambiente.gob.ec/web/index.php?option=com_k2&view=item&id=125%3Atexto-unificado-de-legislaci%C3%B3n-ambiental-secundaria-del-ministerio-de-ambiente-tulas&lang=es)



- Urquiza y Arcos (2012). Experiencias Geotérmicas en el Ecuador: Proyectos Chacana y Chachimbiro., XXVII Seminario Nacional del Sector Eléctrico del 30 de Mayo al 1 de Junio del 2012., CORPORACIÓN ELÉCTRICA DEL ECUADOR CELEC EP., Guayaquil, Ecuador. 16 p. (no publicado)
- Vera R y López R. (1986). El Origen de la Cangahua. Paisajes Geográficos, CEPEIGE, N° 16, Quito., pp: 21-28.
- Vallejo C. (2007). Evolution of the western cordillera in the Andes of Ecuador (Late Cretaceous-Paleogene)., Thesis for degree of Doctor of Nature Science-Swiss Federal Institute of Technology Zürich., 208 p.
- Villares F. (2010). Estudio Geovolcanológico de la Zona Sur de la Caldera de Chacana, Provincia de Napo-Pichincha. Tesis de Grado-EPN, Quito, 209 p.
- Yepes H., Ramón P., Fernández, J., y Egüez, A. (1990). Estudio del Riesgo Sísmico - Obras Complementarias. Proyecto Papallacta. Informe inédito preparado para EMAAP-Q., 27 p.
- Yepes H., Ramón P. (2000). Proyecto Ríos Orientales-Estudio Preliminar del Peligro Sísmico. Informe inédito preparado para UEPRO de EMAAP-Q. 46 pp.
- Yock A. (2009). Geothermometry., Short Course on Surface Exploration for Geothermal Resources by UNU-GTP and LaGeo., Ahuachapán-Santa Tecla El Salvador., 8 p. PDF en:  
[www.vaxasoftware.com](http://www.vaxasoftware.com) "Calor específico del agua a diferentes temperaturas PDF".