

UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN AGUSTÍN DE AREQUIPA
FACULTAD DE GEOLOGÍA, GEOFÍSICA Y MINAS
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERA GEOFÍSICA



**ESTUDIO ESTRUCTURAL Y DEL SISTEMA HIDROTHERMAL DE LOS
VOLCANES SABANCAYA Y HUALCA-HUALCA MEDIANTE EL MÉTODO DE
POTENCIAL ESPONTANEO**

TESIS PRESENTADO POR LA BACHILLER:

YOVANA VIVIANA ALVAREZ ROBLES

PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE:

INGENIERO GEOFÍSICO

ASESORES: Dr. Orlando Efraín Macedo Sánchez
Msc. Nino Celestino Puma Sacsi

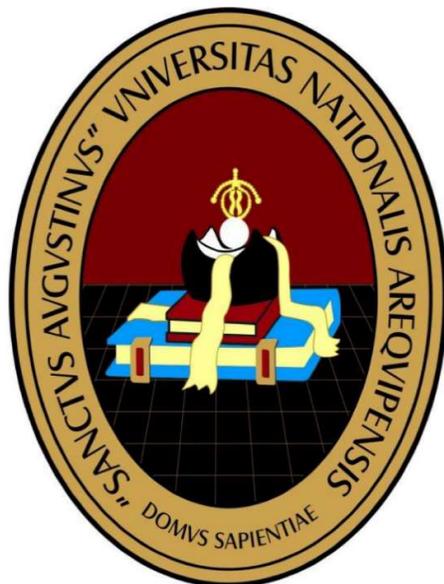
AREQUIPA – PERÚ

2017

UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN AGUSTÍN DE AREQUIPA

FACULTAD DE GEOLOGÍA, GEOFÍSICA Y MINAS

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERA GEOFÍSICA



**ESTUDIO ESTRUCTURAL Y DEL SISTEMA HIDROTHERMAL DE LOS
VOLCANES SABANCAYA Y HUALCA-HUALCA MEDIANTE EL MÉTODO DE
POTENCIAL ESPONTANEO**

TESIS PRESENTADO POR LA BACHILLER:

YOVANA VIVIANA ALVAREZ ROBLES

PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE:

INGENIERO GEOFÍSICO

JURADOS:

Presidente: MSc. Edgard Gonzales Zenteno

Vocal: Dr. Fredy García Zúñiga

Secretario: Ing. Javier Ticona Paucara

ASESORES: Dr. Orlando Efraín Macedo Sánchez

MSc. Nino Celestino Puma Sacsi

AREQUIPA – PERÚ

2017

«—Hay que vivir el presente, pues si piensas en el pasado, no avanzas. Vive el momento, donde todo es como debe ser, tómate tu tiempo, pon freno a tus malos recuerdos y llegarás a donde quiera que vayas a llegar mucho más deprisa y topándote con menos baches en el camino». Todo viaje es una aventura en la que a veces tienes que romper con todo, ganar, perder y arriesgarte por tus sueños.

J.A. Redmerski.

DEDICATORIA

A la virgen de Chapí, la que me ha dado fortaleza para continuar cuando estuve a punto de caer; por ello con toda la humildad que de mi corazón puede emanar, dedico primeramente mi trabajo a la patrona de Arequipa.

A mi madre, que con su demostración de madre ejemplar me ha enseñado a no desfallecer ni rendirme ante nada y aunque a mi lado ya no está sé que desde el cielo ilumina mi camino.

A mi padre por su apoyo, consejos, comprensión, amor, ayuda en los momentos difíciles.

A mis hermanas por estar siempre presentes, acompañándome para poderme realizar.

Yovana V. A. R.

AGRADECIMIENTO

La culminación del presente trabajo no hubiera sido posible sin el apoyo de muchas personas que gentilmente en los momentos oportunos supieron brindarme su apoyo, tiempo y experiencia en esta etapa que significa un logro importante en mi vida.

Al Dr. Orlando Macedo, asesor de la Tesis mi más sincero agradecimiento por la culminación de la misma y por las enseñanzas impartidas durante el desarrollo de dicho proyecto.

Al **Observatorio vulcanológico del Sur del Instituto Geofísico del Perú**, representado por su director el **Dr. Orlando Macedo** por abrirme las puertas de la institución y permitirme realizar el presente trabajo de investigación, por toda la confianza y apoyo que me ha brindado.

Al **Dr. Anthony Finizola** por aportar de manera significativa en la revisión y buenas críticas al presente trabajo.

Al **MSc. Nino Puma** por su paciencia y enseñanza a lo largo de este trabajo.

A todos los integrantes del OVS, por su apoyo y palabras de aliento que de una u otra manera han influenciado para la culminación de la presente tesis.

Finalmente, mi agradecimiento a la Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa, a los catedráticos de la Escuela Profesional de Ingeniería Geofísica, por las enseñanzas impartidas durante mi formación profesional.

¡A todos ustedes muchas gracias...!



Foto del Volcán Sabancaya tomada el 07 de junio de 1990. (Fuente: Luis Ballón, 1990)

“El volcán de Ambato, como han corrompidos los españoles, está en la provincia de Collaguas a veinte y tantas leguas al occidente de la ciudad de Arequipa. Su altura será de tres cuartos de legua, con falda muy dilatada que, transitando yo por su falda, hice mansión muy cerca y sentí aquella noche ruido que sería de peñas que escaladas del fuego que arde incesantemente bajan despeñadas de la altura en busca de su centro. Allí, el volcán está perennemente ardiendo de día y de noche y que no hay noticia de haber hecho estragos en tiempos inmemorables”. Crónica de Travada y Córdova (1752)

RESUMEN

El presente estudio tiene como finalidad aplicar el método de potencial espontáneo al estudio y análisis del sistema hidrotermal del volcán Sabancaya, así mismo determinar estructuras importantes (fallas, colapso de caldera, etc.) que se encuentran ocultas por la presencia de material volcánico.

En el volcán Sabancaya se han identificado dos anomalías positivas, la primera identificada como anomalía 1 del Sabancaya (AS1), relacionada al sistema hidrotermal propio de un volcán activo, y la segunda identificada como anomalía 2 del Sabancaya (AS2), probablemente relacionado con una antigua caldera de colapso, enterrada y cubierta por nuevo material producto de las constantes erupciones, esta caldera sería permeable y facilitaría el ascenso de los fluidos a lo largo del borde de la misma.

En el volcán hualca-hualca se distinguen dos anomalías, la primera anomalía es una anomalía negativa ubicada al Nor este del Hualca –Hualca, identificada como anomalía 1 del Hualca-Hualca (AH1) la cual presenta una forma cóncava, relacionada probablemente con la geometría subterránea del piso de una antigua caldera impermeable, donde se estaría depositando agua meteórica; la segunda anomalía localizada al Norte del Hualca-Hualca, es una anomalía positiva, identificada como anomalía 2 del Hualca –Hualca (AH2), la cual estaría vinculada con la antigua cicatriz de colapso del flanco norte del volcán Hualca-Hualca, esta sería permeable y permitiría el transporte de fluidos a través de la roca o el medio sólido fracturado.

El modelo 3D elaborado para el volcán Sabancaya, nos ayuda a visualizar mejor la delimitación del sistema hidrotermal, así como la forma y distribución de la posible antigua caldera de colapso.

El modelo 3D elaborado para el volcán Hualca nos ayuda a visualizar la forma topográfica de la posible antigua caldera, cubierta por erupciones posteriores.

Palabras clave: Potencial Espontáneo, volcán Sabancaya, sistema hidrotermal.

INDICE

DEDICATORIA.....	I
AGRADECIMIENTO.....	II
RESUMEN.....	IV
LISTA DE FIGURAS.....	VII
LISTA DE TABLAS.....	IX
CAPITULO I	
INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 UBICACIÓN	3
1.2 ACCESIBILIDAD	5
1.3 CLIMA Y VEGETACIÓN	6
1.4 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	7
1.5 JUSTIFICACIÓN.....	7
1.6 OBJETIVOS.....	7
1.6.1 Objetivo General.....	7
1.6.2 Objetivos Específicos	7
1.7 TRABAJOS ANTERIORES EN LA ZONA DE ESTUDIO	7
1.8 ACTIVIDAD HISTÓRICA DEL VOLCÁN SABANCAYA.....	10
CAPITULO II	
MARCO GEOLÓGICO, ESTRATIGRAFICO Y ESTRUCTURAL.....	14
2.1 GEOMORFOLOGÍA	14
2.2. GEOLOGÍA	14
2.3 ESTRATIGRAFÍA.....	15
2.3.3 Estratigrafía del volcán Hualca- Hualca	15
2.3.5 Estratigrafía del volcán Sabancaya	15
2.4 GEOLOGÍA ESTRUCTURAL.....	18
2.4.1 El sistema de Fallas NO-SE	18
2.4.2 El sistema de Fallas E-O.....	18
2.4.3 El Lineamiento de Sepina NE-SO	18
CAPITULO III	
POTENCIAL NATURAL O POTENCIAL ESPONTANEO (PE).....	20
3.2 PRINCIPIO DEL MÉTODO	21
3.3 FENÓMENOS QUE GENERAN EL POTENCIAL ESPONTANEO	21
3.4 CONFIGURACIÓN PARA LA MEDICIÓN DEL POTENCIAL ESPONTANEO	26
3.5 POTENCIAL ESPONTANEO EN VOLCANES ACTIVOS.....	28
3.6 MODELO DE GENERACIÓN DE PE EN UN ÁREA VOLCÁNICA.....	29
CAPITULO IV	
ADQUISICIÓN Y PROCESAMIENTO DE LOS DATOS.....	31

4.1 METODOLOGÍA.....	31
4.2 EQUIPO Y MATERIAL EMPLEADO.....	32
4.3 ELABORACION DE UN ELECTRODO IMPOLARIZABLE	34
4.4 TRABAJO DE CAMPO.....	35
4.4.1 Método de medida empleado.....	36
4.5 TRABAJO DE GABINETE	38
4.5.1 Software empleado	38
4.5.2 Reducción de los datos de PE.....	38
CAPITULO V	46
RESULTADOS.....	46
5.1 UBICACIÓN DE LAS MEDIDAS	46
5.2 PERFILES RADIALES EN LOS VOLCANES SABANCAYA Y HUALCA-HUALCA.....	48
5.3 CARACTERISTICAS DE LOS PERFILES RADIALES – VOLCÁN SABANCAYA.....	52
5.4 FORMACIONES GEOELÉCTRICAS – SECTOR VOLCÁN SABANCAYA.....	58
5.5 MAPA DE ANOMALÍAS DE POTENCIAL ESPONTANEO EN EL COMPLEJO VOLCÁNICO AMPATO-SABANCAYA Y VOLCÁN HUALCA-HUALCA.....	60
CAPITULO VI	62
INTERPRETACIÓN VOLCANOLÓGICA Y ESTRUCTURAL	62
6.1 GRADIENTE DE POTENCIAL ESPONTANEO	62
6.1.1 Perfiles de Potencial Espontaneo y Altura en función de la Distancia del V. Sabancaya.....	65
6.1.2 Perfil de Potencial Espontaneo y Altura en función de la distancia V. Hualca-Hualca.....	72
6.2 MODELO 3D DE LA ANOMALÍA EN EL VOLCÁN SABANCAYA.....	78
6.3 MODELO 3D DE LA ANOMALA EN EL VOLCÁN HUALCA-HUALCA	82
CONCLUSIONES	
RECOMENDACIONES	
BIBLIOGRAFÍA	
ANEXO	

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1: a) Distribución de las principales cadenas volcánicas sobre la cordillera occidental de Sudamérica. (Silva & Francis, 1991). b) Ubicación del volcán Sabancaya y Volcán Hualca-Hualca) Vista flanco este del volcán Sabancaya.	4
Figura 1.2: Imagen de la accesibilidad al volcán Sabancaya partiendo desde la ciudad de Arequipa (Fuente: Ministerio de Comercio exterior y Turismo).	5
Figura 1.3: Vegetación en la zona de estudio a) Turberas (Bofedales) al Oeste de la altiplanicie de Patapampa, b) Pajonales en las Pampas c) Plantas almohadilladas más conocidas como Yaretas, d) Líquenes. (Alcalá, L. 2007).	6
Figura 2.1: Mapa geológico del volcán Sabancaya y volcán Hualca-Hualca (Farfán J., et al, 2015). ...	17
Figura 2.2: Mapa estructural Regional de los principales sistemas de fallas y lineamientos identificados por Sebrier et al., 1985; Huamán 1995 y Mering et al, 1996.	19
Figura 3.1: Principio del método de PE. (Dana, 1992).	21
Figura 3.2: Mecanismo de PE por fenómeno electroquímico de Sato y Mooney, 1960.	22
Figura 3.3: Potenciales termoeléctricos producidos por un cuerpo caliente. (Modificado de Zlotnicki y Nishida, 2003).	23
Figura 3.4: Esquema de distribución de la DCE (Modificado de Revil, A. 2011).	25
Figura 3.5: Modelo de generación de Potencial Electrocinético. DCE en la superficie de un mineral, que se ve afectada por el flujo de fluido (Modificado de Revil, A. 2011).	25
Figura 3.6: Esquema de las anomalías de Potencial espontaneo -Efecto Electrocinético – electrofiltración (modificado de Lénat, J, 2005).	26
Figura 3.7: Configuración método base fija (modificado de Dentith, M. y Mudge ,S.,2014).	27
Figura 3.8: Configuración método de gradientes (modificado de Dentith, M. y Mudge, S., 2014).	27
Figura 3.9: Esquema de las anomalías de Potencial espontaneo en áreas volcánicas. a) Efecto Termoeléctrico b) Efecto Electrocinético (modificado de Zlotnicki y Nishida, 2003).	28
Figura 3.10: Generación de la señal de PE en la parte interna del volcán en un terreno heterogéneo, Mauri (2009).	30
Figura 3.11: Modelo de generación de PE en un área volcánica. (modificado de Lénat, J, 2005).	30
Figura 4.1: Equipo y Material empleado: a) Carrete, b) Sulfato de Cobre Pentahidratado (CuSO ₄), c) Electrodo impolarizable, d) GPS 62S marca Garmin e) Multímetro y f) Libreta de notas. ...	33
Figura 4.2: Diseño y construcción de un electrodo Impolarizable.	34
Figura 4.3: Personal del IGP realizando medidas de Potencial Espontaneo en los volcanes Sabancaya y Hualca-Hualca. (Cortesía: IGP-Sede Arequipa).	36
Figura 4.4: Dispositivo de medida empleado en la adquisición de los datos (Gonzales, K., 2001).	37
Figura 4.5: Esquema de medición de Potencial Espontaneo.	37
Figura 4.6: Software usados para el procesamiento de los datos.	38
Figura 4.7: a y b) Corrección de los datos de Potencial Espontaneo, el color naranja representa el desplazamiento tramo por tramo c) Data Final corregida (Modificado de Barde Cabusson y Finizola, 2013).	39
Figura 4.8: Vista en planta de las Mediciones realizadas para diferentes casos (Modificado de Barde Cabusson y Finizola, 2012).	40
Figura 4.9: Adquisición de datos de Potencial Espontaneo y la dirección de Procesamiento en “Sentido Normal (Modificado de Ramos D., 2000).	42
Figura 4.10: Adquisición de datos de Potencial Espontaneo y la dirección de Procesamiento en “Sentido Inverso”, (Modificado de Ramos D., 2000).	43
Figura 4.11: Se muestra el sentido de adquisición y procesamiento de los datos; además del punto de nivel cero en color verde ,ubicado al Nor-Noroeste de Cajamarcana	45
Figura 5.1: Mapa del CVAS y volcán Hualca-Hualca con la ubicación de medidas de potencial espontaneo (PE).Color rojo (Perfiles Periféricos), Color azul (Perfiles Radiales Sabancaya) y color negro (Perfiles Radiales Hualca-Hualca).	47
Figura 5.2: Perfiles radiales de potencial espontaneo en función de la altura realizados en el volcán Sabancaya.	49

Figura 5.3: Perfiles radiales de Potencial espontaneo en función de la altura realizados en el volcán Hualca-Hualca.	51
Figura 5.4: Perfil de Potencial Espontaneo 1-SE.	53
Figura 5.5: Perfil de Potencial Espontaneo 2-E.	54
Figura 5.6: Perfil de Potencial Espontaneo Perfil 3-N.	56
Figura 5.7: Perfil de Potencial Espontaneo Perfil 4-NW.	57
Figura 5.8: Mapa de anomalías de los Volcánes Sabancaya y Hualca- Hualca (línea entrecortada de color blanco).	61
Figura 6.1: Mapa de Gradientes de Potencial o Coeficiente de electrofiltración (Ce).	64
Figura 6.2: Datos de Potencial Espontaneo y altura a lo largo del perfil 1.	66
Figura 6.3: Datos de Potencial Espontaneo y altura a lo largo del perfil 2.	67
Figura 6.4: Datos de Potencial Espontaneo y altura a lo largo del perfil 3.	68
Figura 6.5: Datos de Potencial Espontaneo y altura a lo largo del perfil 4.	69
Figura 6.6: Relación de Potencial espontaneo y altura a lo largo de los perfiles 2 y 4.	70
Figura 6.7: Ubicación de fumarolas (puntos de color amarillo) registradas en Agosto del 2016 en el Volcán Sabancaya.	71
Figura 6.8: Anomalía negativa en el volcán Hualca-Hualca y ubicación del geiser de Pinchollo (puntos de color rojo)	73
Figura 6.9: Datos de Potencial Espontaneo y altura a lo largo del Perfil 5.	74
Figura 6.10: Datos de Potencial Espontaneo y altura a lo largo del Perfil 6.	75
Figura 6.11: Datos de Potencial Espontaneo y altura a lo largo del Perfil 7.	76
Figura 6.12: Datos de Potencial Espontaneo y altura a lo largo del Perfil 8.	77
Figura 6.13: a) Ubicación del CVAS y volcán Hualca-Hualca b) Línea de color rojo representa las medidas de potencial espontaneo c) Modelo-3D del Sistema Hidrotermal del volcán Sabancaya.	80
Figura 6.14: a) Ubicación de la caldera de Xela b) Línea de color verde representa las medidas de potencial espontaneo c) Modelo-3D del Sistema Hidrotermal de la caldera de Xela – Guatemala (Finizola A. et al, 2002).	81
Figura 6.15: Relación de PE en función la zona vadosa.	83
Figura 6.16: a) Ubicación del CVAS y volcán Hualca-Hualca b) Línea de color rojo representa las medidas de potencial espontaneo c) Modelo-3D de la zona hidrogeológica del Volcán Hualca-Hualca.	84
Figura 6.17: a) Ubicación del complejo volcánico Tenerife b) Línea de color negro representa las medidas de potencial espontaneo c) Modelo-3D de la zona hidrogeológica de la caldera Diego Hernández.	85

LISTA DE TABLAS

Tabla 1.1: Resumen de la actividad histórica del volcán Sabancaya.	12
Tabla 2.1: Estratigráfica de las etapas eruptivas del Complejo volcánico Ampato-Sabancaya y volcán Hualca-Hualca (Farfán J. et al, 2015).	16
Tabla 4.1: Método Para corregir los datos de PE en sentido Normal.	42
Tabla 4.2: Método Para corregir los datos de PE en Sentido Inverso.	43
Tabla 5.1: Valores del Coeficiente de Electrofiltración (Ce), asociados a las formaciones geoelectricas identificadas, además de los valores del coeficiente de determinación en el volcán Sabancaya.	59

CAPITULO I

INTRODUCCIÓN

En el sur del Perú la subducción de la placa oceánica de Nazca debajo de la placa Continental Sudamericana ha generado la existencia de un arco volcánico Plio-cuaternario de naturaleza calco-alkalina situado sobre la Cordillera Occidental de los Andes. Este arco volcánico forma parte de la denominada Zona Volcánica Central de los Andes, (de Silva y Francis, 1991).

Los estudios geológicos y vulcanológicos efectuados desde la década de los 80's en el sur del Perú, han permitido visualizar la intensa actividad volcánica reciente e histórica manifestada por los siete volcanes activos con que cuenta el arco volcánico del sur peruano: Sabancaya, Ubinas, Misti, Huaynaputina, Ticsani, Yucamane y Tutupaca.

El volcán Sabancaya, considerado el segundo volcán más activo del Perú forma parte del complejo Volcánico Ampato-Sabancaya (CVAS). Desde su nuevo periodo de intranquilidad iniciado en febrero del 2013, viene siendo monitoreado por el Instituto Geofísico del Perú-Sede Arequipa con estaciones sísmicas telemétricas, instaladas estratégicamente sobre el área del volcán.

Sobre el volcán Sabancaya se han desarrollado diversas investigaciones, aplicando distintos métodos geofísicos (Sísmicos y Potencial Espontaneo), con la finalidad de entender el comportamiento interno y externo de dicho volcán.

Este estudio forma parte de un proyecto que se viene realizando en conjunto entre el Instituto Geofísico del Perú - Sede Arequipa, Observatorio Vulcanológico Del Instituto Geológico Minero Metalúrgico (OVI), en colaboración con el Laboratorio Geociencias Reunión - Francia.

El estudio de potencial espontaneo fue trabajado en base a los datos adquiridos en dos campañas, durante el 2014 y 2015 en el cual se obtuvieron 6836 puntos medidos haciendo un total de 136.68 Km lineales tomados cada 20 m.

La metodología empleada, la ubicación y alcances de este estudio de investigación serán detallados a continuación. Los capítulos fueron dispuestos de la siguiente manera:

- En el primer capítulo se presenta una introducción, ubicación de áreas de estudio, accesibilidad a la zona de estudio, además del clima y la vegetación predominante en la zona. Otros puntos presentados son el planteamiento del problema, justificación, objetivos y trabajos anteriores en la zona de estudio.
- En el segundo capítulo se describe la geomorfología, geología estructural y actividad histórica del volcán Sabancaya.
- En el tercer capítulo se describe a detalle el concepto de potencial espontáneo, principio del método, fenómenos que generan el Potencial Espontáneo, y modelo de generación de Potencial Espontáneo en un área volcánica.
- El cuarto capítulo hace referencia a la adquisición dentro del cual se menciona el trabajo de campo que describe fundamentalmente el equipo y material empleado, método de medida y el trabajo de gabinete describe la corrección de los datos, el software utilizado, sentido de orientación en la adquisición y procesamiento de los datos, etc.
- El quinto capítulo muestra los resultados de los perfiles radiales del volcán Sabancaya y volcán Hualca-Hualca; y además los perfiles periféricos, características de los perfiles en el volcán Sabancaya, así mismo se muestran las formaciones geoeléctricas para los 4 perfiles del volcán Sabancaya y finalmente se muestra un mapa de anomalías de potencial espontáneo en el volcán Sabancaya y volcán Hualca-Hualca.
- En el sexto capítulo se realiza la interpretación de las cuatro anomalías encontradas los volcanes Sabancaya y Hualca-Hualca, gradientes de Potencial Espontáneo para el volcán Sabancaya, perfiles de potencial espontáneo y altura del volcán Hualca-Hualca y se hace una discusión de los resultados para ello se muestra el modelo del sistema hidrotermal del volcán Sabancaya y el Modelo 3D de las anomalías de los volcanes Sabancaya y Hualca-Hualca.

1.1 UBICACIÓN

El volcán Sabancaya, el cual forma parte del complejo volcánico Ampato-Sabancaya (CVAS) y el volcán Hualca-Hualca forman un conjunto de grandes estrovolcanes, localizados en la Cordillera Occidental de los Andes Centrales, a 70 Km al NW de la ciudad de Arequipa y situado en la provincia de Caylloma al sur del Perú. Las cumbres de estos volcanes están caracterizadas por la presencia de glaciares (Alcalá, L.2007), ver **Figura 1.1**.

El volcán Sabancaya, considerado el más joven y activo se encuentra ubicado en las coordenadas (UTM):

Norte: 8252678.11 S
Este: 194060.95 E
Altitud: 5976 msnm
Zona: 19 S.

Y según coordenadas geográficas;

Latitud: 15°47'9.04"S; Longitud: 71°51'19.59"O.

El volcán Hualca-Hualca con 6025 msnm comienza su formación al inicio del cuaternario, es considerado el más antiguo de los volcanes en estudio y define una morfología de caldera que se abre hacia el Norte. Su forma actual se debe al colapso de uno de sus flancos.

El volcán Sabancaya y volcán Hualca-Hualca limitan por el Oeste y Norte con el segundo cañón más profundo del Perú, como es el Colca con una profundidad relativa de 2780 m. Por el Este con la Planicie Patapampa y por el Sur con una rampa acumulativa (material plegado y estratificado) de grandes dimensiones que llega a la costa del Pacífico.

Hacia el Norte de la zona de estudio, se ubican algunos distritos de la Provincia de Caylloma como Cabanaconde, Tapay, Madrigal, Maca, Achoma, Coporaque, Yanque, entre otros.

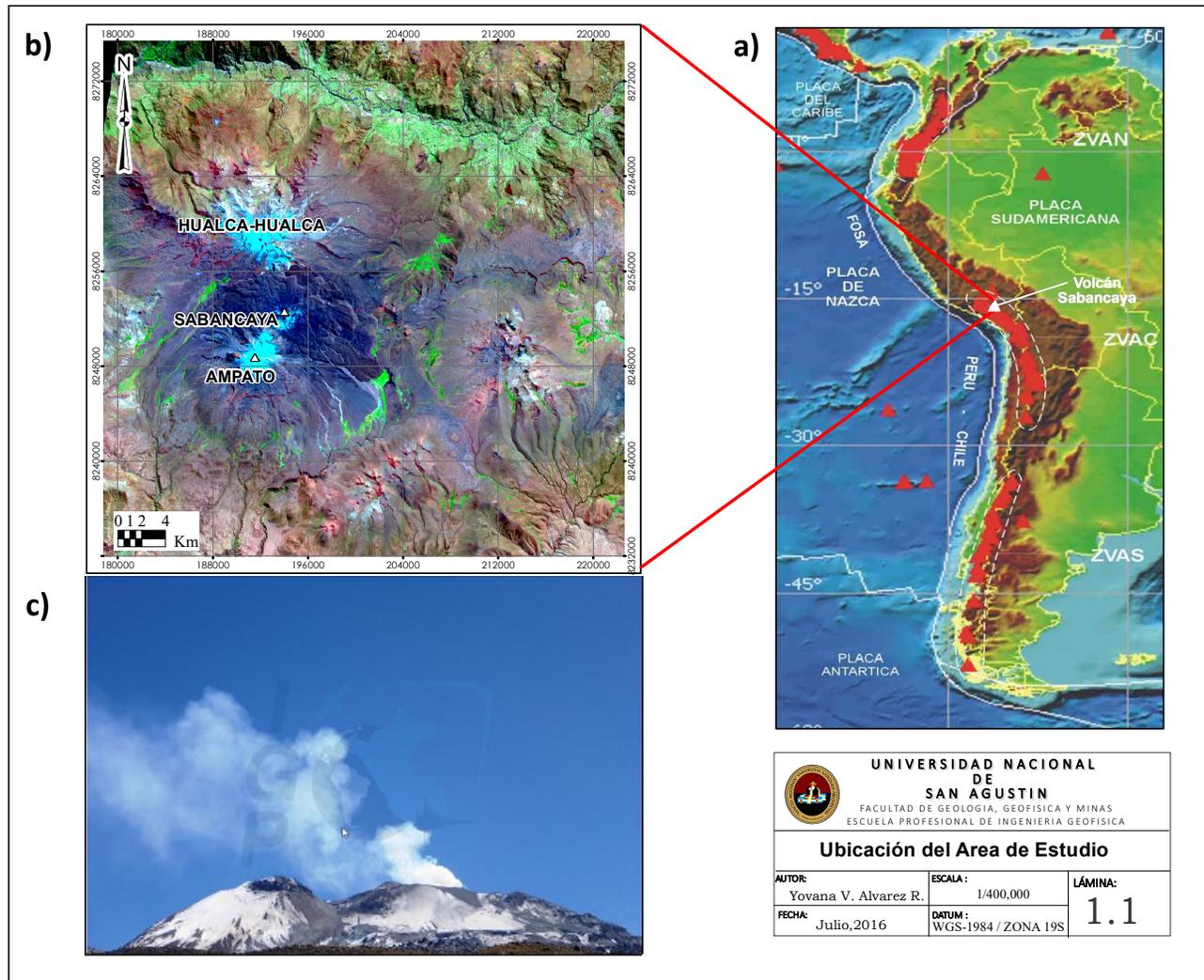


Figura 1.1: a) Distribución de las principales cadenas volcánicas sobre la cordillera occidental de Sudamérica. (Silva & Francis, 1991). b) Ubicación del volcán Sabancaya y Volcán Hualca-Hualca) Vista flanco este del volcán Sabancaya.

1.2 ACCESIBILIDAD

La accesibilidad a la zona de estudio, se realiza principalmente por tres vías:

- **La Primera vía de acceso**, partiendo desde Arequipa mediante la carretera asfaltada que lleva hacia Yura, prosigue a Pampa Cañahuas (Reserva Nacional de Salinas y Aguada Blanca) y luego continua por carretera afirmada hacia los bofedales de Vizcachani, seguidamente a Patapampa (Mirador de los Andes 4897 msnm.) y finalmente al distrito de Chivay en un promedio de 4 Horas. A partir del distrito de Chivay, se prosigue por carretera afirmada hacia los poblados de Achoma, Maca, Cabanaconde y Laguna de Mucurca, como se muestra en la **figura 1.2**.
- **La Segunda vía de acceso**, se sigue la misma ruta partiendo de Arequipa hasta Patapampa, en este lugar hay un desvío a mano izquierda en trocha hacia la zona de Sallalli, la cual se encuentra cerca del Complejo Volcánico Ampato-Sabancaya (**Figura 1.2**).
- Existe una **tercera vía de acceso** desde la localidad de Huambo (provincia de Caylloma), de donde parte una trocha carrozable y poco conservada con dirección SE. Por esta vía se accede hacia el flanco occidental del CVAS (Rivera et al., 2016).

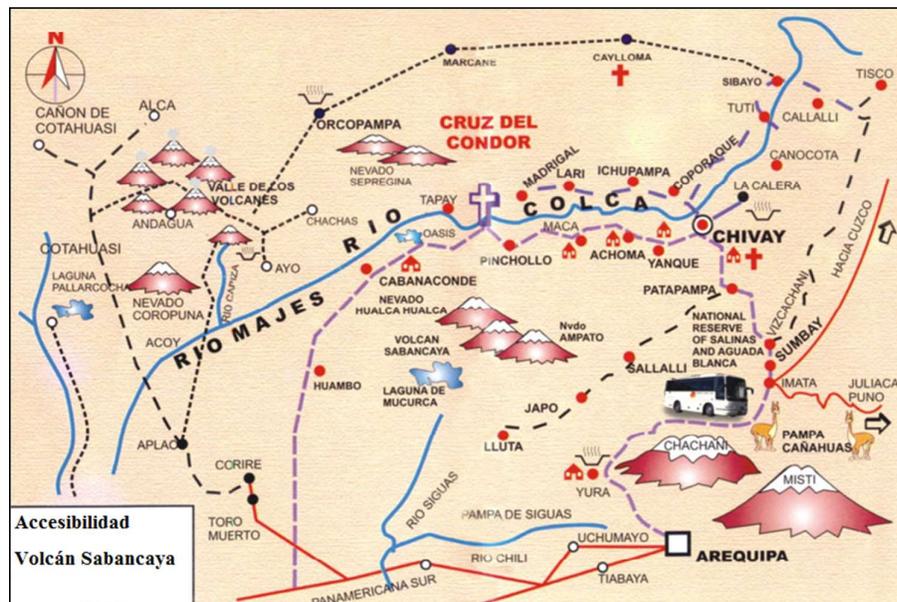


Figura 1.2: Imagen de la accesibilidad al volcán Sabancaya partiendo desde la ciudad de Arequipa (Fuente: Ministerio de Comercio exterior y Turismo).

1.3 CLIMA Y VEGETACIÓN

El clima del valle del Colca es característico de las zonas alto andinas. Durante la temporada de lluvia (diciembre a marzo) los cambios de temperatura no son tan radicales debido a que el cielo nublado impide que los rayos del sol penetren durante el día. Las temperaturas en esta época del año alcanzan entre 5 y 10°C. Entre los meses de abril a noviembre las temperaturas bajan usualmente bajo 0 por la noche y alcanzan entre 15 y 20°C durante el día.

Debido a las condiciones climáticas extremas, la vegetación está conformada fundamentalmente por la presencia de arbustos y matorrales, principalmente de gramíneas y cactáceas (Alcalá, L. 2007).

Las pampas están cubiertas por densas formaciones herbáceas conocidas como pajonales fuente de alimento de llamas, alpacas y vicuñas. Por encima de los 4500 msnm cerca de las nieves perpetuas aparecen formaciones de plantas almohadilladas y arrosetadas pegadas al suelo que reciben el nombre de Yaretas (**Figura 1. 3**). En las áreas que fueron afectadas por la última gran glaciación aparecen turberas que en la cordillera reciben el nombre de bofedales. Por encima del límite de las nieves perpetuas y donde el suelo está congelado durante gran parte del año, abundan las superficies rocosas en la cual se desarrollan los líquenes.

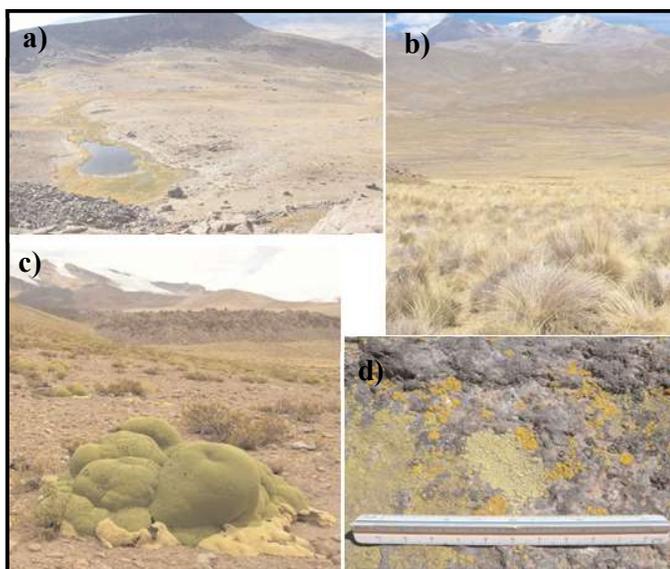


Figura 1.3: Vegetación en la zona de estudio a) Turberas (Bofedales) al Oeste de la altiplanicie de Patapampa, b) Pajonales en las Pampas c) Plantas almohadilladas más conocidas como Yaretas, d) Líquenes. (Alcalá, L. 2007).

1.4 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

El volcán Sabancaya considerado el segundo volcán más activo del Perú, el cual viene siendo monitoreado por el IGP –sede Arequipa desde el año 2013, debido al incremento de actividad fumarólica (gas, vapor de agua, etc.) y actividad sísmica. Con la finalidad de comprender el comportamiento interno y externo de este volcán, surge la necesidad de realizar diferentes estudios, entre ellos tenemos el método geofísico de Potencial Espontaneo.

1.5 JUSTIFICACIÓN

El presente estudio se enfoca en la aplicación del método de Potencial Espontaneo, con el fin de evaluar el sistema hidrotermal presente en el Volcán Sabancaya, así como zonas con presencia de posibles estructuras relacionadas a fallas o calderas de colapso presentes en el volcán Sabancaya y volcán Hualca-Hualca.

1.6 OBJETIVOS

1.6.1 Objetivo General

Aplicación del método de Potencial Espontaneo al estudio de los volcánes Sabancaya y Hualca-Hualca.

1.6.2 Objetivos Específicos

- Identificar y determinar la dimensión del sistema hidrotermal del volcán Sabancaya.
- Delimitar e identificar zonas con presencia de estructuras (fallas, caldera, colapsos de calderas antiguas, etc.), ubicadas en el volcán Sabancaya y volcán Hualca-Hualca.
- Elaborar un modelo en 3 dimensiones de las anomalías presentadas en los volcanes Sabancaya y Hualca – Hualca.

1.7 TRABAJOS ANTERIORES EN LA ZONA DE ESTUDIO

En la región del volcán Sabancaya se realizaron algunos estudios de carácter geológico, tectónico y sísmico, entre estos tenemos:

- Vicente et al., (1979), realizaron la descripción de la geología de Arequipa y el valle del Colca. En este estudio mencionan que esta región está conformada por afloramientos de rocas de edad Mesozoica
- Sébrier et al., (1985), estudiaron las fallas activas de Trigal y Solarpampa, ubicadas en las alturas del cañón del colca, entre las localidades de Huambo y Cabanaconde, fallas con orientaciones E–O, constituidas por segmentos que se extienden a lo largo de 30 km cortando depósitos volcánicos cuaternarios y fluvio–glaciares.
- Chorowicz et al., (1992), profundizaron los estudios de Vicente et al. (1979) y menciona que el extremo Este de la Cordillera Occidental está compuesto de rocas volcánicas y volcanoclásticas constituidas de capas de ignimbritas pertenecientes al Grupo Tacaza del Mioceno Inferior, además, sobreyaciendo a este grupo, se distinguen lavas andesíticas, dacíticas y capas ignimbríticas del grupo Barroso del Plioceno-Cuaternario representado principalmente por el volcán Sabancaya.
- Rodríguez y Huamán (1992), realizaron la localización y el análisis de 131 sismos locales registrados durante el periodo 1990-1993. Los resultados mostraron que los eventos sísmicos se ubicaron principalmente sobre la pampa de Sepina, concluyendo que estos sismos estarían asociados a la deformación tectónica local. Además, los autores sostienen que los epicentros describen una tendencia migratoria desde Pampa de Sepina hasta las localidades de Layuni, Huituhuasi y Visconoja, proponiendo un modelo de amenaza sismo-tectónica.
- Huamán (1995), analizando imágenes de satélite Landsat MSS y observaciones de campo identificó importante deformación tectónica regional y local representada, principalmente, por los sistemas de fallas Huanca, Ichupampa y el sistema Huambo-Cabanaconde, todas ubicadas en el extremo NE, SO y Norte del volcán Sabancaya.
- Gonzáles et al., (1996), analizaron la actividad sísmica registrada en el volcán Sabancaya entre los años 1990 y 1994. En total, localizaron 44 sismos en los extremos N y NE del volcán Hualca-Hualca, a profundidades menores a 9 Km.
- Méring et al., (1996), realizaron trabajos complementarios en la región del volcán Sabancaya, utilizando para ello, imágenes satelitales SPOT y Landsat MSS e identificaron numerosos lineamientos ubicados al N y NE del volcán Sabancaya.

- Antayhua, Y. (2002), explica que la deformación en Pampa Sepina, es producida por esfuerzos tectónicos ocurridos cerca de la falla Sepina; y precisa que la actividad sísmica y la deformación en la Pampa Sepina, sería debido a los esfuerzos generados por la presión del magma durante su propagación por los conductos antes de llegar a la cámara magmática del volcán Sabancaya.
- Pritchard, M. et al (2003), realizó estudios de deformación utilizando la técnica InSAR. El resultado obtenido permitió identificar una anomalía de deformación al NE del volcán Hualca-Hualca, probablemente asociado al proceso eruptivo del volcán Sabancaya.
- Claire (2007), realizó un análisis sismotectónico detallado del valle del Colca, evidenciando que los mecanismos de ruptura coinciden totalmente con la disposición de los principales sistemas de fallas reconocidas en el valle del Colca.
- Gonzáles et al., (2009), publicaron un artículo, en el cual se detallan las características de los procesos de deformación ocurridos al NW del estratovolcán Hualca-Hualca (margen izquierda del cañón del río Colca), asociados a la actividad de fallas normales activas (Solarpampa y Trigal) y probablemente a la actividad volcánica del Sabancaya, esto en base al análisis de imágenes radar, usando la técnica de InSAR.
- Paxi, R. (2012), realizó la clasificación de la actividad volcano-tectónica para el periodo Mayo-Julio 2009 llegando a la conclusión de que el 91.8% corresponde a sismos volcano-tectónicos y un 6.4% relacionado con eventos de movimiento de fluidos y un 1.8% eventos raros. La distribución hipocentral de los sismos presenta mayor acumulación al Norte y Noreste del Volcán asociados a activación o reactivación de fallas y lineamientos probablemente a niveles similares a los reportados por Pritchard en el 2003, mediante las imágenes InSAR.
- Torres, J. (2014), realizó un estudio, en el cual propone un modelo esquemático de la evolución de la sismicidad en base a datos sísmicos y de interfometría SAR del área de estudio, donde da énfasis a que la intranquilidad de dicho volcán, se debe a una intrusión de magma la cual ocasiona rompimiento de rocas provocando los eventos Volcano-Tectónicos Distales (VTD'S), y por consiguiente la reactivación de fallas los cuales corresponden a fallas normales

ubicadas en el **sector NO** así como fallas inversas ubicadas al **E y NE** (Zona de Sepina).

- Jay, J. et al (2015), realizó estudios de correlación entre la deformación mediante la técnica InSAR y eventos volcanotectónicos (VT's) en la cual se observó deformación asociada a la sismicidad de la zona originado por las fallas en dirección E-O y de alguna manera relacionada al incremento de magma al interior del volcán Sabancaya.
- Samaniego, P. et al (2016), hace una reconstrucción cronológica eruptiva del Complejo Volcánico Ampato-Sabancaya mediante dataciones ($K^{40} - Ar^{40}$), Ampato Superior (70-80 Ka) conformado por los picos: Norte, Sur y Central. Durante el Holoceno la actividad migro al NE construyéndose el edificio Sabancaya conformado por flujos de lava de composición andesítica y dacítica y un cono terminal joven y compuesto por material piroclástico.

1.8 ACTIVIDAD HISTÓRICA DEL VOLCÁN SABANCAYA

La actividad histórica del volcán Sabancaya ocurrida en los últimos 500 años, estuvo caracterizada por erupciones explosivas, pero de corta duración e interpretadas de tipo vulcaniana.

Los registros históricos muestran que el volcán Sabancaya presentó una importante actividad eruptiva en los años **1750** y **1784** (Siebert et al., 2010). Posteriormente una nueva actividad eruptiva se registró a partir de noviembre de **1986-1998**, la cual se caracterizó por la ocurrencia de explosiones frecuentes de tipo vulcaniano, con emisiones de ceniza en los alrededores del volcán (Guillande et al., 1992; Gerbe y Thouret, 2004). Así como también los registros presentaron una gran variedad de señales sísmicas relacionadas al fracturamiento de rocas, circulación de fluidos y emisión de fumarolas, y también caída de pequeños bloques de rocas (Rodríguez y Uribe, 1994). La localización de los eventos sísmicos de tipo fractura (conocidos actualmente como Volcano -Tectónicos o VT's) muestran que la principal actividad sísmica se concentró mayormente al este y noreste del volcán Sabancaya; es decir, próximo al lineamiento de la Pampa Sepina (Rodríguez y Uribe, 1994; Antayhua, 2001; Antayhua, 2002).

Entre los años 1998-2011, las fumarolas del volcán Sabancaya rara vez superaban los 200 m de altura y obviamente, no eran visibles desde los pueblos localizados en el valle del Colca ubicados a más de 20 Km de distancia.

Desde el segundo semestre de 2012, las fumarolas del Sabancaya se hicieron más notorias, pues llegaban a alcanzar los 400 m y ocasionalmente podían ser visualizadas desde los pueblos de Chivay y Achoma (valle del Colca).

- Etapa de intranquilidad del volcán Sabancaya (2013-2015):

El 22 de febrero del 2013 y después de 15 años se inició nuevamente el incremento tanto de la actividad fumarólica y sísmica (eventos volcano-tectónicos, de largo periodo, temores, etc.). Estas fumarolas constituidas principalmente de vapor de agua y gases volcánicos, llegaron a alcanzar los 1200 m sobre la cima del Sabancaya.

Como consecuencia de esta intranquilidad el Instituto Geofísico del Perú (IGP) sede Arequipa instaló una red de seis estaciones sísmicas digitales portátiles (cinco de banda ancha y una de periodo corto), así como tres estaciones telemétricas equipadas con sensores de banda ancha.

Durante el 2014 la actividad fumarólica fue incrementando gradualmente, produciéndose entre los meses de agosto a diciembre fumarolas de hasta 1800 m de altura por encima de la cumbre del volcán (Rivera et al., 2016), registrándose además dos explosiones freáticas confinadas (IGP, 2014).

En el 2015 la actividad se mantuvo de manera casi constante la mayor parte del año; sin embargo, la actividad sísmica se incrementó en los últimos dos meses del año sobre todo en eventos relacionados a movimiento de fluidos, así mismo la actividad fumarólica continuó presentando valores altos.

El 06 de noviembre de 2016, luego de 18 años comenzó un nuevo proceso eruptivo, los centros poblados aledaños son testigos presenciales de decenas de explosiones acompañadas de grandes volúmenes de ceniza en dispersión y columnas eruptivas de más de 4 km que se alzan sobre el cráter.

ACTIVIDAD HISTORICA VOLCÁN SABANCAYA	
AÑO	OBSERVACIONES
1750 y 1784	Según Relato Histórico de Travada y Cordoba (1752) y Zamácola y Jáuregui (1804), (Sieber et al., 2010).
1986-1998	Incremento de actividad sísmica .
	Explosiones frecuentes de Tipo Vulcaniana.
	Formación de la columna eruptiva de 5 Km de altura por encima del cráter.
	Materiales emitidos se desplazaron en área de 10 Km Aproximadamente.
	IEV : 2-3 (Thouret et al. 1994).
2013-2015	Considerado como periodo de intranquilidad, debido al incremento tanto de la actividad fumarólica y sísmica.
	Fumarolas de hasta 1.8Km de altura sobre la cima del volcán Sabancaya.
2016	Inicio de un nuevo periodo eruptivo con una explosión registrada en noviembre.
	Columnas eruptivas de más de 4 km que se alzan sobre el cráter.

Tabla 1.1: Resumen de la actividad histórica del volcán Sabancaya.



Figura 1.4: Explosiones en el volcán Sabancaya registradas el 07 de noviembre del 2016, expulsaron cenizas de 4000 metros de altura, iniciando un nuevo proceso eruptivo después de 18 años. (Cortesía: IGP-sede Arequipa).

CAPITULO II

MARCO GEOLÓGICO, ESTRATIGRAFICO Y ESTRUCTURAL

2.1 GEOMORFOLOGÍA

La geomorfología del CVAS y sus alrededores está conformada en su mayoría por unidades geomorfológicas de origen (volcánico y glaciar). Las geoformas de origen glaciar y volcánico se formaron durante el Pleistoceno Tardío y Holoceno, en este periodo se tuvo el Último Máximo Glaciar del Pleistoceno (UMGP) que ocurrió hace 18 Ka aproximadamente, el cual se refiere al máximo volumen de hielo planetario, que existió durante la última glaciación (Alcalá, J. 2007). Las geoformas de origen glaciar corresponde a valles glaciares, circos glaciares y extensas zonas de acumulación de morrenas, mientras que dentro de las geoformas de origen volcánico podemos mencionar a zonas de coladas de lava, edificios volcánicos glaciados, estratoconos, conos de la cumbre, domos, cráter, zona de volcanoclastos y lahares.

2.2. GEOLOGÍA

Las rocas más antiguas de la zona de estudio son las rocas subvolcánicas, de color blanquecino, rico en fenocristales de plagioclasas y anfíbol. En casi toda el área de trabajo afloran flujos de lava andesíticos de color gris verdosa, correlacionado con el Grupo Barroso y que pertenecen del Mioceno Superior al pleistoceno (Palacios et al., 1993). Finalmente, cubriendo varios depósitos volcánicos afloran depósitos morrenicos emplazados durante el Pleistoceno Superior y Holoceno.

2.3 ESTRATIGRAFÍA

2.3.3 Estratigrafía del volcán Hualca- Hualca

Sus depósitos han sido agrupados en seis eventos: **El primer evento (Qpl-hh/tqa)**, consiste de flujos de lavas traquiandesíticas que se extienden hacia el Este del complejo, cubriendo discordantemente a los depósitos del grupo Tacaza y a las tobas soldadas del complejo volcánico Huarancante. **El segundo evento (Qpl-hh/an1)**, consiste de flujos de andesita intercalados con tobas Cristalolíticas, ambos forman la base del complejo volcánico, se extienden hacia el este y oeste, cubriendo a los depósitos del Grupo Tacaza. **El tercer evento (Qpl-hh/an2)**, consiste de flujos de andesita porfiríticas, que se extienden hacia el flanco sur, infrayaciendo a los depósitos del estratovolcán Sabancaya. **El cuarto evento (Qpl-hh/an3)**, consiste de flujos andesíticos afíricos a porfiríticas de la cumbre. **El quinto evento (Qpl-hh/da)**, consiste de domos y flujos dacíticos posteriores, el emplazamiento de este domo (criptodomo) originó el colapso del flanco Norte del complejo, por lo que se emplazaron depósitos de avalanchas de escombros hacia el río Colca y hacia Cabanaconde, originando una caldera de colapso, estos depósitos conforman **El sexto evento (Qpl-hh/dae)** que taponearon las aguas del río Colca, creando un represamiento aguas arriba con posterior sedimentación de depósitos lacustrinos (Madrigal, Maca). Cerca de este domo se localizan manifestaciones geotermales (surgente de gas de Pinchollo) y alteraciones hidrotermales (Farfán J. et al., 2015).

2.3.5 Estratigrafía del volcán Sabancaya

El volcán Sabancaya se encuentra conformado principalmente por flujos de lava en bloques de composición andesítica y dacítica, con limitados depósitos piroclásticos (Thouret et al. 1994, Samaniego P. et al., 2016).

Sus depósitos han sido divididos y agrupados en cuatro eventos: **El primer evento (Qpl-evs/tbka)**, consiste de tobas soldadas vitrificadas que se extienden hacia el este del cono y rellenan una depresión preexistente, sobreyacen a las tobas del primer evento del estratovolcán Ampato. **El segundo evento (Qpl-evs/da1)**, consiste de flujos dacíticos fluidales, cuyos frentes son muy conspicuos y cubren a las tobas del sexto evento del Ampato, extendiéndose por lo tanto hacia el Sureste. **El tercer evento (Qpl-evs/da2)**, consiste de flujos dacíticos a traquiandesíticos que forman los flancos del estratocono, cubriendo a los depósitos preexistentes del

Ampato y Hualca-Hualca. **El cuarto evento (Qplevs/da3)**, consiste de domos de flujos dacíticos afíricos en la cumbre, con los que finalizó la construcción del estratocono y se extienden principalmente hacia el Norte. (Farfán J. et al, 2015).

ERA TEMA	SISTEMA	SERIE	UNIDADES LITOESTRATIGRÁFICAS	ROCAS INTRUSIVAS					
CENOZOICO	CUATERNARIO	HOLO CENO 0.01	GRUPO ANDAHUA (+/- 100 m)	Qh-al Clastos, gravas en matriz limo arenosa Qh-fg Gravas SRD a SAN en matriz arenolimos intercalados con niveles de arena. Qpl-la Limos arenosos intercalados con areniscas. Qpl-fg Clastos angulosos y subangulosos en matriz amosa. Qpl-an_s Flujos andesíticos a traquiandesíticos afaníticos vesiculares. Qpl-an_i Qpl-al Gravas subangulosas a subredondeadas en matriz areno-limosas. Qpl-mo Morrenas, limos, arenas y gravas..					
		PLEISTOCENO	GRUPO BARROSO (+/- 1 200 m)	Estratovolcán Sabancaya		Qpl-evs/da3 Flujos dacíticos afíricos de la cumbre. Qpl-evs/da2 Flujos dacíticos a traquiandesíticos. Qpl-evs/da1 Flujos dacíticos con textura fuidal. Qpl-evs/tbka Tobas soldadas vitrificadas.			
				Estratovolcán Ampato		Qpl-eva/da Flujos dacíticos de la cumbre. Qpl-eva/tbk Tobas de cristales, no soldadas. Qpl-eva/dp Flujo de dacitas porfídicas. Qpl-eva/dae Depósitos de avalanchas de escombros.. Qpl-eva/tqa Flujos de traquiandesitas. Qpl-eva/av Flujos de andesitas vesiculadas porfíricas. Qpl-eva/tbka Tobas soldadas vitrificadas.			
						Comp. Volc. Hualca Hualca	Qpl-hh/dae Deposito de avalanchas de escombros. Qpl-hh/da Flujos dacíticos (criptodomo). Qpl-hh/an3 Flujos de andesitas de la cumbre. Qpl-hh/an2 Flujos de andesita porfírica. Qpl-hh/an1 Flujos de andesitas intercalados con tobas cristalolíticas. Qpl-hh/tqa Flujos de traquiandesitas.		
							Estratovolcán Las Minas	Qpl-mi/an Flujos de andesita.	
							Caldera Cailloma	Np-cay/tbk Tobas cristalolíticas.	
						Comp. Volc. Mismi		Qpl-cvm/tbk Tobas de cristales, no soldadas. Np-cvm/an2 Flujos de andesitas de la cumbre. Np-cvm/an1 Flujos de andesitas porfíricas.	
				NEÓGENO			PLIOCENO 5	GRUPO TACAZA (+/- 1 000 m)	Fm. Tacaza superior
						Fm. Orcopmpa			PN-or Tobas de bloques intercalados con aglomerados.
						Fm. Indiviso			PN-ta Lavas andesíticas intercaladas con tobas.
Fm. Huanca (+/- 200 m)	P-hu Conglomerados de clastos cuarcíferos en matriz arcósica.								
MESOZOICO	CRETÁCICO	SUP. 99	Fm. Arcurquina (+/- 200 m)	Kis-ar Calizas nodulosas intercaladas con lutitas.					
		INF. 135	Fm. Murco (+/- 300m)	Ki-mu Calizas nodulosas intercaladas con lutitas.					
			Fm. Hualhuani	Ki-hu Areniscas cuarcíferas intercaladas con limolitas.					
	JURÁSICO	GRUPO YURA (+/- 1000 m)	SUP.	Fm. Gramadal	Js-gr Calizas lajas oscuras.				
			MED.	Fm. Labra	Js-la Areniscas en bancos delgados, intercalados con lutitas.				
				Fm. Cachíos	Jm-ca Lutitas deleznales intercaladas con areniscas calcáreas.				
NEO-PROTEROZOICO			Complejo Majes - Colca	PE-em Gneis y granitos potásicos metamorizados.					

Super Unidad Tiabaya
Plutón Seraj
KP-ti-sc/t

Tabla 2.1: Estratigráfica de las etapas eruptivas del Complejo volcánico Ampato-Sabancaya y volcán Hualca-Hualca (Farfán J. et al, 2015).

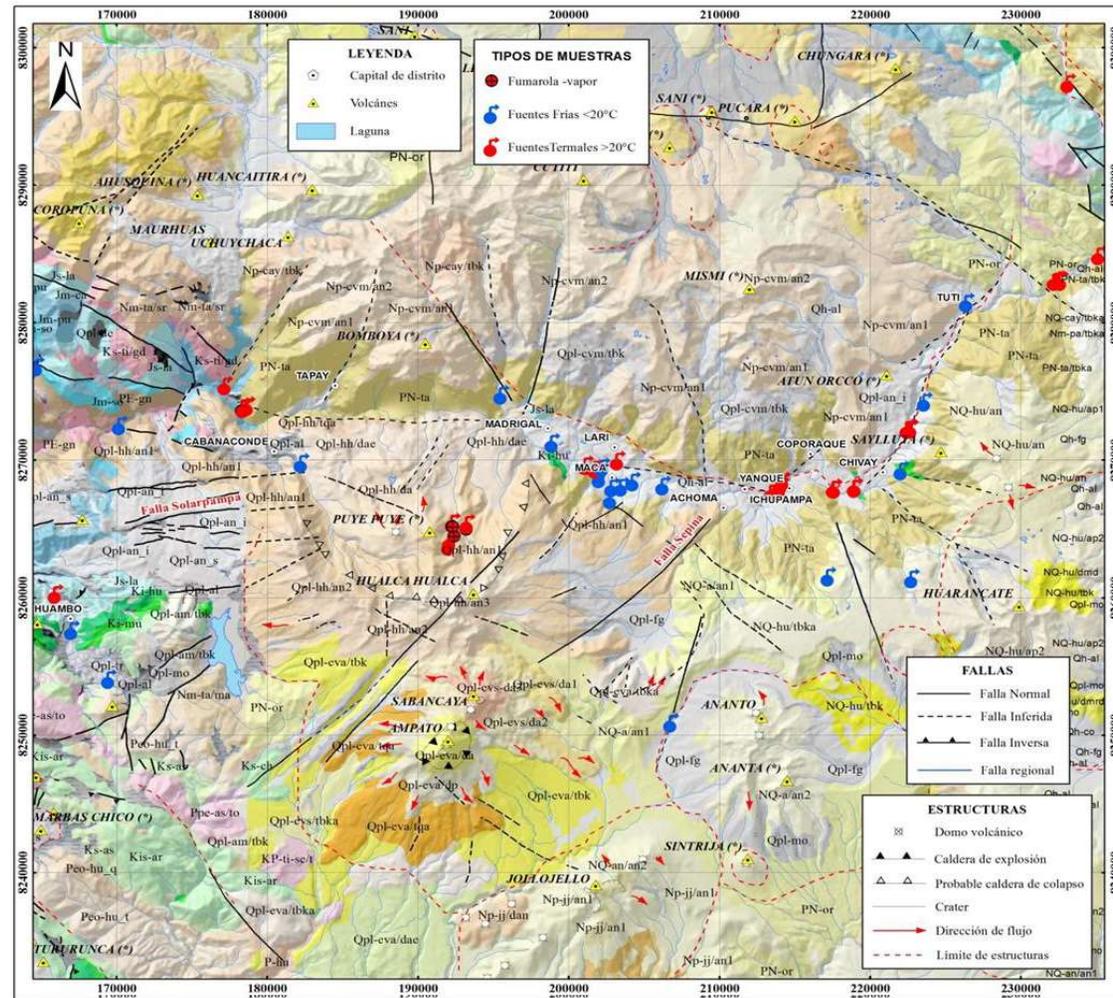


Figura 2.1: Mapa geológico del volcán Sabancaya y volcán Hualca-Hualca (Farfán J., et al, 2015).

2.4 GEOLOGÍA ESTRUCTURAL

En el área de estudio se pueden identificar tres zonas de fallas y lineamientos. (Méring, 1996; Samaniego, 2016).

2.4.1 El sistema de Fallas NO-SE

La primera de ellas corresponde al sistema de fallas NO-SE localizadas al suroeste y noreste del CVAS, conformada por la **Falla de Huanca** que es de tipo normal, con buzamiento hacia el suroeste y con una longitud aproximada de la traza de falla de 50 Km y la **Falla Ichupampa**, de tipo normal, que buza hacia el Suroeste, posee cerca de 25 Km de largo y pasa cerca de la localidad de Yanque (Mariño, 2012; Samaniego, 2016) ver **Figura 2.2**.

2.4.2 El sistema de Fallas E-O

Se observa principalmente al noroeste del CVAS, estas estructuras son casi paralelas al valle del río Colca (Samaniego, 2016). Están conformados principalmente por fallas normales activas (Méring et al., 1996; Huamán, 1995), que afectan flujos de lavas del volcán Hualca-Hualca (**Figura 2.2**). Estas fallas son conocidas como el **Sistema Huambo-Cabanaconde**, conformadas por las **Fallas Trigal y Solarpampa** (Sébrier et al., 1985).

2.4.3 El Lineamiento de Sepina NE-SO

Se encuentra principalmente al noreste del CVAS en la zona de Pampa Sepina, este lineamiento fue identificado por (Huamán, 1995), dicho lineamiento posee una longitud aproximada de 35 Km y son muy activas (Antayhua y Tavera, 2003). (**Figura 2.2**).

Aparentemente este sistema parece ser la fuente de varios eventos sísmicos (Antayhua, J., 2003; Jay et al., 2015). Los centros de emisión, así como los valles glaciares de este complejo se encuentran alineados en dirección NE-SO, por lo que esta observación sugiere que este sistema puede estar controlando el desarrollo estructural del CVAS (Samaniego et al, 2016).

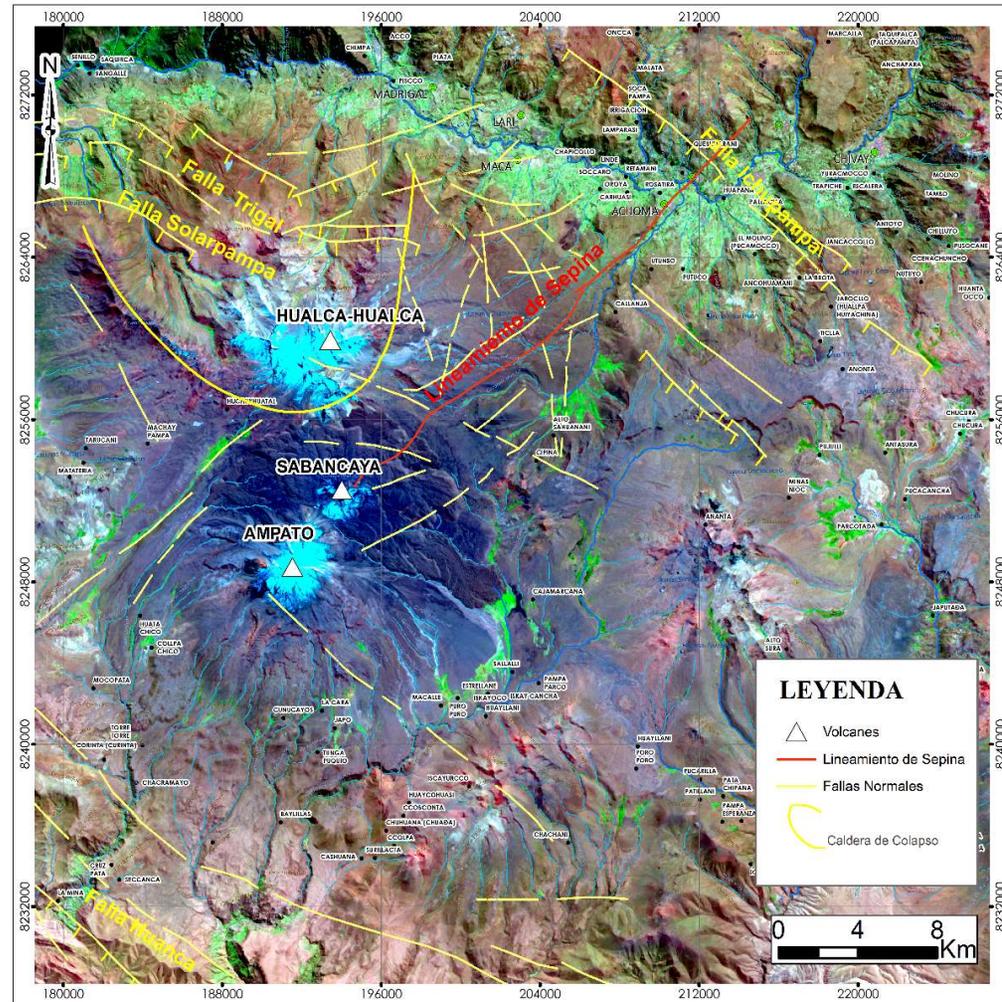


Figura 2.2: Mapa estructural Regional de los principales sistemas de fallas y lineamientos identificados por Sebrier et al., 1985; Huamán 1995 y Mering et al, 1996.

CAPITULO III

POTENCIAL NATURAL O POTENCIAL ESPONTANEO (PE)

El Potencial Espontaneo (PE) es uno de los métodos eléctricos más antiguos que ha sido utilizado en prospección geofísica, se basa al estudio de los potenciales asociados a las corrientes naturales existentes en el subsuelo. A pesar de su antigüedad este método sigue siendo utilizado en la actualidad por ser simple en equipamiento y de fácil ejecución en el campo.

El inglés Robert Fox descubrió en 1830 el fenómeno del potencial espontaneo y sugirió su uso en la prospección de yacimientos de minerales. Sin embargo, el primer éxito corresponde al ingeniero de minas Conrad Schlumberger, padre de la prospección eléctrica. Este investigador descubrió en el año de 1912 el yacimiento de sulfuro de cobre en Cornwall- Inglaterra, aplicando el método de PE. Sato y Mooney (1960) afirman que el potencial espontaneo generado en un yacimiento se debe a la diferencia en la capacidad de oxidación de las aguas próximas al extremo superior e inferior del yacimiento, dentro del cual se produce un intercambio de cargas iónicas y electrónicas. La mineralización sirve para el transporte de electrones desde la superficie inferior a la superior, hasta que se alcance el equilibrio electroquímico también conocido como potencial Redox.

Actualmente el método aparte de ser aplicado en la minera también viene aplicado en estudios de sistemas hidrotermales en volcanes activos del Perú como Misti (Finizola, A. 2000; Ramos, D. 2000), Ubinas (Gonzales, K. 2001), como volcanes del extranjero como Stromboli en Italia (Finizola, A, et al., 2009), Tenerife en España (Villasante et al ,2014).

También aplicado en áreas geotérmicas, mostrando anomalías positivas relacionadas con zonas de fumarólicas. Aplicado también en hidrogeología, mostrando anomalías negativas relacionadas fundamentalmente a la circulación de

agua subterránea originado por el fenómeno electrocinético (Bogolovsky, V. et al., 1973).

3.2 PRINCIPIO DEL MÉTODO

El método del PE se basa en medir las diferencias de potencial entre dos puntos del terreno (**Figura 3.1**) situados sobre la superficie, pues estos potenciales están asociados a corrientes eléctricas naturales que circulan en el subsuelo, provocados por diversos fenómenos naturales.

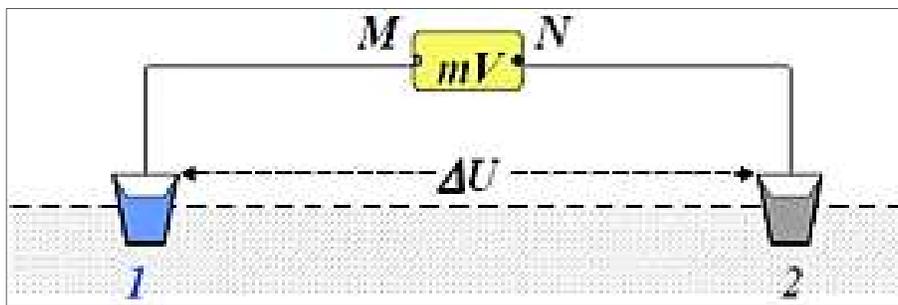


Figura 3.1: Principio del método de PE. (Dana, 1992).

3.3 FENÓMENOS QUE GENERAN EL POTENCIAL ESPONTANEO

El PE está asociado a corrientes naturales que son provocadas por diferentes fenómenos, las cuales son principalmente:

- Cambios eléctricos en ciertos yacimientos de minerales metálicos - (Fenómeno Electroquímico).
- Descensos de gradientes geotérmicos - (Fenómeno Electrotérmico).
- Filtraciones de agua al interior del suelo - (Fenómeno Electrocinético).

a) Fenómeno Electroquímico:

Las sustancias disueltas alrededor de la parte superior del cuerpo sufren reducción, tomando electrones del cuerpo, mientras que en la parte inferior las sustancias disueltas se oxidan, cediendo electrones al cuerpo (**Figura 3.2**). El flujo de electrones de abajo hacia arriba, hace que la reacción química pueda mantenerse indefinidamente. Sobre el nivel freático, las sustancias disueltas se hallan

relativamente oxidadas y bajo él, relativamente reducidas, esto produce una diferencia de potencial de óxido reducción llamado también potencial Redox.

En la zona superior, las reacciones más probables son las que afectan al oxígeno libre (O_2) y al ion férrico (Fe^{+3}). En la zona inferior, las reacciones de oxidación más probables son aquellas en las que interviene el ion ferroso (Fe^{+2}) y el hidróxido ferroso ($Fe(OH)_3$). Los electrones requeridos por las reacciones en la zona alta son proporcionados por las reacciones de la zona baja a través del cuerpo conductor, proceso que se mantiene debido al oxígeno que es suministrado por el agua de lluvia al infiltrarse en el subsuelo.

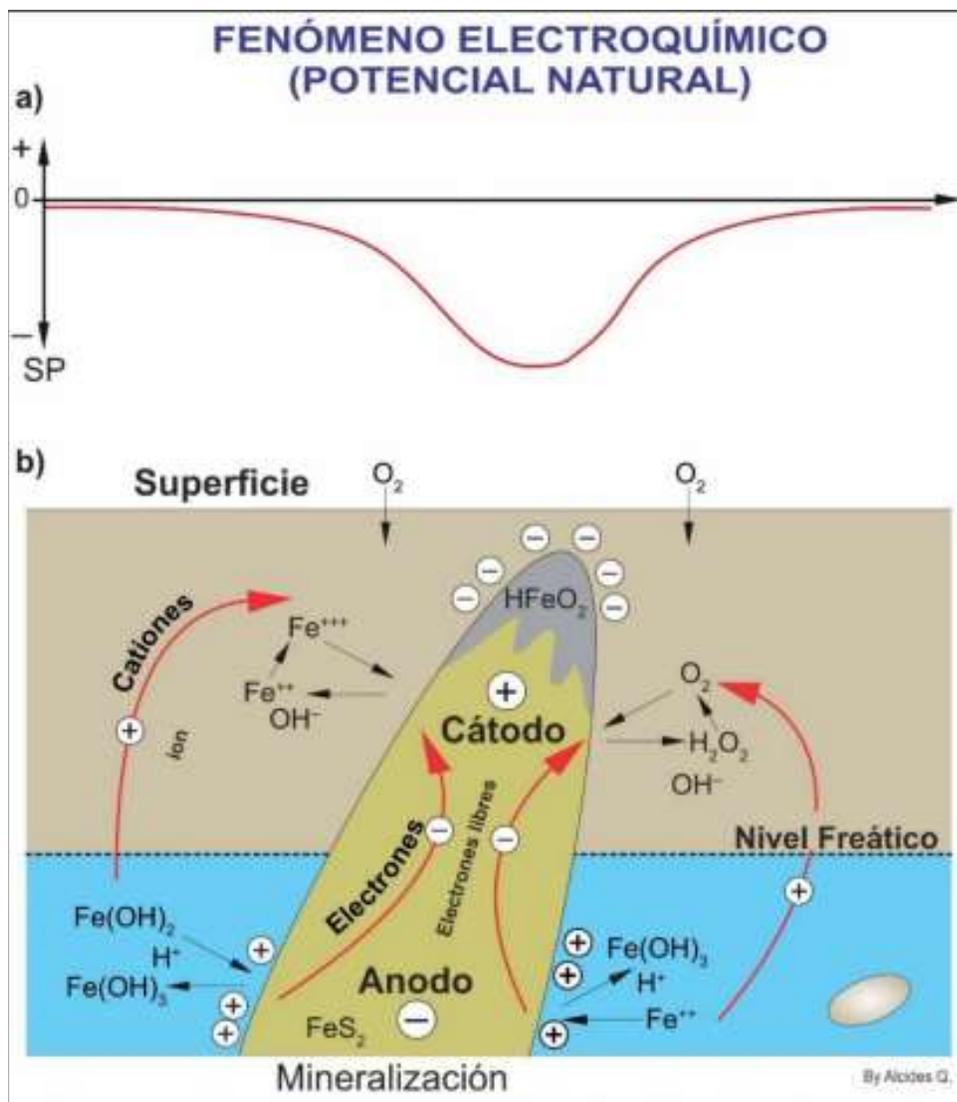


Figura 3.2: Mecanismo de PE por fenómeno electroquímico de Sato y Mooney, 1960.

b) Fenómeno Electrotérmico:

Si se mantiene una diferencia de temperatura a través de una muestra de roca, aparecerá un gradiente de potencial correspondiente (Corwin y Hoover, 1979).

Este fenómeno llamado efecto Soret, se debe a la difusión termal diferencial entre los iones de los fluidos presentes en los poros y iones cedidos por la roca matriz, (Heikes y Ure, 1961).

Generalmente, las anomalías de PE debidas al efecto termoeléctrico son de amplitud más pequeña (típicamente unas pocas decenas de mV) que las anomalías generadas por el efecto Electrocinético (Mauri G, 2009).

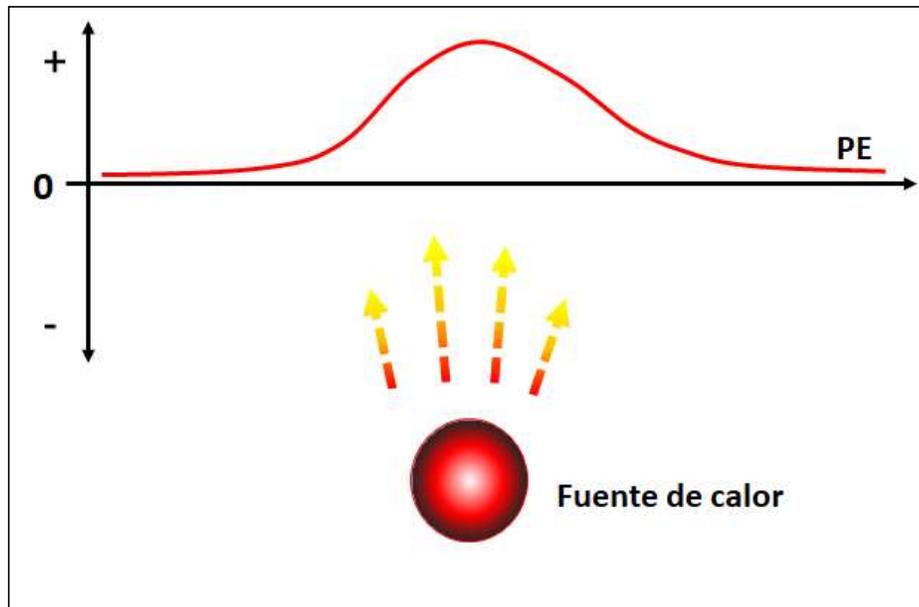


Figura 3.3: Potenciales termoeléctricos producidos por un cuerpo caliente. (Modificado de Zlotnicki y Nishida, 2003).

c) Fenómeno Electrocinético:

Es la principal fuente de generación de PE en una zona volcánica, los potenciales electrocinéticos, son generados por el flujo de los fluidos (ejemplo agua, gas, vapor) a través de los capilares del sólido (roca).

El modelo actualmente aceptado que explica el fenómeno Electrocinético es el modelo de distribución de iones en la interfaz sólido-líquido propuesto por Stern en

1924. A continuación se describe este modelo, también conocido como el de Doble capa Eléctrica.

- **Doble Capa Eléctrica (DCE)**

Cuando entran en contacto un sólido y un líquido, se forma en su interfaz sólido/líquido, un sistema de Doble Capa Eléctrica (DCE). La parte líquida conductora (agua, por ejemplo) es cargada positivamente y la otra (sólida) poco conductora es cargada negativamente, (Ishido y Mitzutani, 1981). Graham perfeccionó el modelo de Stern, de la DCE, el cual se describe a continuación:

Considerar un capilar al interior de una roca porosa saturada de una solución acuosa. En la interfaz que separa la fase sólida (roca) y la fase líquida (solución acuosa), se va a desarrollar una separación de cargas y por tanto una diferencia de potencial entre la interfaz y el eje del capilar (**Figura 3.4**). Esta separación de cargas va a ser equivalente y de signo opuesto. Los iones del líquido van a localizarse en la pared del sólido, por fuerzas de absorción química y fuerzas de origen electrostático, mientras que los iones del sólido pasan al líquido por simple difusión, definiendo así una carga superficial en el sólido (Mitzutani et al., 1976).

Este mecanismo da lugar a la formación de una DCE, distinguiéndose la capa compacta (o de Stern) donde los iones del líquido se adhieren a la pared del sólido, y una capa difusa, conocida también como de Gouy-Chapman, en la cual los iones son potencialmente móviles (**Figura 3.5**).

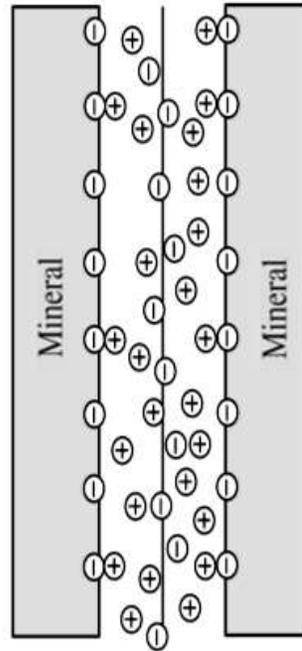


Figura 3.4: Esquema de distribución de la DCE (Modificado de Revil, A. 2011).

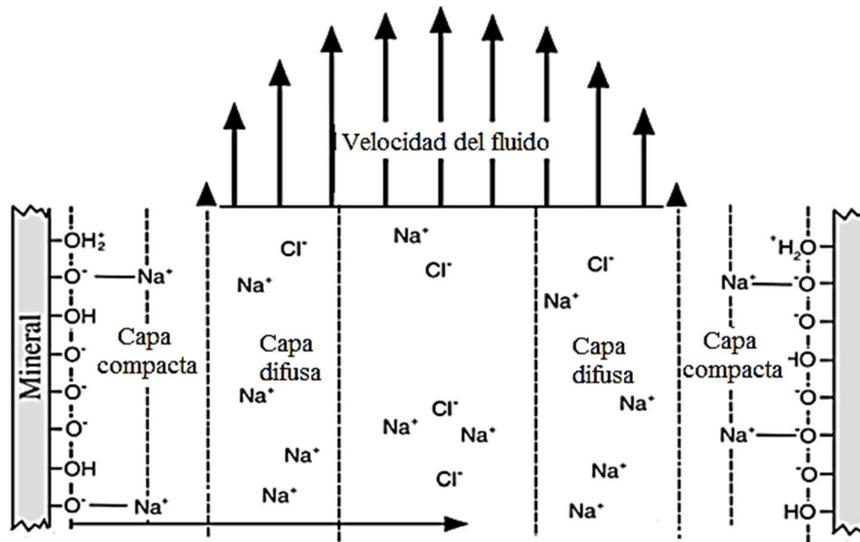


Figura 3.5: Modelo de generación de Potencial Electrocinético. DCE en la superficie de un mineral, que se ve afectada por el flujo de fluido (Modificado de Revil, A. 2011).

- Electrofiltración

También conocido como potencial de flujo, este fenómeno es generado por el movimiento de los electrolitos en el subsuelo. Cuando un electrolito para atraves de una membrana porosa produce una diferencia de potencial. Las rocas son

consideradas como una de estas membranas debido a que por su porosidad poseen capilares a través de los cuales puede filtrarse agua meteórica.

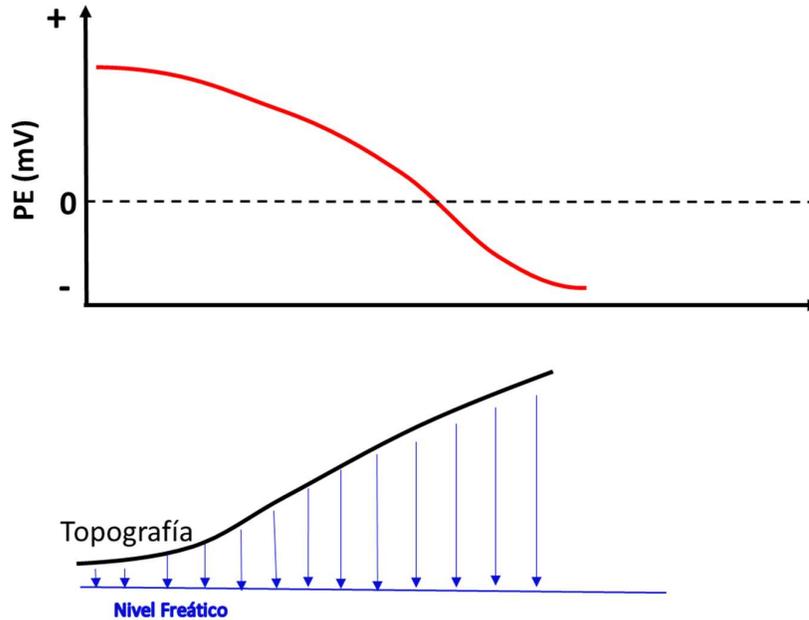


Figura 3.6: Esquema de las anomalías de Potencial espontaneo -Efecto Electrocinético – electrofiltración (modificado de Lénat, J, 2005).

3.4 CONFIGURACIÓN PARA LA MEDICIÓN DEL POTENCIAL ESPONTANEO

Existen dos tipos de configuraciones: El método de potenciales o de base fija y el método de gradientes.

a) Método de potenciales o de base fija

Se basa en colocar dos electrodos, uno fijo y el otro electrodo móvil y se instala a lo largo del perfil que previamente se ha definido. Para la toma de medida con esta configuración, primero instalamos un electrodo (Electrodo A) o también denominado electrodo fijo; posteriormente se estira el cable y se instala el segundo electrodo (Electrodo B) o llamado electrodo móvil y se procede a la medición del potencial, esta operación se realiza de forma sucesiva hasta terminar el perfil; siempre manteniendo el electro A en la misma posición. En este método tiene una

principal ventaja de no necesitar corrección, debido a que se mantiene fijo el electrodo A, ver **figura 3.7**.

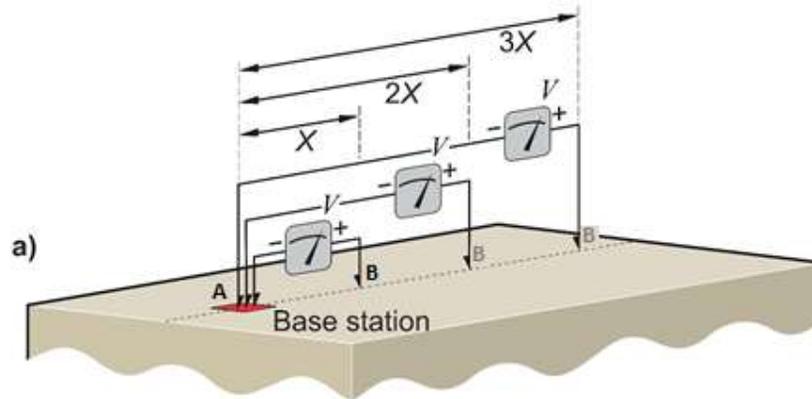


Figura 3.7: Configuración método base fija (modificado de Dentith, M. y Mudge, S., 2014).

b) Método de gradientes

De manera similar que el método anterior, esta configuración solo precisa de 2 electrodos, y se basa en medir mediante el milivoltímetro, cual es la diferencia de potencial entre los dos electrodos, siendo la distancia entre ambos invariable.

Para ello, en primer lugar, definiremos quien es el electrodo A y B y los uniremos al terminal positivo y negativo del multímetro respectivamente. Realizada la primera medida, ahora sin cambiar la polaridad del dispositivo, así como la distancia eléctrica, procederemos a tomar el resto de medidas a lo largo del perfil, de forma que el electrodo A ocupe siempre la posición que ocupaba el B en la anterior medida. (Parasnis, D., 1971). Para obtener la variación espacial del valor total del potencial, basta con ir sumando cada uno de estos gradientes, ver **figura 3.8**.

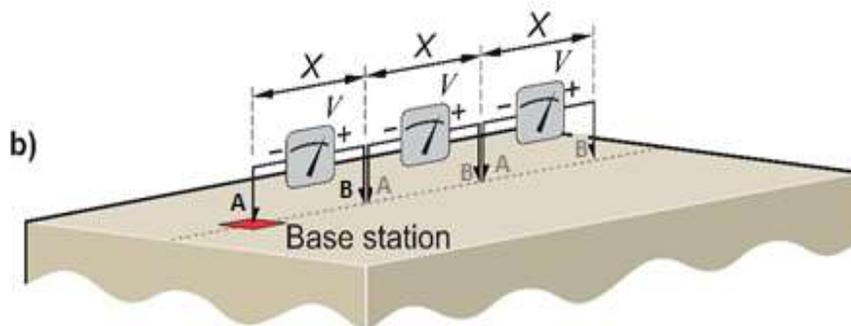


Figura 3.8: Configuración método de gradientes (modificado de Dentith, M. y Mudge, S., 2014).

3.5 POTENCIAL ESPONTANEO EN VOLCANES ACTIVOS

Se han propuesto dos mecanismos para explicar el origen de la diferencia de potencial: (1) el acoplamiento electrocinético debido a las células de convección del sistema hidrotermal asociado con (2) el acoplamiento termoeléctrico generada por las fuentes de calor dentro del edificio volcánico. Aunque estas dos fuentes coexisten, dentro de un sistema hidrotérmico, las consideraciones teóricas (Corwin y Hoover, 1979) sugieren que la diferencia de potencial generada por el acoplamiento electrocinético es el fenómeno esencial.

De hecho, estos estudios muestran que las anomalías teóricas generadas por electrofiltración tienen una amplitud de más de un orden de magnitud mayor que el generado por acoplamiento termoeléctrico (**Figura 3.9**).

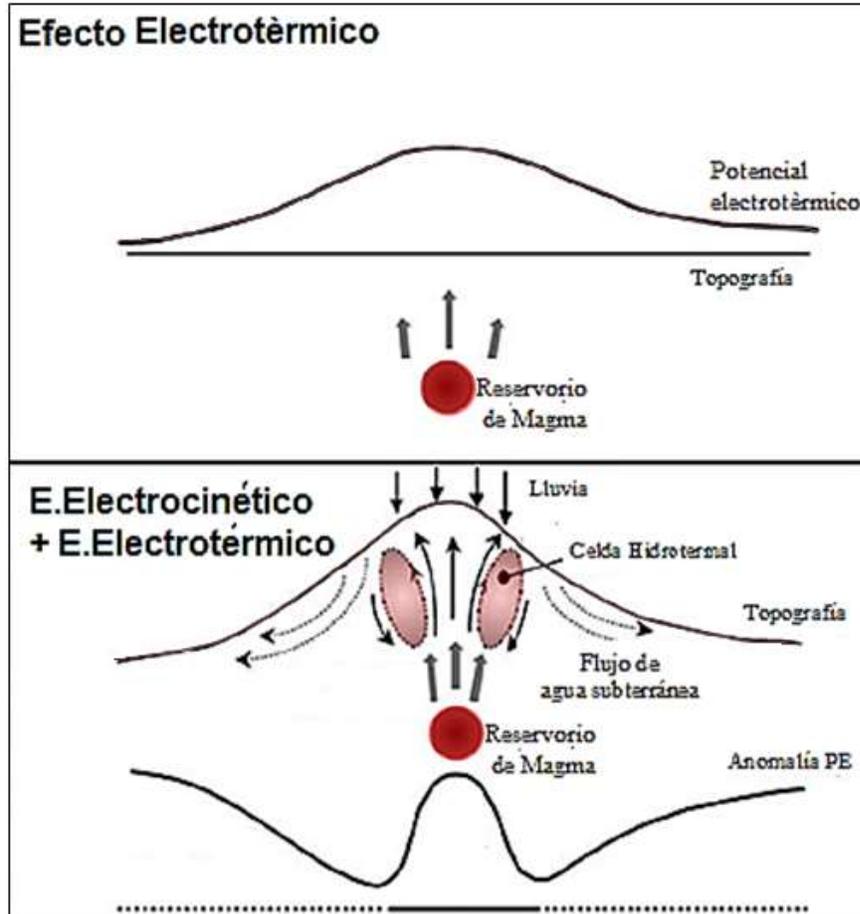


Figura 3.9: Esquema de las anomalías de Potencial espontaneo en áreas volcánicas. a) Efecto Termoeléctrico b) Efecto Electrocinético (modificado de Zlotnicki y Nishida, 2003).

3.6 MODELO DE GENERACIÓN DE PE EN UN ÁREA VOLCÁNICA

En un edificio volcánico, la estructura es siempre heterogénea. El edificio se compone de capas alternas de escoria más o menos permeable, lava altamente fracturada, brechas volcánicas, ceniza y capas alteradas. Las capas menos permeables consisten en flujos de lava con una baja densidad de fractura, así como capas extremadamente alteradas (Stimac et al., 2003).

Los fluidos hidrotermales se esparcen por todo el edificio a través de las capas más permeables y preferentemente a través de las fracturas, el flujo de calor de la cámara magmática poco profunda y la intrusión superficial, calientan los fluidos hidrotermales profundos, que hierven y se transforman parcialmente en una fase gaseosa.

Estos fluidos de ebullición (fluidos calientes) se mueven hacia la superficie a lo largo de las fracturas, debido a la dilatación del fluido por calor (Johnston et al., 2001). Durante la migración ascendente, los fluidos que hierven pierden energía por transferencia de calor al ambiente circundante, por ejemplo, fluidos hidrotermales más frescos y roca con menos temperatura (Chiodini et al., 2005, Merlani et al., 2001), ver **figura 3.10**.

Una parte del flujo ascendente se convertirá en vapor y será expulsado hacia la atmosfera, el resto dejará de elevarse, estabilizándose en un nivel, antes de descender nuevamente debido a la gravedad. Parte del flujo enfriado será nuevamente calentado a profundidad, formando de esta manera una célula convectiva hidrotermal.

Finalmente, las fuentes de corriente positivas serán generadas en las partes superficiales y las negativas en niveles profundos, formando el modelo de curva de PE que se esperaría en un volcán, tal como muestra la **figura 3.11**.

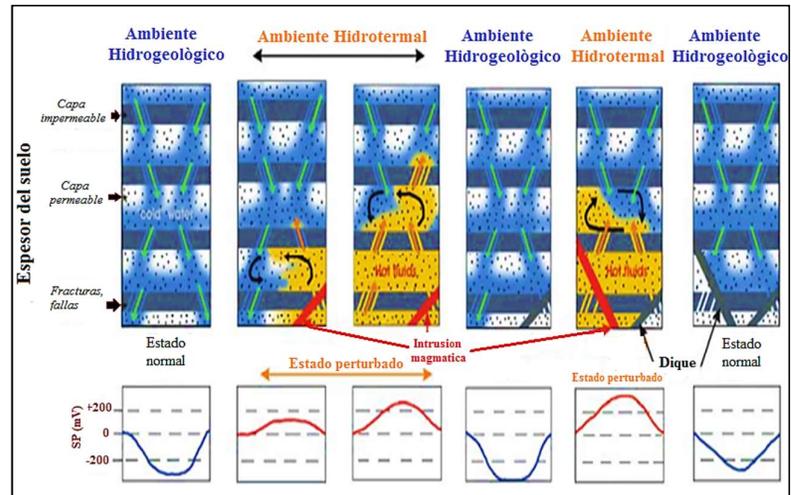


Figura 3.10: Generación de la señal de PE en la parte interna del volcán en un terreno heterogéneo, Mauri (2009).

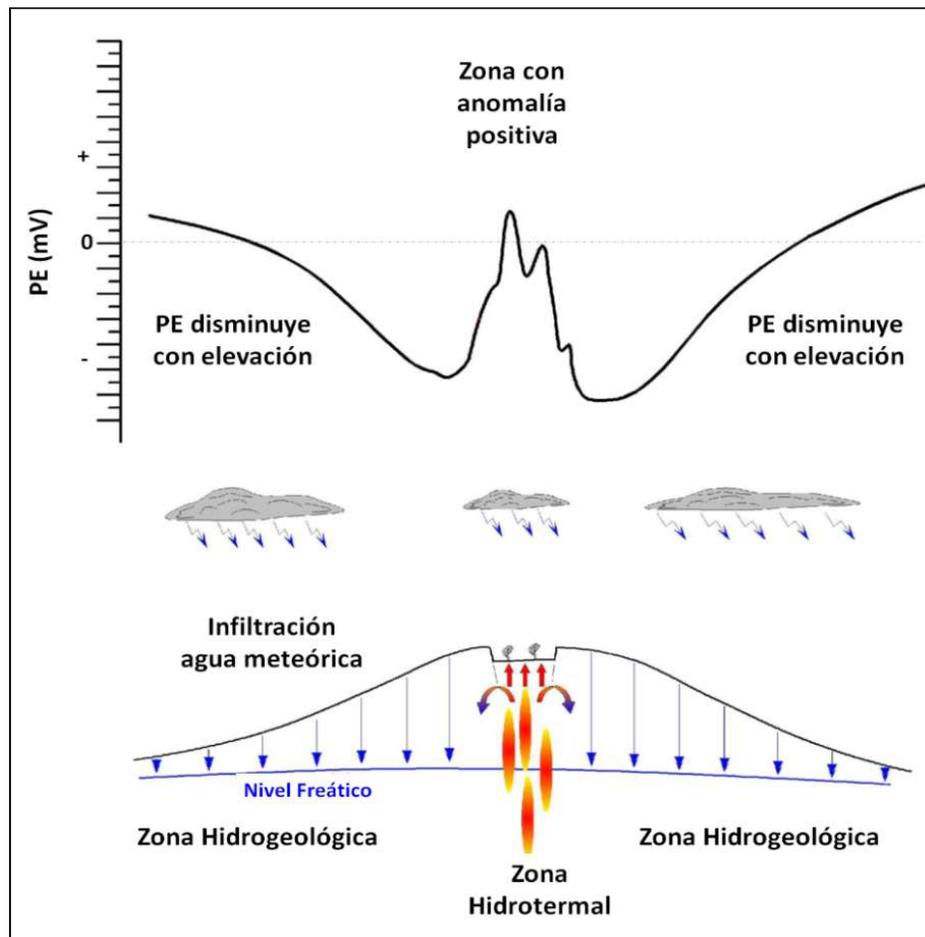


Figura 3.11: Modelo de generación de PE en un área volcánica. (modificado de Lénat, J, 2005).

CAPITULO IV

ADQUISICIÓN Y PROCESAMIENTO DE LOS DATOS

4.1 METODOLOGÍA

La metodología empleada para realizar las mediciones de PE en el CVAS y volcán Hualca-Hualca fue el siguiente:

- Revisión bibliográfica del método de PE y búsqueda de información relacionada con trabajos realizados en otros volcanes, donde se aplicaron el método de PE tanto en el Perú como en el extranjero.
- Movilización del equipo y personal a la zona de estudio, luego se realizó la elección del punto inicial o de partida, cuyo valor asignado es 0 mV (valor arbitrario), a partir de este punto se realizó la adquisición de los datos para los ocho perfiles radiales ubicados al Noreste de volcán Hualca-Hualca. También se realizaron 4 perfiles radiales en el volcán Sabancaya cubriendo desde la cumbre hasta las faldas del volcán, así mismo se realizaron perfiles periféricos en las partes bajas del volcán a fin de poder unir con los perfiles radiales, con la finalidad de ir formando circuitos cerrados.
- Con el objetivo de que todos estos valores estén relacionados a un punto común, se elige un **punto de referencia**, que se le denomina “**nivel cero o Punto de saturación**”. Para escoger este punto se debe considerar que sea en una zona saturada, la cual no presente variación de PE en el tiempo, además debe estar ubicado en una zona aislada de toda perturbación eléctrica natural o artificial.
- En el presente trabajo se ha tomado como punto de referencia o “**nivel cero**”, un punto ubicado al SSE de la parte baja del volcán Sabancaya, ver **figura 4.11**.

- La separación entre los electrodos de medida es relativamente pequeña (20 m), dicha distancia es utilizado para detectar anomalías de pequeña amplitud, cuyo origen es más superficial (por ejemplo: heterogeneidad del terreno, cambios litológicos, características estructurales, etc.).
- Después del trabajo de campo, se continúa con el trabajo de gabinete, en la cual se procesan los datos para su posterior interpretación, como se verá más adelante.

4.2 EQUIPO Y MATERIAL EMPLEADO

Una de las ventajas del potencial espontaneo es que es un método económico dada la sencillez de los equipos y materiales utilizados.

Los elementos necesarios para la medición del PE son:

- Sulfato de Cobre (CuSO_4).
- Electrodo Impolarizable conformado por un tubo de PVC en cuyo interior se encuentra un avarilla de cobre que sobre sale al exterior del tubo en la cual se conecta el cable conductor.
- Carrete para el cable conductor de 300 m de largo debidamente aislado.
- Multímetro de alta Impedancia. (Metrix MX20). Precisión: 0.1 mV.
- GPS Garmin (Modelo: GPSmap 62S) Precisión: 10 m.
- Libreta de notas.
- Accesorios: Radios trans-receptores portátiles (walkie-talkies), mapas topográficos, etc.

En la **figura 4.1** se muestra los equipos y materiales utilizados para la adquisición de los datos.



a)



b)



c)



d)



e)



f)

Figura 4.1: Equipo y Material empleado: a) Carrete, b) Sulfato de Cobre Pentahidratado (CuSO_4), c) Electrodo impolarizable, d) GPS 62S marca Garmin e) Multímetro y f) Libreta de notas.

4.3 ELABORACION DE UN ELECTRODO IMPOLARIZABLE

El electrodo impolarizable es de fácil elaboración. Los materiales que lo conforman son accesibles ya que fundamentalmente está conformado por un tubo de PVC de aproximadamente de 25 cm. En la base del tubo se coloca un tapón de madera porosa, a través del cual se asegura la continuidad del contacto entre el electrodo y el suelo y, por consiguiente, el intercambio iónico. Al interior del tubo va la solución de Sulfato de Cobre ($CuSO_4$) y en el medio de dicho tubo se coloca una varilla de cobre de aproximadamente de 20 cm. La varilla atraviesa un tapón de jebe, dejando una parte expuesta que nos permitirá conectar al cable conductor para la toma de datos. El tampón de jebe sirve para evitar el derrame de la solución (Figura 4.2).

Es importante subrayar que necesitamos comenzar la construcción del electrodo por lo menos dos días antes de efectuar las mediciones, pues necesitamos que la madera se encuentre totalmente saturada a la solución para optimizar el intercambio iónico (Daza, 2012).



Figura 4.2: Diseño y construcción de un electrodo Impolarizable.

4.4 TRABAJO DE CAMPO

La adquisición de los datos de PE en los volcanes Sabancaya y Hualca-Hualca comprende dos campañas correspondientes a los años 2014 y 2015.

- La primera campaña realizada del 30 de octubre al 10 de noviembre de 2014, en el cual se abarco la parte noreste del volcán Hualca-Hualca; correspondiente a 3693 puntos de medición equivalentes a 73.84 Km lineales.
- La segunda campaña realizada del 21 de Setiembre al 02 de octubre de 2015, la cual abarca las mediciones radiales y periféricas realizadas en el volcán Sabancaya, adquiriendo un total de 3143 puntos de medición equivalentes a 62.84 Km lineales,

Durante las campañas 2014 y 2015 se efectuaron cuatro perfiles radiales que parten de la cumbre y terminan en las faldas del volcán Sabancaya y ocho perfiles radiales en el volcán Hualca-Hualca; además de perfiles periféricos en las faldas de los volcanes Sabancaya y Hualca-Hualca a fin de unir con los perfiles radiales y elaborar circuitos cerrados.

Los datos fueron obtenidos cada 20 m y considerando el punto de referencia cada 300 m (Longitud del cable). En total se han obtenido 6836 puntos de medición equivalentes a un total de 136.68 Km lineales.



Figura 4.3: Personal del IGP realizando medidas de Potencial Espontaneo en los volcanes Sabancaya y Hualca-Hualca. (Cortesía: IGP-Sede Arequipa).

4.4.1 Método de medida empleado

Para este tipo de estudio, se empleó una combinación de los métodos más utilizados (método de base fija y método de gradientes), este arreglo es aplicado para facilitar la adquisición de los datos, ver **figura 4.4**.

La combinación de estos métodos consiste fundamentalmente en realizar las mediciones por bloques de 300 m (máxima longitud del cable), con intervalos entre los electrodos de 20 m, el intervalo entre los electrodos puede variar entre 10, 50 o

100 m dependiendo del detalle que se desea conseguir en la zona de estudio. Para este estudio se consideró 20 m. para tener una buena resolución del sistema hidrotermal y de las estructuras presentes en los volcanes.

Determinado el punto de inicio, las medidas de PE comienzan colocando el primer electrodo de referencia (M_0) al inicio del primer tramo o bloque, posteriormente se extiende el cable y se va realizando las medidas con el electrodo móvil cada 20 m, hasta alcanzar la máxima longitud del cable (300 m), efectuando de esta manera 15 mediciones por tramo ; terminado el primer tramo, el cable es rebobinado y se inicia el siguiente considerando que el último punto medido del primer tramo se convierte en el nuevo punto de referencia (M_1) y se procede de la misma manera de acuerdo a lo explicado en el tramo 1 (Figuras 4.4, 4.7 y 4.8).

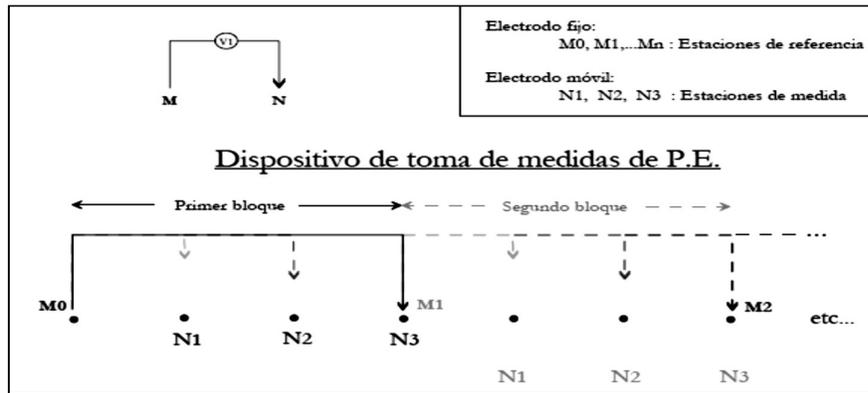


Figura 4.4: Dispositivo de medida empleado en la adquisición de los datos (Gonzales, K., 2001).

La figura 4.5 muestra el esquema de avance en la medición de los datos de PE en el campo, partiendo del electrodo de referencia y avanzando de 20 en 20 m con el electrodo móvil hasta alcanzar la longitud máxima (300 m).

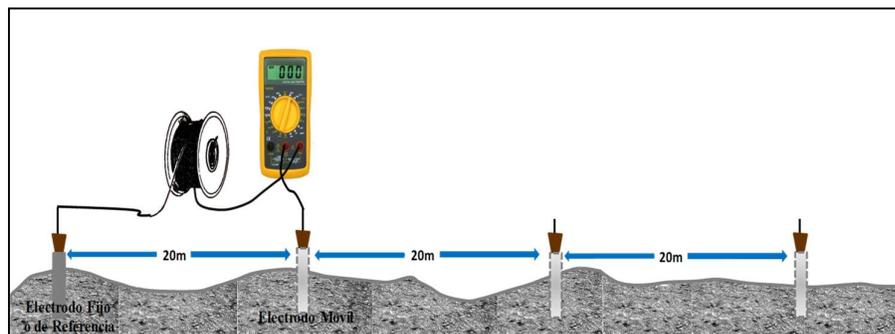


Figura 4.5: Esquema de medición de Potencial Espontáneo.

4.5 TRABAJO DE GABINETE

El trabajo de gabinete consistió en el procesamiento (corrección de los datos) e interpretación de los datos, para finalmente presentar resultados y posterior redacción de la presente tesis.

4.5.1 Software empleado

Para el procesamiento de las líneas de potencial espontáneo se utilizaron varios softwares entre ellos: **Grapher 10**, **Surfer 13.0**, **Arcgiss 10**, **Global Mapper 15** (**Figura 4.6**) los cuales, ayudan a ubicar y plotear los puntos medidos en un Modelo Digital de Elevación (DEM), para su posterior análisis e interpretación.



Figura 4.6: Software usados para el procesamiento de los datos.

4.5.2 Reducción de los datos de PE

Los datos de PE obtenidos en campo, también llamados, PE_Campo (valor medido en Milivoltios), simplemente nos reflejan el valor del Potencial medido en tramos o bloques y que, a su vez, cada bloque está en relación al electrodo Fijo del tramo medido, tal como se puede apreciar en la **figura 4.7**.

Para este estudio se usó un cable de 300 m de longitud y la separación entre cada punto fue de 20 m, dicha separación entre electrodos nos permite tener buena resolución y además esta distancia fue adaptada para poder localizar los límites estructurales.

Con el fin de obtener los valores reales de potencial en cada punto de medida, se procede a unir todos los tramos o bloques, realizando una suma algebraica de los valores observados en el multímetro para cada punto, obteniendo de esta manera los valores reales de PE para todos los puntos medidos que quedan referidas a un punto inicial cuyo valor es 0 mV (**figura 4.7**). Líneas abajo se explicará a detalle cada una de estas correcciones.

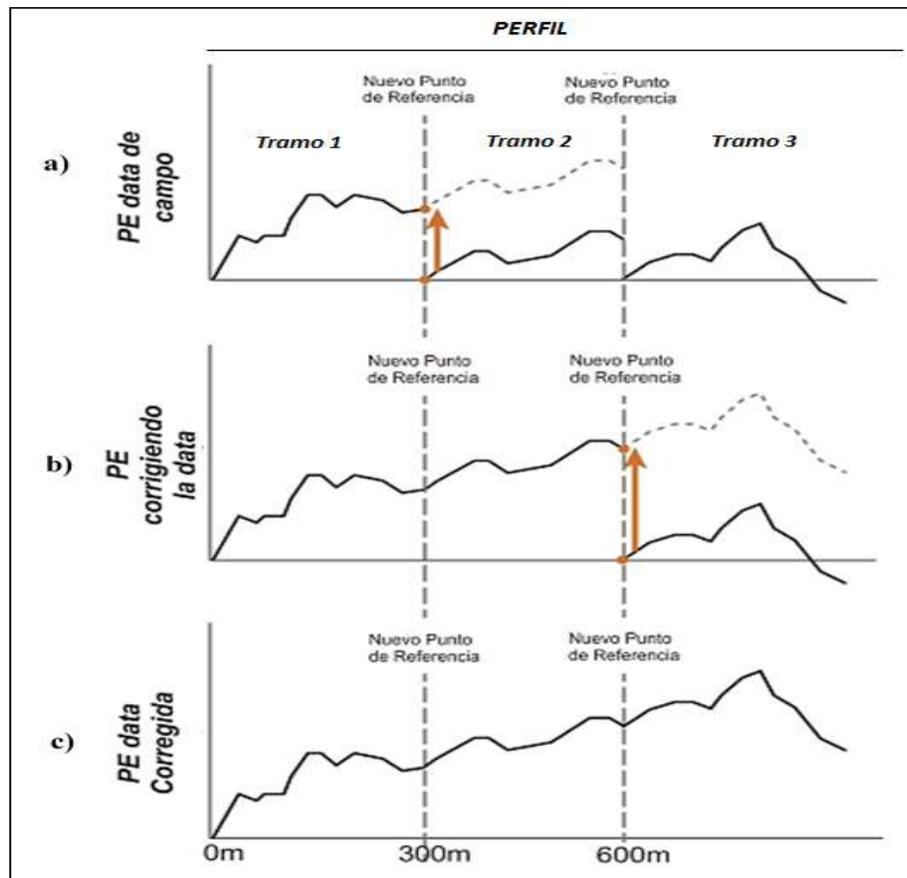


Figura 4.7: a y b) Corrección de los datos de Potencial Espontáneo, el color naranja representa el desplazamiento tramo por tramo **c)** Data Final corregida (Modificado de Barde Cabusson y Finizola, 2013).

En la adquisición de los datos de PE, se pueden realizar mediciones para diferentes formas (lineal, rectangular, circular, amorfas, etc.), como se puede observar en la **figura 4.8**, la corrección de los datos para cada caso será similar al descrito anteriormente.

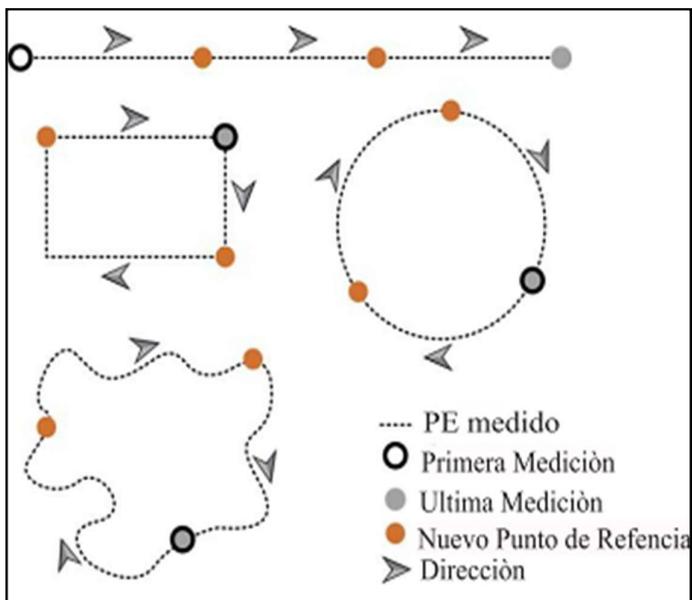


Figura 4.8: Vista en planta de las Mediciones realizadas para diferentes casos (Modificado de Barde Cabusson y Finizola, 2012).

Se presentan dos maneras de corregir los datos de potencial espontáneo, los cuales son:

a) **Sentido Normal:** Es la que normalmente se conoce y en el cual se parte de un punto inicial conocido y se desea continuar con la medición hacia un punto no conocido, en este caso se aplica una corrección en **Sentido Normal**. En la **figura 4.9** se indica que la adquisición de los datos inicia en el punto A_0 , considerando a este Punto de Referencia (PR) con un valor de 0 mV y el procesamiento también se realiza en la misma dirección del perfil.

En la tabla 4.1, se muestra un ejemplo de dos tramos de un perfil y se indica cómo se realiza la suma algebraica (corrección) para cada tramo en sentido normal. Todas las correcciones se realizan al PE_Campo. Para el primer tramo se realiza la suma de todos los puntos con respecto al primer punto de medida ($A_0=0$), que a su vez es el Punto de Referencia ($PR=A_0$). Para el segundo tramo, el último valor del primer tramo ($A_{15}=40$) se convierte en el PR del segundo Tramo, y al mismo tiempo viene hacer la primera medida del segundo tramo ($PR=B_0=40$). Seguidamente se vuelve a sumar algebraicamente todos los puntos del segundo tramo con respecto al primer punto de medida del segundo tramo (B_0+B_1) y así sucesivamente para cada tramo de un mismo perfil.

b) Sentido Inverso: Cuando el valor del punto inicial no es conocido y se avanza hacia un punto conocido, en este caso se le aplica la corrección en **Sentido Inverso**. En la **figura 4.10** se indica que la adquisición de los datos inicia en el punto A_0 , y se avanza en tramos igual que en el primer caso, para el procesamiento se procede en sentido inverso tomando como Punto de Referencia uno de los valores del perfil conocido que en el ejemplo de la **figura 4.10** es $PR = -177 \text{ mV}$.

La tabla 4.2 muestra un ejemplo de dos tramos de un perfil y se indica cómo se realiza la suma algebraica (corrección) para cada tramo en sentido inverso. Primero, se toma el punto del perfil conocido y corregido, que en este caso es $PR = -177 \text{ mV}$. El valor que obtendrá el último punto del perfil a corregir se obtendrá restando el valor del PR menos el valor del PE_Campo B_{15} , más el mismo valor de B_{15} , denotado en la formula siguiente $(PR - B_{15}) + B_{15}$, la diferencia que se encuentra entre paréntesis se mantiene constante para todo el tramo del perfil, variando únicamente el valor fuera del paréntesis para cada punto del tramo medido, como se muestra en la tabla 4.2.

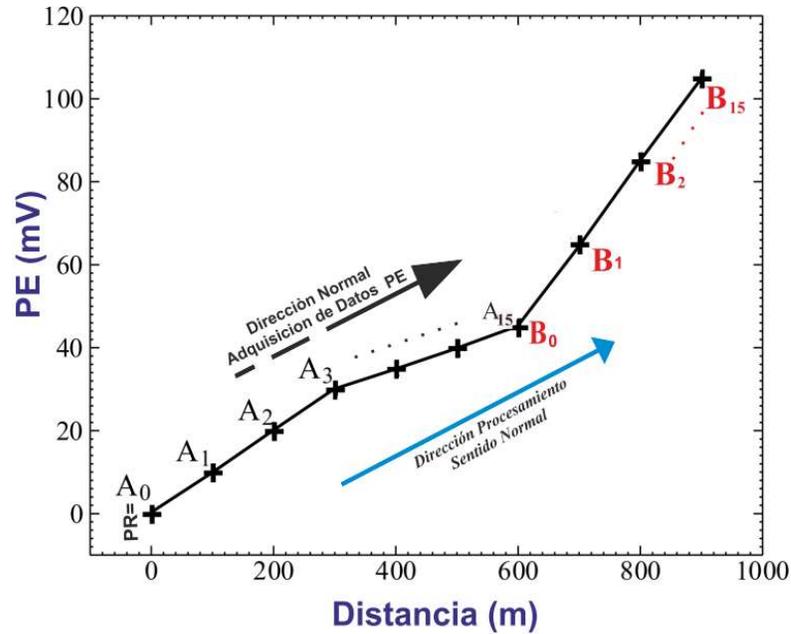


Figura 4.9: Adquisición de datos de Potencial Espontáneo y la dirección de Procesamiento en “Sentido Normal (Modificado de Ramos D., 2000).

Corrección de los Datos en Sentido Normal					
Estación	Distancia (m).	PE_Campo (mV)	Operación Algebraica	PE (mV) Valor Final	Sentido (Normal)
PR=A ₀	0	0	0	0	Valor Conocido
A ₁	20	-5.7	= SES5+(D5)	-5.7	
A ₂	40	-38	= SES5+(D6)	-38	
A ₃	60	28.2	⋮	28.2	
A ₄	80	12	⋮	12	
A ₅	100	48.6	⋮	48.6	
A ₆	120	25.8	⋮	25.8	
A ₇	140	-38	⋮	-38	
A ₈	160	-76	⋮	-76	
A ₉	180	35.5	⋮	35.5	
A ₁₀	200	-35.5	⋮	-35.5	
A ₁₁	220	29.7	⋮	29.7	
A ₁₂	240	39.9	⋮	39.9	
A ₁₃	260	43.5	⋮	43.5	
A ₁₄	280	-12	∇	-12	
A ₁₅	300	40	= SES5+(D19)	40	
				40	
PR=B ₀	0	0	40+(0)	40	Valor no Conocido
B ₁	20	-10	= SES20+(D22)	30	
B ₂	40	26.3	= SES20+(D23)	66.3	
B ₃	60	-69	⋮	-29	
B ₄	80	49	⋮	89	
B ₅	100	15.5	⋮	55.5	
B ₆	120	-23	⋮	17	
B ₇	140	79.7	⋮	119.7	
B ₈	160	-151.8	⋮	-111.8	
B ₉	180	-66	⋮	-26	
B ₁₀	200	31.5	⋮	71.5	
B ₁₁	220	42	⋮	82	
B ₁₂	240	13.6	⋮	53.6	
B ₁₃	260	37	⋮	77	
B ₁₄	280	88.6	∇	128.6	
B ₁₅	300	-217	= SES20+(D36)	-177	
				-177	

Tabla 4.1: Método Para corregir los datos de PE en sentido Normal.

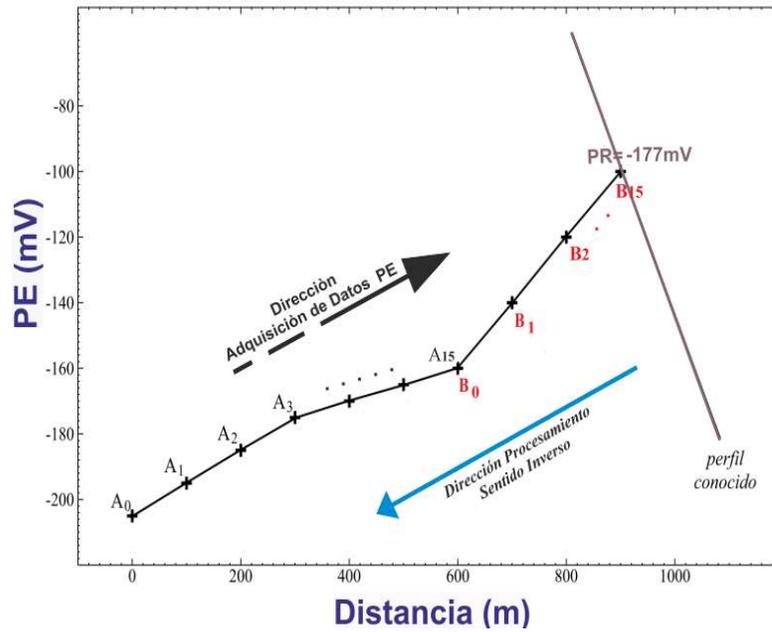


Figura 4.10: Adquisición de datos de Potencial Espontaneo y la dirección de Procesamiento en “Sentido Inverso”, (Modificado de Ramos D., 2000).

Corrección de los Datos en Sentido Inverso					
Estación	Distancia (m)	PE_Campo (mV)	Operación Algebraica	PE (mV) Valor Final	Sentido (Normal)
A ₀	0	0	0	0	Valor no Conocido
A ₁	20	-5.7	↑	-5.7	
A ₂	40	-38	↓	-38	
A ₃	60	28.2	↓	28.2	
A ₄	80	12	↓	12	
A ₅	100	48.6	↓	48.6	
A ₆	120	25.8	↓	25.8	
A ₇	140	-38	↓	-38	
A ₈	160	-76	↓	-76	
A ₉	180	35.5	↓	35.5	
A ₁₀	200	-35.5	↓	-35.5	
A ₁₁	220	29.7	↓	29.7	
A ₁₂	240	39.9	↓	39.9	
A ₁₃	260	43.5	↓	43.5	
A ₁₄	280	-12	= (M21-K20)+K19	-12	
A ₁₅	300	40	= (M21-K20)+K20	40	
PR				40	
B ₀	0	0	= (SMS38-SKS37)+K22	40	Valor Conocido
B ₁	20	-10	↑	30	
B ₂	40	26.3	↓	66.3	
B ₃	60	-69	↓	-29	
B ₄	80	49	↓	89	
B ₅	100	15.5	↓	55.5	
B ₆	120	-23	↓	17	
B ₇	140	79.7	↓	119.7	
B ₈	160	-151.8	↓	-111.8	
B ₉	180	-66	↓	-26	
B ₁₀	200	31.5	↓	71.5	
B ₁₁	220	42	↓	82	
B ₁₂	240	13.6	↓	53.6	
B ₁₃	260	37	↓	77	
B ₁₄	280	88.6	= (SMS38-SKS37)+K36	128.6	
B ₁₅	300	-217	= (SMS38-SKS37)+K37	-177	
PR				-177	

Tabla 4.2: Método Para corregir los datos de PE en Sentido Inverso.

Estas correcciones se realizan fundamentalmente debido a que los datos son adquiridos en varios perfiles (cada perfil consta de varios tramos) y campañas (2014 y 2015) como es nuestro caso. El sentido de las mediciones debe de ser tomado en cuenta al momento de realizar las correcciones respectivas para obtener el valor verdadero del potencial espontaneo en cada punto.

En áreas volcánicas la adquisición de los datos se realiza mediante circuitos cerrados (**Figura 4.8**), con la finalidad de tener un control en la calidad de los datos de PE. Teóricamente la suma total de potenciales de este circuito debería de ser cero, pero en la práctica no ocurre esto, por lo que se obtiene una diferencia de ΔV entre el primer y último valor medido en el mismo punto, este valor es también conocido como "error de cierre" u "offset", que debe ser repartido entre todas las estaciones que corresponda al circuito (repartición de error), obteniendo finalmente una suma nula.

En el procesamiento de nuestros datos todavía no se ha realizado la corrección de cierre por que aún no culmina el proyecto.

La elección del **nivel cero** debe ser una zona que no presente variación de PE en el tiempo y todos los datos de PE (todos los perfiles del proyecto) tomaran como referencia a este punto. Para nuestros datos se escogió un punto en un bofedal, ubicado al SSE de las faldas del volcán Sabancaya. En la **figura 4.11** se observa el punto de referencia de color verde.

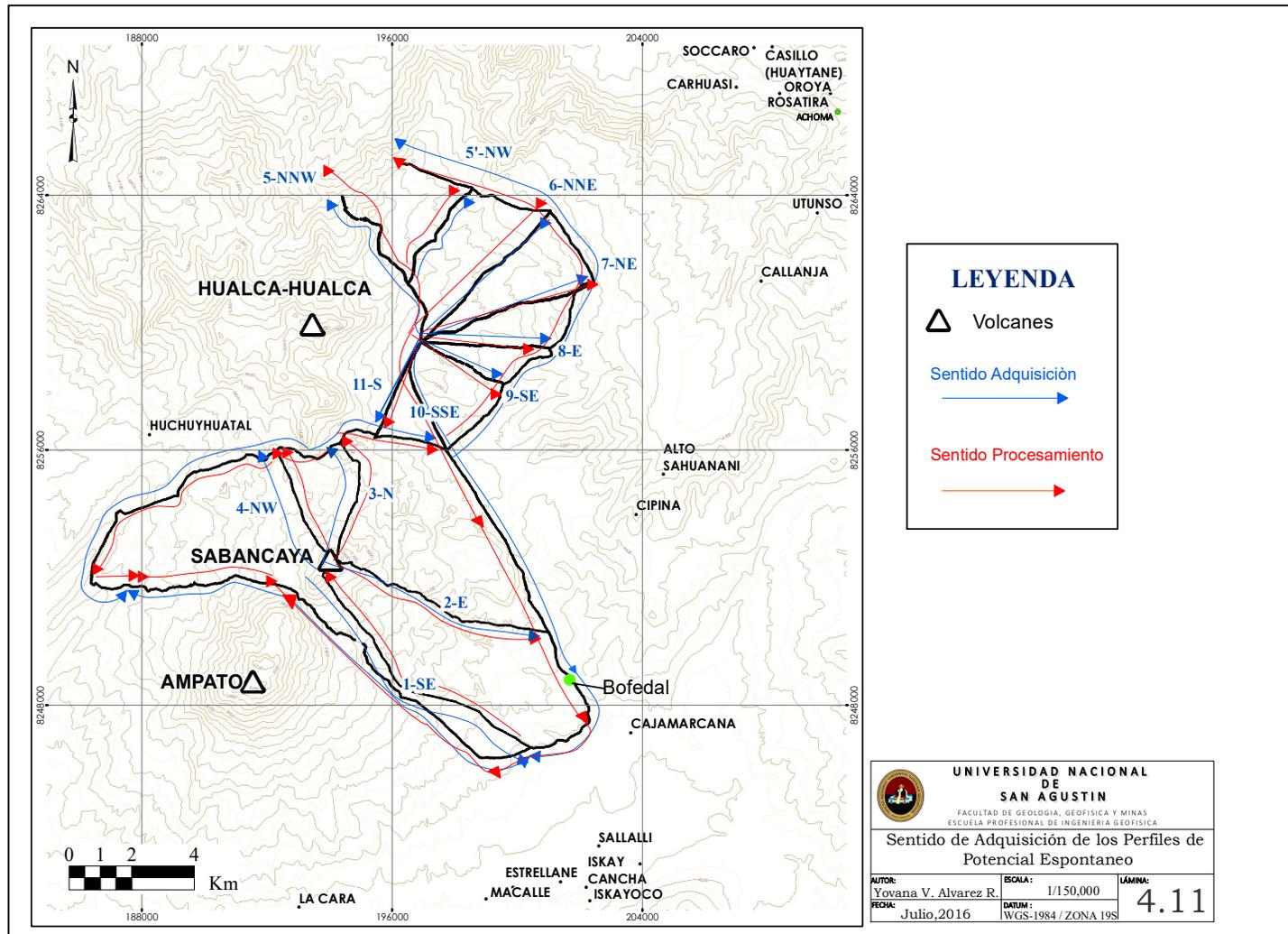


Figura 4.11: Se muestra el sentido de adquisición y procesamiento de los datos; además del punto de nivel cero en color verde, ubicado al Nor-Noroeste de Cajamarca

CAPITULO V

RESULTADOS

A continuación, se presentan los resultados de las líneas de PE obtenidos para el volcán Sabancaya y volcán Hualca-Hualca, también se presentan el mapa de anomalías y los perfiles obtenidos, finalmente se presenta un cuadro a manera de resumen de los horizontes Geoeléctricos hallados.

5.1 UBICACIÓN DE LAS MEDIDAS

Las medidas de PE realizadas en el CVAS y volcán Hualca-Hualca se dividen de la siguiente manera:

- A) Perfiles radiales:** En el Sabancaya se realizaron 4 perfiles radiales, distribuidos de manera equidistante que van desde el borde de la caldera hasta la base del cono. Dichos perfiles están conformados por 1325 puntos de PE, medidos cada 20 m lo cual representa 26,48 Km lineales (**Figura 5.1**). Al este del volcán Hualca-Hualca se realizaron 8 perfiles radiales que parten de un mismo punto; dichos perfiles cuentan con un total de 2572 puntos de medición, con intervalos de 20 m que representa 51,42 Km lineales (**Figura 5.1**).

- B) Perfiles periféricos:** Se realizaron 2939 puntos de medición que bordean las partes bajas de los volcanes Sabancaya y Hualca-Hualca, lo cual representa 58.76 Km lineales, medidos cada 20 m. (**Figura 5.1**).

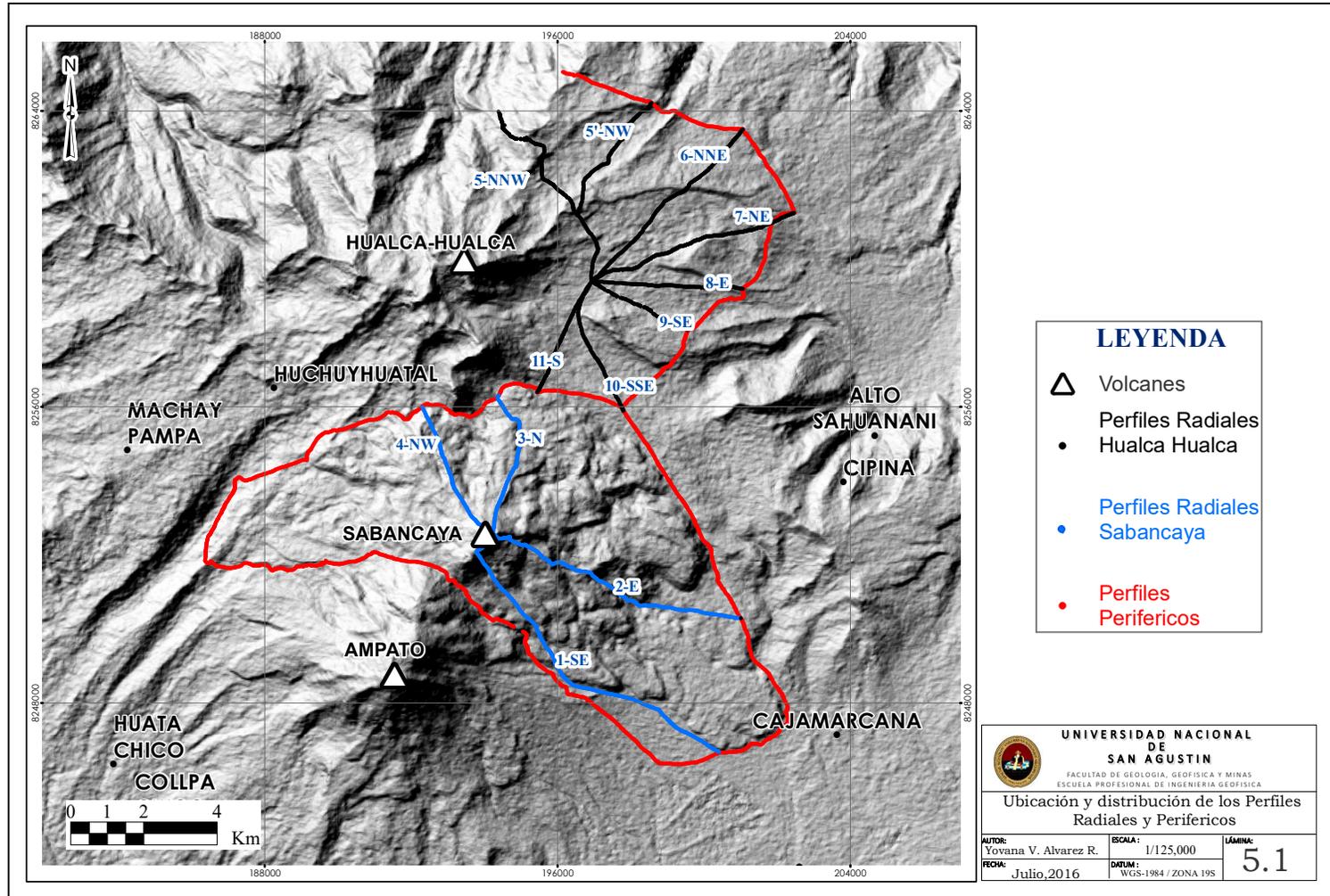


Figura 5.1: Mapa del CVAS y volcán Hualca-Hualca con la ubicación de medidas de potencial espontaneo (PE). Color rojo (Perfiles Periféricos), Color azul (Perfiles Radiales Sabancaya) y color negro (Perfiles Radiales Hualca-Hualca).

5.2 PERFILES RADIALES EN LOS VOLCANES SABANCAYA Y HUALCA-HUALCA

Los resultados de los 4 perfiles radiales (1-SSE, 2-E, 3-N y 4-NW), distribuidos en el volcán Sabancaya y los 8 perfiles radiales (5, 5', 6, 7, 8, 9, 10, 11), distribuidos al este del volcán Hualca-Hualca, se presentan en perfiles de valores de PE en función de la altitud, ver **figuras 5.2 y 5.3**.

En la **figura 5.2** muestra los 4 perfiles radiales en función de la altitud para el volcán Sabancaya, en la cual se distingue los valores de una anomalía negativa que se presenta en todos los perfiles, cuyo valor varía entre -646 mV (perfil 4-NW) y -1270 mV (perfil 3-N). La ubicación del valor mínimo de esta anomalía se encuentra entre los 4800 y 5500 msnm.

De acuerdo a la **figura 5.2** el mínimo valor de la anomalía negativa se encuentra en el perfil 3-N (-1270 mV), sobre los 5500 msnm. Asu vez se puede observar que la forma de estos perfiles se asemeja a una " V " (Finizola, A.2001), para el caso del volcán Sabancaya esta forma no es apreciada como tal, debido a que, a lo largo de los perfiles se aprecian valores de PE dispersos (Perfil 1-SSE, 2-E, 3-N), que distorsionan esa forma; en el caso del perfil 4-NW la forma de " V " se va atenuando a lo largo del perfil. También se presenta una anomalía positiva que se observa en los 4 perfiles radiales cuyo valor va desde los 180.1 mV (perfil 1-SSE) y -425 mV (perfil 4-NV), encontrándose entre los 4600 y 5400 msnm de altitud.

En la **figura 5.3** se muestra los 8 perfiles radiales en función de la altitud en el volcán Hualca-Hualca, en la cual se distingue los valores de una anomalía negativa que se presenta en todos los perfiles, cuyo valor varía entre -2221 mV (perfil 5') y -445 mV (perfil 10), en los perfiles 6, 7, 8 y 9 se puede observar claramente la forma cóncava de esta anomalía ; mientras que, para los perfiles 10 y 11 no hay una forma bien definida y presentan picos negativos con valores de -445 y -479 mV entre los 5000 y 5100 msnm.

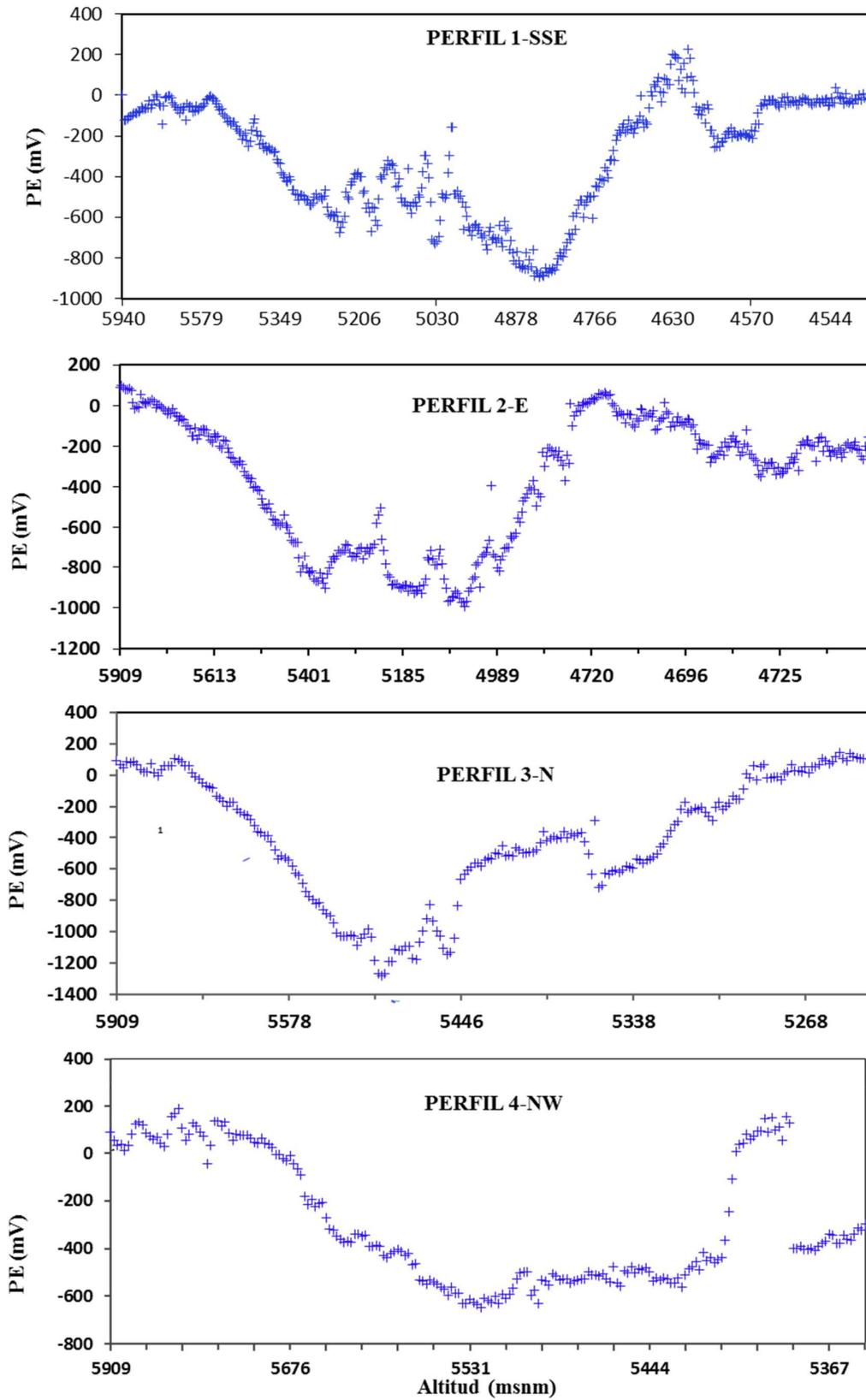
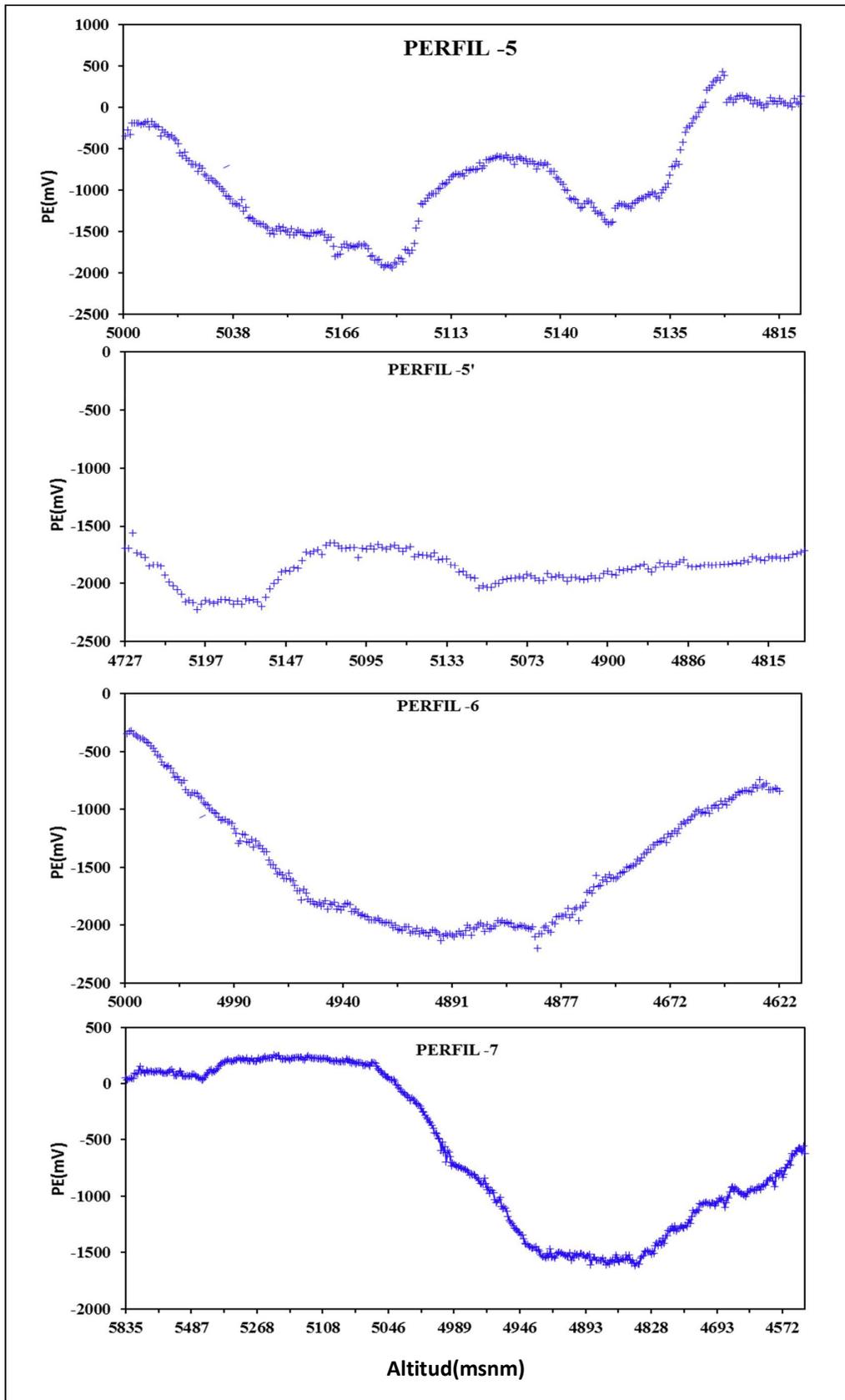


Figura 5.2: Perfiles radiales de potencial espontaneo en función de la altura realizados en el volcán Sabancaya.



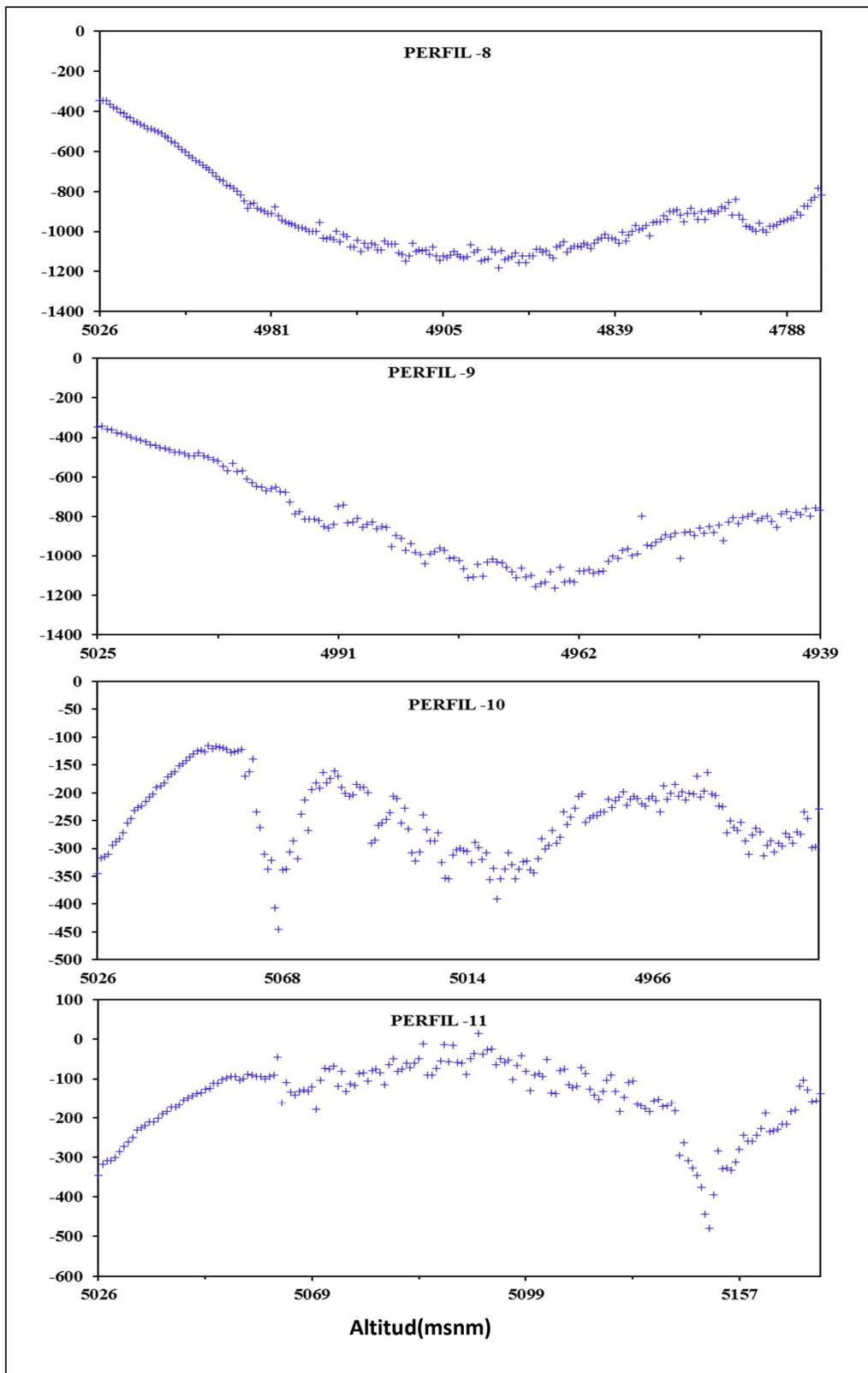


Figura 5.3: Perfiles radiales de Potencial espontaneo en función de la altura realizados en el volcán Hualca-Hualca.

5.3 CARACTERISTICAS DE LOS PERFILES RADIALES – VOLCÁN SABANCAYA

En zonas volcánicas las anomalías de PE son producidas fundamentalmente por el fenómeno electrocinético, conocido también como de electrofiltración producida por el movimiento de fluidos al interior de la roca, el desplazamiento de estos fluidos depende de la litología de los materiales a través del cual circulan. Dado que un volcán está formado por materiales de distintas propiedades litológicas, cada una de estas variaciones litológicas definen diferentes estructuras geoelectricas al interior del edificio volcánico. A continuación, se presentan los perfiles encontrados para el volcán Sabancaya, con sus respectivas formaciones geoelectricas:

El **Perfil N°1**: Ubicado al Sur-Este, conformado por 476 puntos y separados cada 20 m, con una longitud de 9.5 Km. El inicio en la parte izquierda del perfil corresponde al cráter del volcán y se puede apreciar la zona asociada al sistema Hidrotermal donde el valor más alto del Potencial es 3.8 mV sobre los 5843 msnm, formado por material rocoso; a continuación se encuentra la zona de transición la (TZ) que es el límite entre la zona Hidrogeológica y la Hidrotermal, este límite se encuentra entre los 4800 a 5300 msnm, en esta zona los datos de PE se encuentran muy dispersos, presentando un valor máximo de -157.4 mV sobre los 4999 msnm y un mínimo -893.8mV sobre los 4829 msnm. La base del volcán corresponde a la zona hidrogeológica (HZ) con un valor mínimo de Potencial de -805,6 mV a una altitud de 4512 msnm. Se resalta una zona conductiva (CZ) con un valor máximo de 227,4 mV a una altitud de 4614 msnm (**Figura 5.4**).

El **Perfil N°2**: Ubicado al Este, conformado por 399 puntos separados cada 20 m que hacen un total de 7.96 Km. La parte izquierda del inicio del perfil corresponde al cráter del volcán y se puede apreciar la zona asociada al sistema hidrotermal, donde el valor más alto del Potencial es 90 mV sobre los 5909 msnm. A continuación, se encuentra la zona de transición la (TZ) que es el límite entre la zona hidrogeológica y la hidrotermal, que se ubica entre los 4900 a 5300 msnm; en esta zona al igual que en el perfil 1 los datos de PE se encuentran muy dispersos, presentando un valor mínimo de -993 mV y máximo de -505 mV, la base del volcán corresponde a la zona hidrogeológica (HZ) con un valor mínimo de Potencial de -816,8 mV a una altitud de 4976 msnm. Se resalta una zona conductiva (CZ) con un valor máximo de 63 mV a una altitud de 4699 msnm. (**Figura 5.5**).

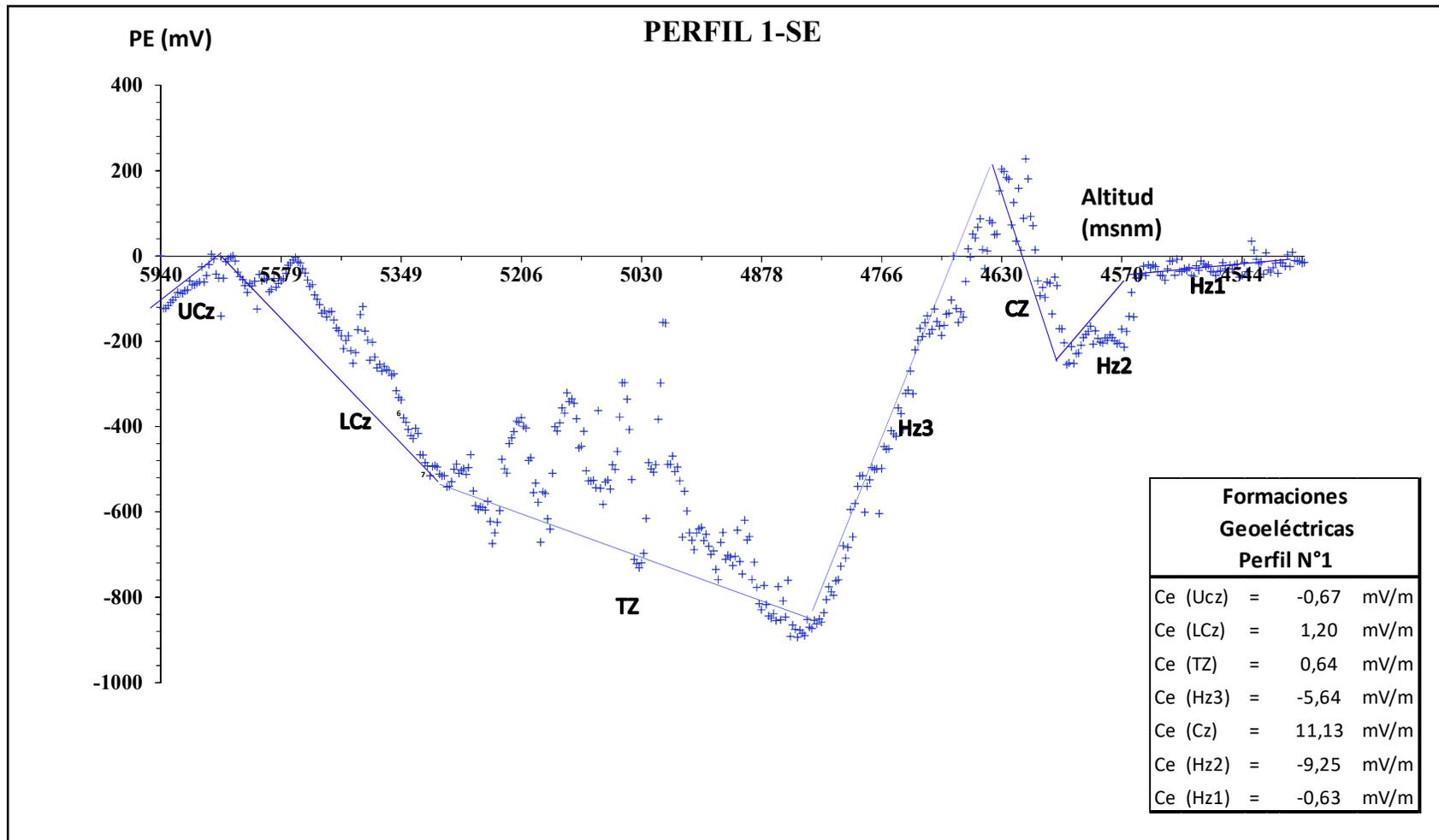


Figura 5.4: Perfil de Potencial Espontaneo 1-SE.

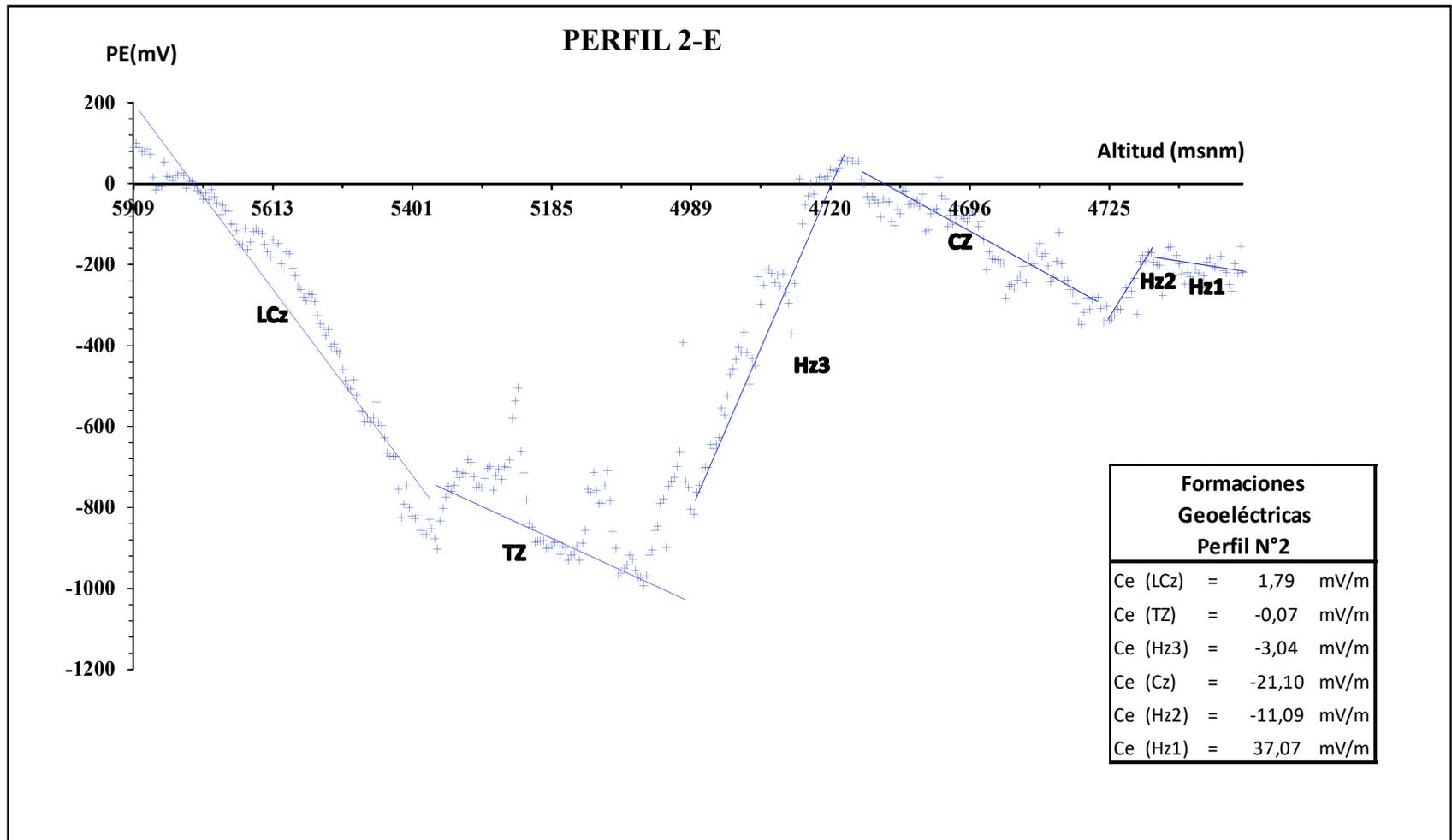


Figura 5.5: Perfil de Potencial Espontaneo 2-E

El **Perfil N°3**: Ubicado al Norte, conformado por 220 puntos separados cada 20 m que hacen un total de 4.38 Km. En la parte izquierda del perfil, se inicia desde el cráter del volcán y se puede apreciar la zona asociada al sistema Hidrotermal donde el valor máximo del Potencial es 103 mV sobre los 5825 msnm. Seguidamente se encuentra la zona de transición la (TZ) que es el límite entre la zona Hidrogeológica e Hidrotermal y se encuentra a una altura de alrededor de los 5400 a 5500 msnm, en esta zona al igual que en los perfiles anteriores los datos de PE se encuentran muy dispersos presentando un valor mínimo de -1280 mV y máximo de -827 mV. La base del volcán correspondiente a la zona hidrogeológica (HZ) cuyo valor mínimo de Potencial -719 mV a una altitud de 5368 msnm. Del mismo modo que en los perfiles 1 y 2, también en el perfil 3 se observa la zona conductiva (CZ) con un valor máximo de -369 mV a una altitud de 5388 msnm. **(Figura 5.6).**

El **Perfil N°4**: Ubicado al Noroeste, conformado por 211 puntos separados cada 20 m que hacen un total de 4.2 Km. La parte izquierda del perfil corresponde al cráter del volcán y se puede apreciar la zona asociada al sistema Hidrotermal donde el valor más alto del Potencial es 190 mV sobre los 5899 msnm. A continuación, se encuentra la zona de transición la (TZ) que es el límite entre la zona Hidrogeológica e Hidrotermal y se encuentra localizado entre los 5400 a 5500 msnm, en esta zona también los datos de PE se encuentran muy dispersos presentando un valor mínimo de -631 mV y máximo de -498 mV. La base del volcán corresponde a la zona hidrogeológica (HZ) cuyo valor de Potencial mínimo es -408 mV a una altitud de 5410 msnm. Nuevamente se observa la zona conductiva (CZ) con un valor máximo de 125 mV a una altitud de 5438 msnm. **(Figura 5.7).**

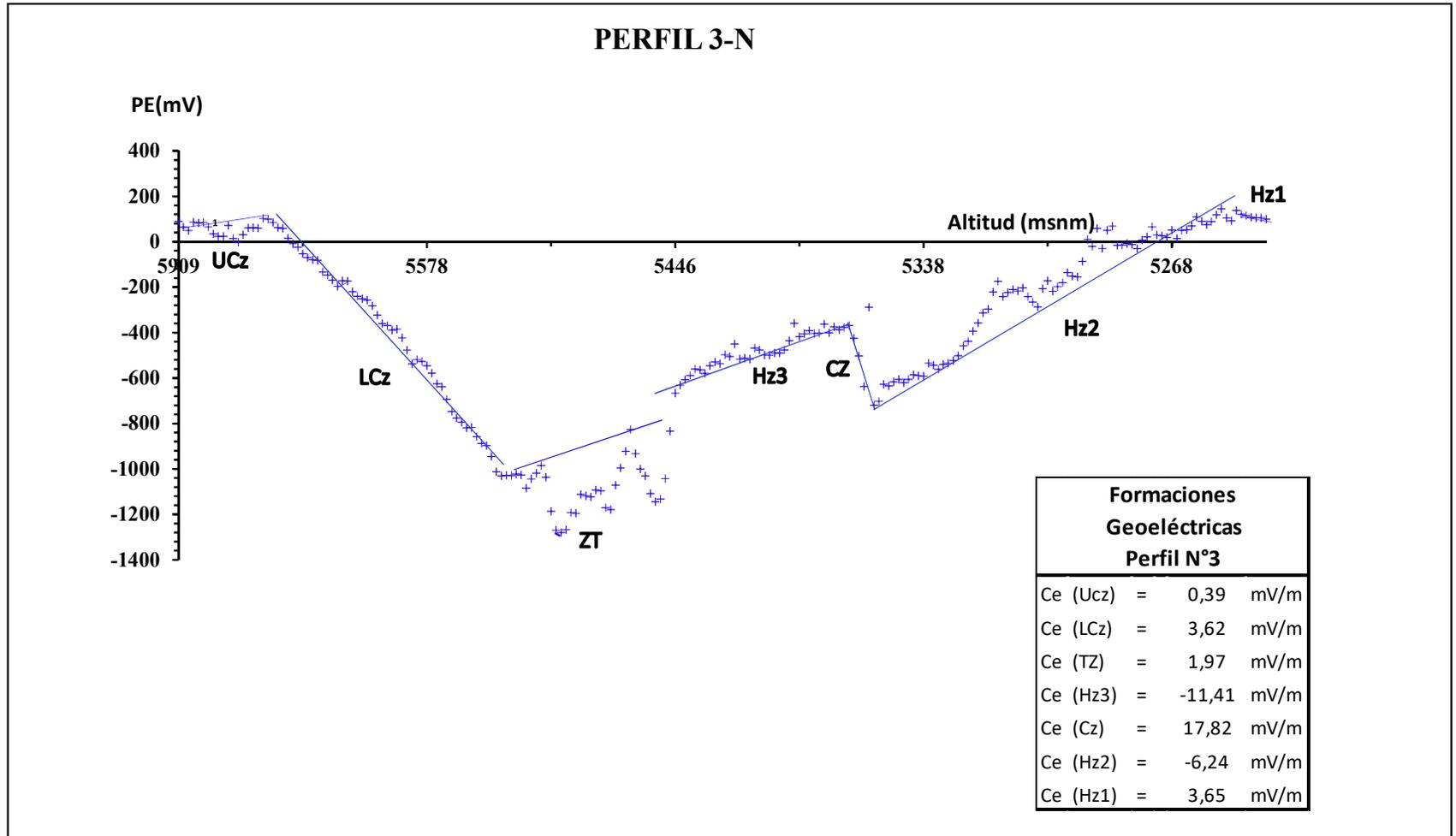


Figura 5.6: Perfil de Potencial Espontaneo Perfil 3-N.

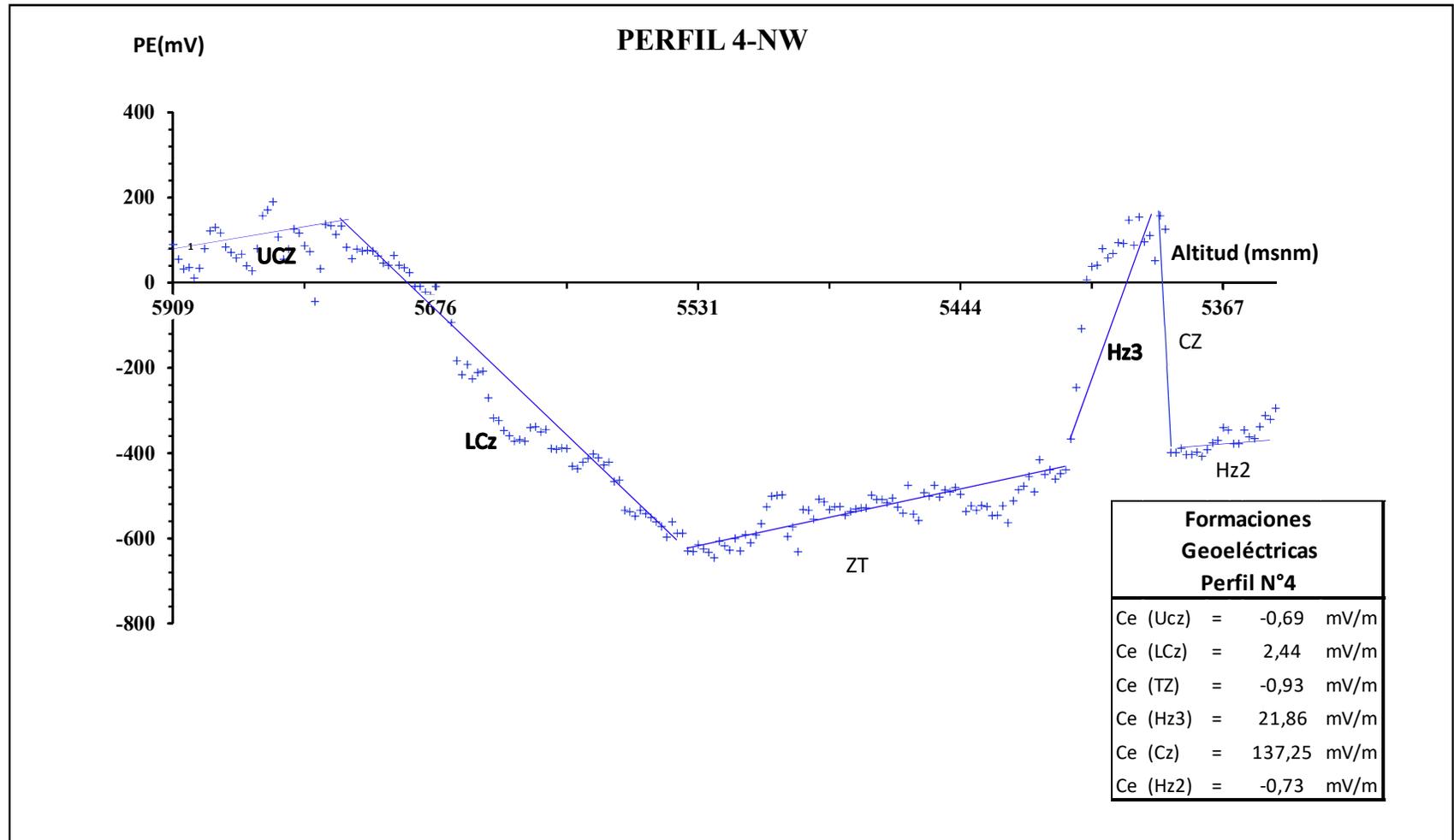


Figura 5.7: Perfil de Potencial Espontaneo Perfil 4-NW

5.4 FORMACIONES GEOELÉCTRICAS – SECTOR VOLCÁN SABANCAYA

Para identificar las formaciones geoelectricas presentes en el volcán Sabancaya en primer lugar se tiene que hacer un cálculo matemático, que consiste en hallar los “Coeficientes de Determinación R^2 ” y posteriormente calcular los coeficientes de electrofiltración (C_e).

El cálculo del coeficiente R^2 es una ecuación lineal, el cual permite calcular el grado de alineación de los puntos que conforman la ecuación, la correlación varía entre 0 y 1. Mientras el valor calculado se aproxime a 1, significa que la proporción de correlación entre el valor del PE en función de la altura es óptima. La **Tabla 5.1** muestra los valores de los cálculos realizados

El $C_e = \Delta V / \Delta h$ o gradiente, es el coeficiente de electrofiltración. El C_e corresponde a la variación del potencial (ΔV) respecto a la variación de la altura (Δh), (Jackson & Kauahikaua, 1988, Aubert et al., 1990).

La variación del potencial (ΔV) y variación de la altura (Δh) corresponde al segmento de los puntos asignados para el cálculo del coeficiente de determinación R^2 .

Gracias al C_e se puede caracterizar las zonas litológicas presentes en el edificio volcánico ya que el PE de electrofiltración depende de la porosidad y permeabilidad de las rocas, así como la composición y temperatura de los fluidos presentes.

En la **Tabla 5.1** Se muestra los valores del coeficiente de electrofiltración o gradientes de potencial calculados para las diferentes zonas.

Dentro de la zona hidrogeológica, de transición e hidrotermal se distinguen sub zonas u Horizontes Geoelectricos (**ver Tabla 5.1**), estos son:

- a) Zona Hidrogeológica (Hz): En la que se distinguen 3 Horizontes Geoelectricos (Hz1, Hz2, Hz3) y un horizonte definido como Zona conductiva (Cz).
- b) Zona de Transición (TZ): Presente en los 4 Perfiles.
- c) Zona Hidrotermal (Lcz, Ucz): Zona de baja convección (Lcz), zona altamente convectiva (Ucz).

Horizontes Geoelectricos		Perfil N°1		Perfil N°2		Perfil N°3		Perfil N°4	
	Hz.	Ce (mV/m)	R ²						
Zona Hidrotermal	Ucz	-0,67	0,53	-	-	0,39	0,12	-0,69	0,01
	LCz	1,2	0,77	1,79	0,84	3,62	0,9	2,44	0,91
Zona de Transición	TZ	0,64	0,39	-0,07	0,02	1,97	0,01	-0,93	0,64
Zona Hidrogeológica	Hz3	-5,64	0,96	-3,04	0,95	-11,41	0,27	21,86	0,26
	Cz	11,13	0,79	-21,1	0,56	17,82	0,2	137,25	0,91
	Hz2	-9,25	0,45	-11,09	0,62	-6,24	0,93	-0,73	0,71
	Hz1	-0,63	0,11	37,07	0,02	3,65	0,70	-	-

Tabla 5.1: Valores del Coeficiente de Electrofiltración (Ce), asociados a las formaciones geoelectricas identificadas, además de los valores del coeficiente de determinación en el volcán Sabancaya.

5.5 MAPA DE ANOMALÍAS DE POTENCIAL ESPONTANEO EN EL COMPLEJO VOLCÁNICO AMPATO-SABANCAYA Y VOLCÁN HUALCA-HUALCA

A) SECTOR SABANCAYA

Mediante los 4 perfiles radiales (1-SE, 2-E, 3-N, 4-NW) y periféricos tomados alrededor y en la base del volcán, se ha realizado un mapa de PE, en la cual se ha logrado identificar la presencia de una Anomalía, identificada como anomalía 1 del Sabancaya (AS1) marcada con líneas discontinuas en la zona del volcán Sabancaya (**Figura 5.8**).

Esta anomalía tiene una forma semicircular de aproximadamente 4 km de diámetro, ligeramente alargada en dirección NO-SE, que presenta valores mínimos de -1200 mV al Norte del volcán cerca del Perfil N°3 hasta los 80 mV en la cumbre el volcán. Dicha anomalía es típica de volcanes activos, tales como los volcanes del sur del Perú que son de tipo andesíticos, y estaría asociada directamente a la delimitación de la zona Hidrogeológica (Fría) de la zona Hidrotermal (Caliente).

B) SECTOR HUALCA-HUALCA

Al Nor-Este de este volcán, se aprecia una Anomalía negativa, identificada como anomalía 1 del hualca-hualca (AH1) de forma elíptica cuyas medidas son de 6 km x 3.5 Km eje menor y en dirección Noroeste-Sureste el cual presenta un descenso considerable de los valores de PE en este sector del volcán con una amplitud mínima de -2200 mV. (**Figura 5.8**).

Al Norte de este volcán se aprecia otra Anomalía positiva, identificada como anomalía 2 del Hualca –Hualca (AH2) de forma aún no definida porque la adquisición de datos continúa realizándose en esta zona. (**Figura 5.8**). Esta anomalía podría estar relacionada con la antigua caldera de colapso ubicada en el flanco Norte del volcán y que permite el transporte de fluidos a través de la roca o el medio sólido. Esto se hace más evidente por la presencia de las fuentes termales (geiser infernillo) cercanas a la zona.

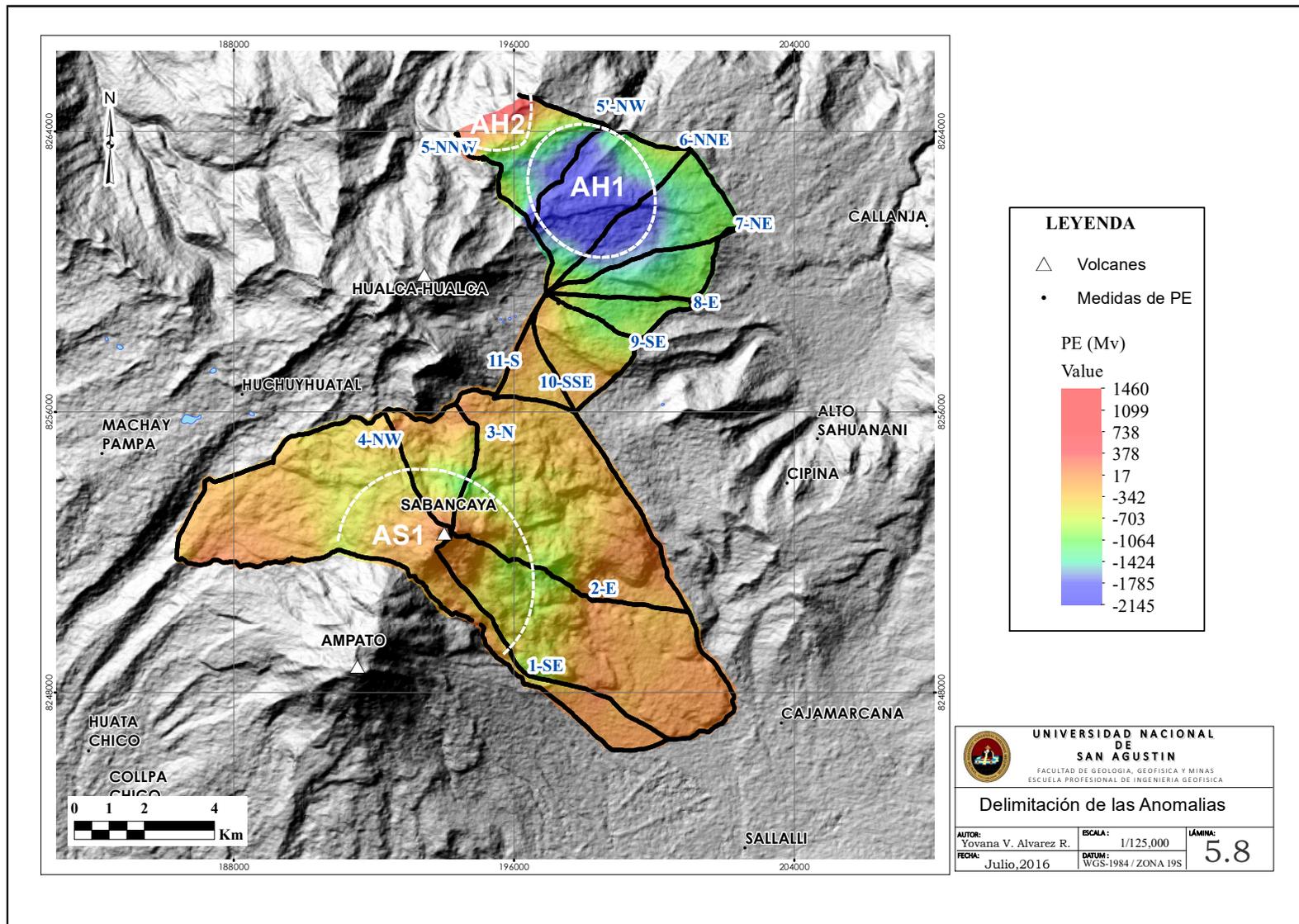


Figura 5.8: Mapa de anomalías de los Volcánes Sabancaya y Hualca- Hualca (línea entrecortada de color blanco).

CAPITULO VI

INTERPRETACIÓN VOLCANOLÓGICA Y ESTRUCTURAL

En el presente capítulo se muestra las anomalías encontradas en el volcán Sabancaya y el Hualca-Hualca; los cuales serán interpretados y discutidos en este capítulo.

La anomalía positiva sobre el Sabancaya está asociada al sistema hidrotermal, típico en volcanes activos (Finizola, A. 2002) mientras que la anomalía encontrada en la zona del volcán Hualca-Hualca, estaría asociada a la zona hidrogeológica, posiblemente originada por una antigua caldera. Se distingue una tercera anomalía al NW del Volcán Hualca-Hualca donde los valores de potencial se incrementan.

Se ha realizado un mapa de Zoneación de SP, en base a los resultados de los gradientes de potencial en función de la altitud. Estos resultados nos permitieron delimitar los horizontes Geoeléctricos. En el volcán Sabancaya se ha distinguido 7 zonas geoeléctricas. La interpretación de estos horizontes Geoeléctricos estarían relacionados a capas litológicas presentes en la zona de estudio, que se formaron por los diferentes procesos eruptivos que ha experimentado el volcán durante su formación. Estos límites reflejan variaciones laterales de porosidad y/o permeabilidad del material que forma el volcán.

6.1 GRADIENTE DE POTENCIAL ESPONTANEO

Los resultados del gradiente de potencial pueden ser expresados en gráficos (**Figura 6.1**), donde se correlacionan los valores del Coeficiente de Electrofiltración C_e en función de la altura formando los horizontes geoeléctricas (**H_z, T_z, L_{cz}, U_{cz}**) casi concéntricos respecto al cono activo del volcán Sabancaya.

La zona hidrogeológica (HZ) conformada por tres horizontes o formaciones geoelectricas Hz1, Hz2, Hz3 y que comprende desde los 4500 hasta los 5400 msnm, siendo Hz1 el que presentan mayor ancho visto en planta y es uniforme en los 4 perfiles, mientras que Hz2 presenta mayor ancho en los perfiles 3 y 4; terminando con Hz3, no siendo visible en el perfil 4 (figura 6.1).

La zona de transición (TZ), considerada como la zona límite entre la zona hidrogeológica e hidrotermal, situada entre las alturas de 4800 y 5500 msnm. Presentando mayor ancho visto en planta en los perfiles 1, 2 y 4 (**Figura 6.1**).

La zona Hidrotermal correspondiente a la parte superior del volcán y comprende desde las alturas 5300 hasta los 5900 msnm. Conformada por dos horizontes (Lcz, Ucz); Una zona de baja convección (Lcz=Low convective zone) y una zona de alta convección (Ucz=Upper Convective Zone) que corresponde a la cumbre del volcán. La Lcz presenta un crecimiento uniforme en los cuatro perfiles, mientras que la Ucz no es visible en el perfil 2 (**figura 6.1**).

También podemos apreciar una zona Convectiva (Cz) de color amarillo, con gradiente de potencial positivo presente en los 4 perfiles identificado con anomalía 2 del Sabancaya (AS2), situada entre 4800 hasta los 5400 msnm, ver **figura 6.1**.

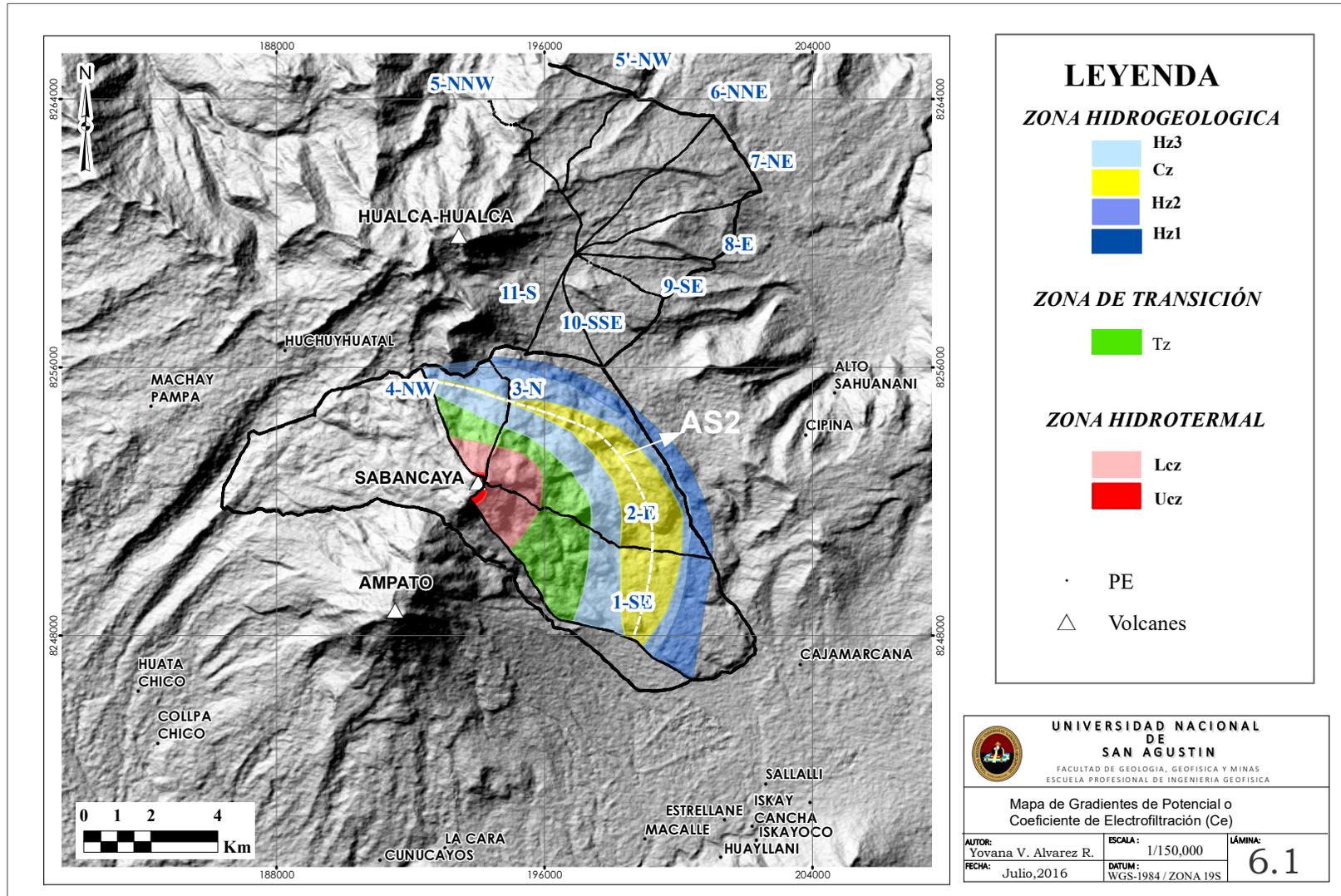


Figura 6.1: Mapa de Gradientes de Potencial o Coeficiente de electrofiltración (Ce).

6.1.1 Perfiles de Potencial Espontaneo y Altura en función de la Distancia del V. Sabancaya

En los perfiles 1-SE, 2-E, 3-N, 4-NW se observa la relación del PE y altura en función de la distancia, son inversamente proporcional, mientras que en la zona hidrogeológica los valores de potencial van descendiendo como se puede apreciar en los perfiles 1, 2, 3 y 4 (**Figuras 6.2 y 6.5**) a medida que aumenta la altura hasta llegar a un mínimo conocido como zonas transicionales (zonas de color verde de los perfiles 1, 2, 3 y 4 (**Figuras 6.2 y 6.5**) para luego aumentar sus valores de potencial en las zonas hidrotermales, mostrando mayor incremento de potencial en la cumbre del cráter (zona de color rojo de los perfiles 1, 2, 3 y 4 (**Figuras 6.2 y 6.5**)). En Agosto del 2016 el Instituto Geofísico del Perú –sede Arequipa identifico 5 puntos de emisión de fumarolas, 2 de las cuales fueron identificadas en la Ucz y las otras 3 se ubican en la zona Lcz, relacionados estos puntos de emisión a la actividad del sistema hidrotermal (**Figura 6.7**).

Asimismo, se observa una zona convectiva de color amarillo en los perfiles 1, 2, 3 y 4 (**Figuras 6.2 y 6.5**) y con mayor notoriedad en los perfiles 1 y 2, esta zona convectiva se trataría de una antigua caldera de colapso, que posteriormente fue rellenada con nuevos materiales productos de las numerosas erupciones y que actualmente no es visible en superficie.

En la **figura 6.6** se muestra los perfiles 2 y 4, con sus respectivos valores de potencial, el grafico muestra claramente la zona hidrotermal e Hidrogeológica que ya fue observada en otros volcanes como Misti (2001), Ubinas (2002), Estromboli (2002) por Finizola Et al., (2004) los cuales presenta una forma de W y que es típico de los volcanes activos.

PERFIL 1-SE

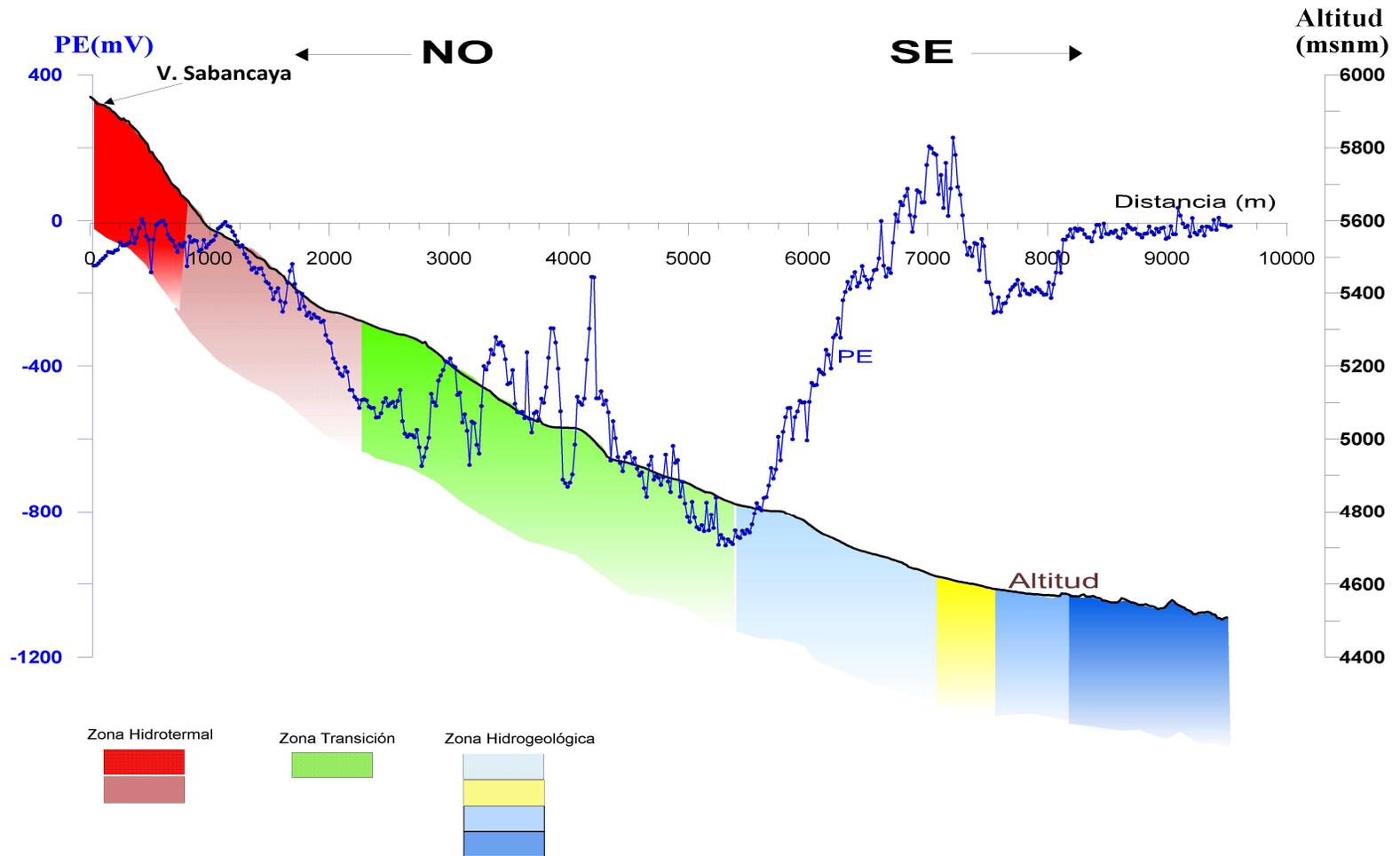


Figura 6.2: Datos de Potencial Espontaneo y altura a lo largo del perfil 1

PERFIL 2-E

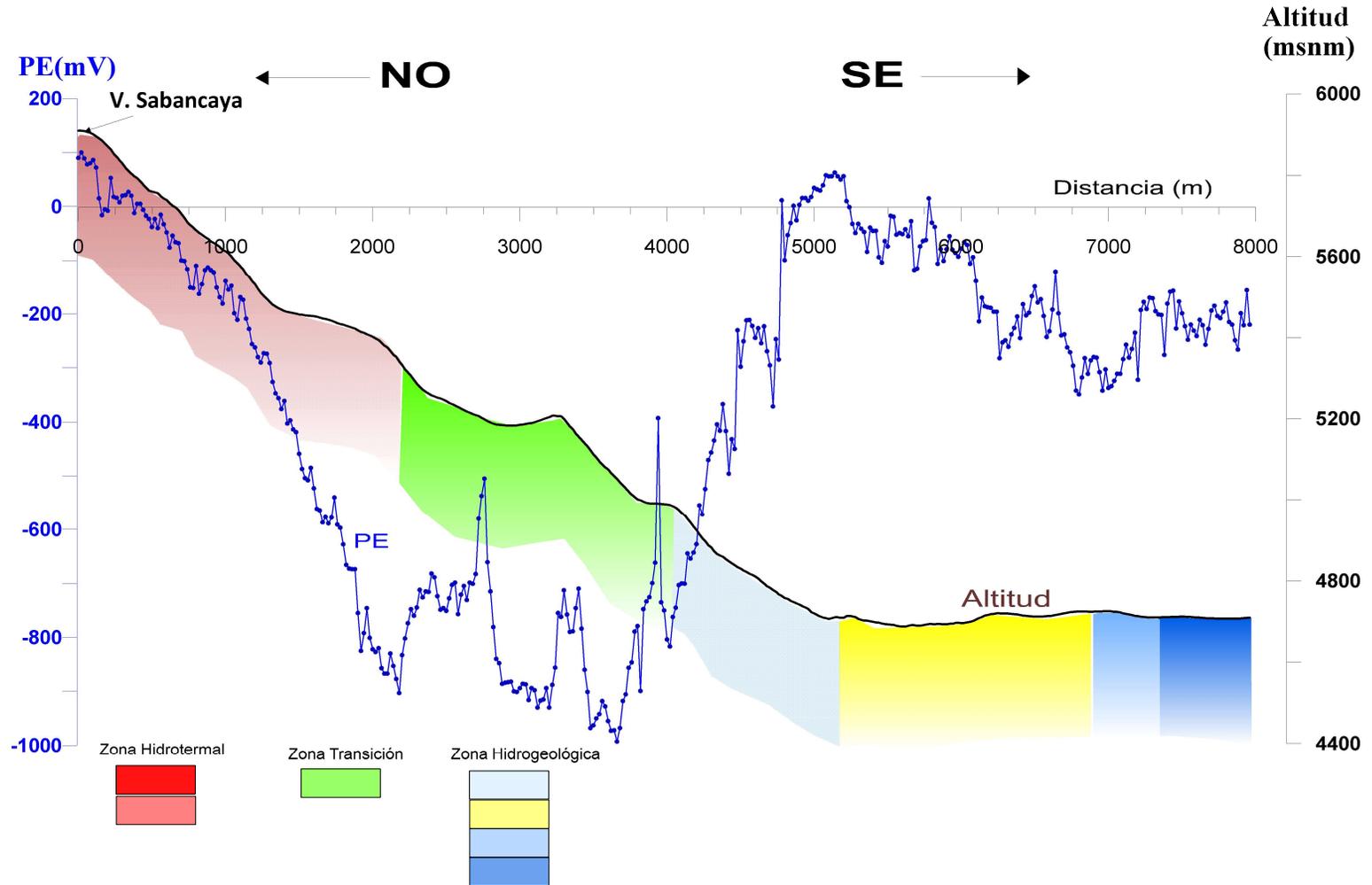


Figura 6.3: Datos de Potencial Espontaneo y altura a lo largo del perfil 2.

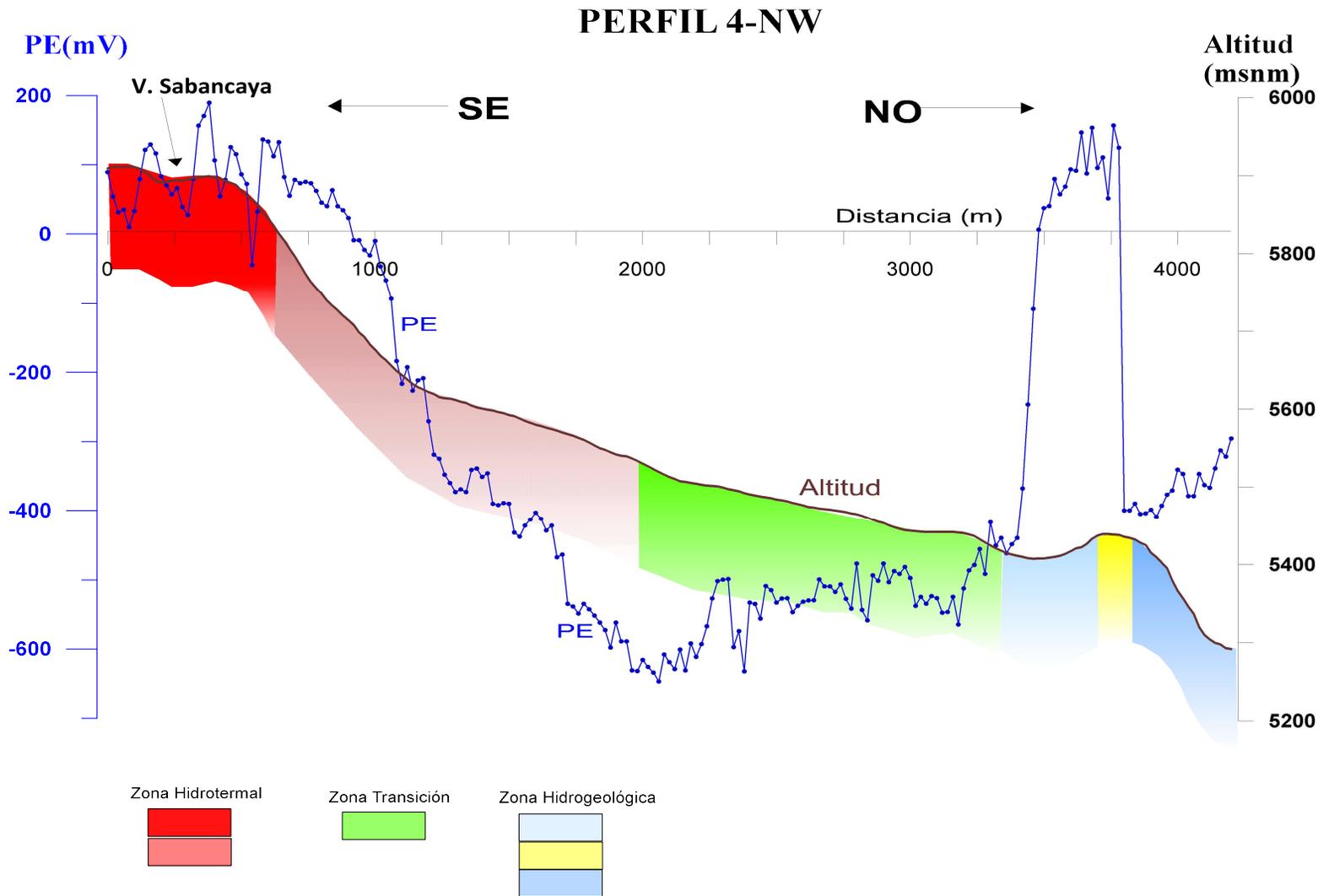


Figura 6.5: Datos de Potencial Espontaneo y altura a lo largo del perfil 4.

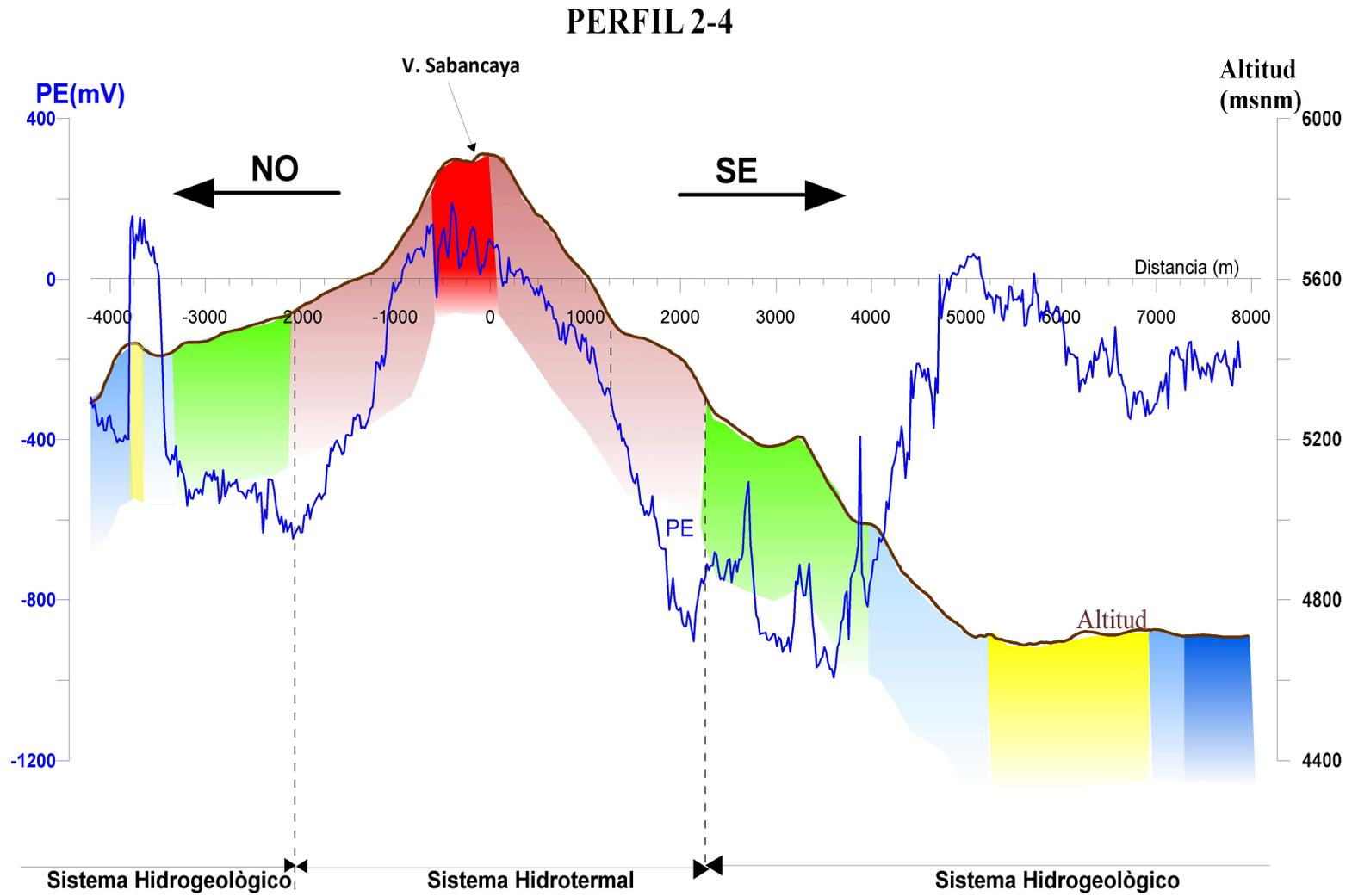


Figura 6.6: Relación de Potencial espontaneo y altura a lo largo de los perfiles 2 y 4.

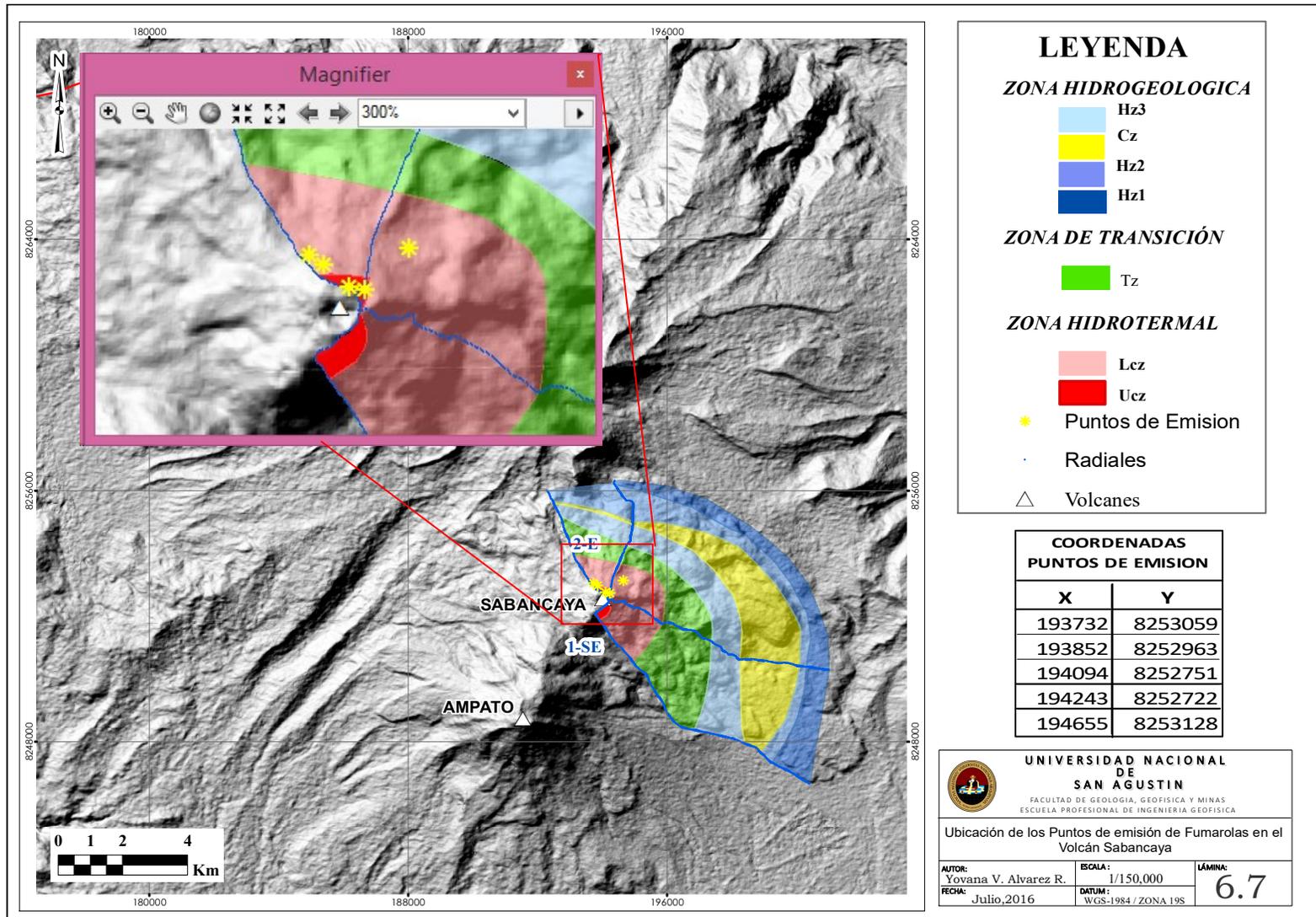


Figura 6.7: Ubicación de fumarolas (puntos de color amarillo) registradas en Agosto del 2016 en el Volcán Sabancaya.

6.1.2 Perfil de Potencial Espontaneo y Altura en función de la distancia V. Hualca-Hualca

Se han realizado medidas de PE al Noreste del volcán Hualca-Hualca con un total de 8 perfiles adicionales (**Figura 6.8**).

En el volcán Hualca-Hualca tenemos una zona hidrogeológica donde se observa claramente una anomalía negativa ubicada al NE del mismo de forma elíptica y concéntrica con medidas de 3 km por 5 Km aproximadamente, y presenta una ligera prolongación al Sureste (**Figura 6.8**). Mostrando valores mínimos de Potencial de -2200 mV (perfil 6) y -1100 mV (perfil 8), ver la **figura 6.8**

Estudios anteriores de PE realizados en al año 2013 en el complejo volcánico Tenerife (España) por el Dr. Anthony Finizola, específicamente en Diego Hernández demuestran que la anomalía negativa encontrada en esa caldera está relacionada a un sistema de caldera formada hace muchos años atrás.

Este estudio nos ayuda a entender esta forma tan particular que presentan los perfiles 6, 7, y 8 (**Figura 6.9 y 6.12**), notando claramente forma cóncava de la señal de PE que dibujaría la forma de la posible caldera.

En la parte NW se observa un incremento de los valores de PE (anomalía A3), esto podría estar relacionado con la presencia de antigua caldera de colapso permeable que permite el transporte de fluidos a través de la roca o el medio sólido. Esto se hace evidente por la presencia de las fuentes termales (geiser infernillo) cercanas a la zona, tal como se puede apreciar en la **figura 6.8**.

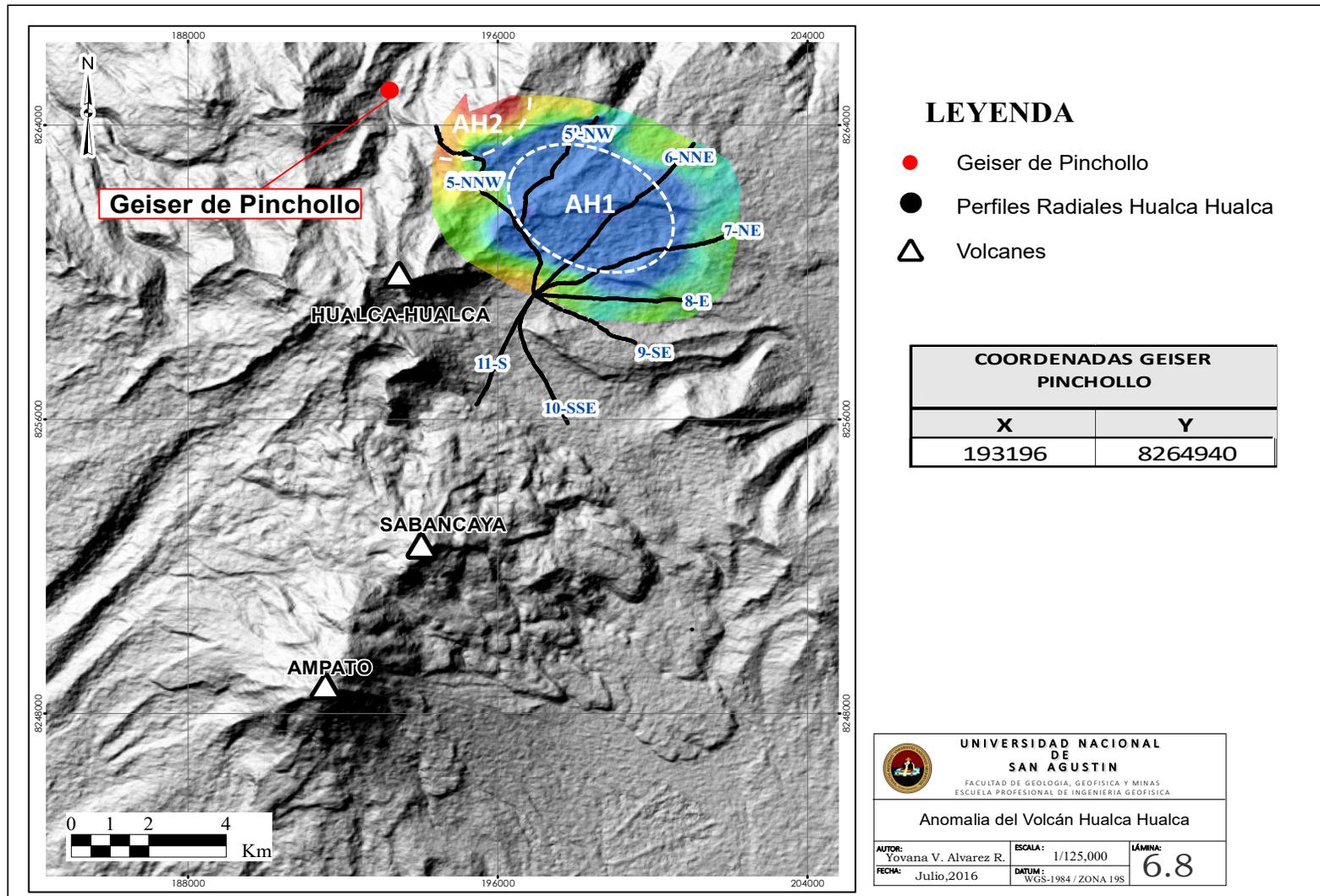


Figura 6.8: Anomalia negativa en el volcán Hualca-Hualca y ubicación del geiser de Pinchollo (puntos de color rojo)

PERFIL 8

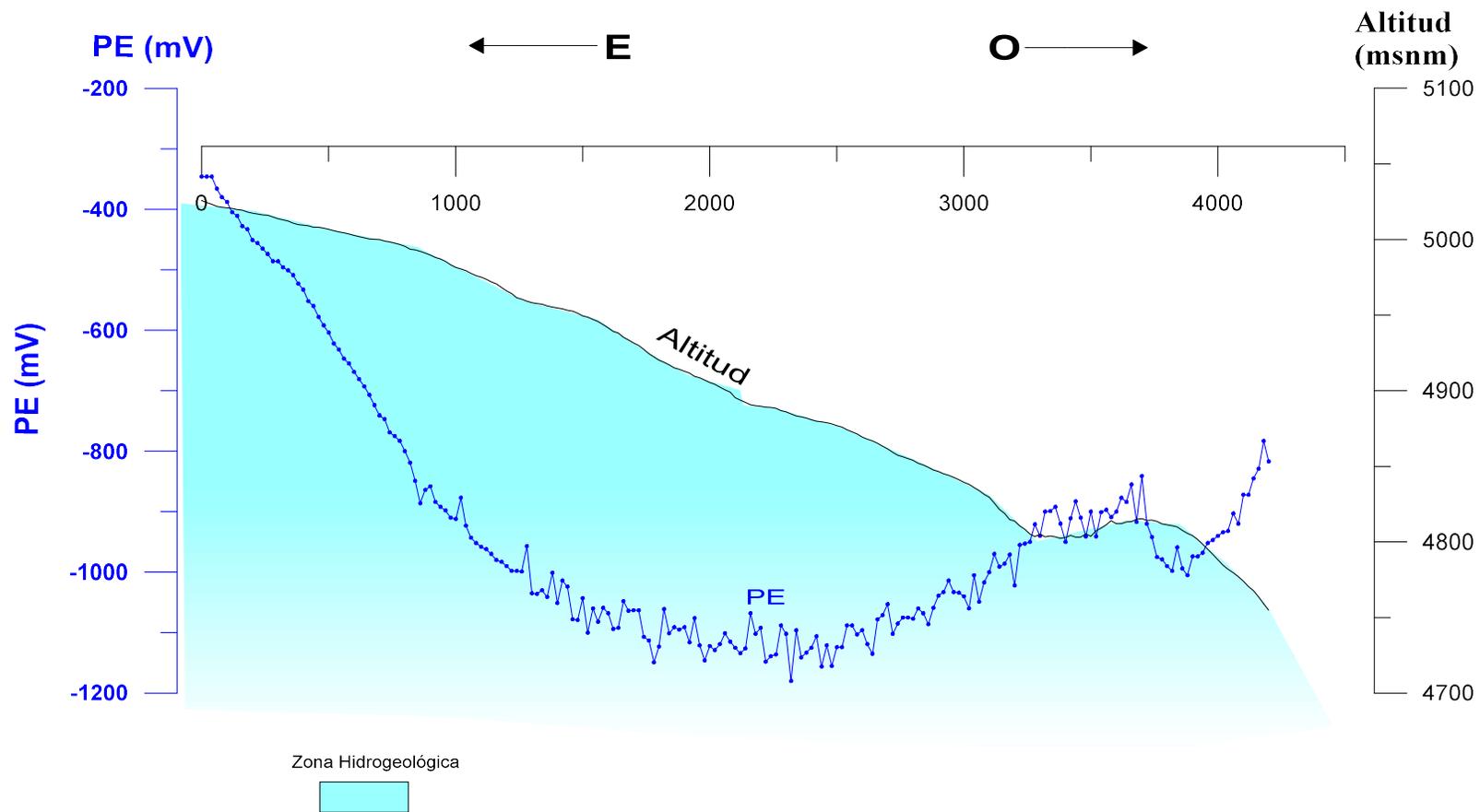


Figura 6.12: Datos de Potencial Espontaneo y altura a lo largo del Perfil 8.

6.2 MODELO 3D DE LA ANOMALÍA EN EL VOLCÁN SABANCAYA

Con los resultados obtenidos y su interpretación, se ha desarrollado un modelo 3D de las dos zonas con gradientes de potencial positivos observados en el volcán Sabancaya:

- El primero relacionado al sistema hidrotermal propio del volcán y centrada en la cima del actual domo activo. Este sistema hidrotermal situado en la parte central del volcán Sabancaya sería alimentado por la energía térmica liberada por el cuerpo magmático al interior del volcán, dicho cuerpo calienta una zona de 4 Km de diámetro (extensión del sistema Hidrotermal) como se puede apreciar en la **figura 6.13c**. Se puede apreciar que, los valores mínimos de esta anomalía se encuentran en la parte norte, este y sureste del volcán que estaría relacionado a las variaciones de pendientes, no siendo el caso para el perfil 4 ubicado al NW, la cual presenta una pendiente menos pronunciada (**figura 5.8**). White, R. 2013, al explicar sobre la sismicidad precursora de una erupción, detalla los principales factores que influyen en dicha sismicidad, destacando la importancia del tamaño del sistema hidrotermal, ya que al presentar un amplio tamaño el sistema hidrotermal (agua, vapor) y que al interactuar con el magma presente en el volcán podría desencadenar erupciones violentas. La dimensión del sistema hidrotermal encontrado en el volcán Sabancaya es de 4 km, lo cual indica que no es más grande que los sistemas hidrotermales encontrados en el Misti (6 km) (Ramos. 2000) y el Ubinas (6x7 km) (Gonzalez, K.2001), lo que nos dice que las explosiones del Misti y Ubinas serán más fuertes.
- El segundo gradiente positivo identificado como Cz en amarillo (**figura 6.13c**), se presenta en los cuatro perfiles del volcán Sabancaya y estaría relacionada con una antigua caldera de colapso (conversación personal con Dr. Finizola) enterrada y cubierta por nuevo material producto de las constantes erupciones, esta caldera sería permeable favoreciendo el ascenso de los fluidos calientes a lo largo del borde de la misma debido a fracturas anulares, tal como ocurre en otros volcanes como la caldera Concepción de Ataco en el Salvador y la Caldera de Xela en Guatemala (Finizola A.et al, 2002). La caldera de Xela es un claro ejemplo, que respalda este argumento (**figura 6.14c**), esta caldera forma parte de un complejo volcánico conformado por los volcanes Santa María, Cerro

Quemado y Zunil. Los estudios de potencial espontaneo sobre este complejo muestran los gradientes de potencial positivos relacionados al sistema hidrotermal y también se distinguió otro gradiente positivo identificado como M4, el cual indica la presencia de un límite estructural relacionada a una antigua caldera permeable. La presencia de la caldera de Xela ha sido corroborada en campo, porque se pueden observar los extremos de la misma (**Figura 6.14c**).

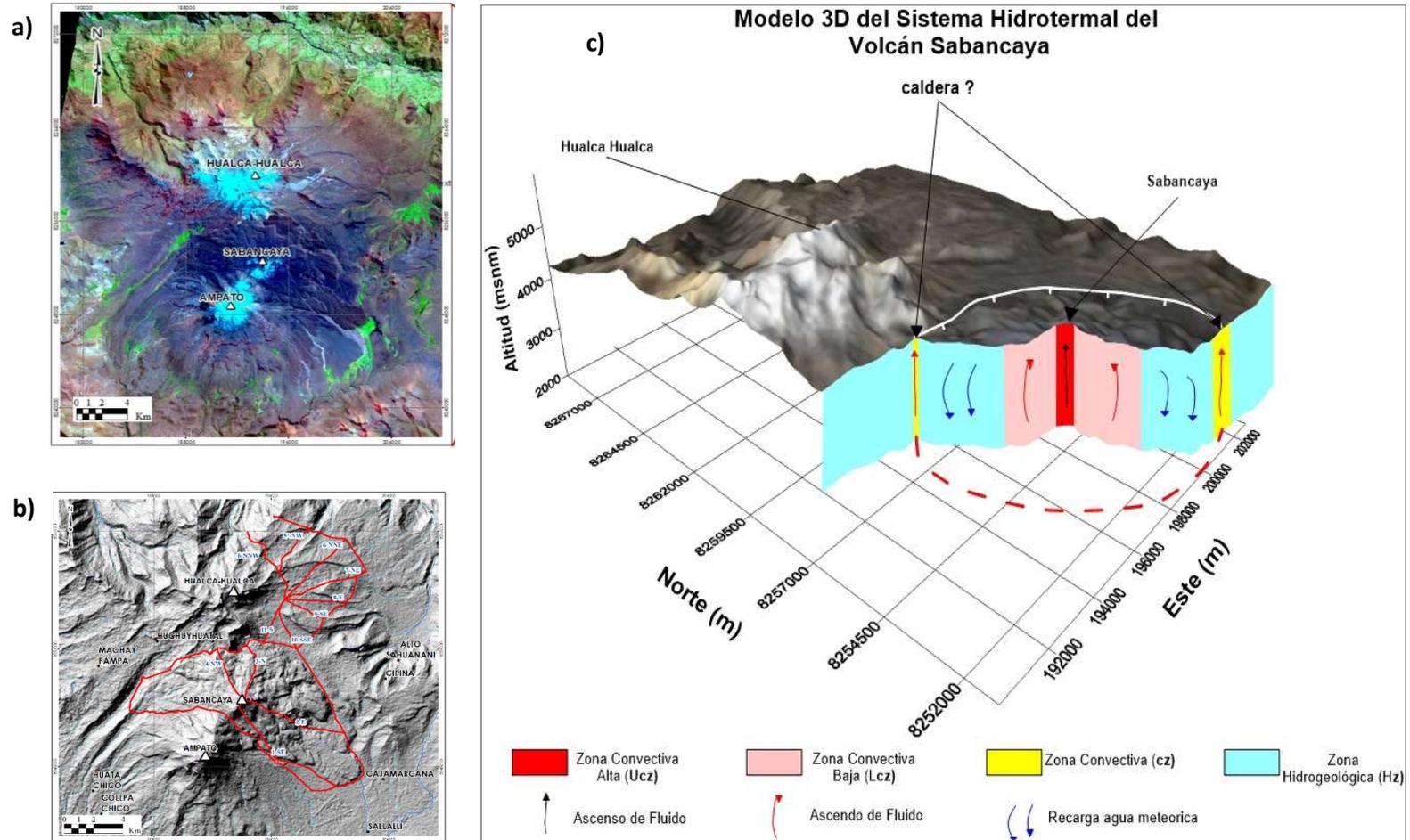


Figura 6.13: a) Ubicación del CVAS y volcán Hualca-Hualca b) Línea de color rojo representa las medidas de potencial espontaneo c) Modelo-3D del Sistema Hidrotermal del volcán Sabancaya .

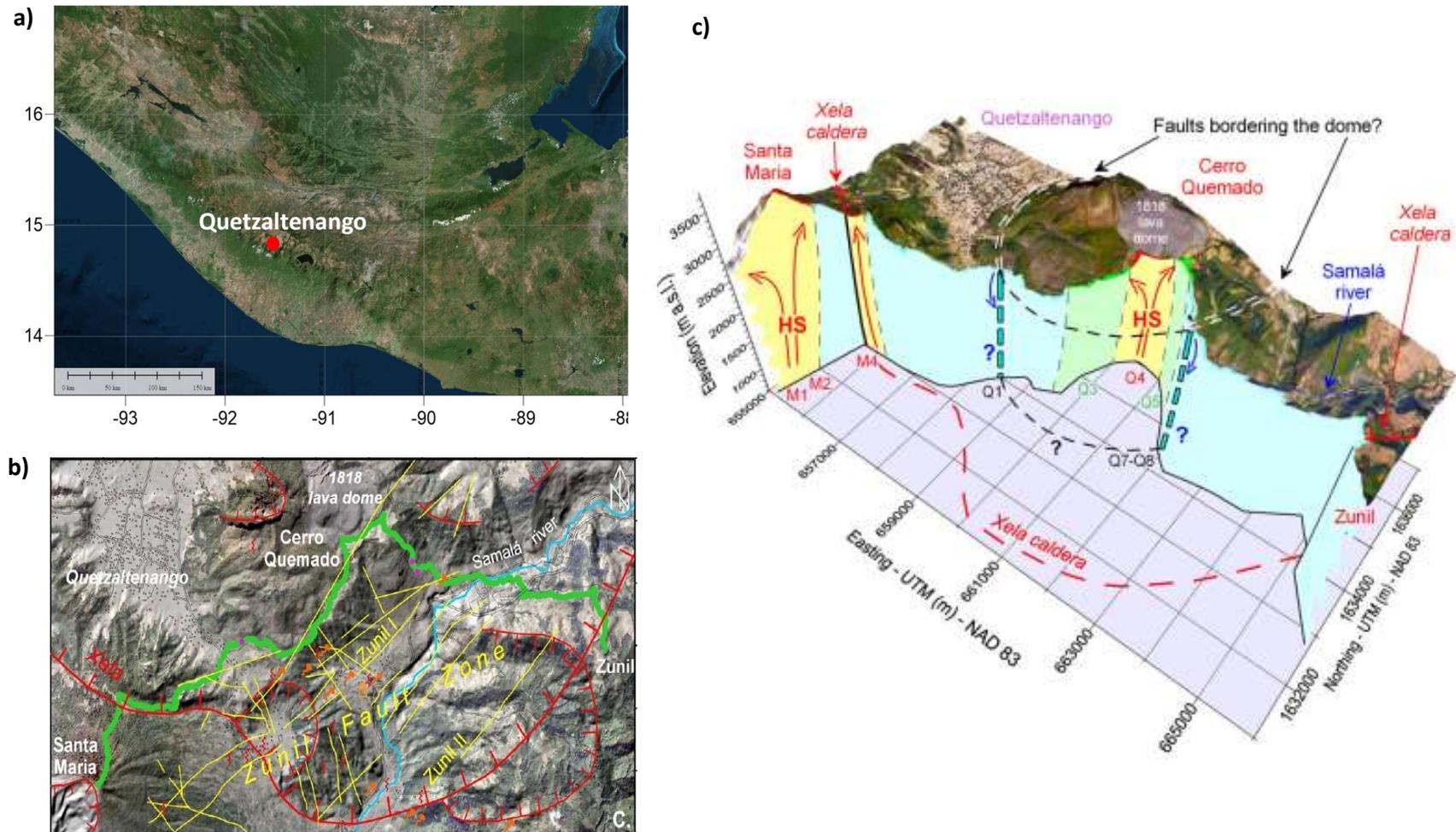


Figura 6.14: a) Ubicación de la caldera de Xela b) Línea de color verde representa las medidas de potencial espontaneo c) Modelo-3D del Sistema Hidrotermal de la caldera de Xela –Guatemala (Finizola A. et al, 2002).

6.3 MODELO 3D DE LA ANOMALA EN EL VOLCÁN HUALCA-HUALCA

La anomalía identificada como anomalía 1 del Hualca –Hualca que se observa al NE del volcán Hualca-Hualca (AH1) y que presenta valores negativos de potencial espontaneo con forma cóncava, probablemente esté relacionada con la geometría subterránea del piso de una antigua caldera impermeable donde se estaría depositando agua meteórica (**figura 6.16c**).

Villasante, M. (2014) realizo estudios de PE en el complejo Volcánico Tenerife (España), conformado por la amplia Caldera de las Cañadas (Diego Hernández, Guájara y Ucanca), los resultados obtenidos muestran una anomalía negativa en la caldera Diego Hernández (**Figura 6.17c**), muy similar a la observada en el volcán Hualca-Hualca. Con el objetivo de tener un estudio más detallado de la caldera Diego Hernández, Villasante corrobora con estudios de Audiomagnetotelurico realizados por Coppo, N. et al. (2008) y detectó una anomalía negativa similar a la encontrada con PE y esto le ayudo a identificar la presencia de dos capas principales dentro de la caldera Diego Hernández (DH): una capa relacionada a la zona vadosa (Zona no saturada) y otra capa relacionada a la zona saturada (Zona Hidrogeológica).

Con el objetivo de encontrar la zona vadosa y la zona saturada para posteriormente realizar un modelo 3D para el volcán Hualca-Hualca y debido a que no se cuenta con datos de Audiomagnetotelurico para nuestra zona de estudio, se decidió considerar los mismos datos de Audiomagnetotelurico (AMT) tomados en la caldera Diego Hernández. La **figura 6.15** muestra la relación lineal del PE en función del espesor de la zona vadosa o zona no saturada para la caldera Diego Hernández, los puntos de color rojo son los datos de AMT dentro de la caldera y los puntos de color azul son los datos de AMT fuera de la caldera DH. De acuerdo con la **figura 6.15** se tomara la misma relación de SP vs Espesor de la zona vadosa y para encontrar esta relación se toman 2 puntos de la recta de color azul, del primer punto, se considera que a 0 metros el valor del PE =500 mV y del segundo punto se considera que a 650 metros de espesor el PE=0 mV, teniendo los datos de este punto se elabora la ecuación de la recta para el cálculo del coeficiente de electrofiltración

que es aprox. $C_e = -0.8 \text{ mV/m}$, este valor (pendiente) se utiliza en la **ecuación 6.1** para el cálculo del espesor de la zona vadosa del Volcán Hualca-Hualca.

$$Y = aX + b \quad \text{Ecuación (6.1)}$$

Considerando:

$a = -0.8 \text{ mV/m}$

$b = 500 \text{ mV}$

$Y = \text{valor de PE (mV)}$

$X = \text{espesor zona vadosa (m)}$.

Después de calcular el espesor de la zona vadosa para cada punto de las medidas de PE adquiridos, se interpolan todos estos datos con la finalidad de elaborar un modelo cualitativo 3D para la anomalía observada al NE del Volcán Hualca-Hualca. El modelo elaborado (**Figura 6.16c**) ayuda en la visualización de la forma topográfica de la capa freática, la cual estaría sobreyaciendo a una posible antigua caldera impermeable que habría sido cubierta por erupciones posteriores y a su vez serviría de reservorio para la acumulación de agua meteórica.

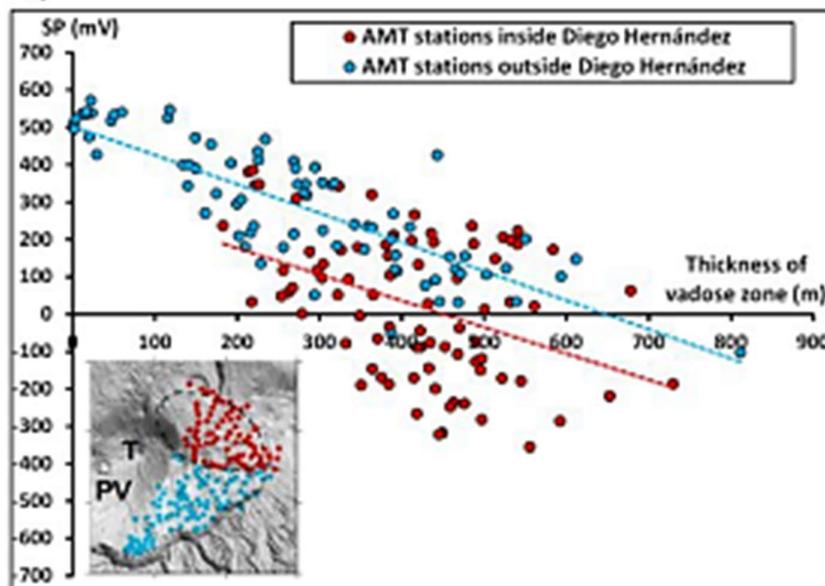


Figura 6.15: Relación de PE en función la zona vadosa.

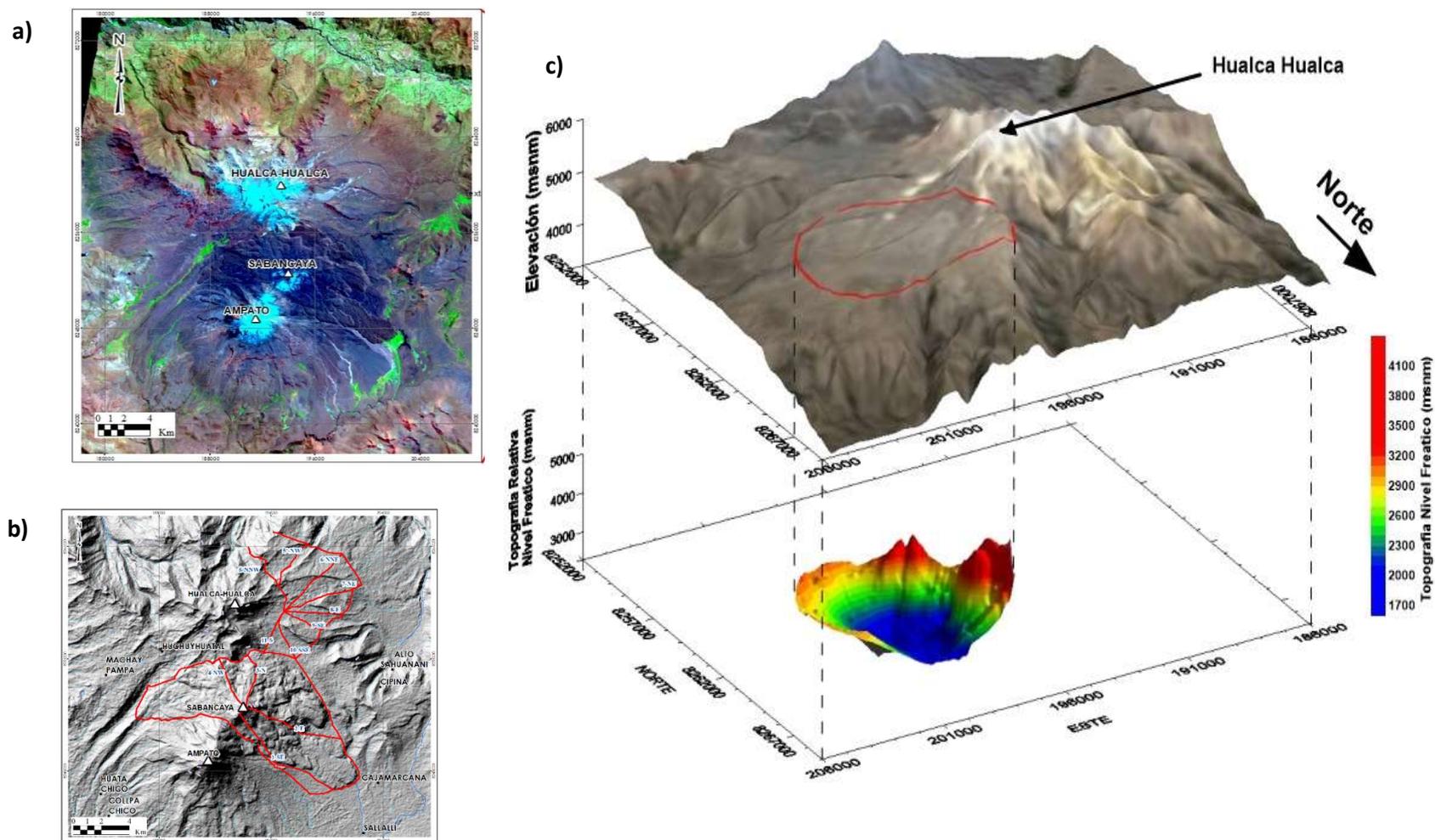


Figura 6.16: a) Ubicación del CVAS y volcán Hualca-Hualca b) Línea de color rojo representa las medidas de potencial espontaneo c) Modelo-3D de la zona hidrogeológica del Volcán Hualca-Hualca .

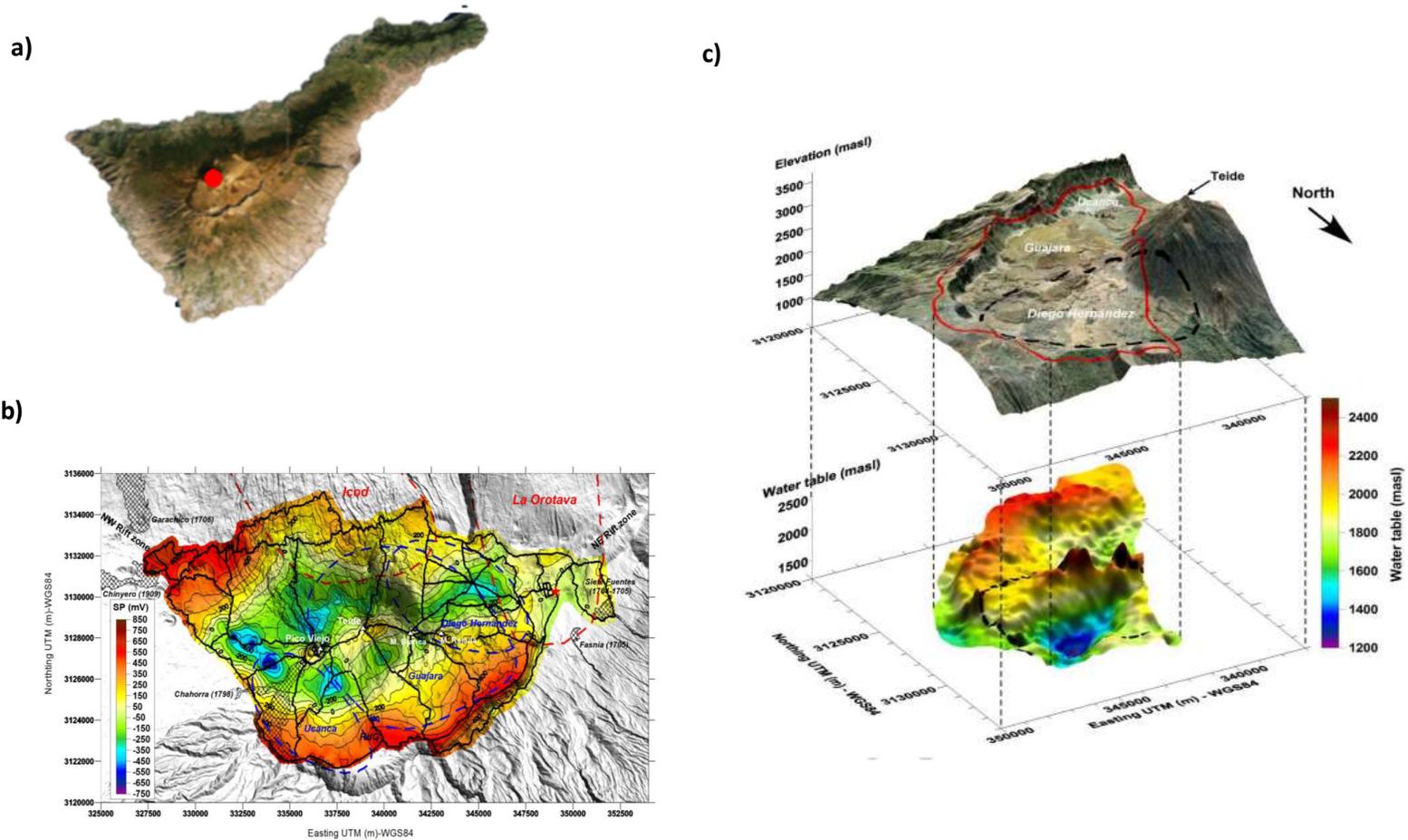


Figura 6.17: a) Ubicación del complejo volcánico Tenerife b) Línea de color negro representa las medidas de potencial espontaneo c) Modelo 3D de la zona hidrogeológica de la caldera Diego Hernández

CONCLUSIONES

- El método de potencial espontáneo ha permitido conocer y delimitar el sistema hidrotermal en el volcán Sabancaya, así como estructuras presentes en el volcán Sabancaya y volcán Hualca-Hualca.
- En el volcán Sabancaya se han identificado dos anomalías positivas, la primera identificada como anomalía 1 del Sabancaya (AS1), de forma semicircular y de aprox. 4Km de diámetro, típica de los volcanes activos y relacionada al sistema hidrotermal propio del volcán. La segunda identificada como anomalía 2 del Sabancaya (AS2), probablemente relacionado con una antigua caldera de colapso, enterrada y cubierta por nuevo material producto de las constantes erupciones, esta caldera sería permeable y facilitaría el ascenso de los fluidos a lo largo del borde de la misma.
- En el volcán hualca-hualca se distinguen dos anomalías, la primera anomalía es una anomalía negativa ubicada al Nor este del Hualca –Hualca, identificada como anomalía 1 del Hualca-Hualca (AH1), de forma elíptica, cuyas medidas son de 6 x 3.5Km, en dirección (NW-SE) y una amplitud mínima de -2200 mV. La segunda anomalía localizada al Norte del Hualca-Hualca, es una anomalía positiva, identificada como anomalía 2 del Hualca –Hualca (AH2), la cual estaría vinculada con la antigua cicatriz de colapso del flanco norte del volcán Hualca-Hualca, esta sería permeable y permitiría el transporte de fluidos a través de la roca o el medio sólido fracturado.
- El modelo 3D elaborado para el volcán Sabancaya, ayuda a visualizar mejor la delimitación del sistema hidrotermal, así como la forma y distribución de la posible antigua caldera de colapso.
- El modelo 3D elaborado para el volcán Hualca ayuda a visualizar la geometría subterránea del piso de una posible antigua caldera de colapso impermeable, donde se estaría depositando agua meteórica y que fue cubierta por erupciones posteriores.

RECOMENDACIONES

- El método del PE ha demostrado ser de fácil aplicación y presentar resultados favorables, necesarios para ser considerados como una herramienta más en el monitoreo de volcanes.
- Continuar con la adquisición de datos de PE en el complejo volcánico Ampato-Sabancaya y volcán Hualca-Hualca, a fin de complementar el presente estudio.
- Establecer un perfil de reiteración de PE en el volcán Sabancaya, para realizar un monitoreo continuo, ya que las variaciones en las curvas de potencial pueden brindar información sobre la evolución de la zona de influencia magmática.
- Completar el presente estudio con otros métodos de estudio como Audiomagnetotelurico, etc.; a fin de obtener un modelo 3D con valores adquiridos en el volcán Hualca-Hualca.
- Realizar estudios de medida de CO₂ para ubicar puntos de desgasificación del suelo, generalmente de origen magmático profundo.
- Realizar medidas de geotemperaturas en la cumbre de volcán Sabancaya.

BIBLIOGRAFÍA

Antayhua, Y., Tavera, H. y Bernal, I (2001). -Análisis de la actividad sísmica en la región del Volcán Sabancaya (Arequipa). *Boletín de la Sociedad Geológica del Perú v.92 (2001) p.79-88.*

Antayhua, Y. (2002). - Análisis de la actividad sísmica en la región del volcán Sabancaya y los sismos de Maca (1991), Sepina (1992) y Cabanaconde (1998). *Tesis Profesional: Ing. Geofísico. Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa, 146p.*

Antayhua, Y. y Tavera, H. (2003). - Volcanes y Sismicidad en la Región del Volcán Sabancaya (Arequipa). Instituto Geofísico del Perú (IGP). 82 p.

Aizawa, K. (2008). - Classification of self-potential anomalies on volcanoes and possible interpretations for their subsurface structure. *Kyoto University, Japon.16p.*

Aizawa K., Yoshimura R., Oshiman N., Yamazaki K., Uto, Ogawa Y., Tank, W. Kanda, S. Sakanaka, Y. Furukawa, T. Hashimoto, M. Uyeshima, Ogawa, I. Shiozaki, A.W. Hurst (2005). -Hydrothermal system beneath Mt. Fuji volcano inferred from magnetotellurics and electric self-potential. *Universidad de Tokyo-Japón.*

Alcalá, L. (2007). -La evolución de los glaciares en el complejo volcánico Ampato (Perú). *Tesis de Diploma de Estudios Avanzados. Universidad Complutense de Madrid, España. -86p.*

Auge, M. (2008). - Métodos geoelectricas para la prospección de agua subterránea. *Universidad de Buenos Aires.30p.*

Aubert, M., I. N. Dana, and M. Livet (1990). - Identification of the Boundaries between 2 Watersheds in a Volcanic Area by the Self-Potential Method, *Academia de ciencias Serie II, 311 (8), p 999-1004.*

Arias, G. (2016). - Estudio De Señales De Muy Largo Periodo Del Volcán Cotopaxi. *Escuela Politécnica Nacional .122p.*

Barde, S. y Finizola, A. (2012).- Tutorial For Self Potential Data Processing I Data Correction

Bennati, L. (2005). - Identificación de las limitaciones estructurales que cruzan la isla norteña de Estromboli (Italia) mediante los métodos de potencial espontaneo y CO₂. *Universidad de Blaise Pascal, Clermont –Ferrand II.26p.*

Bogolovsky, V.et al (1973). - Deformation of natural electric fields near drainage structures. *Geophys.Prospect. 22, p716-723.*

Cadena, O. (2011). - Detección y Clasificación automática de registros sísmicos en el Observatorio Vulcanológico y Sismológico de Pasto utilizando redes neuronales artificiales. *Tesis Profesional: Mgs. Ciencias Geofísica. Universidad Nacional de Colombia, 101p.*

Chiodini, G., D. Granieri, R. Avino, S. Caliro, A. Costa, and C. Werner (2005). - Carbon dioxide diffuse degassing and estimation of heat release from volcanic and hydrothermal systems, *Journal of Geophysical Research-Solid Earth, 110 (B8).*

Chorowicz, B. et al (1992).- Spot Satellite monitoring of the eruption de Nevado Sabancaya Volcano (Southern Perú). *Remote Sens. Environ. 42, 43-49 p.*

Claire, D. (2007). -Comportamiento actual del ante-arco y del arco del codo de Arica en la orogénesis de los Andes Centrales. Universidad de Chile, Facultad de Ciencia Físicas y Matemáticas, Departamento de Geología, Tesis de Doctor en Ciencias, 280 p.

Collantes, F. (2013). - Estudio De Amenaza, Riesgo Y Vulnerabilidad De La Parroquia Huambaló, Cantón Pelileo, Frente Al Proceso Eruptivo Del Volcán Tungurahua. *Tesis Profesional: Magister En Gestión Ambiental En La Industria. Universidad Internacional SEK (Quito).* p 6-50.

Coppo, N., Schnegg, P.A., Heise, W., Falco, P., Costa, R., 2008.- Multiple caldera collapses inferred from the shallow electrical resistivity signature of the Las Cañadas caldera, Tenerife, Canary Islands. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 170, p153-166.

Corwin, R. F., and D. B. Hoover (1979). - The self-potential method in geothermal exploration, p.226 – 245.

Dana, I. (1992). - Contribution de la méthode de polarisation spontanée (PS) à la connaissance structurale et à la surveillance de quelques volcans indonésiens. *Thèse de doctorat, Université Blaise Pascal, Clermont-Fd.*

Daza Felipe A. (2012). -Métodos Geoelectricos aplicados a la exploración de aguas subterráneas y termales. *Tesis Profesional: Geofísico. Universidad De Concepción, Chile, 256p.*

Delgado R. (2012). - Estudio geológico, petrográfico y geoquímico del complejo Volcánico Ampato – Sabancaya. *Tesis Profesional: Ing. Geologica. Universidad Nacional San Agustín de Arequipa, 169 p.*

Denith M., et al Mudge S. (2014). - Geophysics for the Mineral Exploration Geoscientist.p.516.

De Silva S.L., Francis, P.W. (1991). - Volcanoes of the Central Andes. Springer-Verlag 216 p.

Estrada L. (2012). - Prospección Geoelectrica. *Universidad Nacional de Tucuman-Chile.20p.*

Farfán M., De la Cruz C., López N. (2015). - Integración de datos Geológicos y Geoquímicos de un área Geotermal, Caso de estudio Colca-Perú. *Universidad de El Salvador.92p*

Finizola A. (2002). -Estudio del Sistema Hidrotermal de Volcanes Activos Misti (Perú) y Estromboli (Italia). *Tesis Doctoral: Especialidad Vulcanología. Universidad Blas Pascal Clermont-Ferrand II-Arequipa ,205p.*

Finizola A., Jean-Francois Le´nat, Macedo O., Ramos D., Thouret J., Sortino F. (2004). - Fluid circulation and structural discontinuities inside Misti volcano (Peru) inferred from self-potential measurements. *Universite´ Blaise Pascal et CNRS.18p.*

Finizola A., Rici T., Barde Cabusson Stephanie. Chuetze C. Villasante M. (2014). - Hydrothermal system of Central Tenerife Volcanic Complex, Canary Islands (Spain), inferred from self-potential measurements.82p.

Fournier Robert O., (2006). - Hydrothermal systems and volcano geochemistry. P323-p341.

Gerbe, M.C., Thouret, J.C., (2004). - Role of magma mixing in the petrogenesis of lavas erupted through the 1990–98 explosive activity of Nevado Sabancaya in South Peru. *Bull. Volcanol.* 66, 541–561.

González, E. et al (1996) - Sismicidad del volcán Sabancaya y el Hualca-Hualca. Segundo Seminario Latinoamericano: Volcanes, Sismos y Prevención.

Gonzalez, K (2001). - Estudio estructural y del sistema hidrotermal del volcán Ubinas aplicando métodos geofísicos y geoquímicos. *Tesis Profesional: Ing. Geofísico. Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa, 176p.*

Gonzales K.; Froger J. L.; Audin L. y Macedo O. (2009) - Ejemplos de Deformación producto de la Tectónica extensiva en las zonas de Huambo-Cabanaconde en Arequipa y Calacoa-Huaytire en Moquegua de los Andes Centrales vistos por Interferometría Radar - InSAR. *Bol.Soc. Geol. Perú 103, 109-124 p.*

Guillande R., Thouret J.-C., Huaman D. & Le Guern F. (1992) .-. Rapport Délégation. Risques Majeurs, Ministère de l'Environnement, 133 p.

Gutiérrez, A. (2010). - Análisis de la sismicidad del volcán Chichonal durante los periodos de junio de 2004 a mayo de 2005 y de enero a abril de 2008. *Tesis Profesional: Ing. Geofísico. Universidad Nacional Autónoma de México, 110p.*

Gutiérrez, L. (2013). - Sistema de detección y clasificación de señales sísmico-volcánicas utilizando modelos ocultos de Markov (HMMs): Aplicación a volcanes activos de Nicaragua e Italia. *Universidda de Granada-399p.*

Heikes, R. y Ure, R. (1961). - *Thermoelectricity Science and engineering, New York.*

Huamán, D. (1995) - Métodos y aplicaciones de las imágenes de satélite en la cartografía geológica. El caso del seguimiento y evolución de la amenaza volcánica del Sabancaya (región del Colca, Arequipa). *Tesis de Ingeniero, Universidad Nacional San Agustín, Arequipa, 138 p.*

Ibáñez J. (1997). - Apuntes de Sismología Volcánica. *Curso Internacional de Vulcanología y Geofísica Volcánica, Lanzarote, 89 p.*

Ishido, T. y H. Mizutani (1981). - Experimental and theoretical basis of electrokinetic phenomena in rock-water systems and its applications to geophysics, J. Geophysics. *National Institute of Advanced Industrial Science and Technology (AIST), Tsukuba, Japón. Res., 86, 1763p—1775p.*

Jackson, D y kauahikaua, J. (1988).- Regional self potential anomalies at Kilauea volcano. In: "Volcanism in Hawaii. *Prof. Pap. U.S. Geol. Surv., 1350, p 974-959.*

Jay, J.A., Delgado, F.J., Torres, J.L., Pritchard, M.E., Macedo, O., Aguilar, V., 2015.- Deformation and seismicity near Sabancaya volcano, southern Peru, from 2012 to 2015. *Geophys. Volume 42*

Lénat, J. (2005). - Anomalies In A Complex Volcanic Environment: A Sp/Elevation Gradient. *Laboratoire Magmas et Volcans. Univ. Blaise Pascal-Francia, p24-30.*

Llerena, P. (2006). - Características de la sismicidad observada en octubre 2001 en el volcán Misti (Sur del Perú). *Tesis Profesional: Ing. Geofísico. Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa. 151p.*

Machaca R. (2012). - Evaluación de Eventos Sísmicos de Largo Periodo (LP) como Precursores en las Explosiones del Volcán Ubinas, 2006 – 2009. *Tesis Profesional: Ing. Geofísico: Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa. 134p.*

Mariño J. (2012). - Escenarios Eruptivos y mapas de Peligros del complejo volcánico Ampato-Sabancaya. *Tesis Profesional: Mgs. Ciencias y Gestión de la Tierra. Universidad Sophia Antipolis-Francia, 87p.*

Mauri, G. (2006). - Análisis de series temporales de datos geofísicos multiparámetros de sistemas volcánicos activos. *Universidad Simón Fraser –Canadá, 62p.*

Mauri, G. (2009). - Multi-Scale Analysis Of Multiparameter Geophysical And Geochemical Data From Active Volcanic Systems. *Tesis PhD .en ciencias de la tierra em la universidad de Simon Fraser , British Columbia-Canada*

Mering C., Huamán R.; Chorowicz B. y Guillande R. (1996) - *New data on the geodynamics of southern Perú from computerized analysis of SPOT and SAR ERS-1 images: Tecthon., 259p.*

Merlani, A. L., G. Natale, and E. Salusti (2001). - Fracturing processes due to temperature and pressure nonlinear waves propagating in fluid-saturated porous rocks, *Journal of Geophysical Research-Solid Earth, 106 (B6), 11067-11081.*

Molina, C. (2001). - Actividad Pre-Eruptiva en el Volcán Tungurahua. *Universidad de Caldas - Colombia.201p.*

Nishida Yasunori, Tomillar Hidefumi (1986). - Estudio de Potencial Espontaneo en áreas volcánicas –volcán Usu. *Universidad de Hokkaido-Japón.*

Orellana E. (1972). - Prospección Geoeléctrica en corriente continua. Madrid: Paraninfo, 523 p.

Palacios O., Klinck B., De la cruz, Allison R., De la cruz N., Hawkins M (1993) - Geología de la Cordillera Occidental y Altiplano al Oeste del lago Titicaca – Sur del Perú (Proyecto integrado del Sur del Perú). – *INGEMMET, 257 p.*

Parasnis, D. C. (1971). Geofísica Minera, Editorial Paraninfo. *Madrid, España.p93-110.*

Paxi Z., R. (2012). -Análisis de la actividad del volcán Sabancaya durante el periodo mayo-julio 2009. *Tesis Profesional: Ing. Geofísico. Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa, 141p.*

Pritchard, M. (2003) – Recent crustal deformation in west central South-America. California Intitute of Technology, *Pasadena, California. 251 p.*

Ramos, D (2000). - *Aplicación del método geofísico de Potencial espontaneo para el estudio estructural el Volcán Misti. Tesis Profesional: Ing. Geofísico. Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa, 141p.*

Revil A., Jardini Abderrahim (2007). - Self-Potential Method. *Primera población. Universidad de Cambridge.400p.*

Rivera, M., et al (2016). - Geología y Evaluación de Peligros del Complejo Volcánico Ampato - Sabancaya (Arequipa), *boletín ingemmet, serie c: Geodinámica y ingeniería geológica N°61, Lima-Perú.300p.*

Rodríguez, A. y Huamán, D. (1992) - Actividad de los Volcanes Ubinas y Sabancaya. Inf. Int. IGP, 12 p.

Rodríguez A. y Uribe M. (1994). -Participación del Instituto Geofísico del Perú en relación con la reactivación del Volcán Sabancaya, provincia de Caylloma, región de Arequipa. *Informe interno IGP Oficina de Arequipa, p. 28.*

Samaniego, P. (2016). - The eruptive chronology of the Ampato–Sabancaya volcanic complex (Southern Perú). *Revista elsevier 2016, Journal of Volcanology and Geothermal Research Volume 323, 1 September 2016, Pag. 110-128.*

Sánchez, C. (2015). - Modelo Experimental de la Dinámica de estallido y emisión acústica en volcanes. *Universidad de Santiago de Chile.120p.*

Sato, M. Y Mooney, H. (1960). - The electrochemical mechanism of sulfite self potentials. *Geophysics 35, p226-249.*

Schiavone D. and Quarto R. (1983). - Self-Potential Prospecting In the Study of Water Movements. Instituto de Geodesia de Geofísica, *Universidad de Bari (Italia).47-58p).*

Sébrier, M.et al (1985). -Quaternary normal and reverse faulting and the state of stress in the Central Andes of Perú. *Tectonics 7,895-928 p.*

Sheriff R.E (1990). -Applied Geophysics, Segunda Edición. *Universidad de Cambridge.p293-297.*

Siebert, L., Simkin, T., Kimberly, P., (2010). - Volcanoes of the World. third ed. Smithsonian Institution and University of California .551 p.

Sortino F., Finizola A., Lenat Jean –Francois, Valenza M. (2001) - Fluid circulation at Stromboli volcano (Aeolian Islands, Italy) from self-potential and CO₂ surveys. *Universidad Blaise Pascal-Francia .18p.*

Stimac, J. A., T. S. Powell, and G. U. Golla (2003). - Porosity and permeability of the Tiwi geothermal field, Philippines, based on continuous and spot core measurements, *Geothermics, 33,* p 87-107.

Thouret, J-C, et al (1994). - *La actividad eruptiva del volcán nevado Sabancaya (Sur de Perú): geología, sensores remotos, evaluación y mapeo de zonas de riesgo.* Boletín de la sociedad geológica de Francia 165 (1): p 49 -63.

Torres Aguilar J. (2013). - Evaluación De La Actividad Sísmo-volcanica Asociada A La Intranquilidad Del Volcán Sabancaya, Periodo Enero - Julio 2013.*Tesis Profesional: Ing. Geofísico. Universidad Nacional San Agustín de Arequipa, 148p.*

Vicente, J.; et al (1979). - Sobre el escurrimiento Cincha-Lluta: elemento del accidente mayor andino al NW de Arequipa. *Bol. Soc. Geol. Perú, T. 61pp, 67-99 p.*

Villasante M. (2014). -Estudio del Complejo Volcánico Tenerife Isla Canarias, inferido de las medidas de Potencia Espontaneo .82p.

Vyacheslav M. Zobin (2010). - Introducción a la Sismología Volcánica. *Observatorio Vulcanológico, Universidad de Colima-México. 501p.*

White, R. y Mccausland, W. (2013). - Curso de sismología Arequipa. “Pronóstico de Erupciones Explosivas basado en patrones sísmicos USGS “p. 1-86.

Zamácola y Jáuregui (1789). - Diario del viaje que el obispo Dr. Pedro Chávez de la Rosa, verificó a las provincias de Moquegua y Tacna en 1789, *publicado en "El Deber", Arequipa 1937.*

Zlotnicki, J., and Nishida Y. (2003). - Review on morphological insights of Self-Potential anomalies on volcanoes.

ANEXO

TRABAJOS PUBLICADOS

"XII° Congreso Nacional Y VI° Congreso De Geografía De Las Américas"
11-13 de octubre de 2017, Tacna-Perú

Session 2: Geografía Física

**ESTUDIO ESTRUCTURAL Y DEL SISTEMA HIDROTHERMAL DE LOS
VOLCANES SABANCAYA Y HUALCA-HUALCA MEDIANTE EL METODO
DE POTENCIAL ESPONTANEO**

Yovana Alvarez¹, Orlando Macedo¹, Nino Puma¹, Anthony Finizola²,

¹ Instituto Geofísico del Perú –Sede Arequipa
Urb. La Marina B-19, Cayma - Arequipa.

²Universidad de la reunión -Francia

Resumen:

El presente estudio tiene como finalidad analizar y comprender el comportamiento del volcán Sabancaya considerado el segundo más activo del Perú, aplicando uno de los métodos geofísicos más conocidos y pocos usados en la vulcanología, como es el Potencial Espontaneo.

El estudio de potencial espontaneo fue trabajado en base a los datos adquiridos en dos campañas durante el 2014 y 2015 en el cual se obtuvieron 6836 puntos medidos, haciendo un total de 136.68 Km. lineales tomados cada 20 m. los Resultados de perfiles y mapas finales muestran importantes anomalías. En el Volcán Sabancaya se han identificado dos zonas con gradientes de potencial positivos. La primera relacionada al sistema hidrotermal propio del volcán y centrada en la cima del actual domo activo de aprox. 4Km de diámetro. La segunda estaría relacionada con una antigua caldera de colapso enterrada y cubierta por nuevo material producto de las constantes erupciones, esta caldera seria permeable por donde los fluidos calientes empiezan ascender a lo largo del borde de la misma debido a pequeñas fallas , tal como ocurre en otros volcanes como la caldera Concepción de Ataco, la Caldera de Berlín (Salvador), y la Caldera de Xela en Guatemala (Finizola A., 2002).El modelo 3D elaborado nos ayuda a visualizar mejor la forma y distribución de esta caldera.

Mientras que la anomalía (A2) se presenta al NE del Hualca-Hualca y presenta una anomalía negativa de aprox. 3Km de diámetro, y en forma cóncava, probablemente relacionado con la geometría subterránea del piso de una antigua caldera impermeable donde se estaría depositando agua meteórica.

También se ha identificado una anomalía A3 al Norte del estrovolcán Hualca –Hualca positiva, esta anomalía estaría relacionada con la presencia de una antigua caldera de colapso permeable que permite el transporte de fluidos a través de la roca o el medio sólido.

1. Introducción

El complejo volcánico Ampato-Sabancaya y el Volcán Hualca- Hualca forman un conjunto de grandes estrovolcanes, localizados en la Cordillera Occidental de los Andes Centrales, a 70 Km al NW de la ciudad de Arequipa, al sur del Perú. Las cumbres de estos volcanes están caracterizadas por la presencia de glaciares (Alcala L., 2007). Hacia el Norte de la zona de estudio, se ubican algunos distritos de la Provincia de Caylloma como Cabanaconde, Tapay, Madrigal, Maca, Achoma, Coporaque, Yanque, entre otros, además, se encuentra del Colca el Cañón, importante atractivo Turístico de la provincia de Caylloma.

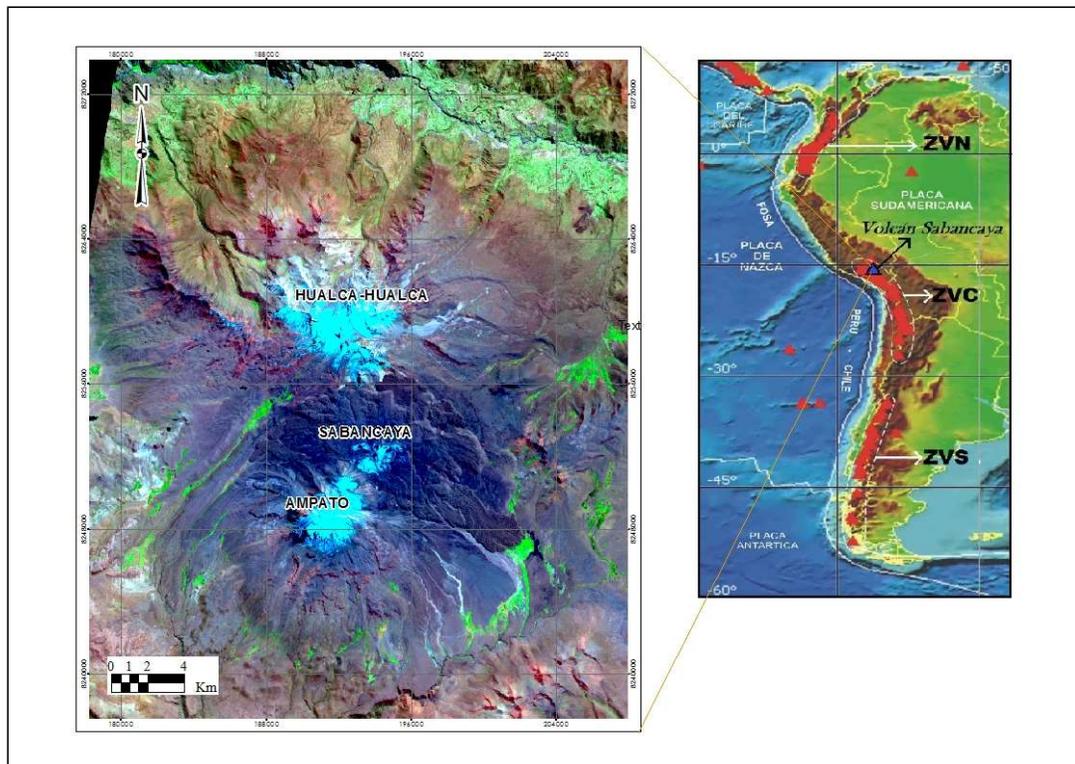


Figura 1: Mapa de Ubicación del Complejo Volcánico Ampato Sabancaya y el Volcán Hualca-Hualca.

2. Método de Potencial Espontáneo

El método del Potencial espontáneo (PE) se basa en medir las diferencias de potencial entre dos puntos del terreno situados sobre la superficie, pues estos potenciales están

asociados a corrientes eléctricas naturales que circulan en el subsuelo, provocados por diversos fenómenos naturales.

En un edificio volcánico, la estructura volcánica es siempre heterogéneo. El edificio se compone de capas alternas de escoria más o menos permeable, lava altamente fracturada, brechas volcánicas, ceniza y capas alteradas. Las capas menos permeables consisten en flujos de lava con una baja densidad de fractura, así como capas extremadamente alteradas (Stimac et al., 2003).

Los fluidos hidrotermales se esparcen por todo el edificio a través de las capas más permeables y preferentemente a través de las fracturas. El flujo de calor de la cámara magmática poco profunda y la intrusión superficial, calientan los fluidos hidrotermales profundos, que hierven y se transforman parcialmente en una fase gaseosa. Estos fluidos calientes y gas se mueven hacia la superficie a lo largo de las fracturas [Johnston et al., 2001].

Una parte del flujo ascendente se convertirá en vapor y será expulsado hacia la atmosfera, el resto dejará de elevarse, estabilizándose en un nivel, antes de descender nuevamente debido a la gravedad. La parte del flujo enfriado será nuevamente calentado a profundidad, formando de esta manera una célula convectiva hidrotermal.

Finalmente, las fuentes de corriente positivas serán generadas en las partes superficiales y las negativas en niveles profundos.

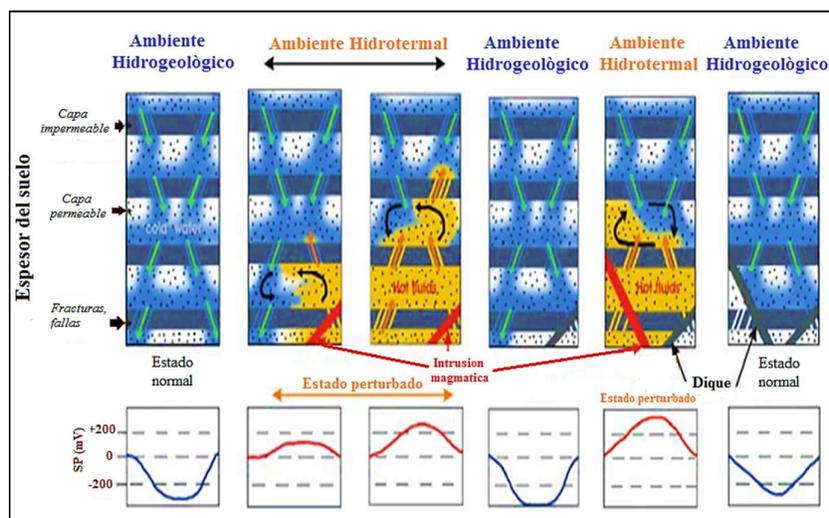


Figura 2: Modelo de la generación de señal SP en un área volcánica en terreno heterogéneo. Modificado de Mauri (2004).

3. Adquisición, procesamiento y resultados

3.1 Adquisición

La adquisición de los datos de Potencial Espontaneo en los volcanes Sabancaya y Hualcahualca comprende datos adquiridos durante los años 2014 y 2015.entre los materiales necesarios utilizados tenemos: Sulfato de Cobre Pentahidratado (CuSO_4), Electrodo Impolarizables conformado por un tubo de PVC en cuyo interior se encuentra un avarilla de cobre que sobre sale al exterior del tubo en la cual se conecta el cable conductor, Carrete para el cable conductor de 300m de largo debidamente aislado, Multímetro de alta Impedancia. (Metrix MX20), GPS Garmin, Libreta de notas, Accesorios (Radios trans-receptores portátiles (walkie-talkies), mapas topográficos).

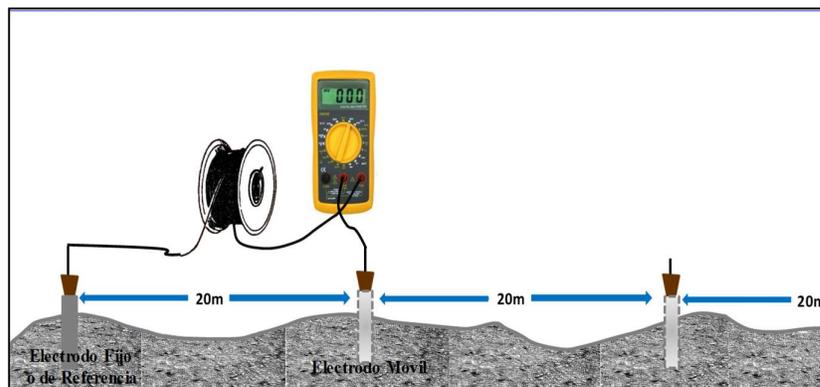


Figura 3: Esquema de medición de Potencial Espontaneo.

3.2 Procesamiento

Los datos de potencial espontaneo obtenidos en campo también llamados, PE_Campo (mV), simplemente nos refleja el valor del Potencial medido en bloques o tramos y que a su vez cada tramo está en relación al electrodo Fijo de dicho tramo medido.

Para hallar el valor verdadero (Valor Final) del Potencial espontaneo en cada uno de los puntos se procede a realizar una suma algebraica de cada tramo con respecto al anterior, de esta manera todos nuestros puntos del perfil quedaran referidas a un punto elegido (Punto Inicial del Perfil). Una vez realizada esta operación para todos los puntos las medidas. Medida, se obtiene el valor de potencial espontaneo para cada punto sobre el cual se hicieron las medidas.

3.3 Resultados

Mediante los 4 perfiles radiales (1-SE 2-E- 3-N, 4-NW) y periféricos tomados alrededor y en la base del Volcán, se ha podido identificar la presencia de una Anomalía 1 (A1) marcada con líneas discontinuas en la zona del Volcán Sabancaya.

Esta anomalía tiene una forma semicircular de aprox. 5 km de diámetro y casi concéntrica que bordea el volcán, dicha anomalía es típico de volcanes activos, tales como los volcanes en el sur del Perú que son de andesíticos. Esta anomalía delimita la zona Hidrogeológica (Fría) en los flancos inferiores de la zona Hidrotermal (Caliente) en el actual cráter activo, la anomalía presenta valores mínimos de -1200 mV al Norte del volcán Sabancaya por donde pasa el Perfil N°3 y va hasta los 80 mV en la cumbre el volcán. Al Nor-Este (NE) de este volcán se aprecia una Anomalía 2(A2), negativa de forma elíptica cuyas medidas son de 6km x 3.5Km eje menor y en dirección NorOeste-SurEste el cual presenta un descenso considerable de los valores de Potencial Espontaneo en este sector del volcán con una amplitud mínima de -2200 mV.

Al Norte (N) del volcán Hualca-Hualca se aprecia una Anomalía (A3). positiva de forma aún no definida porque la adquisición de datos continua para esa zona. Esta anomalía podría estar relacionada con la antigua caldera de colapso ubicada en el flanco Norte del Volcán y que permite el transporte de fluidos a través de la roca o el medio sólido. Esto es evidente por la presencia de las fuentes termales (geiser infernillo) cercanas a la zona.

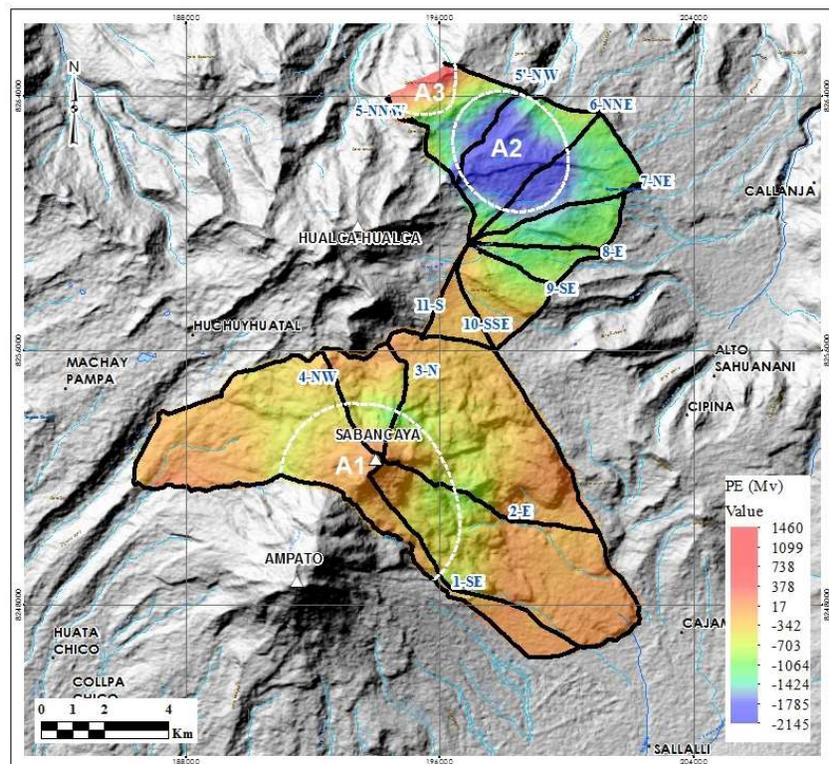


Figura 4: Mapa de Potencial Espontaneo del Complejo Volcánico Ampato Sabancaya y el Volcán Hualca- Hualca, la línea entrecortada de color blanco señala la ubicación de las anomalías.

3.3.1 Gradiente De Potencial Espontaneo

Los resultados del gradiente de potencial pueden ser expresados en gráficos (donde se correlacionan los valores del Coeficiente de Electrofiltración C_e en función de la altura formando los horizontes geoelectricas (Hz, Tz, Lcz, Ucz) casi concéntricos respecto al cono activo del volcán Sabancaya.

La zona hidrogeológica (HZ) conformada por tres horizontes o formaciones geoelectricas Hz1, Hz2, Hz3 y comprende desde los 4500 hasta los 5400 msnm. Siendo Hz1 el que presentan mayor ancho visto en planta y es uniformen los 4 perfiles, mientras que Hz2 presenta mayor con mayor ancho en los perfiles 3 y 4; terminando con Hz3 no siendo visible en el perfil 4.

La zona de transición (TZ), considerada como la zona límite entre la zona hidrogeológica e hidrotermal, situada entre los 4800 y 5500 msnm. Presentando mayor ancho visto en planta en los perfiles 1,2 y 4.

La zona Hidrotermal correspondiente a la parte superior del volcán, comprende desde los 5300 hasta los 5900 msnm. Conformada por dos horizontes (Lcz, Ucz); Una zona de baja convección (Lcz=Low convective zone) y una zona de alta convección (Ucz=Upper Convective Zone) que corresponde a la cumbre del volcán. La Lcz presenta un crecimiento uniforme en los cuatro perfiles, mientras que la Ucz no es visible en el perfil 2.

También podemos apreciar una zona Convectiva (Cz) presente en los 4 perfiles, situada entre 4800 hasta los 5400 msnm, presentando mayor crecimiento en los perfiles 3 y 4.

En la figura 7 se muestra los perfiles 2-4, con sus respectivos valores de potencial, el grafico muestra claramente una característica que ya fue observada en otros volcanes como Misti (2001), Ubinas (2002), Estromboli (2002) por (Finizola Et al., 2004) lo cual presenta una forma W y que es típico de los volcanes activos.

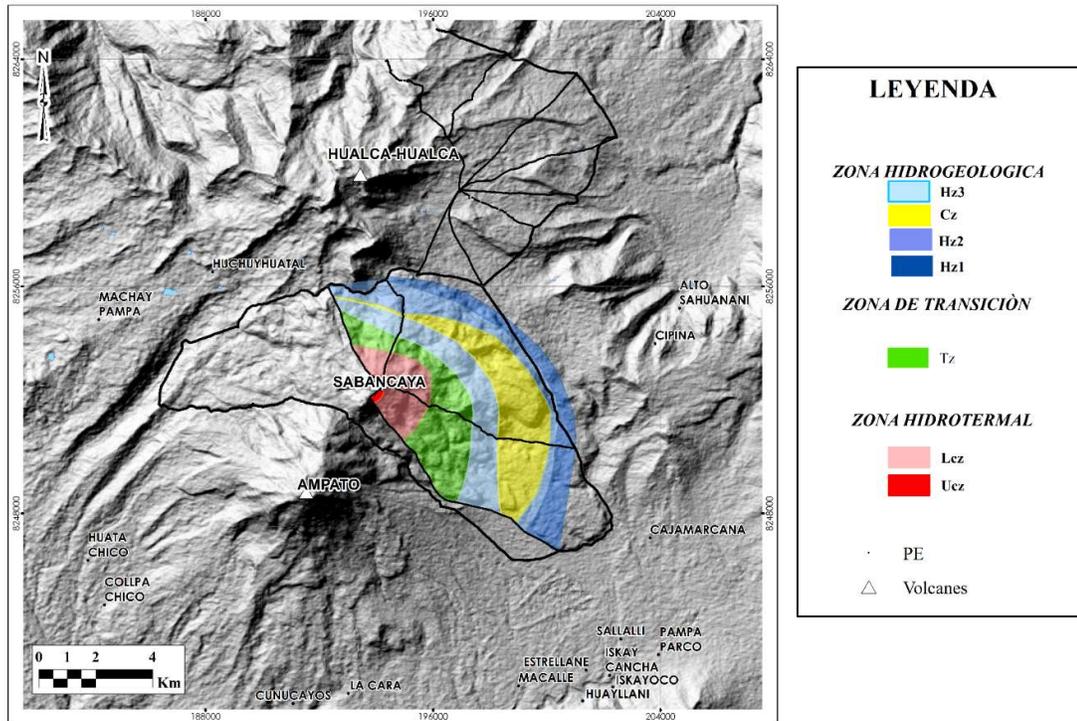


Figura 5: Mapa de Gradientes de Potencial ($Ce = \Delta V/\Delta h$) en el Volcán.

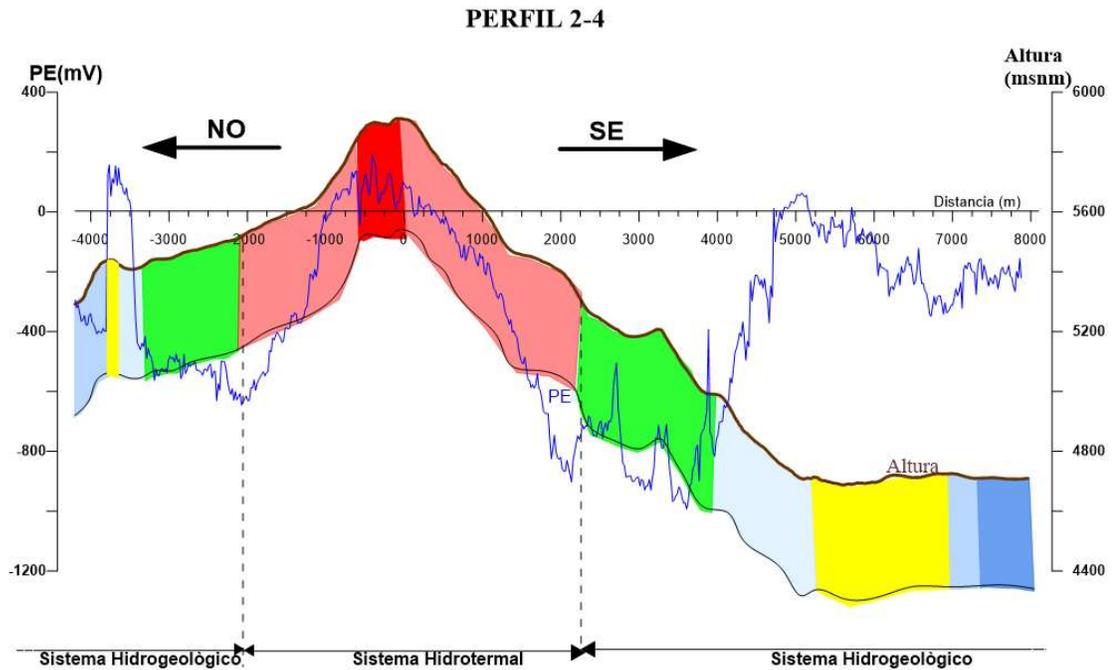


Figura 6: Relación de Potencial espontaneo y altura a lo largo de los perfiles 2 y 4.

En Agosto del 2016 el Instituto geofísico del Perú-sede Arequipa identifico 5 zonas de emisión de fumarolas 2 de las cuales fueron identificadas en la Ucz y las otras 3 se ubican en la Lcz, relacionados estos puntos de emisión a la actividad del sistema hidrotermal.

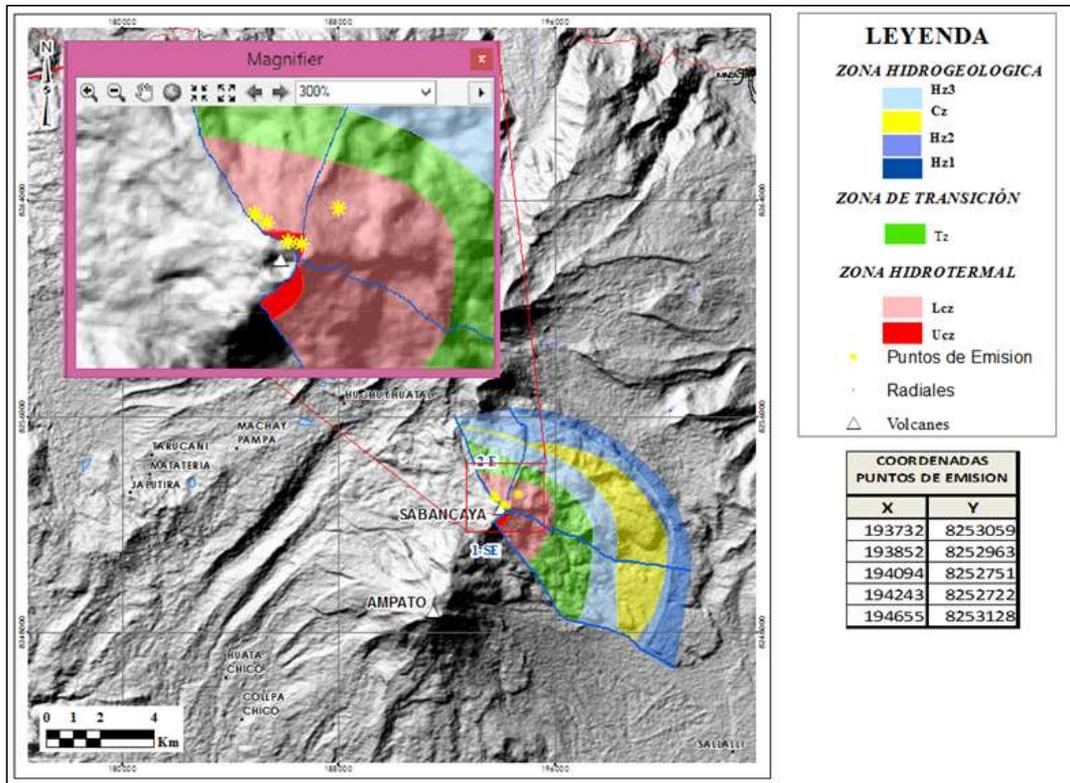


Figura 7: Ubicación de fumarolas (puntos de color amarillo) registradas en agosto del 2016 en el Volcán Sabancaya.

4. Interpretación

4.1 Modelo del sistema hidrotermal del volcán Sabancaya

En el Volcán Sabancaya se han identificado dos zonas con gradientes de potencial positivos. La primera relacionada al sistema hidrotermal propio del volcán y centrada en la cima del actual domo activo de aprox. 5Km de diámetro.

La segunda estaría relacionada con una antigua caldera de colapso (conversación personal con Dr. Finizola) enterrada y cubierta por nuevo material producto de las constantes erupciones , esta caldera sería permeable por donde los fluidos calientes empiezan ascender a lo largo del borde de la misma debido a pequeñas fallas anulares fracturadas, tal como ocurre en otros volcanes como la caldera Concepción de Ataco, la Caldera de Berlín (Salvador), y la Caldera de Xela en Guatemala (Finizola A., 2002).

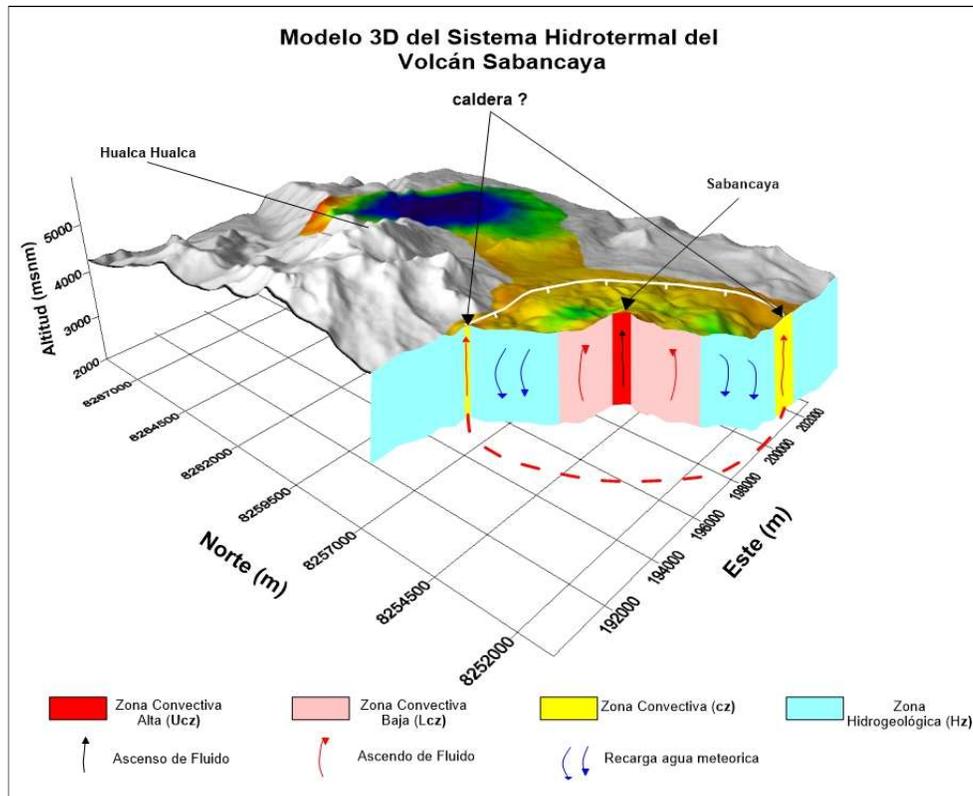


Figura 8: Modelo 3D del Sistema Hidrotermal del Volcán Sabancaya.

4.2 Modelo 3D de la anomalía en el volcán Hualca-Hualca

La anomalía identificada como **A2** y que se presenta al **NE** del volcán Hualca-Hualca, la cual presenta una anomalía negativa de potencial espontaneo y en forma de embudo, probablemente relacionado con la geometría subterránea del piso de una antigua caldera impermeable donde se estaría depositando agua meteórica.

Estudios de Audiomagnetotelurico fueron realizados en el Complejo Volcánico Tenerife (España) como se mencionó anteriormente, específicamente en la caldera de Diego Hernández donde se presenta la anomalía negativa, con el objetivo de determinar el espesor de la zona vadosa (zona no saturada) y ubicar en profundidad la zona saturada que a su vez nos ayuda a visualizar la geometría o forma de la caldera .Pues bien tomando como referencia este estudio se ha elaborado un Modelo en 3D de la anomalía negativa presentada en el Volcán Hualca-Hualca ,ver **figura 10**,se han considerado algunos parámetros del estudio realizado en la caldera diego Hernández y establecer una equivalencia para el volcán Hualca ,para establecer una relación linear de potencial espontaneo en función de la zona vadosa o zona no saturada.

Este modelo cualitativo que nos ayuda a visualizar la forma topográfica de la capa freática la cual sobre yace a una posible antigua caldera impermeable cubierta por erupciones posteriores y que serviría de reservorio para la acumulación de agua meteórica.

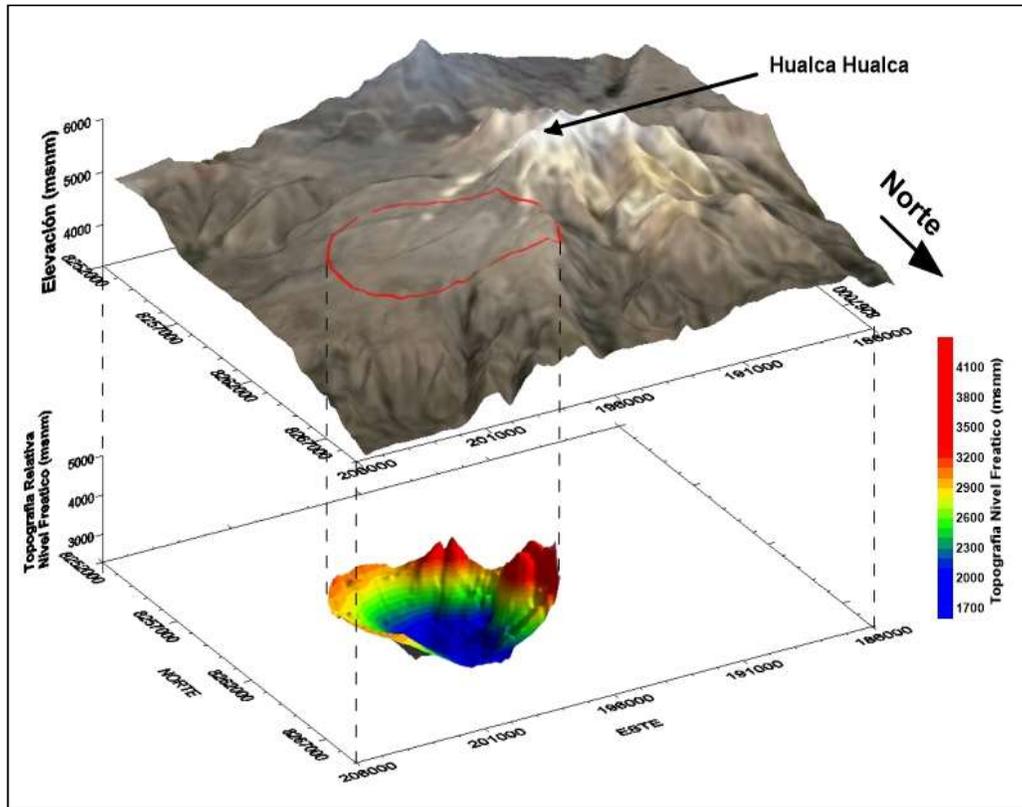


Figura 9: Modelo 3D de la anomalía observada al NE del Volcán Hualca-Hualca

5. Conclusiones

La aplicación del método PE al estudio del complejo Volcánico Ampato-Sabancaya y volcán Hualca-Hualca, nos ha permitido identificar y conocer la extensión y estructura del Sistema Hidrotermal del volcán Sabancaya.

Se identificaron 3 zonas anómalas, la primera identificada como anomalía A1, típica de volcanes activos y relacionada a la zona hidrotermal, La anomalía A2, está relacionada a la presencia de una antigua caldera impermeable, sirviendo como reservorio de la capa freática. También se ha identificado una A3 al Norte del estrovolcán Hualca –Hualca positiva que estaría relacionado a la presencia de una antigua caldera de colapso permeable que permite el transporte de fluidos a través de la roca o el medio sólido.

El modelo 3D elaborado para el volcán Sabancaya además de permitirnos identificar y determinar la dimensión del sistema hidrotermal, nos ha permitido identificar una antigua caldera cubierta por posteriores erupciones a lo largo de la formación del volcán.

El modelo teórico 3D elaborado para el Volcán Hualca-Hualca nos ayuda a visualizar la forma topográfica de la capa freática la cual sobreyace a una posible antigua caldera cubierta por erupciones posteriores.

El método del potencial espontáneo ha demostrado ser de fácil aplicación y presentar resultados favorables, necesarios para ser considerados como una herramienta más en el monitoreo de volcanes.

6. Bibliografía

Aizawa K., Yoshimura R., Oshiman N., Yamazaki K., Uto, Ogawa Y., Tank, W. Kanda, S. Sakanaka, Y. Furukawa, T. Hashimoto, M. Uyeshima, Ogawa, I. Shiozaki, A.W. Hurst (2005). -Hydrothermal system beneath Mt. Fuji volcano inferred from magnetotellurics and electric self-potential. *Universidad de Tokyo-Japón*.

Corwin, R. F., and D. B. Hoover (1979), The self-potential method in geothermal exploration, *p.226 – 245*.

Dana, i. N. (1992). - Contribution de la méthode de polarisation spontanée (PS) à la connaissance structurale et à la surveillance de quelques volcans indonésiens. *Thèse de doctorat, Université Blaise Pascal, Clermont-Fd*.

Finizola A., Jean-Francois Le´nat, Macedo O., Ramos D., Thouret J., Sortino F. (2004). - Fluid circulation and structural discontinuities inside Misti volcano (Peru) inferred from self-potential measurements. *Universite´ Blaise Pascal et CNRS.18p*.

Finizola A., Rici T., Barde Cabusson Stephanie. Chuetze C. Villasante M. (2014). - Hydrothermal system of Central Tenerife Volcanic Complex, Canary Islands (Spain), inferred from self-potential measurements. *82p*.

Fournier Robert O., (2006). - Hydrothermal systems and volcano geochemistry. *P323-p341*.

Revil André, Jardini Abderrahim (2007). -_Self-Potential Method. Primera población. *Universidad de Cambridge.400p*.

Villasante Marcos (2014). -Estudio del Complejo Volcánico Tenerife Isla Canarias, inferido de las medidas de Potencia Espontaneo .*82p*.