

**UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR
FACULTAD MULTIDISCIPLINARIA ORIENTAL
DEPARTAMENTO DE CIENCIAS NATURALES Y MATEMÁTICA
SECCIÓN DE FÍSICA**



TRABAJO DE GRADO

**“MAPEO DE POTENCIAL ESPONTANEO Y TEMPERATURA EN ZONA
HIDROTERMAL EN EL FLANCO ESTE DEL VOLCÁN CONCHAGUA, LA UNIÓN,
EL SALVADOR”**

PRESENTADO POR

JESÚS ALBERTO HERNÁNDEZ ALVARADO

PARA OPTAR AL GRADO DE

LICENCIADO EN FÍSICA

DOCENTE ASESOR

LIC. RAFAEL CARTAGENA

CIUDAD UNIVERSITARIA ORIENTAL, AGOSTO DE 2016

SAN MIGUEL

EL SALVADOR

CENTROAMÉRICA

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR

AUTORIDADES

LIC. LUIS ARGUETA ANTILLÓN

RECTOR INTERINO

MAESTRO. ROGER ARMANDO ARIAS

VICE - RECTOR ACADÉMICO INTERINO

DRA. LETICIA ZA VALETA DE AMAYA

SECRETARIA GENERAL

LICDA. BEATRIZ MÉNDEZ

FISCAL GENERAL INTERINA

FACULTAD MULTIDISCIPLINARIA ORIENTAL

AUTORIDADES

ING. JOAQUÍN ORLANDO MACHUCA

DECANO

LIC. CARLOS ALEXANDER DÍAZ

VICE- DECANO

LIC. FERNANDO PINEDA PASTOR

SECRETARIO INTERINO

LIC. JOSÉ ALCIDES MARTÍNEZ
JEFE DEL DEPTO. DE CC NN Y MATEMÁTICAS

LICDA. BLANCA MIRIAM RAMOS DE ROSALES
COORDINADORA SECCIÓN DE FÍSICA

LIC. RAFAEL CAYETANO CARTAGENA MARTÍNEZ
ASESOR

JURADO CALIFICADOR

LIC. RAFAEL CAYETANO CARTAGENA MARTÍNEZ

LIC. OSCAR ARMANDO CALDERÓN CASTELLANOS.

LIC. CRISTÓBAL HERNÁN RÍOS BENÍTEZ.

**UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR
FACULTAD MULTIDISCIPLINARIA ORIENTAL
DEPARTAMENTO DE CIENCIAS NATURALES Y MATEMÁTICA
SECCIÓN DE FÍSICA**



TRABAJO DE GRADUACIÓN

**“MAPEO DE POTENCIAL ESPONTANEO Y TEMPERATURA EN
ZONA HIDROTERMAL EN EL FLANCO ESTE DEL VOLCÁN
CONCHAGUA, LA UNIÓN, EL SALVADOR”**

PRESENTADO POR

JESÚS ALBERTO HERNÁNDEZ ALVARADO

PARA OPTAR AL GRADO DE

LICENCIADO EN FÍSICA

CIUDAD UNIVERSITARIA ORIENTAL, AGOSTO DE 2016

AGRADECIMIENTOS

Quiero agradecer primeramente a Dios por ser demasiado bueno conmigo y permitirme escalar académicamente y además por brindarme las fuerzas necesarias para haber culminado este trabajo de investigación.

Al Lic. Rafael Cartagena, quien me impulsó en esta área desconocida en un principio para mí, gracias por haberte soportado con tanto que lo hice pensar, pero ahora aquí está el resultado; además le agradezco por haber sido el medio para tener colaboración del GIVUES y obtener ayuda inclusive de eminencias en el área. ¡Gracias Lic. Cartagena! ¡Aprendí geología junto a Ud.!

Al Lic. Efraín Benítez porque él es quien me mencionó por primera vez la palabra “potencial espontaneo” y me ayudó a adentrarme en el mundo de la geofísica, me dio las bases básicas para usar SURFER que era desconocido para mí y aprender a crear mapas e interpretarlos. Y por dejarme establecer contacto con el reconocido geofísico Anthony Finizola. ¡Gracias Lic., quedé fascinado!

A todos los docentes de la Sección de Física, por todos sus conocimientos durante mi estadía estudiantil, por haber soportado los ánimos que muestro a menudo.

Al GIVUES por su colaboración en esta investigación.

A mi madre y Verence que siempre en las buenas y malas han estado conmigo.

A mi hermano Donamin Alvarado y a Ever quienes fueron los que me proporcionaron fondos económicos para comenzar y lograr este triunfo, a Isaí y a todos aquellos que por falta de espacio no menciono en estas líneas.

A Ricardo Elías, a Mirna, a mi abuelo Luis, a Fermín, a Erick, a Kelvin, a Henry, a Josué Eliseo, a Levi, a Daniel, a William, a Gerson, a Melqui, a Nehemias y al hombre más grande: Lisandro, quienes formaron parte en la adquisición de datos ¡Gracias por su ayuda ad honorem!

A quien empezó a ayudarme en este proceso y ya no está. ¡Gracias!

DEDICATORIA

A Dios por darme sabiduría y las ganas para no correrme.

A mi madre Edinora Alvarado y a Verenice por sus ánimos y apoyo.

A todas las personas antes mencionadas, se han ganado un espacio en esta dedicatoria.

También dedico este trabajo a todo aquel que empieza el camino de la Física y que avanzan por ese camino.

¡Adelante el camino es difícil, pero eso es lo que hace a la vida emocionante, porque si fuera todo fácil la vida perdería gracia!

¡El éxito en la vida consiste en siempre seguir hacia adelante!

*“La vida es como montar en bicicleta.
Para mantener el equilibrio hay que seguir pedaleando”*

Albert Einstein.

INDICE GENERAL

RESUMEN

INTRODUCCIÓN.....1

JUSTIFICACION.....3

I. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.1 Planteamiento del problema.....4

1.2 Formulación del problema.....4

1.3 Objetivos de la investigación5

1.4 Hipótesis5

II. MARCO GEOLOGICO

2.1 Antigüedad del territorio Salvadoreño6

2.2 Tectónica y Sismicidad6

2. 2. 1 Criterios para determinar volcanes activos.....12

2.3 Formaciones Geológicas13

2.4 Litología.....16

2.5 Geomorfología16

2.6 Tectónica.....19

2.7 Sismología21

2.8 Generalidades del Volcán Conchagua.....22

2. 8. 1 Geografía y relieve23

2. 8. 2 Antecedentes vulcanológicos y sismológicos.....24

2.9 Elementos estratigráficos del Volcán Conchagua.....25

2. 9. 1 Estratos de San Salvador26

2. 9. 2 Estratos de Cuscatlán28

2. 10 Estratigrafía reciente30

2. 10. 1 Secuencia Conchagua30

2. 10. 2 Secuencia Ocote31

2. 10. 3 Basalto Playitas.....32

2. 11 Fallas geológicas de la región de estudio32

2. 12 Antigüedad del Volcán Conchagua.....38

2. 13 Zona de estudio	38
III. MARCO TEORICO	
3.1 Antecedentes de la investigación	42
3.2 Bases teóricas	44
3.2.1 Geofísica	44
3.2.2 Métodos geoelectricos	45
3.2.3 Propiedades eléctricas fundamentales	45
3.2.4 Potencial Eléctrico natural	62
3.2.5 Potencial Espontáneo.....	77
IV. MARCO METODOLÓGICO	
4.1 Método de SP.....	86
4.2 Tipo de configuraciones	86
4.3 Instrumentación.....	89
4.4 Procedimiento experimental.....	92
4.5 Análisis de Datos.....	94
4.6 Ventajas y limitaciones del método.	94
V. RESULTADOS Y CONCLUSIONES	
5.1 RESULTADOS	98
5. 2 CONCLUSIONES.....	133
VI. RECOMENDACIONES.....	134
VII. BIBLIOGRAFIA	135
VIII. ANEXOS.....	141

INDICE DE FIGURAS

MARCO GEOLOGICO

<i>Figura 2.1: Placas tectónicas de Centroamérica</i>	7
<i>Figura 2.2: Esquema del proceso geodinámico de subducción y la formación del frente volcánico continental</i>	8
<i>Figura 2.3: Distribución de zonas volcánicas terciarias y cuaternarias (Modificada)</i>	11
<i>Figura 2.4: Volcanes activos y zonas volcánicas activas de El Salvador</i>	13
<i>Figura 2.5: Mapa Geológico General de El Salvador (Modificado)</i>	15
<i>Figura 2.6: Mapa Geomorfológico General de El Salvador (Modificado)</i>	18
<i>Figura 2.7: Ejes tectónicos del sistema WNW</i>	20
<i>Figura 2.8: Zonas de enjambres sísmicos ocurridos en el periodo de 1985 a 1999</i>	22
<i>Figura 2.9: Mapa geológico de Volcán Conchagua, de Meyer-Abich</i>	23
<i>Figura 2.10: Fragmento de Mapa Geológico General de El Salvador mostrando la zona del Volcán Conchagua (Modificado)</i>	26
<i>Figura 2. 11: Formación de San Salvador (s2) (Modificado)</i>	27
<i>Figura 2. 12: Formación de Cuscatlán (c3) (Modificado)</i>	29
<i>Figura 2. 13: Alteración de escorias caídas y lavas escoráceas, en laderas de volcán Conchagua</i>	31
<i>Figura 2. 14: Alteración de escorias basálticas, a veces intercaladas por capas de cenizas basálticas y por coladas de basalto olivínico en laderas de volcán Conchagua</i>	32
<i>Figura 2. 15: Tectónica de Centroamérica</i>	33
<i>Figura 2. 16: Ilustración esquemática tridimensional del movimiento del antearco de El Salvador y Nicaragua (Modificada)</i>	34
<i>Figura 2. 17: Esquema tridimensional del movimiento de bloques con tipo de falla de desgarre</i>	35
<i>Figura 2. 18: Representación geométrica del fallamiento tipo librera, común en mecanismos de desgarre</i>	36
<i>Figura 2. 19: Mapa de zona de fallamiento El Carmen – Conchagua</i>	37
<i>Figura 2. 20: Zonas volcánicas terciarias y cuaternarias (Modificada)</i>	38
<i>Figura 2. 21: Vista satelital (Google Earth) de zona de estudio</i>	39

Figura 2. 22: Mapas de ubicación.....	40
Figura 2. 23: Imagen satelital (Google Earth) de Campo Chiquirín.....	41
Figura 2. 24: Imagen satelital (Google Maps) de Campo Chiquirín.....	41

MARCO TEORICO

Figura 3.1: Ley de Ohm.....	49
Figura 3.2: Recorrido de la corriente que penetra al electrodo.....	52
Figura 3.3: Resistividad en Ohm-m (Modificada).....	54
Figura 3.4: Isotropía e anisotropía (Modificada).....	60
Figura 3.5: Capa doble eléctrica (Modificada).....	63
Figura 3.6: Difusión (Modificada).....	67
Figura 3.7: Movimiento molecular en la difusión (Modificada).....	69
Figura 3.8: Modelo de generación de Potencial electrotérmico (Modificado) ...	71
Figura 3.9: Masa de pirita a pocos metros de la superficie (Modificada).....	73
Figura 3.10: Variación del potencial Redox con el tiempo (Modificada)	74
Figura 3.11: Anomalías de Potencial natural (Modificada).....	76
Figura 3.12: Acoplamiento electrocinético en estructuras volcánicas (Modificada).....	81

MARCO METODOLÓGICO

Figura 4.1: Montaje experimental.....	90
Figura 4.2: Sulfato de Cobre (CuSO₄).....	91
Figura 4.3: Partes de los electrodos impolarizables	91
Figura 4.4: Mutitester Keysight-U1271A.....	93
Figura 4.5: Termocupla tipo K.....	93
Figura 4.6: Portadas de los softwares.....	94

RESULTADOS Y CONCLUSIONES

Figura 5.1: Puntos para malla. Google Earth.....	96
Figura 5.2: Puntos para malla y punto de referencia. Google Earth	97
Figura 5.3: Punto de afloramiento de Sistema hidrotermal.....	97

Figura 5.4: Delimitación de punto de afloramiento.....	98
Figura 5.5: Conjunto de Mapas de SP y Temperatura.....	127
Figura 5.6: Mapas de SP y Temperatura, primera medición.....	128
Figura 5.7: Mapas de SP y Temperatura, segunda medición.....	129
Figura 5.8: Mapas de SP y Temperatura, tercera medición.....	130
Figura 5.9: Zona de comparación.....	131

INDICE DE TABLAS

MARCO GEOLOGICO

Tabla 2.1: Enjambres sísmicos más relevantes en zona de fallamiento El Carmen – Conchagua	36
--------------------------------------------------------------------------------------------------------	-----------

MARCO TEORICO

Tabla 3.1: Resistividades de algunos materiales (Modificada).....	55
Tabla 3.2: Valores de constante dieléctrica a 20 °C (Modificada).....	59

RESULTADOS Y CONCLUSIONES

Tabla 5.1: Estación lluviosa: 4 de agosto de 2015.....	99
Tabla 5.2: Estación semi-lluviosa: 16 de septiembre de 2015	108
Tabla 5.3: Estación seca: 15 de enero de 2016	117

RESUMEN

El área de estudio es una cancha de fútbol que está ubicada en el flanco Este del Volcán Conchagua, cerca de la línea de costa, en el sitio conocido como Punta Chiquirín, del Cantón Agua Escondida, municipio de La Unión, cuyas coordenadas geográficas son: 13°17'38.0"N 87°47'12.9"W.

El objetivo de este trabajo es aplicar la técnica geofísica de Potencial Espontáneo (SP) y Temperatura, para luego procesarlas mediante el software: SURFER, y así crear mapas con las anomalías registradas mediante la técnica mencionada, para determinar las dimensiones de un afloramiento del sistema hidrotermal del Volcán Conchagua que es visible en la cancha de fútbol del Caserío Chiquirín.

A partir de los resultados obtenidos se puede inferir los efectos del sistema hidrotermal en la cancha y asimismo generarse una idea del tamaño y la dirección del sistema total en el Volcán Conchagua, que muchos lo consideran inactivo.

Y por último, este trabajo es el primero aplicado en esa zona, por lo que los datos son únicos hasta el momento, pero dan muestras de la atipicidad e inestabilidad de la zona, por lo que se convierte en una pequeña base para futuras investigaciones de carácter científicas.

INTRODUCCIÓN

Desde tiempos prehistóricos las zonas volcánicas han sido pobladas para el aprovechamiento de recursos naturales, tanto por la riqueza mineral de los materiales volcánicos, como por ser excelentes zonas de recarga de acuíferos. Pero los volcanes son también la mejor prueba de que el planeta es dinámico y las erupciones pueden constituir una amenaza para la población.

El Salvador, a lo largo de su historia geológica, se ha caracterizado por una gran actividad volcánica, la cual, está estrechamente ligada a la actividad sísmica. Todos los volcanes salvadoreños que aún se consideran activos, forman parte de la Cadena Volcánica Cuaternaria de América Central, relacionada, con el magmatismo de subducción paralela a la costa del Pacífico.

La información disponible sobre la potencialidad de los peligros volcánicos en nuestro país es casi inexistente, en ello influye directamente la casi nula vigilancia técnica sobre el desarrollo de la actividad de los edificios volcánicos o bien formaciones activas que requieren de especial atención.

Sin embargo, es evidente que la predicción de erupciones volcánicas tiene, en general, un valor limitado, debido al enorme desconocimiento existente sobre los cambios en la vida de los volcanes.

Además a veces los costos que trae consigo un monitoreo volcánico de calidad comporta costos enormes, que muchas veces no es posible sufragar.

En nuestro país existen muchas zonas volcánicas que requieren especial atención debido a su ubicación y al impacto económico y social que se daría al momento de presentarse algún tipo de actividad eruptiva. Ejemplo de ello es el grupo de volcanes del golfo de Fonseca, en el cual está ubicado el puerto de Cutuco, una de las zonas comerciales pesqueras más importante que contribuye al desarrollo socio-

económico de nuestro país, por lo cual resulta más que necesario tener conocimiento sobre la potencial peligrosidad volcánica de la zona.

La presente investigación tiene como objetivo enfocarse principalmente en una de las fumarolas del volcán Conchagua, que evidencian una actividad volcánica en esta zona, se registró la diferencia de potencial espontaneo y temperatura de la zona hidrotermal que aflora justo en la cancha de futbol del Caserío Chiquirín, del municipio de La Unión.

JUSTIFICACION

Si bien en las últimas décadas se han desarrollado numerosos estudios sobre la actividad volcánica de El Salvador, los cuales han proporcionado información de importancia que han permitido desarrollar actividades orientadas a reducir el riesgo, aún no existe una amplia y variada gama de trabajos o proyectos que incluyan la investigación en los últimos quince años de la actividad volcánica del golfo de Fonseca, por lo cual es muy necesario hacer estudios que tengan como objetivo contar con una sistematización de datos que permitan conocer la actividad volcánica de la región.

En el pasado se han efectuado estudios en el volcán de Conchagua, pero no han presentado resultados concretos sobre la actividad volcánica en esta zona y por ende no se ha establecido algún nivel de amenaza de carácter eruptivo que sería una componente con un alto grado de amenaza sobre el puerto de Cutuco, que es una infraestructura muy importante para el país, así como también para los pobladores de las zonas aledañas que podrían resultar afectados.

Esta investigación resultara ser un aporte muy importante a la investigación y al monitoreo volcánico que la UES efectúa en el país desde hace más de 15 años, así como también se estaría dando comienzo a uno de los primeros bancos de datos que ayuden a revelar información concreta sobre la actividad volcánica en la región del golfo de Fonseca mediante una técnica de prospección geofísica.

I. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.1 Planteamiento del problema

El Centro Escolar “Caserío Chiquirín” del Cantón Agua Escondida, jurisdicción de La Unión, cuenta con una población de más de 200 estudiantes, los cuales utilizan una cancha de futbol ubicada justo al par de la escuela, como campo de educación física, pero, en dicho campo existe un punto de afloramiento hidrotermal (fumarola) visible inclusive a cierta distancia, perteneciente al sistema hidrotermal en el flanco este del Volcán Conchagua.

Además, no se tiene información relacionada al comportamiento de este punto de afloramiento del sistema hidrotermal del Volcán Conchagua, lo cual hace necesario que en esta zona se realicen estudios y caracterizaciones geofísicas o químicas, que sirvan de base para posteriores estudios académicos y científicos que puedan contribuir a solucionar problemas relacionados a la actividad del sistema hidrotermal de la estructura volcánica mencionada.

Por tanto a través del método de Potencial Espontaneo (SP) y temperatura, como un primer estudio geofísico, servirá de base para determinar anomalías termales y al mismo tiempo dimensionar el punto de afloramiento del sistema hidrotermal en dicho lugar, para obtener un mapa donde se reflejará el tamaño del sistema en ese punto y así obtener parámetros que sirvan a otras entidades en caso de algún evento de carácter volcánico que ahí pueda generarse.

1.2 Formulación del problema

Debido a que no existen datos, registros, información o estudios de ningún tipo, relacionados al sistema hidrotermal total del Volcán Conchagua, en éste trabajo, se pretende dimensionar un punto de afloramiento activo en el campo de futbol del Caserío Chiquirín, del sistema hidrotermal ubicado en el flanco este del volcán, mediante la aplicación de la técnica de Potencial Espontáneo y temperatura.

1.3 Objetivos de la investigación

Objetivo general

Elaborar un mapa de Potencial Espontáneo (SP) y temperatura (T) del sistema hidrotermal del volcán Conchagua en su flanco este

Objetivos específicos

Dimensionar mediante la técnica de SP y T el afloramiento de este sistema hidrotermal, que se ubica dentro de la cancha de futbol contiguo al Centro Escolar “Caserío Chiquirín”, del Cantón Agua Escondida, Jurisdicción de la Unión.

1.4 Hipótesis

Las variaciones de SP y Temperatura en el punto de afloramiento, demuestran que las dimensiones del sistema hidrotermal son mayores que las del campo de futbol.

II. MARCO GEOLOGICO

2.1 Antigüedad del territorio Salvadoreño

El territorio de El Salvador (20,935 km²) es, desde el punto de vista geológico, relativamente joven teniendo en cuenta que la edad de la Tierra se estima en 4,550 millones de años, ya que las rocas más antiguas que en él se encuentran datan del período Cretácico Superior de la Era Secundaria, es decir, hace aproximadamente 80 ma; sin embargo, en su mayoría se formó en la Era Terciaria, especialmente durante los períodos Oligocénico y Miocénico, esto es, entre 36 y 13 ma atrás, y, en menor medida durante la Era Cuaternaria, sobre todo en el Plioceno (entre 1 ma y 10,000 años atrás).

2.2 Tectónica y Sismicidad

A medida que se mueven las placas, la distancia entre dos puntos situados sobre la misma placa permanece relativamente constante, mientras que la distancia entre puntos situados sobre placas distintas, cambia de manera gradual.

Las placas litosféricas se mueven en relación con las demás a una velocidad muy lenta pero continua.

Este movimiento es impulsado por la distribución desigual del calor en el interior de la Tierra. El material caliente que se encuentra en las profundidades del manto se mueve despacio hacia arriba y sirve como una parte del sistema de convección interna de nuestro planeta.

Los titánicos roces entre las placas litosféricas de la Tierra generan terremotos, crean volcanes y deforman grandes masas de roca en las montañas.

Aunque el interior de las placas puede experimentar alguna deformación, las principales interacciones entre las placas individuales se producen a lo largo de sus *bordes*.

Además, las placas tienen tres tipos distintos de bordes:

1. Bordes divergentes (*bordes constructivos*): donde dos placas se separan, lo que produce el ascenso de material desde el manto para crear nuevo suelo oceánico

2. Bordes convergentes (bordes destructivos): donde dos placas se juntan provocando el descenso de la litosfera oceánica debajo de una placa superpuesta, que es finalmente reabsorbida en el manto, o posiblemente la colisión de dos bloques continentales para crear un sistema montañoso

3. Bordes de falla transformante (bordes pasivos): donde dos placas se desplazan lateralmente una respecto de la otra sin la producción ni la destrucción de litosfera.

Cada placa está rodeada por una combinación de estos tres tipos de bordes de placa.

La fuente principal de sismos que afecta a El Salvador es la fosa de subducción, localizada a unos 125 Km. de la costa, en donde la placa de Cocos empieza a sumergirse debajo de la placa del Caribe, llegando hasta profundidades arriba de 300 Km., por debajo del istmo centroamericano (Figura 2.1)

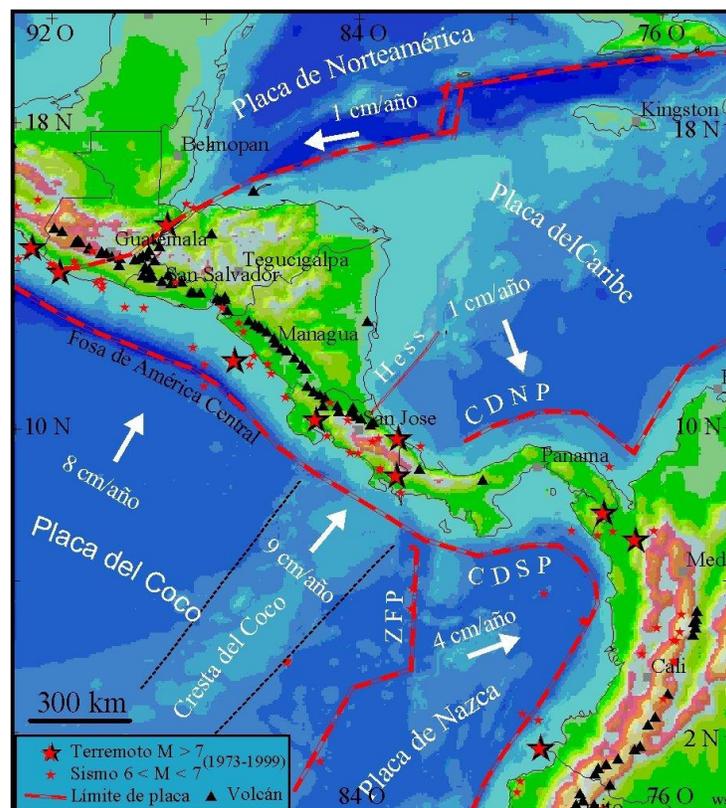


Figura 2.1: Placas tectónicas relacionadas con la sismicidad en Centroamérica
Fuente: Tomado de W. Strauch et al. Estudio de la Microzonificación Sísmica de Managua (1997-2000). Informe final. 2000.

En los lugares donde las placas se separan se encuentran las dorsales, una especie de cadenas de volcanes, donde se genera nueva corteza terrestre por la salida de magma al exterior, y suelen encontrarse en el fondo de los océanos. En cambio en las zonas donde las placas convergen, como en el caso de Centroamérica y Sudamérica, la placa más densa y pesada (corteza oceánica) se hunde por debajo de la menos densa (corteza continental), donde se encuentran las zonas de subducción. América Central se encuentra ubicada en una región donde la interacción de la triple convergencia de las placas de Norteamérica, Cocos y del Caribe, está acompañada por actividad volcánica y alta sismicidad superficial, intermedia y profunda, contribuyendo a que se forme el arco volcánico a lo largo de unos 1500 kilómetros desde Guatemala hasta Panamá.

En El Salvador, la placa de Cocos subduce por debajo de la placa del Caribe. La corteza de la placa de Cocos al estar sometida a altas temperaturas y presiones mientras se hunde, se va fundiendo integrándose al manto y provocando la formación de magma (Figura 2.2)

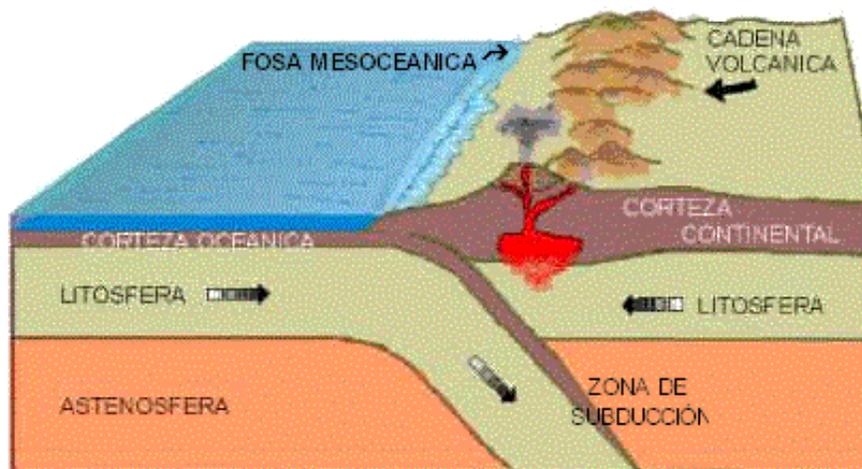


Figura 2.2: Esquema del proceso geodinámico de subducción y la formación del frente volcánico continental asociado a la fusión parcial de la Placa de Cocos (oceánica) que se introduce debajo de la Placa Caribe (continental).

Fuente: Origen del vulcanismo en El Salvador. Archivos de Vulcanología. SNET, 2003

El magma, resultado de la fusión de las rocas, asciende a través de fracturas hasta alcanzar la superficie, donde se producen las erupciones volcánicas y la formación de los conos volcánicos. La Cordillera volcánica en El Salvador es resultado de este proceso.

Este fenómeno no ocurre solo hoy en nuestros días, o durante los últimos años o el siglo pasado, sino que lleva miles de años produciéndose, por lo que antes de los volcanes que conocemos hoy ya existían otros y antes de estos probablemente otros. De hecho, prácticamente todo el subsuelo del país (más de un 90%) está formado por materiales volcánicos. Por ejemplo, en los valles centrales y la Cordillera Norte, encontramos cerros como el Cacahuatique en Morazán y la Sierra de Guazapa en el departamento de San Salvador que los geólogos han identificado como antiguos volcanes.

Básicamente, el vulcanismo en el país se puede clasificar en dos grandes grupos:

1. Vulcanismo Antiguo o Extinguido

Está constituido por una cadena de edificios volcánicos de composición generalmente andesítica y cuyas elevaciones oscilan entre los 700 y 1000 metros sobre el nivel del mar (m.s.n.m.), se encuentran hacia el norte del país conformando la unidad geomorfológica conocida como Cadena Interior, arriba descrita. Se trata de edificios muy antiguos (aproximadamente 1-2 Ma) que no presentan actualmente ninguna actividad y que en varios casos están muy erosionados y sus materiales con un grado de descomposición alto, a tal grado que no son reconocidos como volcanes por la población. Ejemplo de estos son el Cerro de Guazapa en el Departamento de San Salvador y el Volcán de Cacahuatique en el Departamento de Morazán.

2. Vulcanismo Joven o Activo

Está conformado por una cadena de edificios volcánicos que se encuentran ubicados en la unidad geológico-tectónica de la Fosa Central, sobre el tercer eje tectónico del sistema de fallas WNW. Las características generales de estos edificios se detallan a continuación:

- a) Se trata de edificios estrato-volcánicos cuya elevación está entre 1900 y 2350 m.s.n.m.
- b) Presentan erupciones de tipo Estromboliano (y a veces vulcaniano) con lava cuya composición va desde básica hasta ácida (basaltos hasta riolitas).
- c) En su mayoría, son volcanes activos que han presentado períodos eruptivos en tiempos históricamente recientes (siglo XVI hasta la fecha); dichas erupciones han emergido por fisuras con dirección noroeste-sureste.
- d) Hidrogeológicamente, constituyen las zonas con la permeabilidad más alta, lo que las convierte en las principales zonas de recarga de acuíferos del país
- e) Varios presentan zonas de anomalías hidrotermales (fumarolas)
- f) En sus cercanías se encuentran los principales centros urbanos del país

En la Figura 2.3 se muestra la distribución de ambos tipos de vulcanismo

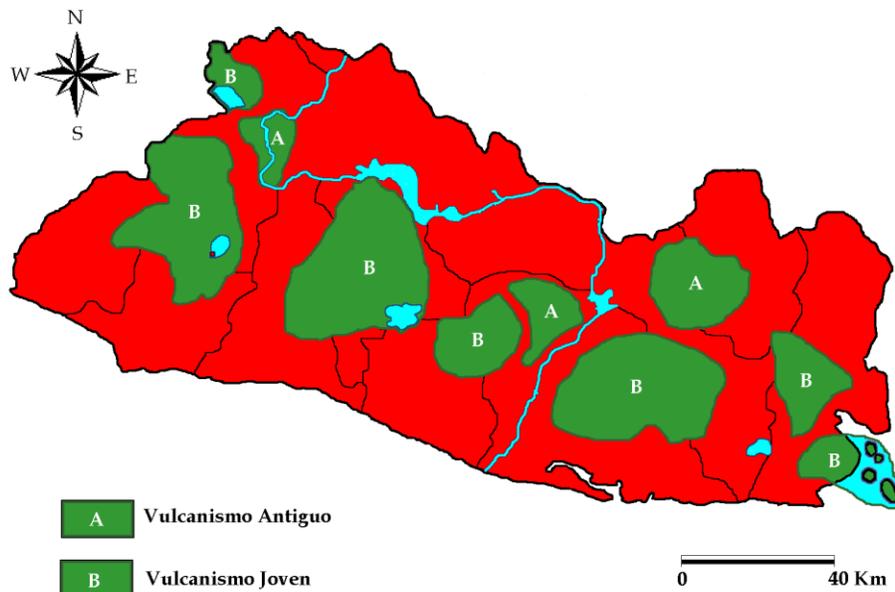


Figura 2.3: Distribución de zonas volcánicas terciarias y cuaternarias (Modificada)

Fuente: Tomado de Ministerio de Cultura y Comunicaciones. Geografía de El Salvador, Primer Tomo. Dirección de Publicaciones e Impresos, San Salvador, 1986.

En resumen, la Cadena Volcánica Activa de El Salvador está conformada por 23 edificios volcánicos (incluyendo depresiones volcánicas que son ocupadas por lagos) que han presentado períodos eruptivos en tiempos históricos, o bien, con evidencias de estar activos (microsismicidad o fumarolas); además se han identificado 5 zonas vulcano-tectónicas que poseen alta microsismicidad y estructuras asociadas al vulcanismo, tales como lagos cratéricos

Es necesario señalar que la cadena volcánica activa forma parte del *Frente Volcánico Centroamericano*, conformado por una serie de volcanes activos que conforman una franja de unos 20 km de ancho por 1100 km de largo que va desde Guatemala hasta Panamá. A su vez, este frente volcánico forma parte de una cadena mayor de volcanes que se extiende por todo el continente americano, y que es paralela a la costa del Océano Pacífico. Finalmente, esta cadena es una parte del denominado *Cinturón de Fuego del Pacífico*, el cual consiste en una serie de volcanes que se extiende desde Nueva Zelanda en el Pacífico Sur, hasta las islas de la Antártida Argentina, circundado casi en su totalidad al Océano Pacífico.

El segmento del Frente Volcánico Centroamericano donde se encuentran los volcanes activos tiene una orientación de N 74° W. En dicho segmento la corteza continental tiene un grosor estimado entre 32 y 40 km y el ángulo con que la Placa de Cocos subduce a la del Caribe oscila entre los 45 y 55° (Chesner, C.A.; Pullinger, C.R.; Escobar, C.D. Physical and chemical evolution of San Miguel Volcano, El Salvador)

2. 2. 1 Criterios para determinar volcanes activos

Según el Smithsonian Institution se entiende por volcán activo aquel que presenta o ha presentado algún tipo de actividad eruptiva durante el Holoceno, es decir durante los últimos 10.000 años.

En el marco de este criterio y en base a la experiencia de campo de diferentes investigaciones geológicas, se han definido en El Salvador criterios específicos para determinar los volcanes activos y clasificarlos según los diferentes rasgos de actividad que presentan.

En El Salvador los criterios para la determinación de actividad volcánica son:

- Se tiene registros históricos (últimos 500 años) y/o prehistóricos de erupciones.
- Se trata de zonas con antecedentes de enjambres sísmicos y hay presencia de fumarolas y fuentes termales.
- La estructura y morfología volcánica está bien conservada.
- Presentan un cráter bien conservado y en sus laderas se identifican depósitos de rocas de erupciones pasadas.

En El Salvador los volcanes peligrosos por sus antecedentes sísmicos, eruptivos, y riesgo que representan para las personas e infraestructura, son los siguientes: Santa Ana, Izalco, San Salvador, Ilopango, San Vicente, y San Miguel; de ellos El Santa Ana, Izalco, San Salvador, San Vicente, Tecapa y San Miguel presentan actividad fumarólica. Los volcanes Ilopango, Complejo San Vicente - Apastepeque, Complejo Usulután - Tecapa, San Miguel y Conchagua, se caracterizan por su micro sismicidad relativamente alta y frecuente

La zona de Las Cruces, Chalchuapa, Candelaria de la Frontera y San Diego, al occidente del país, así como Apastepeque en San Vicente, y la zona de las islas del Golfo de Fonseca, son consideradas zonas vulcano- tectónicas activas.

El Volcán Conchagua es un estratovolcán con una altura de 1250 msnm, y el tipo de roca predominante es andesita hiperstena; según el catálogo de volcanes, se encuentra entre los volcanes activos (Figura 2.4) del mundo, que presentan actividad sísmica, fumarólica y fuentes termales, pero no tiene registro histórico de erupciones.

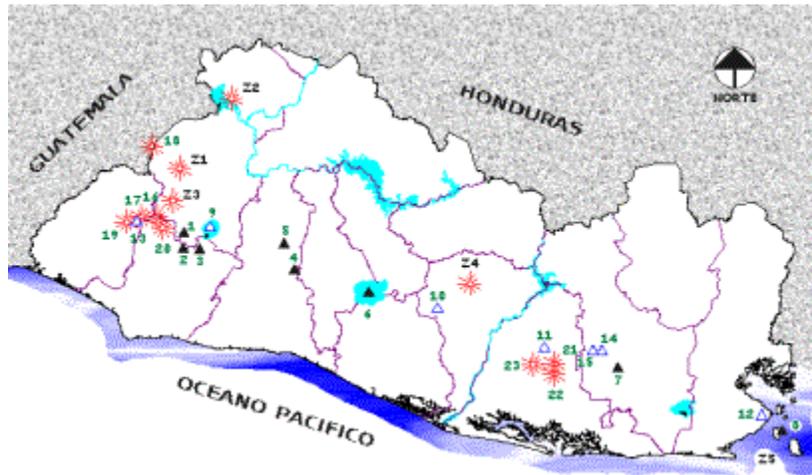


Figura 2.4: Volcanes activos y zonas volcánicas activas de El Salvador

Fuente: Tomado de Carlos Demetrio Escobar. Volcanes activos de El Salvador. Servicio Geológico de El Salvador. Área de Vulcanología, SNET. 2002

2.3 Formaciones Geológicas

Las diferentes formaciones geológicas, es decir, las etapas en que se ha constituido el territorio nacional reciben el nombre del lugar donde se han encontrado mejor representados y son, en orden de antigüedad las siguientes:

- ⊗ Formación Metapán: constituido básicamente por calizas y areniscas del Cretácico Superior-Terciario Inferior.
- ⊗ Formación Chalatenango: rocas volcánicas cuya composición va desde ácidas a básicas, se formaron durante el Oligoceno y Mioceno.
- ⊗ Formación Morazán: se conforma de rocas ígneas intrusivas (plutónicas) de carácter intermedio (dioritas) que datan del Terciario Superior, en los períodos Mioceno y Plioceno (13-1 Ma)

- ⌘ Formación Bálsamo: abarca los períodos Mioceno y Plioceno, y está conformada por rocas volcánicas de intermedias a básicas. Corresponde a la Cadena Costera
- ⌘ Formación Cuscatlán: se constituye de rocas volcánicas de carácter ácido hasta intermedio, períodos Plioceno y Pleistoceno (13 Ma-10,000 años). Comprende al vulcanismo antiguo
- ⌘ Formación San Salvador: está formado por rocas volcánicas de composiciones que varían desde ácidas a básicas. Abarca los últimos 100,000 años hasta la actualidad (períodos Pleistoceno y Holoceno) y corresponde al vulcanismo reciente

En las figura 2.5, se muestra el mapa geológico general de El Salvador.

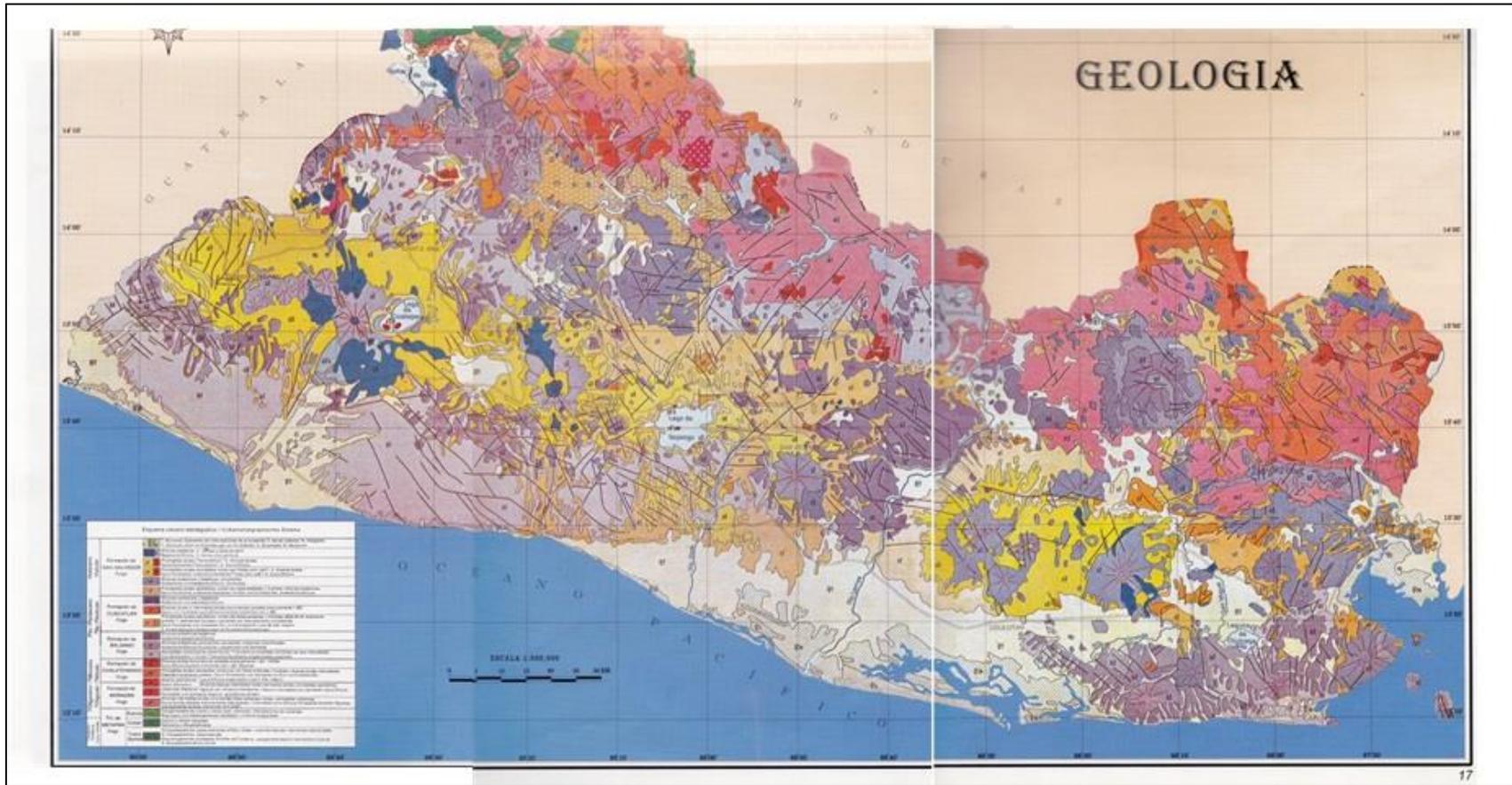


Figura 2.5: Mapa Geológico General de El Salvador (Modificado)

2.4 Litología

Desde el punto de vista litológico, más del 90% de las rocas que conforman el territorio salvadoreño son rocas ígneas extrusivas (volcánicas) cuyas composiciones químicas y mineralógicas corresponden en su mayoría con basaltos y andesitas, estando presentes en menor proporción dacitas y riolitas. El resto son rocas sedimentarias marinas, principalmente calizas, conglomerados de cuarzo y areniscas, y se encuentran al norte de los departamentos de Santa Ana y Chalatenango. Finalmente, también existen en menor medida rocas sedimentarias orgánicas (lignitos y diatomitas) en depósitos dispersos por todo el país y rocas ígneas intrusivas (monzonitas, granitos, granodioritas y dioritas) en el norte del departamento de Morazán.

2.5 Geomorfología

Geomorfológicamente se han considerado las siguientes unidades geológico-tectónicas, ordenadas de sur a norte:

- ⌘ Planicie Costera: abarca aproximadamente un 12% del territorio nacional y está constituida básicamente por depósitos aluviales cuaternarios
- ⌘ Cadena Costera: comprende a la Formación Bálsamo y constituye también un 12% del país
- ⌘ Fosa Central: también recibe el nombre de Graben Central, abarca un 20% del territorio y su importancia estriba en que sobre esta yace la Formación San Salvador, en la cual están asentadas las principales ciudades del país y además también están ubicados los edificios volcánicos que aún presentan actividad
- ⌘ Cadena Interior: también abarca un 20% del país, y comprende los volcanes considerados inactivos. También recibe el nombre de Montaña Interior y corresponde a la Formación Cuscatlán.

- ⌘ Fosa Interior: comprende un 5% del territorio y está constituida por sedimentos fluviales y lacustres
- ⌘ Montaña Fronteriza: abarca un 25% del país y comprende a las Formaciones Morazán, Chalatenango y Metapán

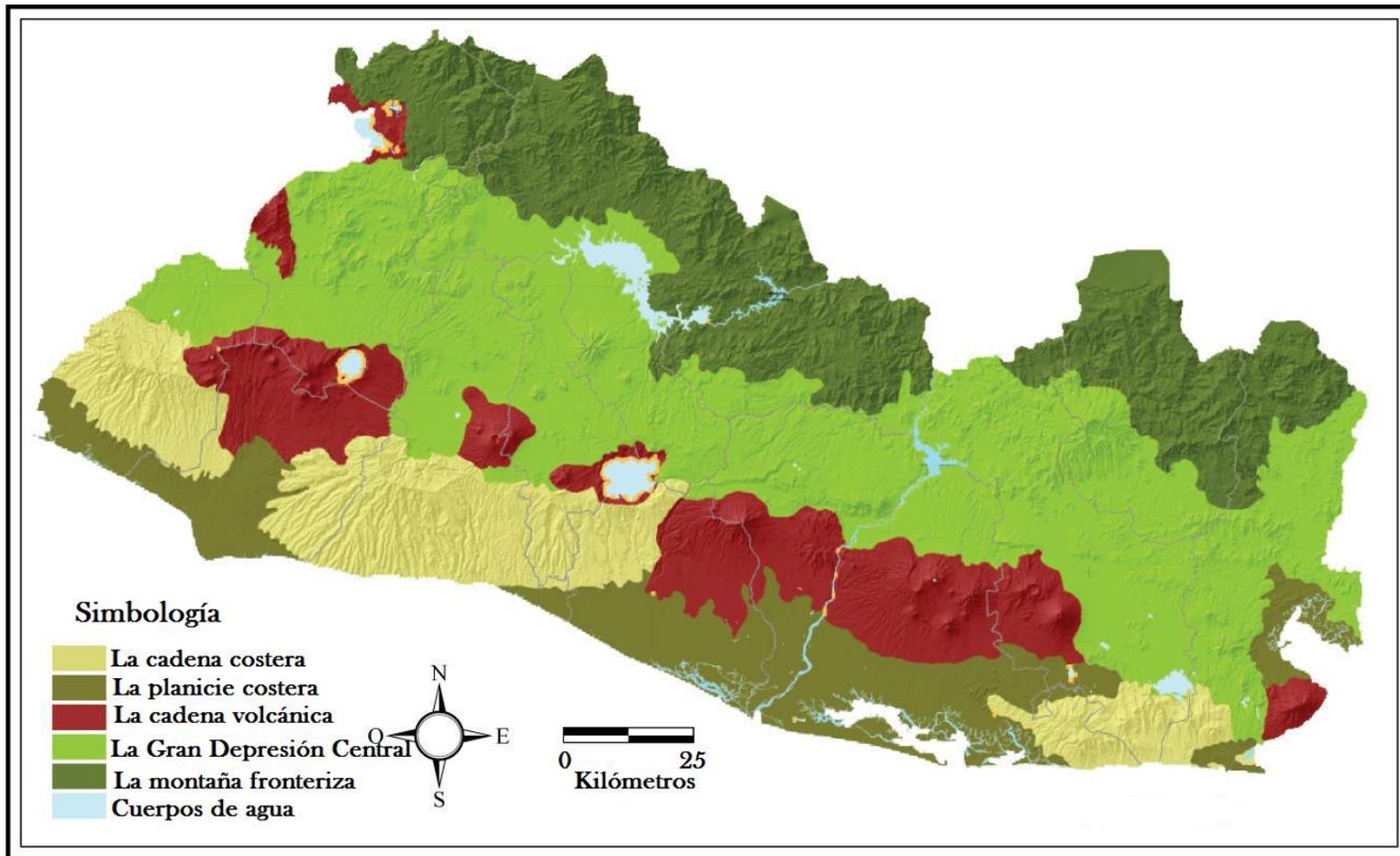


Figura 2.6: Mapa Geomorfológico General de El Salvador (Modificado)

Fuente: Tomado de Archivos HTML de Plan Nacional de Gestión Integrada del Recurso Hídrico en El Salvador (PNGIRH), 2014

2.6 Tectónica

El Salvador posee una tectónica muy compleja, debido que se encuentra en la zona donde la Placa Litosférica de Cocos subduce (es decir, desliza por debajo) a la Placa del Caribe, lo cual produce toda una serie de esfuerzos en la corteza continental del país, haciendo que prácticamente la totalidad del territorio nacional se encuentre atravesada por varios sistemas de fallas que se sobreponen; el primero de los cuales tiene dirección WNW (oeste-noroeste), es el más importante de todos ya que se extiende por todo el país, conformando cinco ejes tectónicos, los cuales se detallan a continuación:

1º) Se encuentra al sur de la Montaña Fronteriza y no presenta ninguna clase de sismicidad ni vulcanismo.

2º) Sobre este se encuentra la Cadena Interior. Actualmente no presenta ni sismicidad ni vulcanismo.

3º) Se trata del eje tectónico más importante, ya que la Fosa Central fue originada por las dislocaciones de este hace aproximadamente 2 Ma; además, sobre el mismo se encuentra la Cadena Volcánica Activa. La actividad sísmica es continua con hipocentros cuya profundidad promedio es de aproximadamente 10 km

4º) Este se encuentra a unos 25 km de la costa. Presenta una actividad sísmica muy marcada (de hecho, la mayoría de sismos registrados en el país se originan en esta región) con hipocentros a una profundidad promedio aproximada de 100 km.

5º) Este eje tectónico constituye la llamada “Fosa de Mesoamérica”, la cual está ubicada a una distancia entre 100 y 200 km de la costa. Corresponde a la zona de subducción entre las arriba anotadas Placas Litosférica de Cocos y Del Caribe. Presenta poca actividad sísmica

A partir de esta información se puede deducir que tanto la actividad sísmica como la volcánica han ido sufriendo con el tiempo un gradual desplazamiento hacia el sur.

A continuación, en la Figura 2.7 se presenta el mapa simplificado de estos ejes:

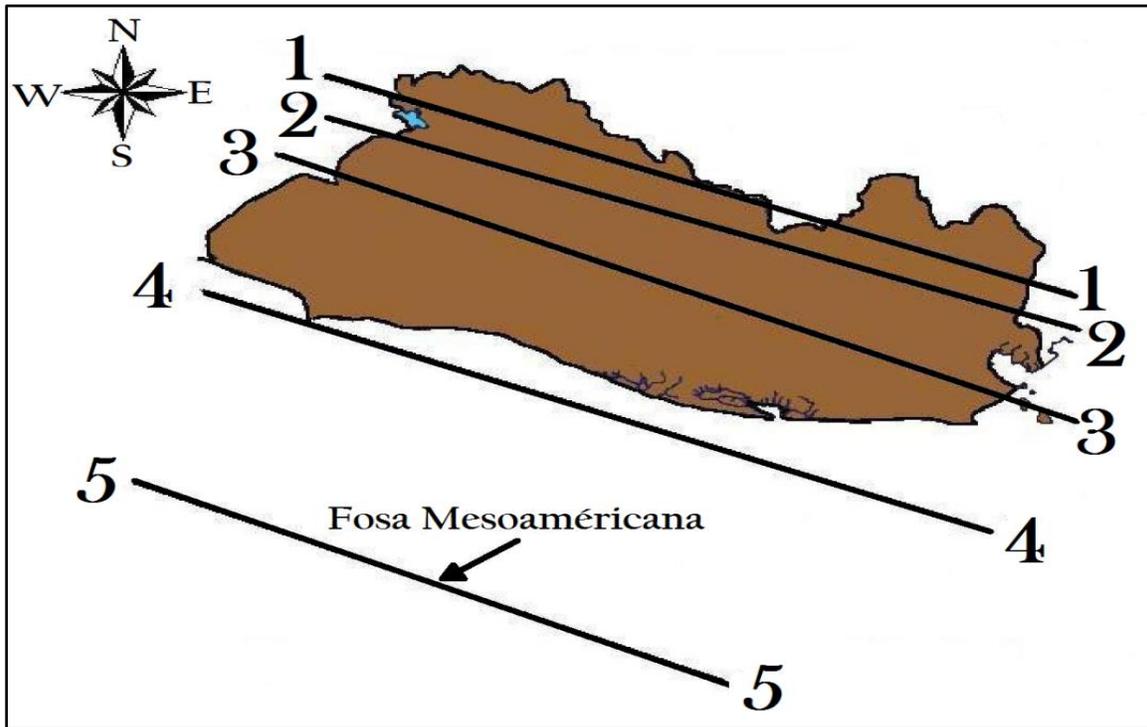


Figura 2.7: Ejes tectónicos del sistema WNW. A través de tiempo geológico, la actividad de este sistema se ha ido desplazando hacia el sur.

Fuente: Tomado de Ministerio de Cultura y Comunicaciones. Geografía de El Salvador, Primer Tomo. Dirección de Publicaciones e Impresos, San Salvador, 1986.

El segundo sistema de fallas tiene una dirección NNW (norte-noroeste), y se encuentra superpuesto al tercer eje del sistema WNW en el cual, como se indica arriba, se encuentra la Cadena Volcánica Activa, y su importancia radica en que todas las erupciones volcánicas registradas en tiempos históricos (S. XVI en adelante) han presentado efusión de lava por fallas pertenecientes a este sistema, como ejemplo se puede citar la erupción del Volcán de San Salvador en 1917, en donde la lava tuvo salida por una falla con orientación NWN con rumbo a

Quezaltepeque. La actividad sísmica de este sistema es muy notable, ya que varios de los sismos de alcance local que han sido registrados obedecen a movimientos de las fallas del sistema, ejemplo de esto son los terremotos que ocurrieron en Jucuapa y Chinameca en 1951 y en San Salvador en 1986.

Existe un tercer sistema de fallas con orientación NNE (norte-noreste), el cual no es muy evidente, ya que se encuentra cubierto por diversos materiales y fallas de los otros sistemas, y, al menos actualmente, no presenta ninguna actividad ni sísmica ni volcánica.

2.7 Sismología

Según un estudio del Departamento de Investigaciones Sismológicas del Ministerio de Obras Públicas de El Salvador, en el período comprendido desde 1986 a 1999, ocurrieron 45 enjambres sísmicos, a partir de los cuales se identifican 8 zonas principales de mayor actividad sísmica, dichas zonas se muestran a continuación en la Figura 2.8

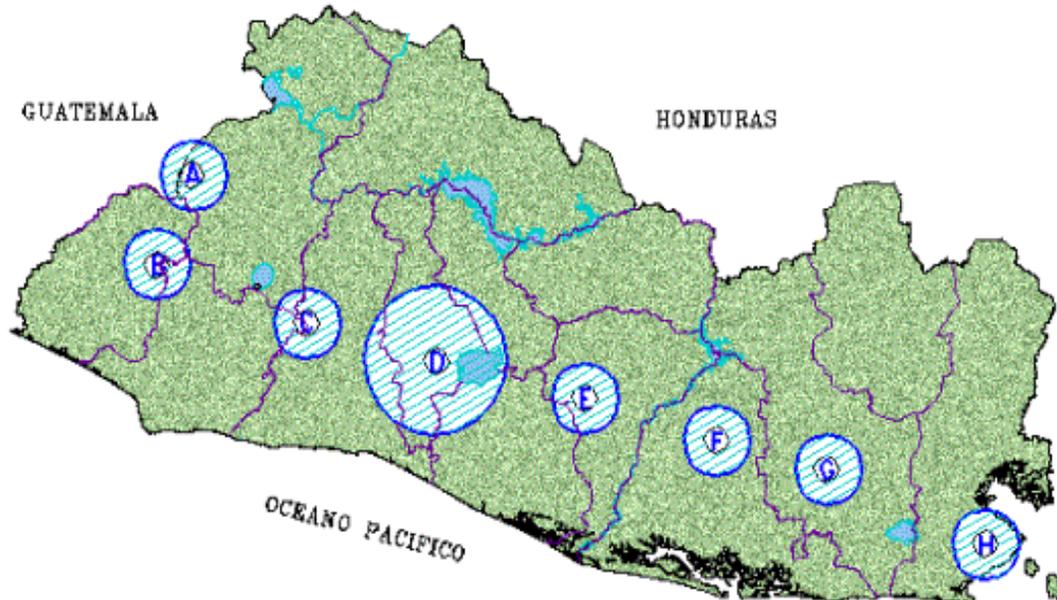


Figura 2.8: Zonas de enjambres sísmicos ocurridos en el periodo de 1985 a 1999. Zona A: Candelaria de la frontera, San Lorenzo. Zona B: Juayúa, Sonsonate. Zona C: Valle de Zapotitán. D: Volcán de San Salvador-Lago de Ilopango. Zona E: San Vicente. Zona F: Berlín-Santiago de María. Zona G: Volcán de San Miguel y Zona H: Conchagua

Fuente: Archivos de Sismología, Geología, SNET, HTML

2.8 Generalidades del Volcán Conchagua

Información geológica detallada sobre este macizo volcánico es casi inexistente, dado que al parecer históricamente no posee rasgos que describan actividad volcánica, la mayoría de información respecto al Conchagua es de tipo turística y la geológica que existe está en los archivos del SNET.

Meyer-Abich elaboró un croquis de este volcán (Figura 2.9) que considero como inactivo. Más sin embargo por la teoría expuesta respecto a los criterios para considerar un volcán activo o inactivo, diremos que es un estrato volcán activo.

Roy en su artículo titulado: “Estado actual de los volcanes de Centro América”, deduciendo sobre la actividad e inactividad de los volcanes menciona los términos: “durmiente” y también “la actividad es enteramente fumarólica” (Roy, 1956); por tanto del volcán Conchagua puedo argumentar que es un volcán activo, en fase durmiente y con actividad enteramente fumarólica.

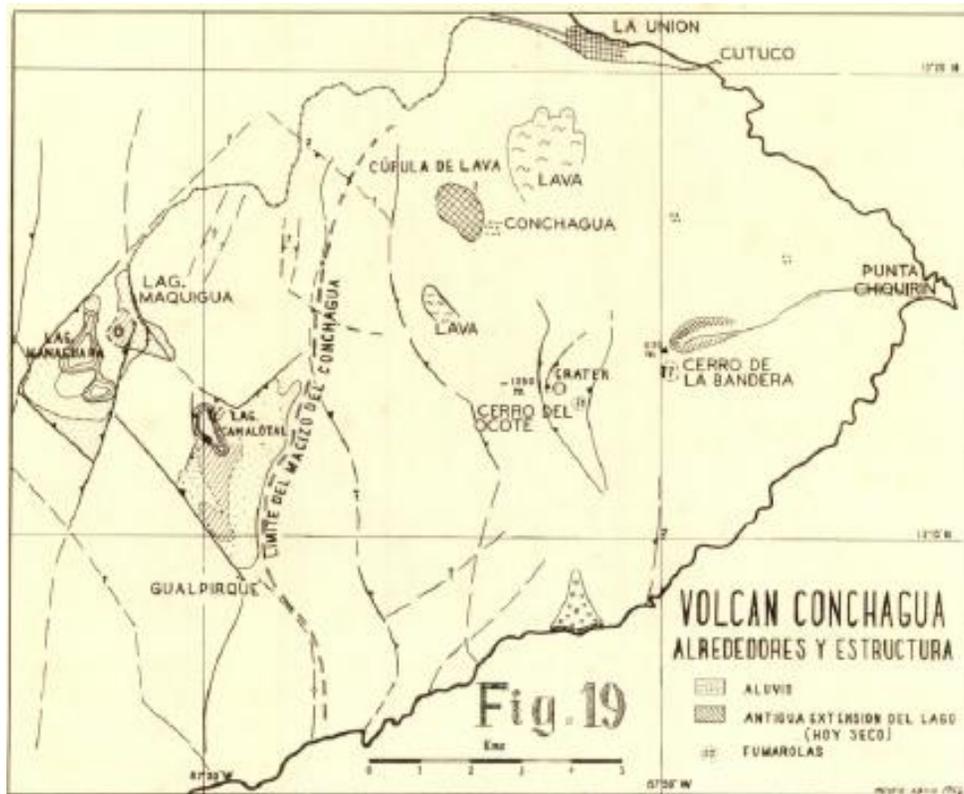


Figura 2.9: Mapa geológico de Volcán Conchagua, elaborado por Meyer-Abich
 Fuente: Tomado de Helmut Meyer-Abich, *Los volcanes activos de Guatemala y El Salvador (América Central)*, 1956.

2. 8. 1 Geografía y relieve

Geográficamente el volcán Conchagua se localiza en departamento de La Unión. Dista 4.6 Km. de la cabecera departamental. Presenta el Conchagua una elevación de 1,243 msnm. El volcán se compone de una cima de dos picos con 2.3 Km de separación: Cerro del Ocote a 1,50 msnm., y Cerro de la Bandera a 1,170 msnm., situado al extremo sur-sureste del Graben Central. Se trata de un volcán con un relieve que demuestra claramente los efectos intensos de la erosión.

El cerro de la Bandera presenta un barranco en forma de cuchara, que no tiene rumbo WNW sino ENE, en dirección a la Punta de Chiquirín (Meyer-Abich, 1956), y este pico es el más antiguo de las dos cimas.

Superficies de laderas manifiestan lateritización de coladas lávicas de múltiples generaciones. Cráteres se encuentran en el estado de erosión y se identifican por anillo de escoria soldada

Ambos volcanes revelan el grado avanzado de perturbación por movimientos tectónicos. Zona de fisuras que representan una falla de 2 Km de anchura pasa en la dirección NOE-SE por las faldas SOE de Cerro Ocote, cerca del cráter, luego cambia su dirección en N-S y por su forma circular quizás se puede juzgar por el sistema de fallas caldéricas. Esa falla, bien conocida, manifiesta temblores sísmicos recientes. Hacia el N la falla esta cubierta por depositos volcano-fluviales. Al pie del volcán, las planicies de la inclinación moderada se formaron sobre de superficies de coladas de lavas andesíticas. Lavas meteorizadas se extienden hasta las costas del Golfo de Fonseca. Solamente en NOE las coladas lávicas yacen sobre del material redepositado, fluvial, epiclástico y piroclástico de la secuencia La Unión. Al E y SE del volcan, se observa la perturbación de lavas por tectónica reciente.

Meteorización laterítica, por lo general, afecta las porciones exteriores de flujos lávicos y por lo tanto podemos encontrar en varios lugares los bloques esféricos-núcleos relativamente frescos, mientras que el resto de rocas se convirtió en arcilla roja.(Hradecký, 2003)

2. 8. 2 Antecedentes vulcanológicos y sismológicos

Según Montessus de Ballore en 1884, en base a datos de otros autores, detalla en su obra titulada “Temblores y Erupciones Volcánicas en Centro-América”, que este volcán presentó erupciones en 1522 y 1688.

Grebe (1956), en su visita de campo de julio de 1954, describe una fumarola con emanación de vapor seco y débil al pie sur-este del volcán de Conchagua en la ribera sur de la bahía de La Playita, otra fuente termal en la Península Chiquirín

El Dr. Helmut Meyer-Abich en 1956, en su trabajo titulado: “Los volcanes activos de Guatemala y El Salvador (América Central)” pone en duda los informes sobre la

posible erupción de 1868, pues este autor observo, al momento de su inspección, que el edificio no presentaba señales de actividad reciente y que las erupciones que se atribuyen en tiempo histórico son bastante dudosas, Meyer-Abich manifiesta, que éste debería ser omitido de la lista de volcanes activos del país.

Maximiliano A. Martínez en 1978, en su obra titulada “Cronología sísmica y eruptiva de la República de El Salvador a partir de 1520”, informa de una presunta actividad del Conchagua para 1868 y dice:

“1868 (Feb. 11-23): Secuencia de fuertes temblores atribuida al volcán Conchagua. El 23 dio comienzo un periodo eruptivo que se extendió por varias semanas, al activarse el cráter de la pendiente sur del Cerro de la Bandera, a dos tercios de altura relativa (Sapper 1913)”

Este volcán ha presentado enjambres sísmicos, entre los más recientes tenemos: 2003, 1999 y 1991, según la mayoría de registros.

En lo que respecta a los materiales eruptados, únicamente se ha hecho mención de andesitas.

2.9 Elementos estratigráficos del Volcán Conchagua

Según el mapa Geológico, la zona del Volcán Conchagua, se encuentra entre los estratos de San Salvador y Cuscatlán (Figura 2.10).

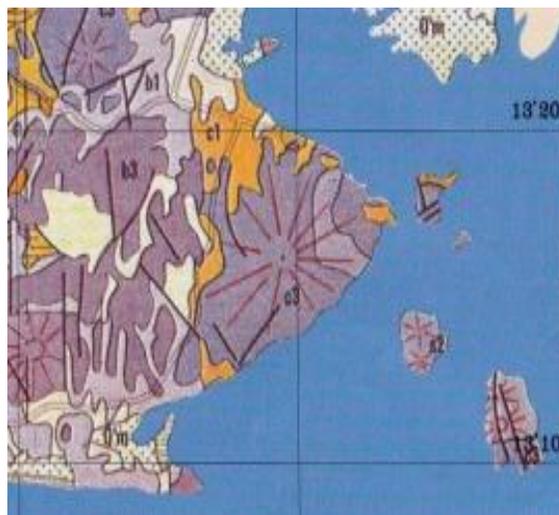


Figura 2.10: Fragmento de Mapa Geológico General de El Salvador mostrando la zona del Volcán Conchagua (Modificado).

2. 9. 1 Estratos de San Salvador (Holoceno hasta Pleistoceno)

Se encuentran en la cadena volcánica joven que atraviesa la parte Sur del país y están compuestos por productos extrusivos de los volcanes individuales. Estos productos son: corrientes de lava, cúpulas de lava, tobas fundidas, tobas, pómez, escoria y cenizas volcánicas, que se encuentran a veces con intercalaciones de sedimentos lacustres. El espesor de los estratos y la sucesión varía de volcán a volcán. También se encuentran suelos fósiles color café y negro.

La formación San Salvador “s2”, es descrita como una secuencia de rocas volcánicas básica-intermedia, piroclastitas subordinadas (Baxter, 1984).

La figura 2.11 muestra la distribución de la formación San Salvador “s2”

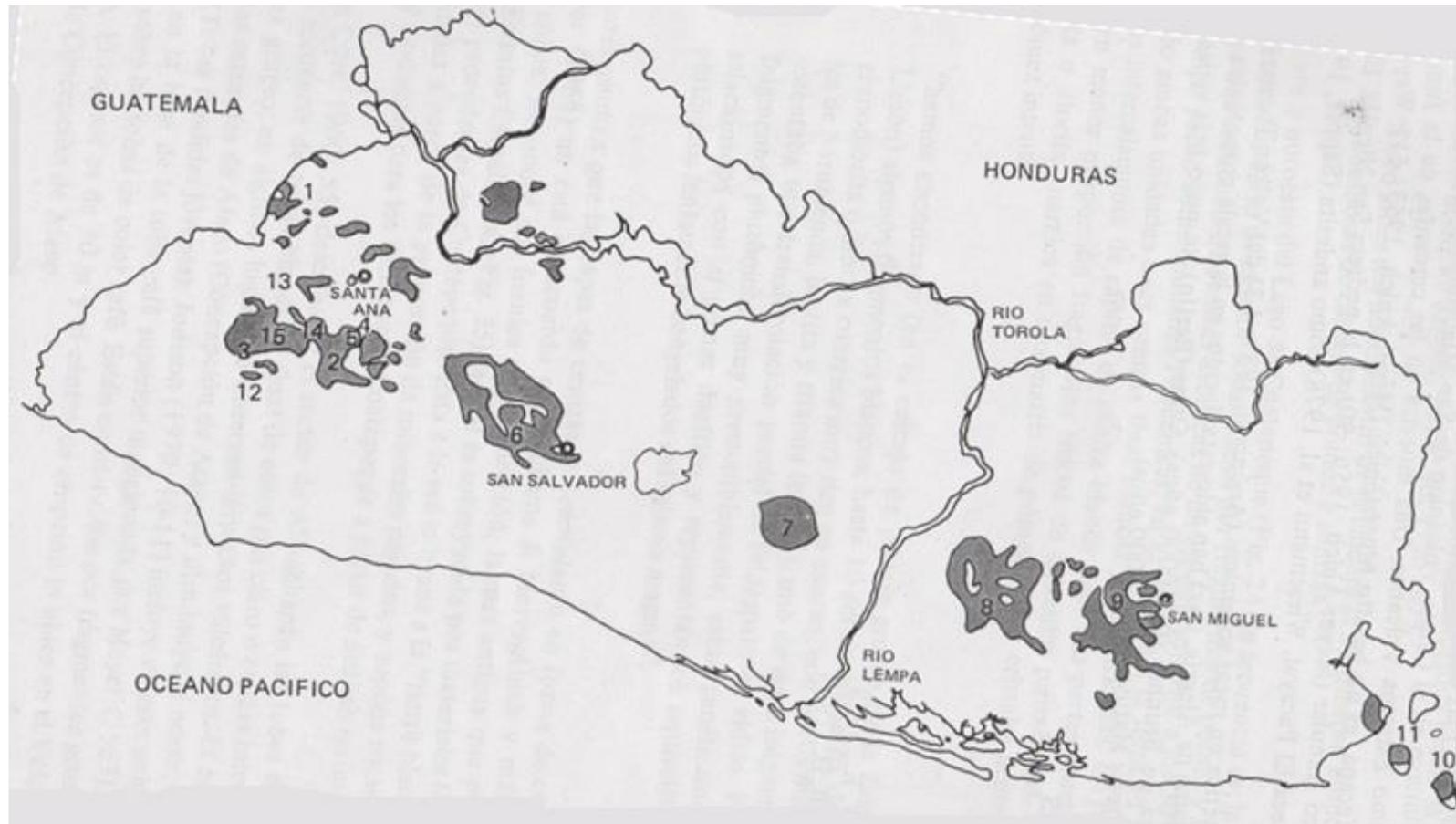


Figura 2. 11: Formación de San Salvador (s2) (Modificado)

Fuente: Tomado de S. Baxter. Léxico Estratigráfico de El Salvador. 1984

2. 9. 2 Estratos de Cuscatlán (Pleistoceno Inferior hasta Plioceno Superior)

Se encuentran en la cadena volcánica vieja que atraviesa la parte Norte del país y están compuestos por productos extrusivos de los volcanes individuales. Estos productos son: corrientes de lava, aglomerados, tobas, escorias y cenizas volcánicas endurecidas y tobas fundidas con intercalaciones de sedimentos lacustres y fluviales. El espesor de los estratos y su sucesión varía de volcán a volcán. También se encuentran suelos fósiles de color rojo de poca profundidad (hasta 4 metros).

La formación c3 es definida como una unidad constituida por rocas volcánicas de tipo andesítica y basáltica. Coladas de lava constituyen la parte principal de esta unidad, sin embargo, conos de cinder y escorias han sido reportadas (Baxter, 1984).

La zona de estudio, el campo Chiquirín, pertenece a la formación Cuscatlán c3, emplazada dentro de una zona c1 y rodeada por una s2, que es una zona volcánica más joven.

La figura 2. 12 muestra la formación Cuscatlán “c3”.

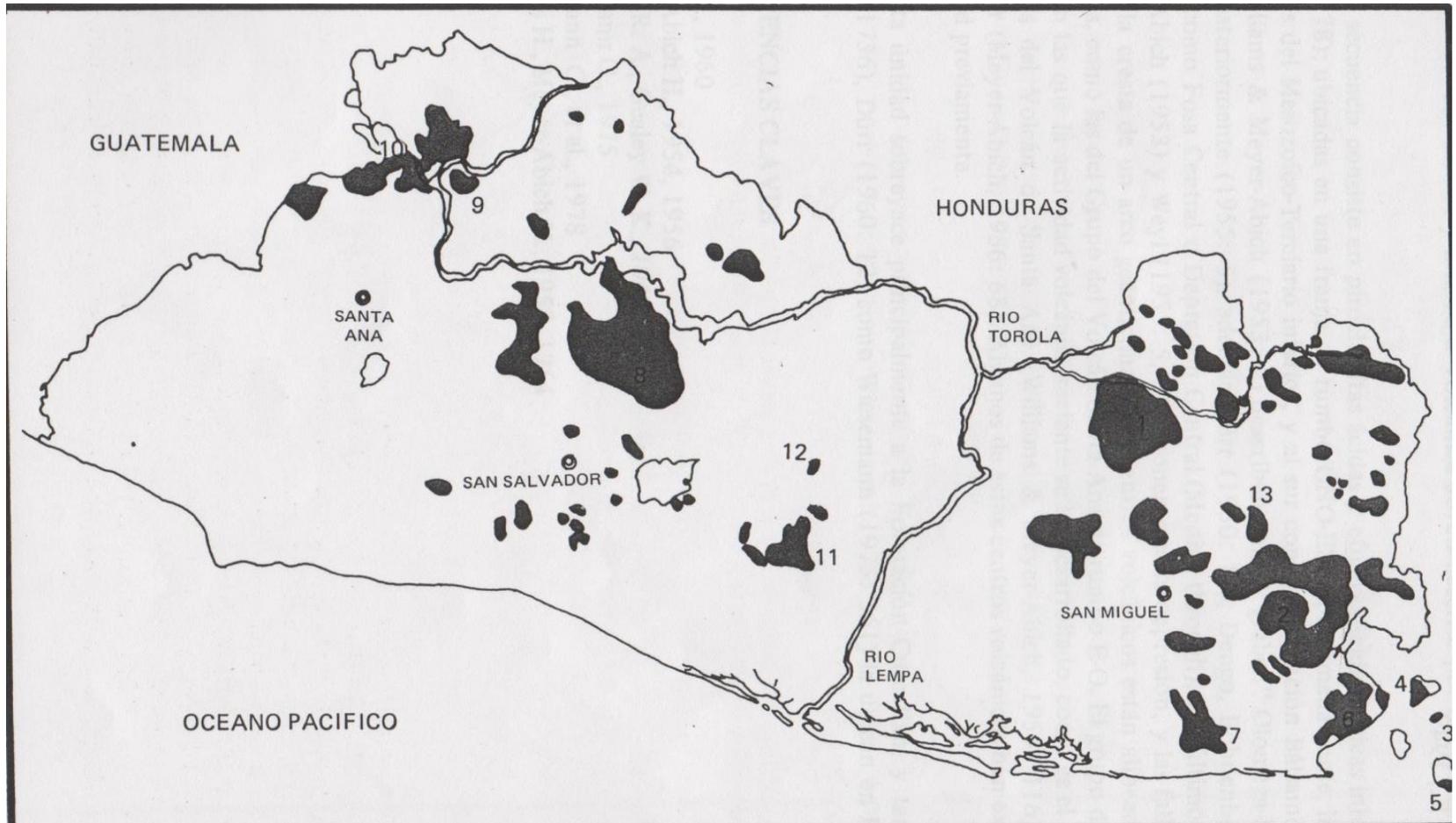


Figura 2. 12: Formación de Cuscatlán (c3) (Modificado)

Fuente: Tomado de S. Baxter. Léxico Estratigráfico de El Salvador. 1984.

2. 10 Estratigrafía reciente

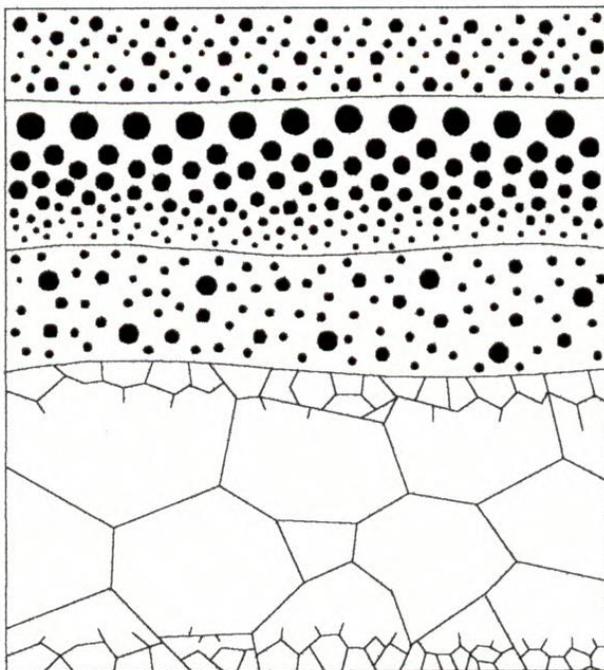
Según el trabajo elaborado por el Servicio Geológico Checo (SGC), PRAHA y el SNET, titulado: “Estudio de los peligros geológicos en el departamento de La Unión, El Salvador, 2003”, detallan lo siguiente:

2. 10. 1 Secuencia Conchagua

Grupo litológico de rocas efusivas y piroclásticas, más antiguas que la secuencia Ocote.

Las rocas más típicas son: escorias basálticas y coladas de lava de composición andesita basáltica (Figura 2. 13).

Basado en perfiles a lo largo de la carretera entre el Faro y la cima del volcán, se encuentran abundantes fragmentos de escorias y de lava pahoe-hoe.



escorias caídas,
meteorizadas

escorias con grada-
ción opuesta

escorias
caídas

lava escoriácea
de andesita
basáltica

Figura 2. 13: Alteración de escorias caídas y lavas escoráceas, en laderas de volcán Conchagua

Fuente: Estudio de los peligros geológicos en el departamento de La Unión, El Salvador, 2003. SGC, PRAHA, SNET.

2. 10. 2 Secuencia Ocote

Este grupo litológico es el más joven de todo el macizo volcánico. Predominan los flujos piroclásticos de composición probablemente andesítica que más arriba alterna con escorias basálticas, a veces intercaladas por capas de cenizas basálticas y por coladas de basalto olivínico (Figura 2. 14).

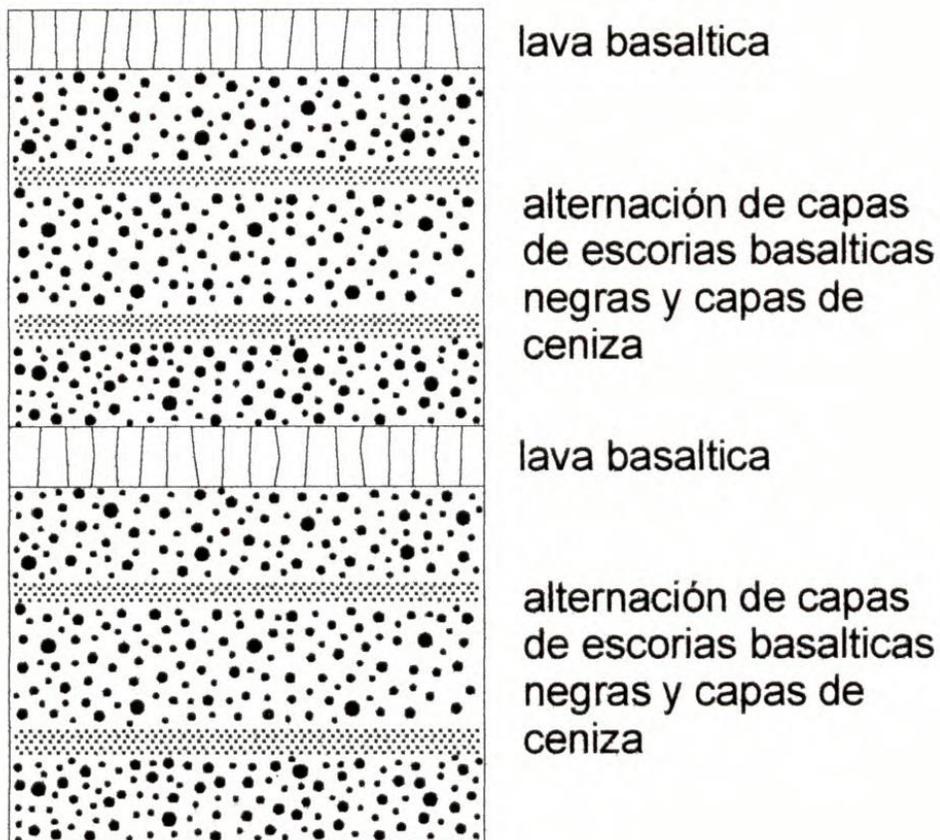


Figura 2. 14: Alteración de escorias basálticas, a veces intercaladas por capas de cenizas basálticas y por coladas de basalto olivínico en laderas de volcán Conchagua

Fuente: Estudio de los peligros geológicos en el departamento de La Unión, El Salvador, 2003. SGC, PRAHA, SNET.

2. 10. 3 Basalto Playitas

El caserío Playitas está alineado de sur por el flujo lávico llamativo de basalto olivínico.

El basalto manifiesta la estructura porfídica, fenocristas de plagioclasas hasta 0.5 cm de diámetro, de diopsida (1 cm) y olivina meteorizada (0.3 mm) yacen en matriz fina, con alto contenido de magnetita.

Cerca de esta colada lávica se ubican fumarolas tanto extinguidas como activas, situadas sobre líneas tectónicas.

2. 11 Fallas geológicas de la región de estudio

El Salvador se ubica en el límite occidental de la placa de Caribe, dentro del Bloque de Chortís (Figura 2. 15). Su actividad sísmica es generada principalmente por dos procesos:

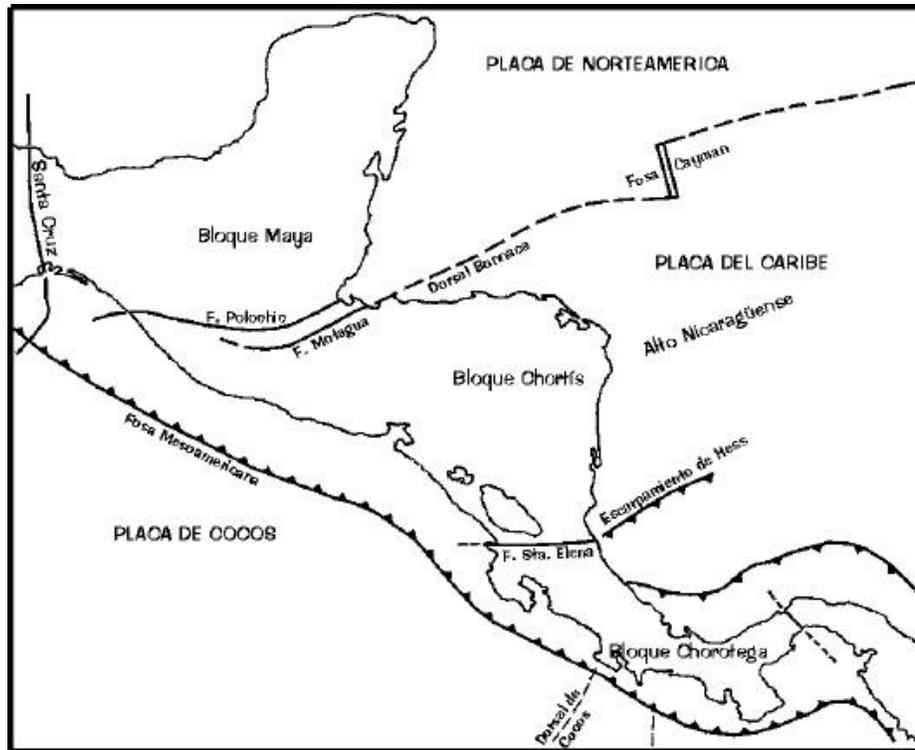


Figura 2. 15: Tectónica de Centroamérica

Fuente: Tomado de J. Kinkler. *América Central. Fallas Geológicas y Sísmicas*.

a) Subducción de la Placa de Cocos bajo la Placa del Caribe, generador de sismos profundos.

b) Movimiento del bloque antearco (Figura 2. 16) en dirección noroeste (paralelo a la subducción), generador de sismos corticales o superficiales (< 30 km). Siendo este último el más destructivo por generarse cerca de las zonas urbanas.



Figura 2. 16: Ilustración esquemática tridimensional del movimiento del antearco de El Salvador y Nicaragua (Modificada)

Fuente: Tomado de Alvarado et al. Forearc motion and deformation between El Salvador and Nicaragua: GPS, seismic, structural, and paleomagnetic observations. 2011

Existe un movimiento de las fallas geológicas locales ubicadas dentro de una amplia zona de deformación extensional que abarca el extremo sureste de El Salvador y que influye sísmicamente a las localidades de Conchagua, El Tihuilotal, El Carmen, La Unión, Intipucá, etc. A esta fuente sísmica se le denomina la zona de fallamiento El Carmen – Conchagua.

De manera específica, la zona de fallamiento El Carmen – Conchagua, forma parte de la zona de debilidad y depresión tectónica conocida como graben central, caracterizada por sismos superficiales y con una constante actividad sísmica. Se trata de una franja de unos 30km de ancho que se extiende de este a oeste cubriendo toda la parte media del territorio salvadoreño.

Estudios recientes, definen con mayor detalle la sismicidad de dicha zona de fallamiento, asociándola a un área donde ocurre un movimiento relativo entre los arcos volcánicos de El Salvador y Nicaragua, los cuales se desplazan en dirección opuesta; ocasionando la formación de una depresión tectónica extensional llamada

“Cuenca de Subsistencia del Golfo de Fonseca”. Del mismo modo, en la generación de sismos, influye en gran medida el movimiento del bloque antearco, el cual se desplaza frente a nuestras costas con mayor facilidad, debido al débil acoplamiento existente entre las placas de Cocos y El Caribe en esa zona.

Debido a lo anterior, esta zona de fallamiento está caracterizada por presentar fallamiento de tipo desgarre (Figura 2. 17), el cual se define como el desplazamiento lateral de un bloque de terreno respecto a otro.

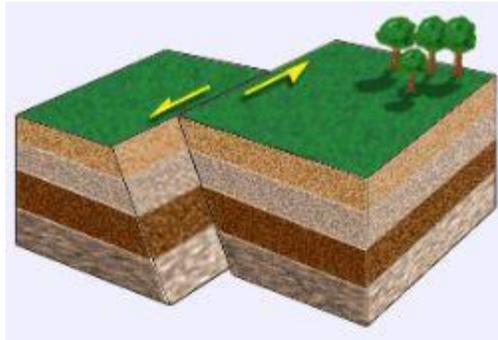
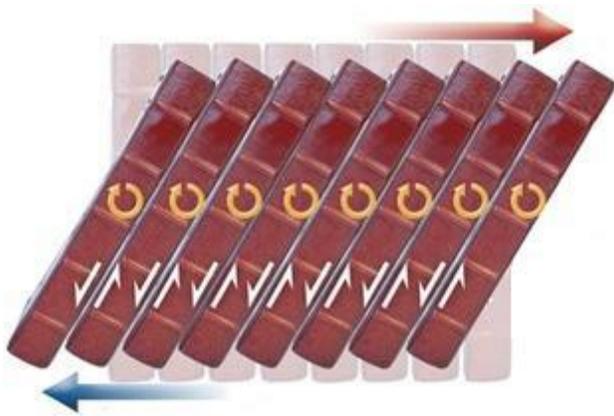


Figura 2. 17: Esquema tridimensional del movimiento de bloques con tipo de falla de desgarre

Fuente: Tomado de C. Martínez. Fallas tectónicas

Asimismo, en el terreno existe evidencia que el mecanismo de desgarre puede ser acompañado por un fallamiento de tipo librera (Figura 2. 18) o estante de libros.



*Figura 2. 18: Representación geométrica del fallamiento tipo librera, común en mecanismos de desgarre
Fuente: Tomado de Enjambre sísmico en La Unión 2015. SNET, Área de Sismología. Registros. Enjambres Sísmicos 2015.*

En esta zona de fallamiento, los sismos son de carácter superficial, asociados al movimiento de las fallas geológicas locales; por lo tanto, sus focos hipocentrales son cercanos a la superficie.

De acuerdo con los registros de la sismicidad en dicha zona, la profundidad focal está comprendida entre 1 y 25 km. Esto tiene implicaciones en el área donde se concentra la energía liberada, como también en la concentración de daños.

Históricamente esta zona se ve afectada por la ocurrencia de enjambres sísmicos. Por las características de las señales registradas, el origen de esta actividad sísmica es atribuido a la activación de fallas geológicas en la zona.

A continuación, en la tabla 2.1 se presenta con más detalle una reseña histórica de los enjambres más relevantes para esta zona

Tabla 2.1: Enjambres sísmicos más relevantes en zona de fallamiento El Carmen – Conchagua. Mc=Magnitud de Tiempo y MI =Magnitud Local

Fecha	Año	Poblaciones zona epicentral	N° de sismos			Magnitud máx.
			Totales	Localizados	Sentidos	
25 febrero al 31 de marzo	1991	Conchagua	7211	74	151	3.4 MC
14 al 15 de julio	2003	Volcán Conchagua - Golfo de Fonseca	39	3	0	2.9 MC
3 al 5 de mayo	2010	Conchagua, La Unión	73	4	2	3.3 ML
18 al 30 de septiembre	2010	Conchagua, La Unión	222	10	2	3.0 ML
2 al 14 de julio	2011	Conchagua, La Unión	1896	29	11	3.6 ML

20 de noviembre al 21 de diciembre	2011	El Carmen, Conchagua, La Unión	1623	112	48	4.8 ML
27 al 29 de septiembre	2012	Conchagua, La Unión	99	14	4	3.6 ML
8 al 16 de febrero	2013	Conchagua, La Unión	103	9	5	3.3 ML
11 de marzo	2014	El Carmen, Conchagua, La Unión	36	5	1	3.5 ML

Fuente: Tomado de Enjambre sísmico en La Unión 2015. SNET, Área de Sismología. Registros. Enjambres Sísmicos 2015.

La Red Sísmica registró entre las 8:35 p.m. del martes 29 de septiembre y las 3:00 pm., del día viernes 9 de octubre de 2015, un total de 1347 sismos. El área epicentral está ubicada en el municipio de Conchagua (Figura 2. 19), en el departamento de La Unión, este es el dato del último enjambre sísmico en la región.

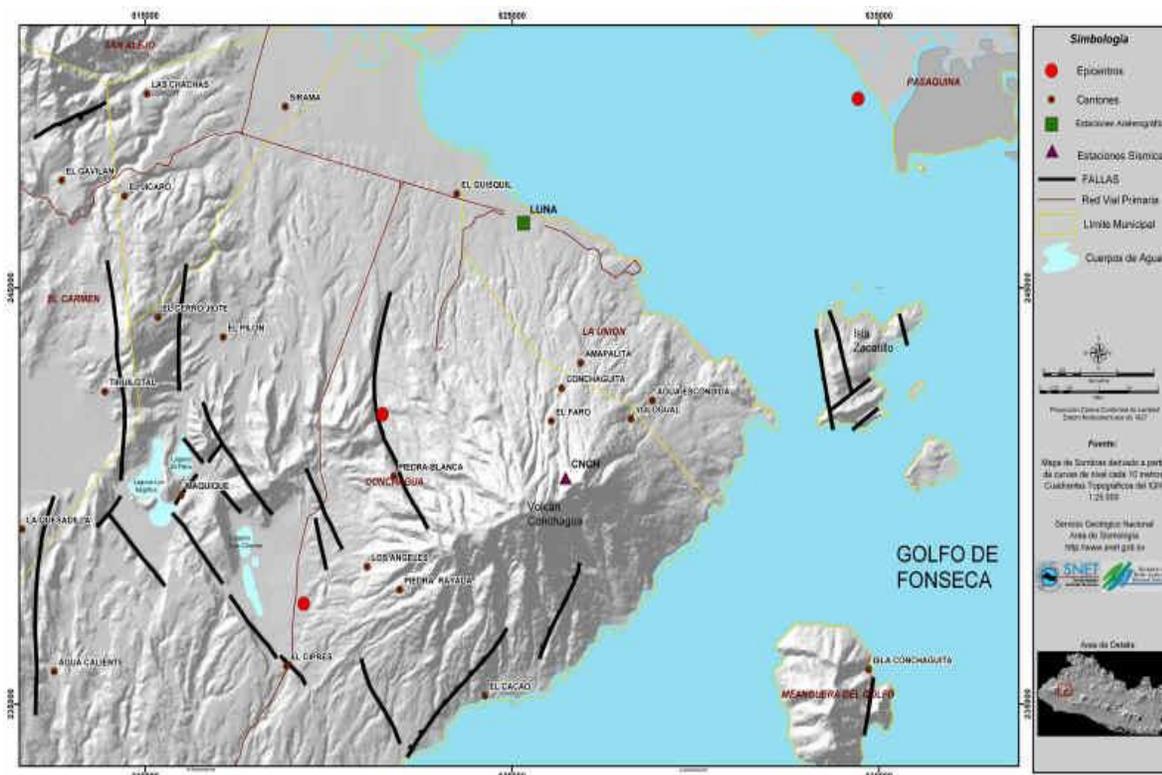


Figura 2. 19: Mapa de zona de fallamiento El Carmen – Conchagua.

Fuente: SNET, Área de Sismología. Registros. Enjambres Sísmicos 2015.

2. 12 Antigüedad del Volcán Conchagua

Por las características geotectónicas y morfológicas que presenta la cadena volcánica salvadoreña, los volcanes se han dividido en dos grupos: volcanes antiguos del terciario (más de dos millones de años) y volcanes jóvenes del cuaternario (menos de dos millones de años) (Figura 2. 20).

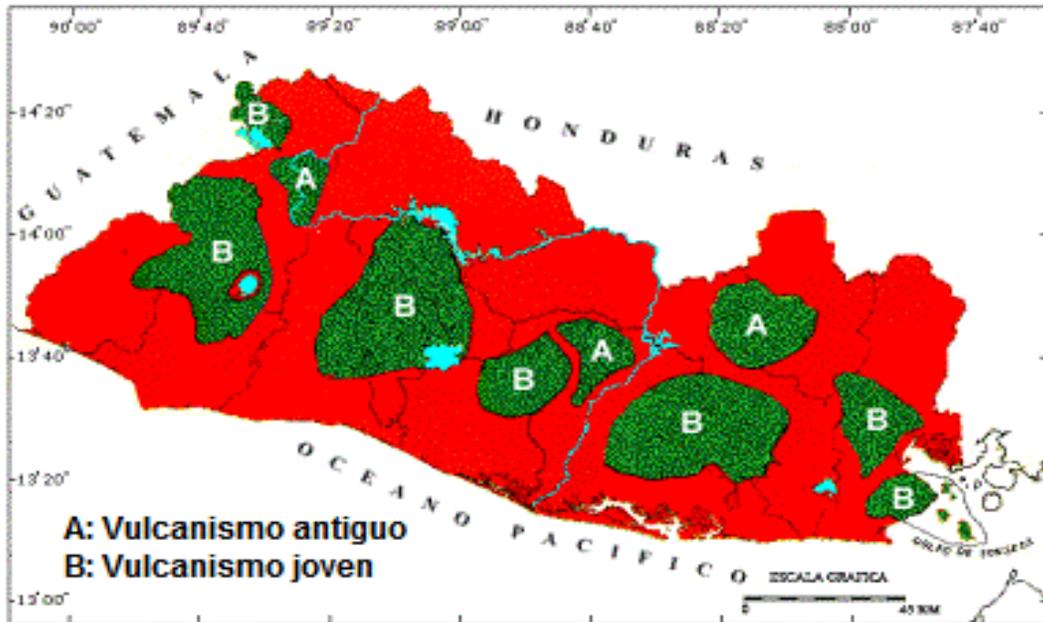


Figura 2. 20: Zonas volcánicas terciarias y cuaternarias (Modificada)

Fuente: Tomado de Howell Williams y Helmut Meyer-Abich. *Volcanism in The Southern part of El Salvador*, citado por Carlos Demetrio Escobar. *Volcanes activos de El Salvador. Servicio Geológico de El Salvador. Área de Vulcanología, SNET. 2002*

El volcán Conchagua pertenece al vulcanismo del periodo cuaternario.

2. 13 Zona de estudio: Cancha de futbol, Caserío Chiquirín

La cancha (campo) de futbol del Caserío Chiquirín, Cantón Agua Escondida, jurisdicción de La Unión, está ubicado en el flanco este del Volcán Conchagua

(13°17'38.0"N 87°47'12.9"W), cerca de la línea de Costa del Golfo de Fonseca, a este lugar se le conoce también por el nombre de “Punta Chiquirín”.

La Figura 2. 21, tomada desde Google Earth, muestra una imagen satelital de su ubicación:

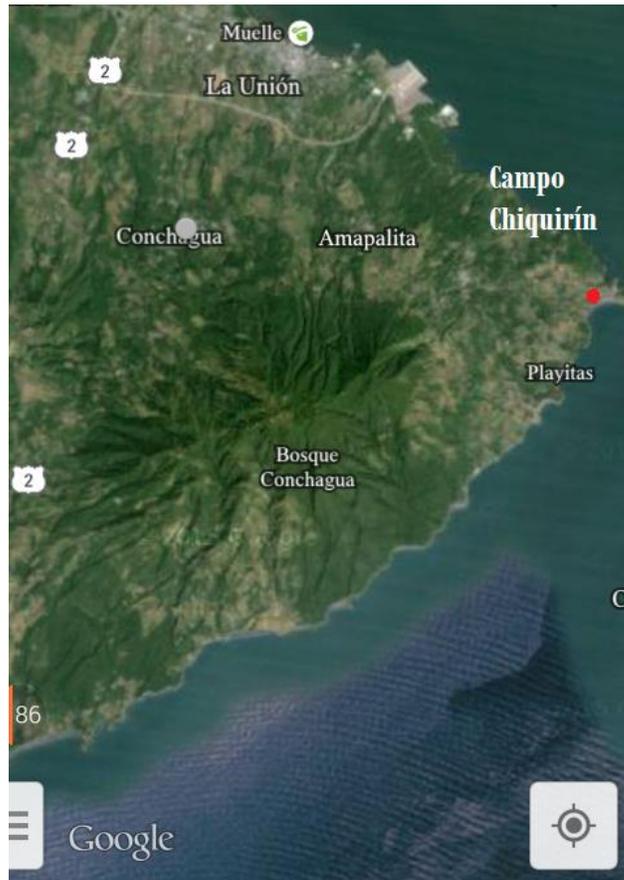


Figura 2. 21: Vista satelital (Google Earth) de zona de estudio.

Para acceder a la zona de estudio, existen dos rutas a tomar desde la Facultad Multidisciplinaria Oriental de la Universidad de El Salvador, una por la carretera Litoral y otra por la carretera Panamericana, en la Figura 2. 22 las rutas están indicadas por el trazo celeste y un trazo gris.

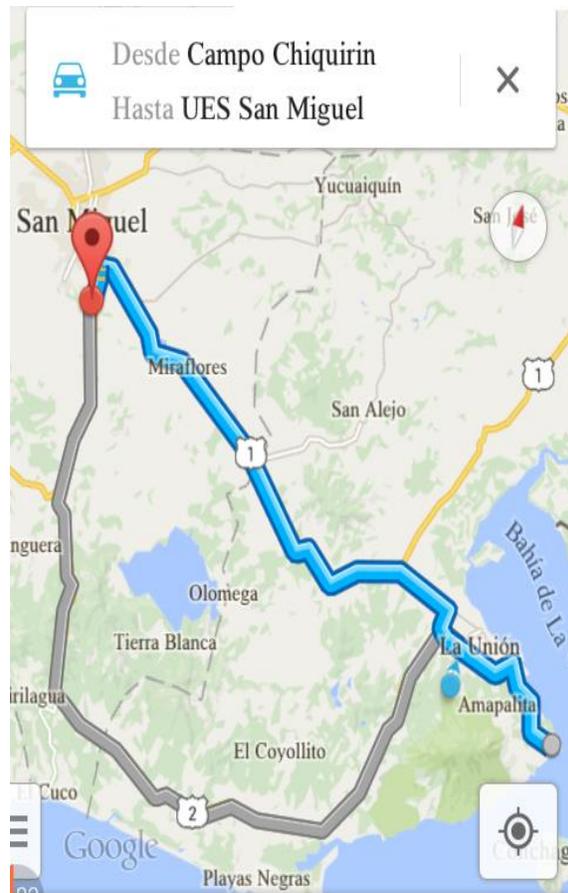
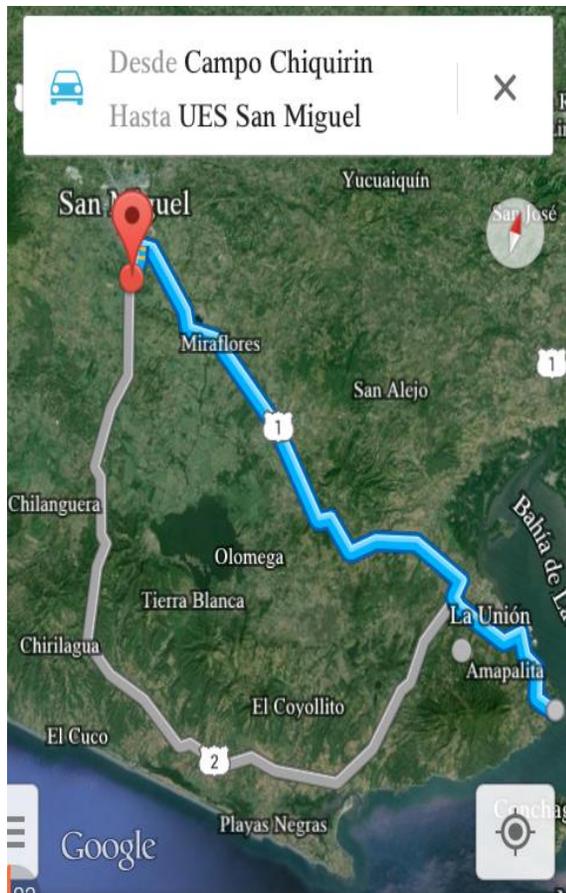


Figura 2. 22: Mapas de ubicación desde la FMO-UES hasta Campo Chiquirín. La línea gris representa la carretera Litoral y el trazo celeste la carretera Panamericana (Google Maps)

El campo del Caserío Chiquirín tiene medidas irregulares: El lado oeste mide 55 metros; el lado norte 75 metros; el lado sur mide 84 metros y el lado este 68 metros. En la figura 2. 23 y 2. 24, se muestra una imagen de la cancha desde el aire, usando Google Earth y Google Maps y ubicando los puntos cardinales de la región:



Figura 2. 23: Imagen satelital (Google Earth) de Campo Chiquirín

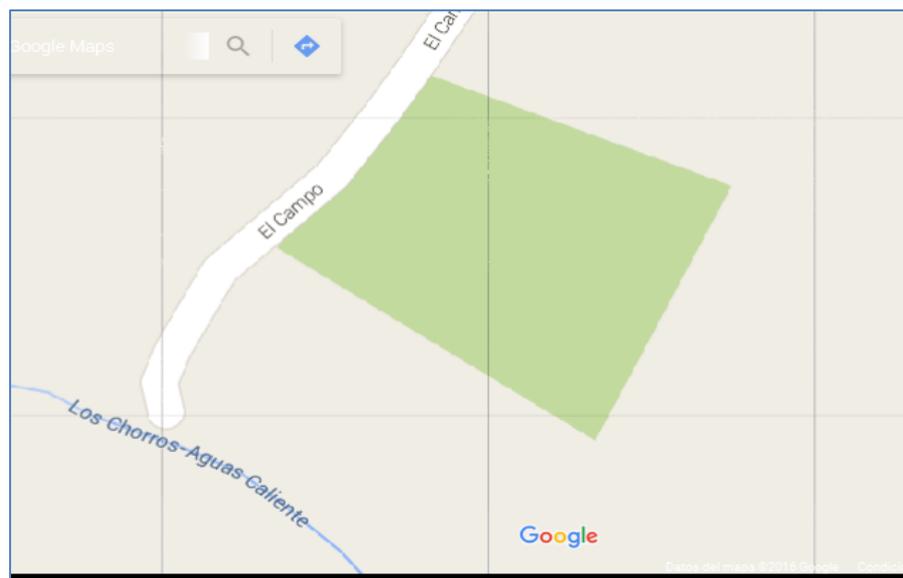


Figura 2. 24: Imagen satelital (Google Maps) de Campo Chiquirín

III. MARCO TEORICO

3.1 Antecedentes de la investigación

La aplicación de la técnica de Potencial Espontáneo (SP), ha sido utilizada con diversos objetivos distintos a nivel mundial en diversas estructuras y zonas.

Gonzales (2000), aplica utiliza el método de SP en el volcán Ubinas, Perú, para localizar zonas geotérmicas, que sirvan como parámetros para determinar el estado actual de la estructura volcánica activa.

Macedo et al. (2002), recopila la información obtenido entre el periodo de 1997 a 1999 de la aplicación de métodos geofísicos como el método de SP y medición de temperatura entre otros, para formular un modelo preliminar de circulación de fluidos al interior del volcán Ubinas, Perú.

Lewicki, Connor, St-Amand, Stix, y Spinner (2003), investigan la relación espacial entre el SP, CO₂ de flujo del suelo, y la temperatura en diferentes puntos que presentan anomalías de SP, en las faldas del volcán Masaya, Nicaragua.

Finizola et al. (2004), mediante la técnica geofísica del SP elaboran un mapeo de un estratovolcán andesítico de 20 km de diámetro. El mapeo de SP es utilizado para delimitar zonas hidrológicas y zonas hidrotermales en el volcán activo Misti, Perú, así como también información interna de la estructura volcánica.

Hashimoto et al. (2004), elaboraron mapas de los volcanes escudo: Rishiri (al norte de Hokkaido, Japón), Kusatsu-Shirane (central Honshu, Japón) e Islas Blancas (al norte de Nueva Zelanda), utilizando el método geofísico para determinar la variabilidad de los valores de SP en rocas volcánicas, en zonas fumarólicas y comparándolo con la resistividad del suelo.

Bennati et al. (2009), comparando el método de SP y medición de emisión de gases de CO₂, estudia las zonas de Santa María, Cerro Quemado y volcán Zunil,

Guatemala, para identificar zonas de estructuras discontinuas y circulación de fluidos hidrotermales de la estructura volcánica activa, así como identificar la variación de permeabilidad interna del complejo volcánico.

Ramos, Antayhua, Masías, Finizola y Svetlana (2010), desarrollaron un estudio geofísico utilizando medidas de SP para obtener información y delimitar un sistema hidrotermal en la estructura del volcán Ticsani, en Perú, como también la identificación de fallas no visibles en la superficie.

Daza (2012), realizó mediciones de SP en un campo experimental de la Universidad de Concepción, sede Chillán, y en el Parque Termal Menetúe, elaboró mapas de zonas con afloramientos atribuidos a zonas hidrotermales y mapas en otras zonas en búsqueda de afluentes de aguas subterráneas.

Torres (2012), aplica la técnica con el objetivo de analizar el comportamiento interno del volcán Misti, Perú, al dimensionar las regiones con fluidos hidrotermales.

También se encuentran algunas aplicaciones de este método geofísico a nivel nacional.

Sermeño et al (2007), a partir de mediciones de SP, evalúan el sector fumarólico del Cerro La Hoya ubicado en el sector sur del Volcán San Salvador, para determinar la variación de los registros medidos en diferentes circunstancias meteorológicas.

Benítez et al. (2012), elaboran un estudio en la parte sureste del cráter del volcán de Santa Ana, con el objeto de obtener información de la estructura interna del volcán utilizando la técnica de SP para generar una línea base de datos y correlacionarlo con temperatura del suelo.

En la zona de estudio de esta investigación tanto el personal del Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales (MARN) y el Grupo de Investigación Vulcanológica de la Universidad de El Salvador (GIVUES) han hecho observaciones sistemáticas

de emisión de gases en las fumarolas de playa Playitas, al sur de Caserío Chiquirín, pero en la aplicación de la técnica de SP no hay registros.

3.2 Bases teóricas

3.2.1 Geofísica

La geofísica es una rama de la física que estudia los diferentes componentes de la Tierra, desde su interior más profundo hasta el exterior, utilizando diferentes métodos proporcionados por la física y otras ciencias.

En términos generales, se ocupa de la parte oculta de la Tierra, que no está a simple vista o a visión directa, realizando medidas de sus propiedades físicas por diferentes procedimientos según el método que se utilice; y es esto lo que la hace diferente de la geología, que utiliza el método de observación directa para realizar sus análisis de estructura, composición e historia de los componentes en estudio.

Para obtener información útil de alguna zona de estudio, es necesaria una interpretación del conjunto de medidas que se obtienen en el lugar de investigación.

La geofísica se divide en:

Geofísica pura

La geofísica pura, para algunos Física del Globo (Cantos, 1978), se ocupa del estudio del magnetismo, electricidad y sismologías terrestres, pero comprende los estudios de vulcanología, geodinámica, climatología, oceanografía y otras ramas de las ciencias relacionados con las Ciencias de la Tierra.

Geofísica aplicada

La geofísica aplicada, es la rama de la ciencia que trata de la aplicación de la geofísica pura. Muchos autores la llaman sencillamente: Prospección Geofísica (Cantos, 1978). Y de su aplicación es de lo que trata ésta investigación.

3.2.2 Métodos geoelectricos

La geofísica usa varios métodos. El método geoelectrico, está basado en la interpretación de las variaciones de resistividad al paso de corriente eléctrica por los distintos materiales que componen el subsuelo en una determinada zona.

Dependiendo de la naturaleza de la generación de corriente eléctrica, los métodos pueden clasificarse como: de Corriente artificial y de Corriente natural. Para el caso de corriente artificial, dependiendo del tipo de corriente que se haga circular en el suelo, se pueden subdividir en: de Corriente continua y de Corriente alterna (Estrada, 2012).

En los métodos geoelectricos, que utilizan corrientes eléctricas artificiales, se inyecta corriente eléctrica al suelo, proveniente de generadores tipo baterías o pequeños motores de combustión.

Los métodos geoelectricos, que utilizan corrientes naturales, tienen su origen en fenómeno químico de Oxidación-Reducción (Estrada, 2012).

3.2.3 Propiedades eléctricas fundamentales de los métodos geoelectricos

Estos métodos están basados en las diferentes propiedades eléctricas de las rocas, las características más considerables son:

a) Corriente eléctrica

Se denomina corriente eléctrica a todo desplazamiento ordenado de cargas eléctricas en el espacio (Yavorski, 1977., pp 387).

La intensidad de corriente (o simplemente corriente), a través de una superficie S, es la magnitud **I** igual a la primera derivada de la carga q que pasa a través de ésta superficie, con respecto al tiempo al tiempo:

$$I = \frac{dq}{dt} \quad (3.1)$$

Esta corriente se dice que es continua, si su intensidad y sentido no varían con el tiempo, por lo tenemos que

$$I = \frac{q}{t} \quad (3.2)$$

Donde q es la carga eléctrica, y t el tiempo.

Por lo que definiendo la intensidad de corriente continua, es igual a la carga q que pasa a través una superficie S por unidad de tiempo (Yavorski, 1977., pp 388).

Se considera que el sentido de la corriente eléctrica es el del desplazamiento de las cargas positivas. En realidad, en los conductores metálicos, la corriente la crea el movimiento de los electrones en sentido contrario al de la corriente.

El vector de densidad de corriente \mathbf{j} caracteriza la distribución de la corriente eléctrica según la sección S (Yavorski, 1977., pp 388). Este vector va dirigido hacia el sentido del desplazamiento de las cargas positivas y es igual a

$$\vec{J} = \frac{d\vec{I}}{dS'} \quad (3.3)$$

Donde dS' es la proyección de la superficie elemental dS sobre el plano perpendicular a \mathbf{j} , y dI , la intensidad de la corriente a través de dS y dS' .

La proyección j_n del vector \mathbf{j} sobre la normal \mathbf{n} a la superficie elemental dS es

$$j_n = \frac{dI}{dS} = j \cos \alpha \quad (3.4)$$

Donde α es el ángulo entre \mathbf{j} y \mathbf{n} .

La intensidad de corriente en un conductor es

$$I = \int_S \vec{j} dS \quad (3.5)$$

Donde la integración comprende toda la sección transversal S del conductor ($\alpha \equiv 0$)

La densidad de corriente continua es la misma en todos los puntos de la sección S del conductor, tenemos que

$$I = \vec{j}S \quad (3.6)$$

Las densidades de corriente continua en dos secciones transversales de un conductor son inversamente proporcionales a las áreas de sus secciones (Yavorski, 1977., pp 388).

$$\frac{j_1}{j_2} = \frac{S_2}{S_1} \quad (3.7)$$

A los conductores metálicos suele llamárseles conductores de primera clase, mientras que, en los conductores que la corriente eléctrica va acompañada de electrolisis, se denominan electrolitos o conductores de segunda clase (Yavorski, 1977., pp 399).

En los metales los portadores de corriente son los electrones de conducción, que surgen debidos a que los electrones de valencia del metal son generales, es decir, no pertenecen a un átomo determinado.

El movimiento ordenado de los electrones en un conductor metálico se produce solicitado por un campo eléctrico exterior (Yavorski, 1977., pp 390). La densidad de corriente es

$$\vec{j} = n_0 e \vec{v} \quad (3.8)$$

Donde n_0 es el número de electrones de conducción por unidad de volumen; e , la magnitud de la carga del electrón y \vec{v} , la velocidad media del movimiento ordenado de los electrones

En el caso de los líquidos, la densidad de corriente \vec{j} , es igual a la sumatoria de las densidades de corriente de los iones positivos y negativos (Yavorski, 1977., pp 401).

$$\vec{j} = \vec{j}_+ + \vec{j}_- \quad (3.9)$$

La densidad de corriente \vec{j} en líquidos y en función de la intensidad \vec{E} del campo eléctrico aplicado es

$$\vec{j} = \frac{F}{N_A} Z_+ n_{0+} (u_+ + u_-) \vec{E} \quad (3.10)$$

Donde F es la constante de Faraday ($F= 96494 \text{ C/g}$); N_A , el número de Avogadro; Z_+ la valencia de los iones positivos de la solución; n_{0+} el número de iones positivos por unidad de volumen del electrolito; u_+ y u_- las movilidades de los iones positivos y negativos respectivamente, es decir, las velocidades medias de estos iones inducidos por un campo eléctrico de intensidad igual a la unidad. Esta es la fórmula de la ley de Ohm para la densidad de corriente en los electrolitos.

En el caso de los gases, la conducción de los gases se produce al ionizarlos.

Ley de Ohm

El flujo de una corriente eléctrica a través de las rocas o los sedimentos, puede explicarse mediante la ley de Ohm, la cual es fundamental, ya que en esta ley es donde se basa toda la geoelectrónica.

Establece que la diferencia de potencial o voltaje V_{21} de un circuito es igual al producto de su resistencia R_{21} por la intensidad de la corriente I (Yavorski, 1977., pp 394).

$$IR_{21} = (\varphi_1 - \varphi_2) + \varepsilon_{21} \quad \text{o} \quad V_{21} = IR_{21} \quad (3.11)$$

Donde,

ε_{21} es igual a la suma algebraica de la f.e.m. de todas las fuentes conectadas en el segmento 1-2 del circuito. La f.e.m. es igual al trabajo realizado por las fuerzas ajenas al trasladar a lo largo del segmento 1-2 del conductor una carga positiva unidad.

V_{21} se denomina voltaje (caída de voltaje o caída de potencial) de la parte 1-2 de un circuito y es la magnitud igual al trabajo realizado por el campo de las fuerzas de Coulomb y de las ajenas (fuerzas no electrostáticas) al desplazar a lo largo del segmento 1-2 del circuito una carga unitaria positiva:

$$V_{21} = \int_1^2 ((E_{coul} + E_{ajen}) dl) = \int_1^2 E dl \quad (3.12)$$

Obtenemos

$$V_{21} = (\varphi_1 - \varphi_2) + \varepsilon_{21} \quad (3.13)$$

Se tiene R_{21} , que es la resistencia de la parte de un circuito comprendida entre las secciones 1 y 2. Matemáticamente se expresa

$$R_{21} = \int_1^2 \rho \frac{dl}{S} \quad (3.14)$$

Para el caso de un conductor cilíndrico y homogéneo (ρ y S , constantes), se tiene

$$R_{21} = \rho \frac{l_{21}}{S} = \frac{l_{21}}{\gamma S} \quad (3.15)$$

Donde l_{21} es la longitud de 1-2 del conductor.

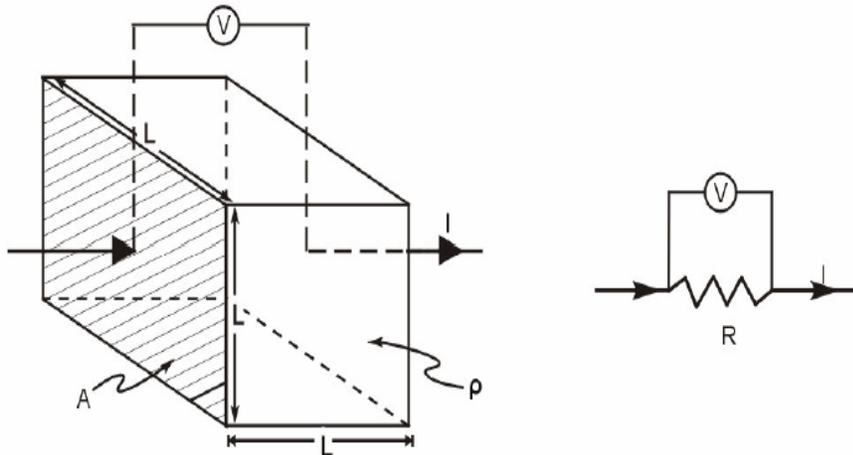


Figura 3.1: Ley de Ohm

Fuente: *Métodos Geoelectrónicos para la Prospección de Agua Subterránea*, 2008

La ley de Ohm (Yavorski, 1977., pp 390) para la densidad de corriente es

$$\vec{j} = \gamma \vec{E} = \frac{1}{\rho} \vec{E} \quad (3.16)$$

Según la teoría clásica y se expresa así:

$$\gamma = \frac{n_0 e^2 \bar{\lambda}}{2m\bar{u}} \quad (3.17)$$

Donde,

n_0 = número de electrones por unidad de volumen del metal

$\bar{\lambda}$ = recorrido libre medio de los electrones.

\bar{u} = velocidad media del movimiento térmico de los electrones a la temperatura dada

Y según la teoría cuántica de los metales:

$$\gamma = \frac{n_0 e^2 \bar{\lambda}}{p_f} \quad (3.18)$$

Donde p_f es la impulsión del electrón que se halla en el nivel energético W_f de Fermi, cuando $T=0$ ($W_f = 3.63 \times 10^{-15} n_0^{2/3} eV$)

$\bar{\lambda}$ = es el recorrido medio de las ondas electrónicas en el metal.

La densidad de corriente \mathbf{j} en un conductor es igual al producto de la conductibilidad del metal γ por la intensidad del campo eléctrico \mathbf{E} , definiéndose como el gradiente del potencial eléctrico V (Cantos, 1978)

$$\mathbf{E} = -\Delta V \quad (3.19)$$

La ley de Ohm expuesta en (3.19), es válida para el caso de un cuerpo isótropo, es decir homogéneo, en el caso de una sección de determinado terreno real, no se presentará nunca el caso de un terreno isótropo, comúnmente está formado por una serie de capas de terreno homogéneo, que a su vez formarán un sistema anisotrópico.

En el caso de un cuerpo anisotrópico, la conductividad γ no podría considerarse un escalar, sino como un tensor simétrico de segundo orden.

Considerando el caso de un sistema estacionario (Cantos, 1978), la densidad de carga espacial será constante, y la ley de conservación de la carga espacial

$$\nabla \cdot \vec{j} = -\frac{\partial \rho}{\partial t} \quad (3.20)$$

Se simplifica a:

$$\nabla \cdot \vec{j} = 0 \quad (3.21)$$

Haciendo uso de las dos leyes fundamentales para régimen estacionario y cuerpos isótropos, tenemos:

$$\nabla \cdot \vec{j} = \nabla \cdot (\gamma \vec{E}) = \gamma \nabla \cdot \vec{E} = \gamma \nabla \cdot (-\nabla V) = -\gamma \nabla^2 V = 0 \quad (3.22)$$

De lo que resulta:

$$\nabla^2 V = 0 \quad (3.23)$$

Que es la ecuación de Laplace.

Aplicando al estudio de un semiespacio formado por un terreno homogéneo e isótropo, en cuya superficie se supone una carga puntual (un electrodo de corriente en el punto considerado y el otro en el infinito), aplicando la ecuación de Laplace en coordenadas esféricas

$$\frac{\partial}{\partial r} \left(r^2 \frac{\partial V}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2 \sin \theta} \frac{\partial}{\partial \theta} \left(\sin \theta \frac{\partial V}{\partial \theta} \right) + \frac{1}{r^2 \sin^2 \theta} \frac{\partial^2 V}{\partial \varphi^2} = 0 \quad (3.24)$$

El sistema presenta simetría respecto a θ y a φ , se supondrá que el potencial depende de la distancia r de un electrodo, por lo la ecuación de Laplace se reduce a:

$$\frac{d}{dr} \left(r^2 \frac{dV}{dr} \right) = 0 \quad (3.25)$$

Al integrar la ecuación anterior, resulta

$$V = C_1 - \frac{C_2}{r} \quad (3.26)$$

Si se adopta un potencial nulo, el elemento que está en el infinito, resulta que $C_1=0$, con lo que resulta

$$V = -\frac{C_2}{r} \quad (3.27)$$

La densidad de corriente en una dirección cualquiera y a una distancia r , tendrá un módulo:

$$j = -\gamma \frac{dV}{dr} = -\gamma \frac{C_2}{r^2} \quad (3.28)$$

Como la densidad de corriente es la misma en cualquier dirección y a una misma distancia r , la corriente I que pasaría por un electrodo será la misma que la que atravesase una semiesfera de radio r , y por tanto

$$I = 2\pi r^2 j = 2\pi r^2 \left(-\gamma \frac{C_2}{r^2} \right) = -2\pi\gamma C_2 \quad (3.29)$$

Y

$$C_2 = -\frac{I}{2\pi\gamma} = -\frac{I\rho}{2\pi} \quad (3.30)$$

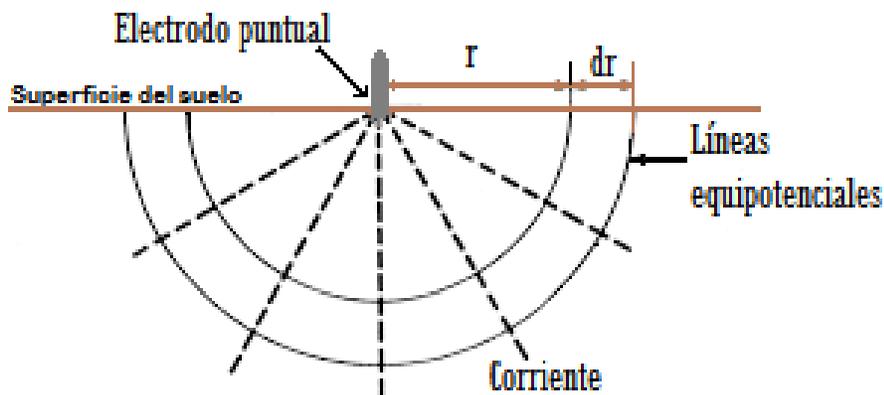


Figura 3.2: Recorrido de la corriente que penetra al electrodo

Por lo que resulta que el potencial debido a un electrodo puntual, y a una distancia r de éste es:

$$V = \frac{I\rho}{2\pi r} \quad (3.31)$$

b) Resistividad

Se denomina resistividad o resistencia específica (del material), a la magnitud

$$\rho = \frac{1}{\gamma} \quad \text{o} \quad \rho = \frac{\vec{E}}{\vec{J}} \quad (3.32)$$

En el caso de los líquidos, la resistividad de los electrolitos (Yavorski, 1977., pp 402) es

$$\rho = \frac{N_A}{FZ_+n_{0+}(u_+ + u_-)} \quad (3.33)$$

Si la molécula del electrolito se disocia en K_+ iones positivos y K_- negativos, tendremos que $K_+ Z_+ = K_- Z_-$,

$$n_{0+} = k_+ \alpha n_0 \quad \text{y} \quad n_{0-} = k_- \alpha n_0 \quad (3.34)$$

Donde α es el grado de disociación, y n_0 , la concentración del electrolito. En este caso

$$\rho = \frac{N_A}{FZ_+n_{0+}(u_+ + u_-)} \quad \text{o} \quad \rho = \frac{1}{F_\alpha C(u_+ + u_-)} \quad (3.35)$$

Donde C es el número equivalente-kilogramo de iones de un mismo signo que hay en la unidad de volumen del electrolito en estado libre y ligado en las moléculas.

Esta magnitud se denomina concentración equivalente de la solución

$$C = \frac{k_+ Z_+ \alpha n_0}{N_A} = \frac{k_- Z_- \alpha n_0}{N_A} \quad (3.36)$$

En el caso de la prospección geoelectrica, la resistividad ρ , representa la naturaleza del conductor, y, es producida por las rocas o los sedimentos (Auge, 2008).

La resistividad de la mayoría de las rocas y sedimentos secos es elevada, por lo que actúan como semiconductores, o conductores de baja capacidad. Este comportamiento cambia significativamente cuando las fisuras o los poros están ocupados por agua, lo que genera una disminución de la resistividad, o lo que es lo mismo en aumento en la capacidad de conducción de la corriente eléctrica. Además

del grado de saturación también incide en la resistividad del medio, el contenido salino del agua; a mayor salinidad, menor resistividad y viceversa (Auge, 2008).

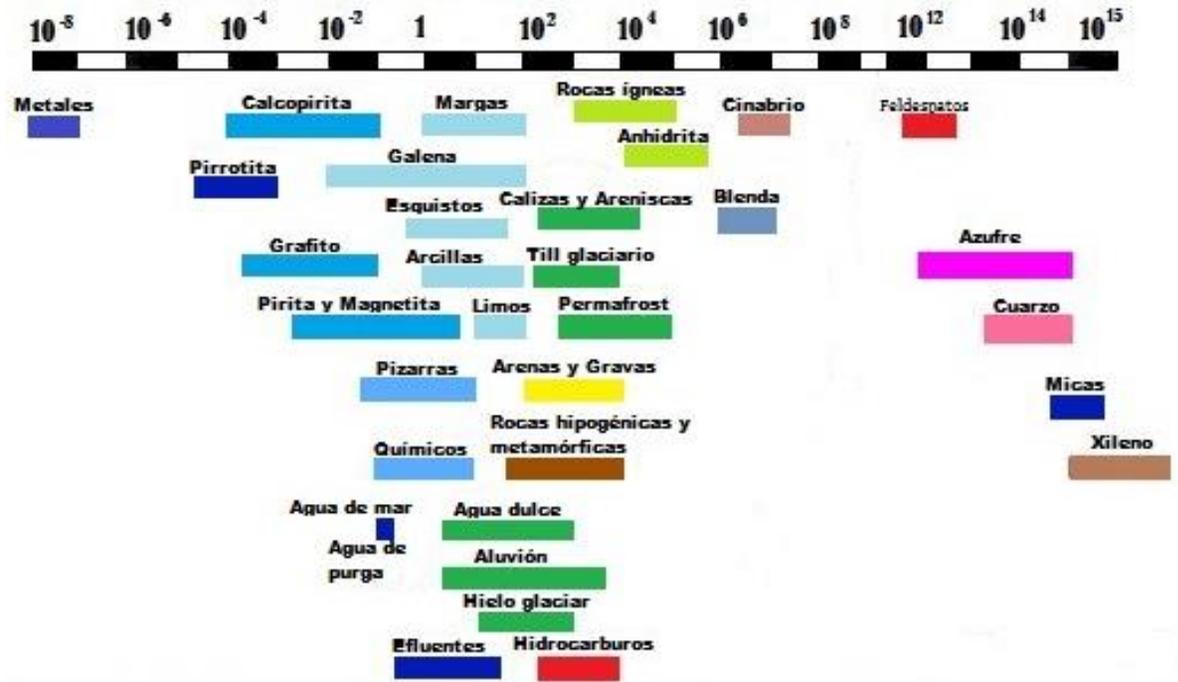


Figura 3.3: Resistividad en Ohm-m de diferentes rocas, minerales y químicos (Modificada)

Son pocos los componentes geológicos sub-saturados o secos, que presentan baja resistividad o alta conductividad entre los que pueden mencionarse a minerales metálicos como calcopirita, pirita, magnetita, galena, pirrotina, etc. El grafito también presenta elevada conductividad eléctrica, pero la mayoría de los minerales no metálicos, al igual que las rocas, tienen resistividades significativamente mayores, en general entre 2 y 6 órdenes de magnitud superiores.

La resistividad de las arenas puede variar mucho, según la cantidad de agua que contienen y la calidad de la misma, por lo que no se pueden tener cifras exactas.

La resistividad de las rocas y formaciones está afectada por los siguientes factores: Sus minerales constitutivos, del agua que llena los poros, volumen relativo de ambos y disposición de los mismos.

Resumiendo la resistividad de todo terreno depende de estos factores:

- ☞ La resistividad del suelo es determinada principalmente por su cantidad de electrolitos; esto es, por la cantidad de humedad, minerales y sales disueltas.
- ☞ La composición del terreno depende de la naturaleza del mismo.
- ☞ La anisotropía del terreno, obviamente no es uniforme en sus capas.
- ☞ El tamaño de los granos de la tierra.
- ☞ El contenido de agua y la humedad.
- ☞ La temperatura.
- ☞ La compactación del terreno.

Para una idea de los valores que se encuentran en prospección geoelectrica, se presenta una lista de resistividades de algunos materiales comunes en un trabajo de prospección.

Tabla 3.1: Resistividades de algunos materiales (Modificada)

Material	Resistividad ($\Omega.m$)
Azufre	10^{15}
Mica	$10^8 - 10^{13}$
Sal gema seca	$10^3 - 10^{13}$
Calcita	$0.05 - 10^{12}$
Cuarzo	10^{12}
Granito seco	$10^6 - 10^9$
Arenisca seca	$10^4 - 10^8$
Limonita	10^5
Caliza seca	$10^3 - 10^4$
Caliza húmeda	50 – 500
Mineral de pirita seco	10 – 100
Mineral de pirita húmedo	1 – 0.001
Calcopirita	0.01 – 0.001
Calcopirita húmeda	$10^{-4} - 10^{-5}$

Marga seca	50 – 100
Marga húmeda	1 – 10
Arcilla seca	80
Arcilla húmeda	0.1 – 1
Sal gema húmeda	0.05 – 0.2
Grafito	3.0×10^{-4}
Cobre	1.7×10^{-8}
Plata	10^{-8}
Agua pura de montaña	$100 - 3.0 \times 10^3$
Agua con 3% de sal	0.05 – 0.1
Agua con 20% de sal	0.03

Fuente: Tratado de Geofísica Aplicada

c) Constante dieléctrica y polarizabilidad

Se denominan dieléctricos a las sustancias que no conducen corriente eléctrica.

En ellos no hay cargas eléctricas libres (Yavorski, 1977., pp 373).

Si dos cargas puntuales q_1 y q_2 se hallan en un dieléctrico homogéneo e infinito, la fuerza de acción recíproca electrostática, ya sea el dieléctrico gaseoso o líquido es:

$$\vec{F}_{12} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_1 q_2}{\epsilon r^3} \vec{r}_{12} \quad (3.37)$$

Donde la constante dieléctrica ϵ del medio (permitividad relativa del medio), expresa la cantidad de veces que la fuerza de acción recíproca entre dos cargas q_1 y q_2 en el medio dado (Yavorski, 1977., pp 354), es menor que en el vacío. La disminución de ϵ se debe a la deformación del dieléctrico bajo la influencia de un campo eléctrico.

F_{12} , representa la fuerza \vec{F} de acción recíproca electrostática entre dos cargas eléctricas puntuales y son fuerzas centrales.

\vec{r}_{12} , representa el radio vector que une las cargas q_1 y q_2

ϵ_0 , es la constante dieléctrica del vacío ($\epsilon_0 = 9.0 \times 10^{-12} \text{ C}^2/\text{Nm}^2$)

Por las propiedades eléctricas, las moléculas en un dieléctrico son equivalentes a los dipolos eléctricos (Yavorski, 1977., pp 373) de momento $\vec{p}_e = q\vec{l}$, donde q es la magnitud de las cargas positivas o negativas de una molécula, l es la distancia entre los centros de gravedad de las cargas positivas y negativas.

Si no hay campo eléctrico exterior y $l = 0$, los dieléctricos se denominan no polares; pero si, en el mismo caso, $l \neq 0$, se denominan dieléctricos polares.

En las moléculas de los dieléctricos no polares (H_2 , N_2 , CCl_4 , hidrocarburos, etc.), los centros de gravedad de las cargas positivas y negativas, sino hay un campo eléctrico exterior, coinciden y el momento dipolar de la molécula es cero. Pero si, estos dieléctricos se colocan en un campo eléctrico exterior, se produce una deformación en la molécula y surge un momento eléctrico dipolar inducido de la molécula (dipolo inducido), proporcional a la intensidad del campo \vec{E} :

$$\vec{p}_e = \epsilon_0 \alpha \vec{E} \quad (3.38)$$

Donde α es la polarizabilidad molecular o atómica y ϵ_0 es la constante dieléctrica del vacío. La polarizabilidad depende solo del volumen de la molécula.

El movimiento térmico de las moléculas de los dieléctricos no polares no influye en la creación de momentos dipolares en ellos, es decir, α no depende de la temperatura.

En un campo eléctrico exterior, los dieléctricos se polarizan, es decir, adquieren un estado caracterizado por que los momentos dipolares de cada volumen elemental

ΔV del dieléctrico son diferentes de cero. En este estado se denominan dieléctricos polarizados.

Para medir la polarización del dieléctrico (Yavorski, 1977., pp 375) se utiliza el vector de polarización o polarización \mathbf{P}_e , que es la suma vectorial de los momentos dipolares de las moléculas en la unidad de volumen

$$\bar{P}_e = \lim_{V \rightarrow 0} \left(\frac{1}{V} \sum_{i=1}^n \bar{p}_{ei} \right) \quad (3.39)$$

Donde n es el número de moléculas polares que hay en el volumen V del dieléctrico \bar{p}_{ei} , es el momento dipolar eléctrico de la molécula i .

Para un dieléctrico homogéneo con moléculas homopolares en un campo eléctrico uniforme, se tiene que

$$\bar{P}_e = n_0 \bar{p}_e \quad (3.40)$$

Sustituyendo la ecuación 5.38 en la ecuación 5.40 resulta

$$\bar{p}_e = \varepsilon_0 n_0 \alpha \bar{E} = \varepsilon_0 \chi_e \bar{E} \quad (3.41)$$

Donde $\chi_e = n_0 \alpha$, y se conoce como susceptibilidad eléctrica de la sustancia, es decir, la polarizabilidad por unidad de volumen del dieléctrico, que es proporcional al volumen de todas las moléculas contenidas en 1 cm^3 .

La relación entre ε y χ_e es

$$\varepsilon = 1 + \chi_e \quad (3.42)$$

Donde la magnitud χ_e se calcula según la fórmula de Debye - Langevin:

$$\chi_e = \frac{n_0 \bar{p}_e^2}{3 \varepsilon_0 k T} \quad (3.43)$$

Donde k es la constante de Boltzmann, T la temperatura absoluta y n_0 representa número de moléculas por unidad de volumen del dieléctrico.

Las moléculas de los dieléctricos polares (H_2O , NH_3 , HCl , CH_3Cl y otras) poseen un momento dipolar permanente (constante), relacionado con la asimetría de las nubes de electrones y núcleos de las moléculas.

El campo eléctrico polarizador exterior, E_0 , que es la causa de que surjan las cargas aparentes, lo crea un sistema de cargas eléctricas libres. En el dieléctrico se suman geoméricamente el E_0 y el campo de cargas aparentes E_p . El vector de intensidad de campo E en el dieléctrico caracteriza al campo macroscópico resultante. Por eso, E depende de las propiedades eléctricas del medio.

La constante dieléctrica es un número adimensional. Algunos valores representativos son:

Tabla 3.2: Valores de constante dieléctrica a 20 °C (Modificada)

Material	ϵ	Material	ϵ
Vacío	1	Cloruro de polivinilo	3.18
Aire (1 atm)	1.00059	Plexiglás	3.4
Aire (100 atm)	1.0548	Vidrio	5 – 10
Teflón	2.1	Neopreno	6.7
Polietileno	2.25	Germanio	16
Benceno	2.28	Glicerina	42.5
Mica	3 – 6	Agua	80.4
Mylar	3.1	Titanato de Estroncio	310

Fuente: Física Universitaria con Física Moderna. Vol. 2. Undécima edición

d) Isotropía y Anisotropía

La Isotropía es la propiedad de los cuerpos de que alguna magnitud física, por ejemplo la conductividad, sea la misma en todas las direcciones (Cantos, 1978).

La anisotropía es lo opuesto, es decir que las propiedades varíen según la dirección.

El Grafito es un ejemplo de material anisótropo, estructuralmente presenta un plano de cristalización; la conductividad resulta ser mayor en la dirección de este plano, que en el normal.

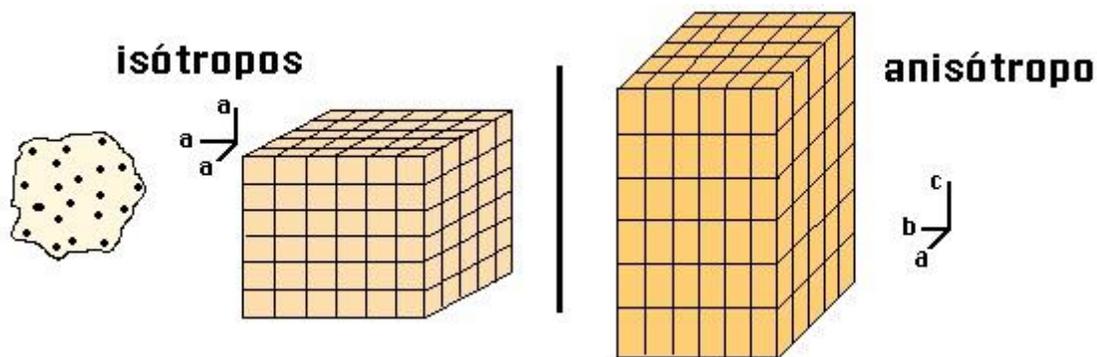


Figura 3.4: Isotropía e anisotropía (Modificada)

En geofísica, encontraremos *macroisotropía* y *macroanisotropía* (Estrada, 2012). Esto es que, suelos anisótropos pueden en conjunto tener isotropía y suelos isotrópico pueden tener macroanisotropía, al estar compuestos en capas como consecuencia de su formación geológica.

Esto en realidad es un tipo de heterogeneidad, ya que se trata de un sistema eléctrico formado por distintos cuerpos, que pueden ser homogéneos e isotrópicos.

e) Efectos del agua de impregnación de las rocas

Todas las soluciones de sales acuosas son conductores electrolíticas, aun cuando las soluciones disueltas sean poco conductoras (Cantos, 1978).

La conducción de corriente en los electrolitos no depende solamente del movimiento de los iones, sino de la cantidad de iones, de la concentración y grado de disociación.

En el caso cuando el agua de impregnación llena los poros de las rocas, la corriente se da por circulación de iones, y la conductividad es función de la cantidad de agua y de sales ionizadas disueltas en ella. Concretamente, dependerá de los siguientes factores:

- 1) De la proporción en volumen de huecos o Factor de Porosidad v .
- 2) De la disposición geométrica de los poros o Factor de Formación F
- 3) De la proporción en que los poros están llenos de agua o Factor de Saturación F_s
- 4) De la resistividad del agua que contiene ρ_w , dependiente a su vez de las sales disueltas.

Heiland citado por Cantos (1978), establece la relación entre los factores en una roca con agua impregnada

$$\rho = \frac{F}{v} \rho_w \quad (3.44)$$

Donde ρ es la resistividad de la roca impregnada

ρ_w es la resistividad de la roca impregnada.

f) Actividad electroquímica

La actividad electroquímica está relacionada con la composición química de las rocas (Cantos, 1978), pero principalmente con la composición y concentración de los electrolitos que las impregnan. De ello depende el signo y magnitud del voltaje que se desarrolla cuando la roca se halla en equilibrio con un determinado electrolito.

En esto se basa el método de autopotencial, polarización espontánea o potencial espontáneo.

3.2.4 Potencial Eléctrico natural (Potencial Espontáneo, SP)

En el suelo fluye corriente eléctrica, esto queda demostrado por la razón de que al intentar medir una diferencia de potencial en el suelo, se encuentra que no es cero.

Por lo que surge la inquietud de cómo y porqué se producen estos potenciales eléctricos de manera natural en el subsuelo.

a) Potencial electrocinético

El potencial electrocinético, se produce por el paso de un fluido de resistividad eléctrica ρ y viscosidad η a través de medio capilar o poroso (una roca), lo que genera un gradiente de potencial eléctrico a lo largo de la trayectoria del flujo del fluido.

Doble Capa Eléctrica

Cuando entra en contacto un fluido y un sólido, se forma una interfaz sólido/líquido, a tal interfaz se le conoce como Doble Capa Eléctrica (DCE, double layer en inglés).

La parte líquida (un fluido como el agua por ejemplo) es la parte conductora cargada positivamente, mientras que la parte sólida (una roca por ejemplo) es poco conductora y está cargada negativamente.

Al 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. 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 adsorción y fuerzas de origen electrostático, mientras que los iones del sólido pasan al líquido por difusión, definiendo así una carga superficial en el sólido. Este mecanismo da lugar a la formación de una doble capa eléctrica, distinguiéndose la capa compacta (conocida como capa de Stern) donde los iones del líquido se adhieren a la pared del sólido, y una capa difusa (o capa de Gouy-

Chapman) en la cual los iones son potencialmente móviles. Según esto, el potencial producido disminuye en forma exponencial en la capa difusa a medida que se aleja de la interfaz hasta llegar a la solución.

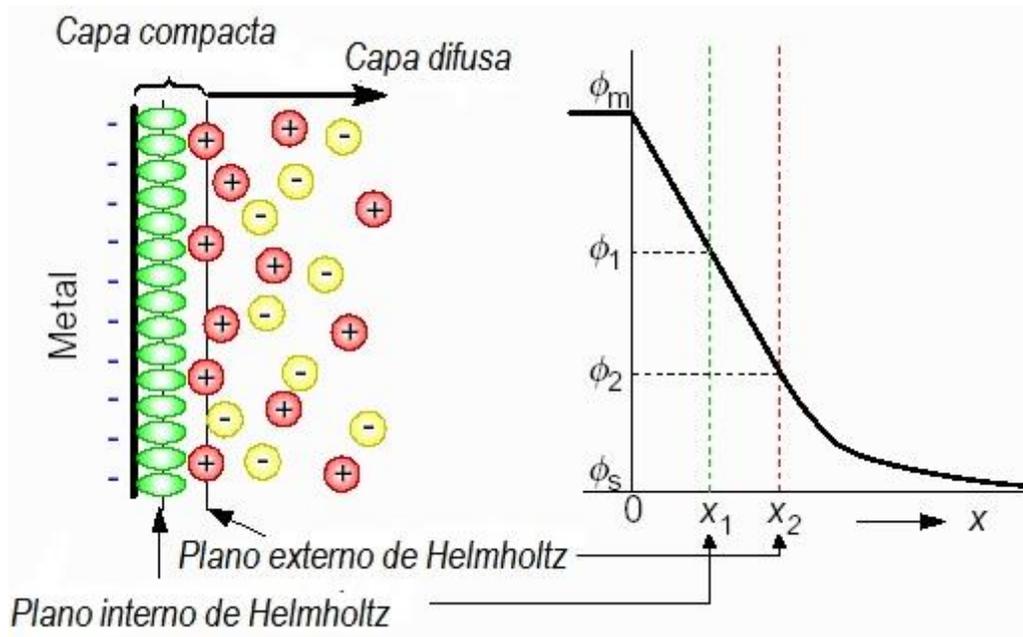


Figura 3.5: Capa doble eléctrica (Modificada)

Capa compacta: es la región comprendida entre el sólido y el plano de aproximación Máxima (es el plano que pasa por el centro de las cargas que están adheridas al sólido). El potencial varía linealmente en la capa compacta. Esta capa compacta se divide en dos capas: la capa interna que contiene los iones parcialmente deshidratados acoplados al sólido por fuerzas de adsorción y que están limitados por el plano interno de Helmholtz y la capa externa, constituida por iones parcialmente hidratados atraídos por fuerzas electrostáticas y cuyo límite exterior corresponde al plano externo de Helmholtz.

Capa Difusa: está situada al exterior de la capa compacta. En esta zona el potencial disminuye de manera exponencial hacia la solución. Hacia el centro del capilar donde la solución es eléctricamente neutra, el campo eléctrico es nulo. Las capas

compactas y difusas son separadas por un plano de desplazamiento (o plano de cizalla) que se confunde mayormente con el plano externo de Helmholtz.

En general, para los líquidos más conductores, el espaciamiento de la capa compacta depende de diferentes parámetros como temperatura, constante dieléctrica, densidad de carga superficial, naturaleza de los medios sólidos y líquidos, fuerza iónica del medio acuoso. En principio, esta distancia de la doble capa disminuye con la fuerza iónica, es decir con la concentración de las soluciones

Electrofiltración

Consiste fundamentalmente en la producción de un gradiente de potencial eléctrico generado por el movimiento de los electrolitos en el subsuelo (Daza, 2012). Este potencial, se produce por interacción de los fluidos móviles presentes en los poros con la doble capa de Helmholtz en la superficie de dichos poros. Este proceso se conoce como acoplamiento electrocinético.

Esto explica una forma de como surgen campos eléctricos naturales, por la filtración de las aguas subterráneas en las rocas porosas. Estos campos existen en todas partes, porque los procesos de filtración ocurren en cualquier parte.

Pero normalmente las fuerzas electromotrices de filtración son insignificantes y el campo eléctrico relacionado con ellas es débil (Carrasco, 2011). Sólo en casos aislados, por ejemplo, en la salida bajo los aluviones de agua a presión de manantiales subterráneos, por drenaje intenso de aguas subterráneas en terrenos accidentados, filtraciones o en obras hidráulica, etc., los campos eléctricos procedentes de la filtración se intensifican hasta tal punto que la observación sobre ellos permite resolver algunos problemas hidrogeológicos y geotécnicos.

Imagínese un capilar (Carrasco, 2011), que posee a una diferencia de presión hidrostática en la entrada y salida, por el cual pasa un electrolito en una determinada dirección. A causa de la adsorción por las paredes del capilar de los iones del mismo signo (normalmente de aniones), en el límite entre la solución y la

pared se forma una capa eléctrica binaria, la externa (fija) cuyo revestimiento consiste en iones negativos adsorbidos y la interna (positiva) que a su vez consta de dos partes: una fija relacionada con la atracción electrostática del revestimiento negativo y otra móvil, distribuida por difusión según la sección transversal del capilar.

Como consecuencia, del capilar se extraen más iones positivos que negativos y por ello en la salida del capilar se acumulan cargas positivas y a la entrada surge el exceso relativo de cargas negativas. Entre el final y principio del capilar, surgen diferencias de potencial proporcionales a la diferencia de presión hidrostática y que dependen también de las constantes eléctricas del líquido. Su valor puede ser calculado por la ecuación:

$$\Delta V = \frac{\rho \varepsilon \zeta}{4\pi \eta} \Delta P \quad (3.45)$$

Donde ΔP representa la variación de presión entre los puntos de entrada y salida del capilar; ε la constante dieléctrica del líquido; ρ la resistividad del líquido; η la viscosidad del líquido; ζ la diferencia de potencial en la capa binaria del revestimiento o potencial zeta o potencial de la doble capa de Helmholtz.

Esta ecuación recibe el nombre de ecuación de Helmholtz-Smoluchowski.

La diferencia de potencial entre los extremos del capilar produce una corriente eléctrica dirigida contra la corriente del líquido y que impide la acumulación de las cargas en el extremo del capilar. Los poros de las rocas se pueden considerar como sistemas complejos de capilares, en cada uno de los cuales se producen procesos análogos a los descritos.

Schlumberger distinguía dos tipos de electrofiltración (Daza, 2012): per descensum y per ascensum. El caso por per descensum, corresponde a la infiltración de aguas lluvias a través de terrenos permeables o a lo largo de fallas. Pierre Lasfargues

(1957) llegó a observar potenciales de -3V en un cerro de la formación Kalahari compuesto de arenas y areniscas alteradas.

Los potenciales de electrofiltración per ascensum pueden ser grandes, si la presión que hace subir las aguas lo es. Potenciales de esta clase relativamente débiles se observan, según Lasfargues, cuando se coloca cada electrodo en una roca diferente en zonas desérticas o semidesérticas con poco espesor de recubrimiento o cuando un electrodo está situado en terreno labrado recientemente y el otro en zona no trabajada desde hace tiempo. El fenómeno se debe, en el primer caso, al ascenso de humedad a través de las capas superficiales, y se observan diferencias de potencial de algunos mV que se debe al ascenso por capilaridad provocado por la evaporación en la tierra removida.

b) Potencial Difusión

El fenómeno de la difusión es un proceso que tiende a establecer dentro de las fases una distribución equilibrada de la concentración (Yavorski, 1977., pp 217).

El fenómeno de difusión en el caso unidimensional ($\rho = \rho(x)$), en un sistema de dos componentes viene definido por la primera Ley de Fick:

$$dM = -D \frac{d\rho}{dx} dA dt \quad (3.46)$$

Donde dM es la masa del primer componente que en el tiempo dt se traslada a través del área elemental dA en la dirección de la normal a x a la superficie que se considera y en el sentido en que disminuye la densidad del primer componente, $d\rho/dx$ es el gradiente de densidad, y, D es el cociente de Difusión. El signo menos indica que el flujo neto va en dirección opuesta al gradiente de densidad.

Si se aísla mentalmente un grupo de moléculas de un sistema de un solo componente, la igualación de su concentración en el volumen del recipiente se

llama Autodifusión. Se define por la Ley de Fick, por lo que D recibe el nombre de Coeficiente de Autodifusión.

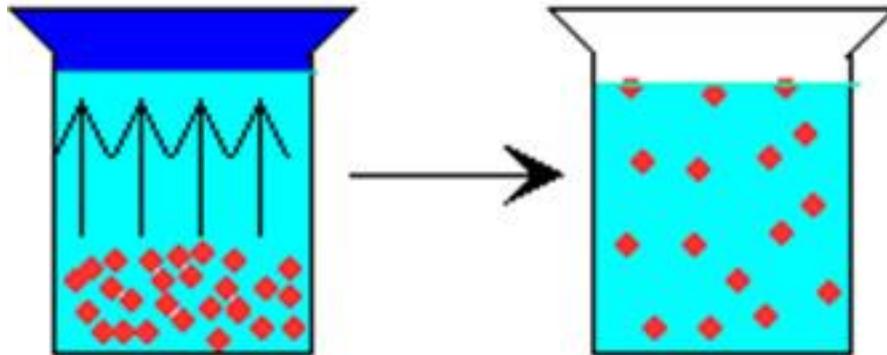


Figura 3.6: Difusión (Modificada)

La densidad de flujo de difusión \vec{j} , se define como el número de partículas de una determinada sustancia que se traslada por difusión (Yavorski, 1977., pp 218), en una unidad de tiempo a través de una unidad de superficie. Si en el medio existe un gradiente de presión ∇p , producido por fuerzas exteriores cualesquiera y un gradiente de temperatura ∇T , la densidad de flujo entonces será:

$$\vec{j} = -Dn_0 \left(\nabla c + \frac{k_T}{T} \nabla T + \frac{k_p}{p} \nabla p \right) \quad (3.47)$$

Donde k es la constante de Boltzmann

D , el coeficiente de difusión que es numéricamente igual a la densidad de flujo de difusión cuando existe el gradiente de concentración ∇c , igual a $1/n_0$.

$k_T D$ es el coeficiente de difusión térmica, es numéricamente igual a la densidad de flujo de difusión cuando $\nabla c = \nabla p = 0$ y $\nabla T/T = 1/n_0$.

k_T , es una magnitud adimensional que se conoce como relación de difusión térmica.

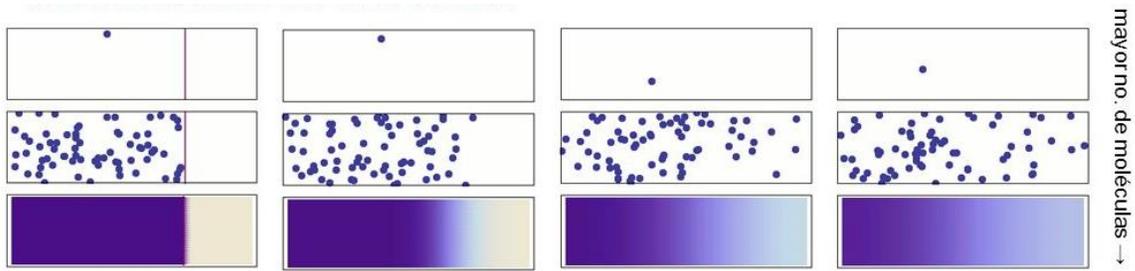
$K_p D$ es el coeficiente de barodifusión, es numéricamente igual a la densidad de flujo de difusión cuando $\nabla c = \nabla T = 0$ y $\nabla p/p = 1/n_0$.

$$n_0 = \frac{p}{kT} \quad (3.48)$$

Como resultado de los procesos de difusión se crea un campo natural (Carrasco, 2011), se produce en los contactos de las rocas que contienen en sus poros soluciones de una misma sal con diferentes concentraciones o soluciones de diferentes sales. En el primer caso, a causa de que la movilidad de los iones de distinto signo es diferente en el electrolito, en el proceso de nivelación de las concentraciones los iones de mayor movilidad se adelantan a los de menor movilidad y a un lado del contacto se produce la acumulación de iones principalmente del mismo signo y en el otro de signo contrario. En el segundo caso, en el proceso de difusión también se produce la separación de los iones de mayor movilidad de los de menor movilidad y la acumulación correspondiente de cargas contrarias a cada lado del límite de contacto de las soluciones. Una nueva distribución de los iones lleva también a la creación de un campo eléctrico. La diferencia de potencial que surge por difusión, puede expresarse por la ecuación

$$\Delta V = \frac{u - v}{u + v} \frac{RT}{nF} \ln \frac{C_2}{C_1} \quad (3.49)$$

Siendo u y v la movilidad de los cationes y aniones; R la constante de los gases; T la temperatura absoluta; F la constante de Faraday; C_1 y C_2 las concentraciones de las soluciones; n la valencia de los iones.



Difusión en una superficie sólida

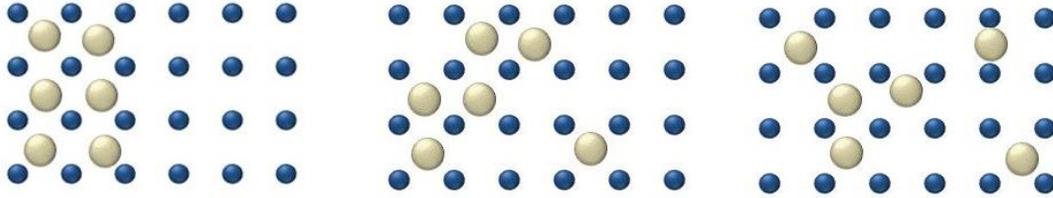


Figura 3.7: Movimiento molecular en la difusión (Modificada)

La Ley de Fick puede describirse dependiendo el autor, por lo que (3.47) puede escribirse en función sólo del acoplamiento entre gradientes químicos y densidad de corriente eléctrica (Daza, 2012): El flujo molar de la i -ésima especie iónica (es decir, $q+$ o $q-$ en un electrolito 1:1) debido al gradiente de concentración está descrito por:

$$\vec{j}_i = -D_i \nabla c_i \quad (3.50)$$

De acuerdo con la relación de Einstein, el coeficiente de difusión puede escribirse en términos de la movilidad iónica u ; la constante de Boltzmann k ; temperatura, T ; la carga iónica total $|ez|$ donde e es la carga elemental.

$$D_i = \frac{u_i k T}{|e Z_i|} \quad (3.51)$$

La densidad de corriente es:

$$\vec{J}_D = \sum_i \left(e Z_i N_A \vec{j}_i \right) \quad (3.52)$$

Donde N_A es el número de Avogadro. Por lo que la densidad de corriente será dada por el flujo total de todas las especies iónicas

$$\vec{J}_D = \sum_i (-Z_i R T u_i \nabla c_i) \quad (3.53)$$

Donde R , es la constante del gas ideal, $R = k N_A = 8.314 \text{ J/mol. K}$.

Si tomamos un ejemplo, para el caso de un poro de geometría simple lleno de fluido, la densidad de corriente total, que involucra solo la difusión y la conducción eléctrica, está descrita por la ecuación de Nernst-Planck

$$\vec{J} = \vec{J}_C + \vec{J}_D = \sum (-u_i F |Z_i| c_i \nabla \phi - Z_i R T u_i \nabla c_i) \quad (3.54)$$

Notar que en este caso, la conductividad eléctrica del fluido es una función de la concentración del soluto que conduce el flujo.

c) Potencial electrotérmico

Si se mantiene un gradiente de temperatura a través de una muestra de roca, aparecerá un gradiente de potencial correspondiente (Daza, 2012). Este fenómeno es conocido como acoplamiento termoeléctrico y es causado por difusión termal diferencial de los iones de los fluidos presentes en los poros y de los electrones e iones cedidos por la roca matriz, proceso conocido como efecto de tipo Soret. La relación entre la diferencia de potencial eléctrico y la diferencia de temperatura se denomina coeficiente de acoplamiento termoeléctrico

$$C_T = \frac{\Delta V}{\Delta T} \quad (3.55)$$

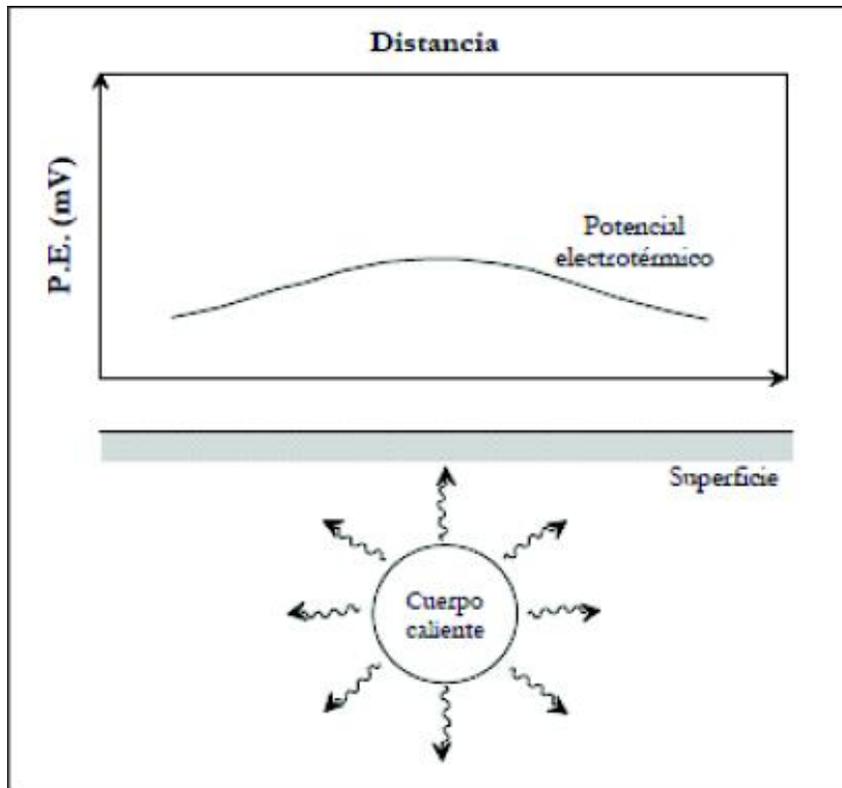


Figura 3.8: Modelo de generación de Potencial electrotérmico (Modificado)

Fuente: Métodos geoelectrónicos aplicados a la exploración de aguas subterráneas y termales

d) Potencial electroquímico

El mecanismo de su origen e influencia, resulta de las leyes electroquímicas (Carrasco, 2011), se puede presentar del modo siguiente: En la superficie de un conductor electrónico, colocado en un medio de conducción iónica, es decir, en el límite de las fases de conductancia de distinta naturaleza, se crea una capa eléctrica binaria. La misma se forma debido al paso de los cationes metálicos de la red cristalina a la solución, o a la precipitación de los cationes sobre la superficie del conductor, o a la adsorción selectiva de los iones de una fase de la superficie por la otra fase. Esta capa se caracteriza por un salto del potencial, cuya magnitud y signo dependen de los factores determinantes del potencial: propiedades, composición y estado del conductor en el medio circundante, los cuales participan en el proceso de formación de la capa eléctrica binaria. Por consiguiente, el conductor electrónico, en

relación al medio circundante, adquiere un potencial que se denomina potencial de electrodo.

Los factores básicos determinantes (Carrasco, 2011) del potencial son: a) la composición química de las aguas subterráneas que circulan en las rocas encajantes e impregnan el cuerpo mineral; b) la composición mineral y las características texto-estructurales del cuerpo mineral.

La influencia de estos factores se manifiesta en su dependencia de las condiciones físico-geológicas tales como resistividad de las rocas y minerales, velocidad de circulación de las aguas subterráneas e interacción de las mismas con las rocas y minerales, a causa de lo cual cambia la composición de las aguas en primer lugar y su grado de oxidación y contenido de iones de sulfuro de hidrógeno y de hierro.

Si el valor y signo del salto de potencial de la capa eléctrica binaria permanece constante en toda la superficie del conductor, entonces este cerrará uniformemente la superficie polarizada, no creándose en el medio circundante un campo eléctrico.

Las condiciones necesarias para que surja un campo en el medio externo es la diferencia de valor o signo del salto de potencial de la capa eléctrica binaria en las diversas zonas de la superficie polarizada. En un medio geológico el valor del salto de potencial en las diferentes partes de la superficie polarizada normalmente es diferente.

Para los yacimientos minerales polarizantes, ello significa que los factores determinantes del potencial deben ser diferentes para las distintas partes del cuerpo mineral. Esto puede ser consecuencia de la presencia bien de una zonalidad en la distribución de los minerales en el yacimiento, bien de la variación de composición química de las aguas subterráneas. En las condiciones geológicas tiene más importancia la segunda causa, que a su vez está relacionada con la disminución del contenido de oxígeno con la profundidad.

Entre los cuerpos que pueden presentar este fenómeno figuran los yacimientos de algunos sulfuros (pirita, pirrotita, calcosina, etc.), ciertos óxidos (magnetita, pirolusita), minerales o rocas carbonosas (granito, antracita). El potencial espontáneo más intenso suele ser por la pirita y pirrotita (Daza, 2012).

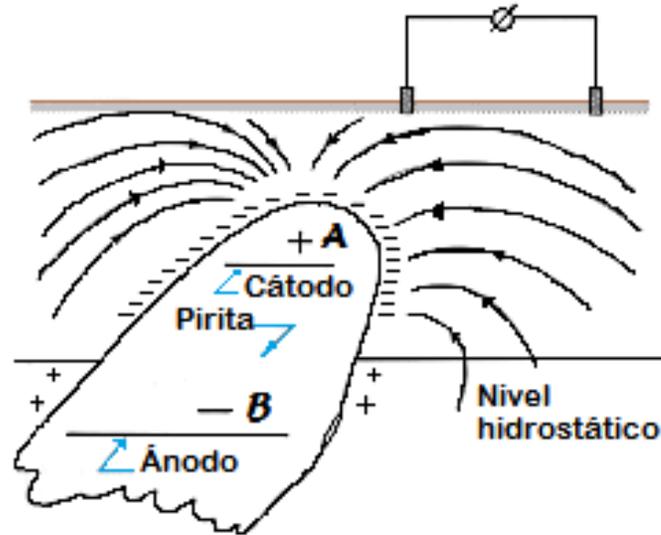


Figura 3.9: Masa de pirita a pocos metros de la superficie (Modificada)

Fuente: Tratado de Geofísica Aplicada

Las reacciones electroquímicas a diferentes alturas de la interfaz cuerpo-roca encajante (encima y debajo del nivel freático), generarán la polarización del cuerpo que sirve de enlace entre ellas. 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. El flujo de electrones de abajo hacia arriba, hace que la reacción química pueda mantenerse indefinidamente. Esto implica que los cuerpos productores de SP son siempre buenos conductores electrónicos, dado que el flujo de electrones se da en su interior, y fuera de él, el flujo es iónico. Por esto las anomalías de SP son casi siempre negativas en la proximidad del extremo superior del cuerpo. Sobre el nivel freático, las sustancias disueltas se hallan relativamente oxidadas y bajo él,

relativamente reducidas, esto produce la diferencia en el potencial Redox (llamado también potencial de oxidación) que es la causa del fenómeno.

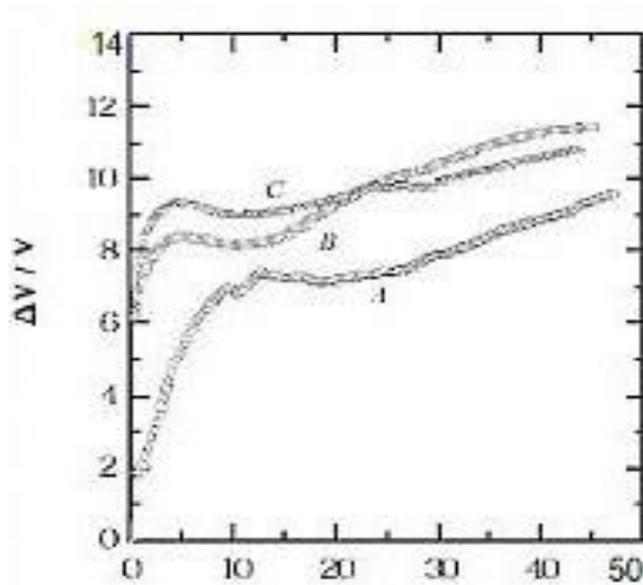


Figura 3.10: Variación del potencial Redox con el tiempo (Modificada)

En la zona superior, las reacciones más probables son las que afectan al oxígeno libre y al ion férrico. En la zona inferior, las reacciones de oxidación más probables son aquellas en las que interviene el ion ferroso y el hidróxido ferroso.

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 libre que es suministrado por el agua de lluvia al infiltrarse en el subsuelo. Por ello, el cuerpo de yacer, al menos en parte, en zona de oxidación activa.

Los electrones requeridos por las reacciones de la zona alta son proporcionados por las reacciones de la zona baja a través del cuerpo conductor. La energía necesaria para el mantenimiento del proceso es suministrada por el oxígeno atmosférico, que penetra en el subsuelo disuelto en las aguas de lluvia.

La baja temperatura, retrasa las reacciones y las capas de congelación (permafrost, etc.) impiden el movimiento iónico

Esta pila de concentración asociada a la presencia de cuerpos mineralizados puede generar algunas centenas de mV (Daza, 2012), pero que en un contexto geotérmico son más bien débiles, de algunas decenas de Mv. No obstante, pueden producirse fuertes contrastes químicos en el subsuelo de un edificio volcánico producidos por la diferencia de concentración en elementos de tipo sulfatos o cloruros, así como la precipitación de hidróxidos entre las ramas ascendentes calientes y las descendentes frías, presentes en el sistema hidrotermal.

La influencia conjunta de todos los factores enumerados lleva a que en las condiciones naturales, la magnitud del salto de potencial de la capa eléctrica binaria crezca con la profundidad (Carrasco, 2011). De esta forma, un depósito mineral junto con sus rocas encajantes forma un elemento galvánico en el cual el cátodo se sitúa en la parte superior del yacimiento y el ánodo en la inferior. El circuito interno del elemento es el mismo cuerpo mineral y el externo, el paquete de rocas encajantes. Dado que las rocas y en especial el cuerpo mineral poseen buena conductancia eléctrica, entre los electrodos del elemento galvánico así creado comienza a circular la corriente. Los portadores en el circuito interno serán los electrones libres y en el externo, los iones.

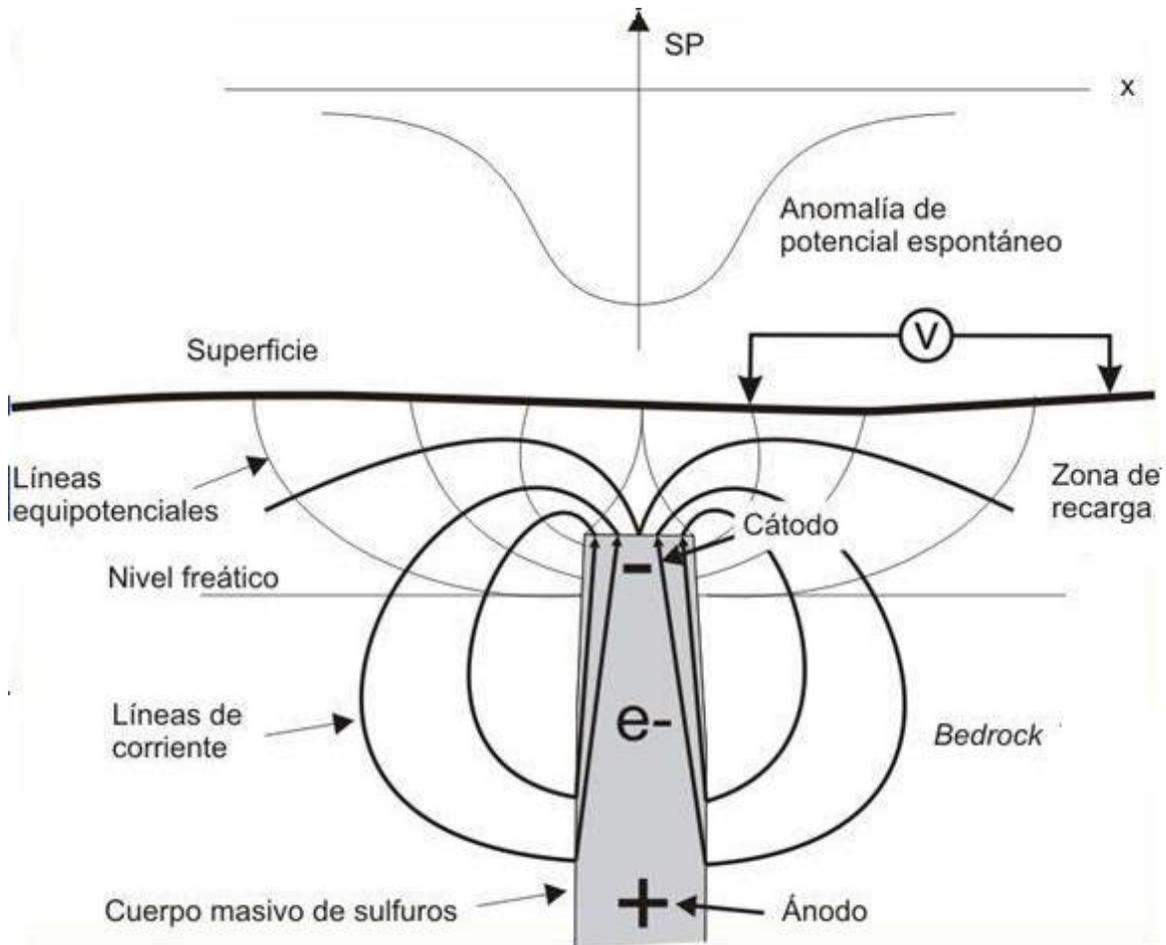


Figura 3.11: Anomalías de Potencial natural (Modificada)

Se sabe que la corriente en el circuito externo de un elemento galvánico depende de la f.e.m del elemento y de la resistencia total del circuito. La resistencia total se compone de las resistencias de las partes interna y externa del circuito. Para un depósito mineral polarizado, esto significa que el campo en su entorno será tanto más intenso cuanto más se diferencien los valores del salto de potencial en las distintas partes del depósito y cuanto menos sea su resistencia interna. La resistencia interna de la pila natural considerada, depende de la resistividad del mineral y también de las reacciones electroquímicas que se producen en el contacto del cuerpo mineral y de las soluciones que lo impregnan, si por este contacto circula la corriente eléctrica.

La intensidad de los campos naturales observados sobre cuerpos sulfurados en diferentes yacimientos, oscila entre amplios límites, desde algunas decenas hasta varias centenas de milivoltios.

También se señalan campos eléctricos naturales sobre capas de antracita, grafito, pizarras carboníferas y rocas grafitizadas las cuales también presentan conductancia electrónica. Sin embargo, en medio iónico las mismas se comportan como electrodos inertes, pues tienen una red cristalina sólida y no ceden cationes al medio iónico. El origen de los campos eléctricos está relacionado en este caso con la formación de una capa eléctrica binaria por adsorción por el grafito o la antracita de los iones de las aguas subterráneas. La anomalía negativa observada en tal caso alcanza a menudo cientos de milivoltios (Carrasco, 2011).

3.2.5 Potencial Espontáneo

Definiremos Potencial Espontáneo (SP), como la diferencia de potencial que se mide en el suelo.

Origen

Aunque el desarrollo de los métodos geoeléctricos es relativamente reciente, su origen se remonta al siglo XVIII (Daza, 2012) con los trabajos de Stephen Gray junto a Granville Wheler y J. Godfrey (1729) sobre la resistividad de las rocas y el descubrimiento, realizado en 1746 por Sir William Watson, de que el suelo es conductor.

El inglés Robert Fox descubrió en 1815 el fenómeno de la polarización espontánea, auto potencial o potencial espontáneo, que consiste en que los yacimientos de ciertos minerales producen débiles corrientes eléctricas apreciables desde la superficie. Fox sugirió el uso de este fenómeno para la prospección de yacimientos, por lo que se le ha considerado como el abuelo de los geofísicos, al emplear el Método de Potenciales Espontáneos en Cornwall, Inglaterra, para encontrar extensiones de los depósitos conocidos de cobre en esa región.

En 1885, Carl Barus, un distinguido físico de la Brown University (USA), llevo a cabo medidas de polarización en el filón Comstock, en Nevada.

Entre 1880 y 1914, Barnes, Brown y Wells, miembros del Geological Survey de Estados Unidos, utilizan sucesivamente este método en las minas del mismo estado de Nevada, y construyen los primeros electrodos impolarizables.

Sin embargo, el primer éxito corresponde al físico de Alsacia, Conrad Schlumberger, “padre de la prospección eléctrica” y sin discusión, la figura más importante de la misma. En 1912, utilizando un equipo muy básico, grabó el primer mapa de curvas de potencial en su finca cerca de Caen, en Normandía, antes de ampliar sus experimentos para las minas de hierro en la zona. Este investigador descubrió en 1913 el yacimiento de sulfuros en el Distrito de Bor, Serbia, por medio del potencial espontáneo, primer hallazgo geofísico de mineral no magnético.

a) Estudio del potencial en terrenos no consolidados.

En este ámbito destaca el trabajo de Ogilvy titulado: “Geophysical studies of water leakage from reservoirs” (Serrano, 2003). En este estudio se realiza un profundo análisis de la influencia que tienen sobre el valor del potencial, factores como el gradiente hidráulico, el tamaño de grano, la permeabilidad, así como la concentración de sal en un fluido.

Utilizando arenas de cuarzo limpias y bajo la hipótesis de régimen laminar, en donde la ley de Darcy tiene validez, las principales conclusiones que se derivaron de este estudio fueron:

- A medida que aumentamos el gradiente de presión del fluido, la amplitud del potencial también incrementa su valor, pero siempre en valores negativos.
- Dado un gradiente hidráulico, las mayores amplitudes del potencial electrocinético se obtienen para terrenos de permeabilidad entre 60-70 Darcy (corresponden a arenas de tamaño de grano medio).

- Fijado un gradiente hidráulico y una permeabilidad, un aumento de la concentración de sal del fluido conlleva una disminución significativa del valor del potencial, llegando incluso a valores casi imperceptibles. Este aspecto limitará el uso del método del Potencial espontáneo en problemas en donde el agua presente elevada salinidad.

b) Estudio del potencial en medios fisurados.

A diferencia de los terrenos no consolidados, el estudio del potencial en medios fisurados no ha sido tan amplio. En este sentido destaca el trabajo de Bogolosvsky titulado: "The study of streaming potential on fissured media models" (Serrano, 2003), en el que intenta establecer la relación existente entre el potencial y algunos de los parámetros que definen un material fisurado: la apertura de las fisuras, la existencia o no de relleno, y la proporción de finos y arenas presentes en el relleno.

También bajo la hipótesis de régimen laminar, las conclusiones más importantes que se derivaron de los ensayos fueron las siguientes:

- Para distintas aperturas de fisuras sin relleno, se observó que cuanto menor sea la apertura mayor será la magnitud del potencial electrocinético (en valores negativos). También se apreció que el orden de magnitud de los valores de potencial obtenidos, eran muy pequeños en comparación con los observados para materiales no consolidados.

- Dada una apertura de fisura de 3mm y diferentes cantidades de relleno arenoso, se observó que:

1. No existe una relación de proporcionalidad entre el potencial y la cantidad de relleno, es decir dado un gradiente hidráulico, más cantidad de relleno arenoso no implica valores de potencial más grande. Los valores máximos de potencial se obtuvieron para un relleno aproximado del 40 %

2. El orden de magnitud de los valores obtenidos son mucho más grande que los obtenidos para fisuras sin relleno, pero sin llegar a los niveles medidos en terrenos no consolidados.

- Por último, dada una apertura de fisura de 3mm y rellena al 100% con diferentes mezclas de arena y arcilla, se observó que fijado el gradiente hidráulico, a medida que aumenta la proporción de arcilla en el relleno, el valor del potencial electrocinético disminuye, si bien el orden de magnitud de éstos valores (siempre negativos) continúan siendo muy superiores a los observados para fisuras sin ningún tipo de relleno.

En definitiva, la detección de focos de filtración en medios fisurados precisará de la existencia de fisuras de pequeña apertura y con cierto relleno (preferentemente arenoso), de forma que la magnitud del potencial generado por el flujo de agua, sea lo suficientemente significativo como para ser medido. En caso contrario la localización de áreas de filtración es prácticamente imposible.

A estas limitaciones, al igual que pasaba en terrenos no consolidados, hemos de sumarle la influencia de la concentración de sal en el fluido en donde recordemos, un incremento de la salinidad del agua conlleva una disminución de la magnitud del potencial.

Destacar que estos ensayos se engloban bajo la hipótesis de régimen laminar, de forma que en el caso de tener un flujo en régimen turbulento (muy factible en medios fisurados o Kársticos) el comportamiento descrito deja de tener validez.

Anomalía de SP observadas en regiones volcánicas

Al considerar la existencia de fuentes geotérmicas en el suelo, el movimiento de las aguas subterráneas se ven modificados por el tamaño de la fuente geotérmica (Torres, 2013). Gran parte de las aguas por meteorización que se infiltran en el suelo y se evaporan a cierta profundidad (por la cercanía a la fuente de calor) creándose una célula de convección hidrotermal que en ocasiones llegan a la

superficie, lo que se conoce como fumarolas; mientras que, otras no llegan a la superficie, pero a cierta distancia se vuelven líquidos.

Sobre las anomalías de SP que han sido observadas en zonas geotérmicas por algunos investigadores, se considera que la razón más importante es el efecto electrocinético, debido a la asociación de transferencia de agua y a la ascendencia térmica, que es lo que produce las anomalías de SP.

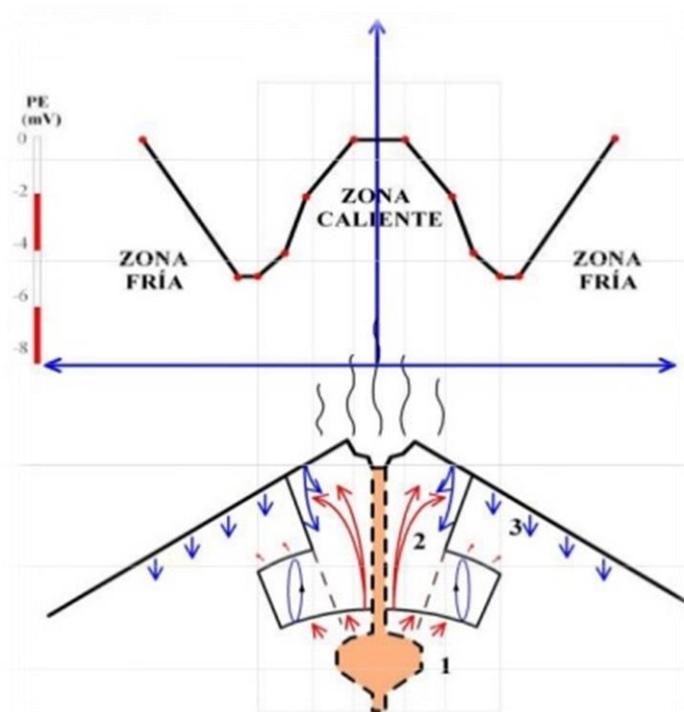


Figura 3.12: Acoplamiento electrocinético en estructuras volcánicas (Modificada)

En el caso de la partes superiores de los volcanes, la presencia de gradientes positivos de SP versus altitud se supone son generados por las corrientes ascendentes de fluidos hidrotérmicos; mientras que en el caso de los gradientes negativos, se asocia a las infiltraciones por gravedad en la parte inferior del volcán. Por lo que hay que considerar que la generación y la amplitud de las señales de SP varían en función de las características de los sólidos y líquidos (que ya han sido mencionadas en secciones anteriores), del caudal y de la temperatura.

Estudios de SP en volcanes activos suelen clasificarse en tres categorías:

1. Los focos que sólo tienen una variación espacial: generalmente estos estudios están orientados hacia la descripción de estructuras de sistemas hidrotermales o volcanes activos.
2. Los que se concentran en la variación temporal: estudios periódicos de SP registran los cambios de los sistemas hidrotermales asociados a las actividades volcánicas, obteniendo resultados variables.
3. Los que incluyen las variaciones espaciales y temporales.

Principales mecanismos de SP en volcanes

Ambos mecanismos se considera que son característicos del perfil de SP típico de un volcán activo y su estudio se viene realizando en muchos volcanes activos.

Efecto topográfico

Generalmente se conoce Efecto topográfico al gradiente negativo de SP versus Altitud observado en las partes inferiores de los volcanes.

Las posibles causas de este efecto se considera que sean las corrientes potenciales generadas debido al flujo de agua subterránea.

Hay que considerar que parte de las precipitaciones de agua se infiltra en el suelo y lo demás fluye en la superficie topográfica, siendo transportado por gravedad y que en algunos casos genera un potencial de vapor.

La magnitud del efecto topográfico depende del coeficiente de acoplamiento electrocinético (Torres, 2013).

Efecto de las surgencias hidrotermales

En algunas regiones volcánicas se ha observado que las anomalías de SP tienden a ser positivas, especialmente en la cumbre, con amplitudes de hasta varios cientos de mV.

La causa de estas anomalías se asocia a la surgencia de agua subterránea por convección térmica. Este flujo ascendente genera el potencial de vapor y la consecuente anomalía positiva de SP (Torres, 2013).

Agentes perturbadores en las medidas de Potencial.

El método del Potencial espontáneo es un método pasivo, dado que simplemente se mide un potencial eléctrico que ya existe de forma natural en el terreno. Esta imposibilidad de poder modificar ningún parámetro de estudio (i.e. intensidad, frecuencia, etc.), y por tanto de intentar separar la señal de nuestro interés del resto, conllevará que el registro de campo obtenido se vea afectado por una gran variedad de potenciales espontáneos, que perturbarán y enmascararán el potencial de nuestro interés: el potencial electrocinético (Serrano, 2003).

Destacar que el orden de magnitud de estos potenciales en muchas ocasiones es similar al del propio potencial electrocinético, que suele ser de algunas decenas de mV.

Aunque comúnmente se denomina “ruido” a todas aquellas anomalías de potencial que no son de nuestro interés.

Así, Corwin citado por Daza (2012), distingue entre “error” y “ruido”:

“Error” serían todos aquellos errores irreproducibles asociados al propio proceso de adquisición de datos.

“Ruido” serían todos aquellos potenciales generados de forma natural (i.e. corrientes telúricas) o artificial (i.e. actividad humana), y cuya génesis no está ligada al movimiento del agua en el terreno.

Dentro de los “errores” tenemos:

Polarización y deriva

La polarización se define como el potencial medido por un par de electrodos en ausencia de un campo eléctrico externo. Mientras que la deriva son las variaciones temporales del valor de la polarización.

Ambos fenómenos responden a la variación de algunos parámetros medioambientales como son la temperatura, la humedad del suelo, así como la química del fluido intersticial.

Las variaciones de temperatura entre los electrolitos del electrodo B con respecto al del A, pueden provocar de +0.5 a +1 mV por cada C° que aumente esta diferencia de temperatura. Los cambios de temperatura son los principales causantes de la deriva de los valores del potencial de polarización, llegándose incluso a alcanzar niveles de 10 a 20 mV bajo condiciones severas.

En cuanto a los cambios químicos, se pueden llegar a generar anomalías de potencial de algunas decenas de mV

Efecto debido al contacto suelo-electrodo

Si colocamos los electrodos en el terreno, medimos, los extraemos y volvemos a reintroducirlos para repetir la medición, se observa que generalmente las mediciones han cambiado. En muchos suelos compactos conductivos, estas variaciones son inferiores de 5 o 10 mV., sin embargo para suelos secos y resistivos estas variaciones pueden ser de decenas de mV

En lo que concierne al grupo de los “ruidos”, distinguimos entre los que generan un potencial espontáneo constante o variable en el tiempo.

Del conjunto de “ruidos transitorios” destacamos:

Corrientes telúricas

Son aquellos cambios de potencial debidos a las variaciones temporales del campo magnético terrestre. Las corrientes telúricas son de origen natural y sus variaciones temporales presentan unos periodos de oscilación comprendidos entre los milisegundos hasta horas.

Corrientes eléctricas debido a la actividad humana

Las zonas industrializadas son fuente de grandes variaciones de potencial, en los que la amplitud de las anomalías puede ser de decenas a centenares de mV/Km

En cuanto a los “ruidos estables” o con una variación temporal muy lenta, destacamos:

Efecto topográfico

En bastantes casos el gradiente topográfico es fácil de reconocer.

Corrosión de elementos metálicos enterrados

La existencia de elementos metálicos enterrados en el terreno (i.e. tuberías metálicas), pueden generar anomalías de potencial de gran amplitud (algunas centenas de mV.) de signo negativo.

IV. MARCO METODOLÓGICO

4.1 Método de SP

El método del Potencial espontáneo se basa en medir entre dos puntos de un terreno, cual es la diferencia de potencial eléctrica generada de forma natural en el subsuelo.

El origen de estos campos eléctricos naturales (potenciales espontáneos) está asociado a diferentes fenómenos como por ejemplo a las variaciones de las propiedades del terreno (cambios de humedad, de su química, etc.), la presencia de cuerpos metálicos, actividad biológica de la materia orgánica, y lo explicado en la sección anterior.

Sin embargo de todo el conjunto de potenciales espontáneos, el que nos resulta interesa es el denominado Potencial electrocinético (Electrokinetic potential o Streaming potential) dado que su génesis está ligada al paso de un fluido a través de un medio poroso (Serrano, 2003).

Por consiguiente, el objetivo de este método se reduce simplemente a detectar en nuestro registro de campo, las variaciones espaciales del potencial electrocinético.

Utilizando electrodos impolarizables en contacto con el suelo nos permite cartografiar la información de SP obtenida.

4.2 Tipo de configuraciones

A la hora de realizar las medidas de campo, se disponen en forma de perfiles, de los que podemos optar por diferentes procedimientos. Si bien todos ellos se han utilizado con éxito en diferentes trabajos, la susceptibilidad a errores sistemáticos hace que ciertos dispositivos sean más idóneos que otros.

Comúnmente se conocen las tres configuraciones siguientes:

1. Configuración del gradiente.

Esta técnica precisa de 2 electrodos, y se basa en medir mediante el voltímetro, cual es la diferencia de potencial entre los dos electrodos, siendo la distancia entre ambos invariable.

Para ello, en primer lugar se define cuál es el electrodo A y B y se une a la terminal positiva y negativa del voltímetro respectivamente. Realizada la primera medida, ahora sin cambiar la polaridad del dispositivo así como la distancia electródica, se procede 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.

Si la distancia fija entre los dos electrodos es relativamente pequeña en comparación con la longitud de onda de la anomalía, este procedimiento representa esencialmente el gradiente del potencial espontáneo en la dirección del perfil de reconocimiento. Para obtener la variación espacial del valor total del potencial, basta con ir sumando cada uno de estos gradientes.

Ventajas

La utilización de poca longitud de cable eléctrico, aspecto que supone hace que se minimice su exposición a las mordeduras de los animales y a los actos de vandalismo.

La rapidez con la que puede ser movido el dispositivo para evitar incidentes con los posibles vehículos que puedan aparecer en la zona.

En caso de observar problemas con el cable eléctrico, es más fácil de encontrar el lugar donde tenemos el fallo eléctrico.

Desventajas

La desventaja de esta configuración reside en la calidad de los datos obtenidos.

Esto se debe a que el propio proceso de adquisición de datos lleva asociado unos “errores” (polarización, deriva y efecto contacto-suelo, que si bien pueden ser mínimos para cada medida puntual, a la hora de sumar los gradientes a fin de obtener el potencial total, la magnitud de estos errores se puede magnificar significativamente.

2. Configuración de base fija (o campo total).

En este dispositivo, precisa también de 2 electrodos, se basa en colocar estaciones fijas de medida a lo largo del perfil que previamente se haya definido. En el momento de realizar las medidas iremos a una de estas estaciones, colocaremos un electrodo (será el B) y mediremos el potencial con respecto al electrodo A, que estará situado siempre en una misma base (denominada base de referencia), en la que supondremos de forma arbitraria potencial cero.

La correcta ubicación de esta base de referencia será fundamental a la hora de obtener unos resultados óptimos, siendo las zonas idóneas para su emplazamiento aquellas que presenten un valor del potencial muy estable en el tiempo.

Ventajas

La principal ventaja es que ahora no tendremos problemas de acumulación del error, ya que cada lectura si bien está sujeta a las tres componentes del error anteriormente mencionadas, ya corresponde al valor total del potencial.

La flexibilidad a la hora de colocar las bases, dado que podemos optar por densificar su número en aquellas zonas de especial interés.

Desventajas

Que las distancias entre las estaciones de medida y la base de referencia pueden llegar a ser incluso de algún kilómetro, esto conlleva:

Un aumento de la susceptibilidad del cable eléctrico a sufrir algún percance, ya sea fortuito o por vandalismo.

Dificultad a la hora de encontrar la ubicación precisa del fallo.

3. Configuración multielectrónica.

Esta configuración es similar a la de base fija pero a diferencia de ésta, ahora no se tiene que ir de estación en estación conectando el electrodo B con el de referencia, y luego medir, sino que, ahora disponemos de un gran número de electrodos, los cuales ya están todos conectados a la base de referencia mediante un cable multiconductor. Se irá realizando de forma automática toda la secuencia de medidas, con el espaciado temporal que nosotros queramos.

Ventajas

La gran ventaja de este dispositivo es la capacidad de realizar un gran número de medidas en un intervalo de tiempo concreto. Esto nos permitirá estimar con gran precisión la deriva de los electrodos, así como otras variaciones temporales del potencial (i.e. corrientes telúricas), y por tanto nos será mucho más fácil y preciso el filtrar estos potenciales de nuestro registro de campo.

Desventajas

El elevado coste en comparación con las otras dos configuraciones.

4.3 Instrumentación

Para medir el potencial espontáneo es necesario disponer de al menos dos electrodos impolarizables, un voltímetro de gran impedancia, cable y carrete (para el caso de gradientes no es necesario, pero en esta investigación que es del tipo de base fija si es requerido).

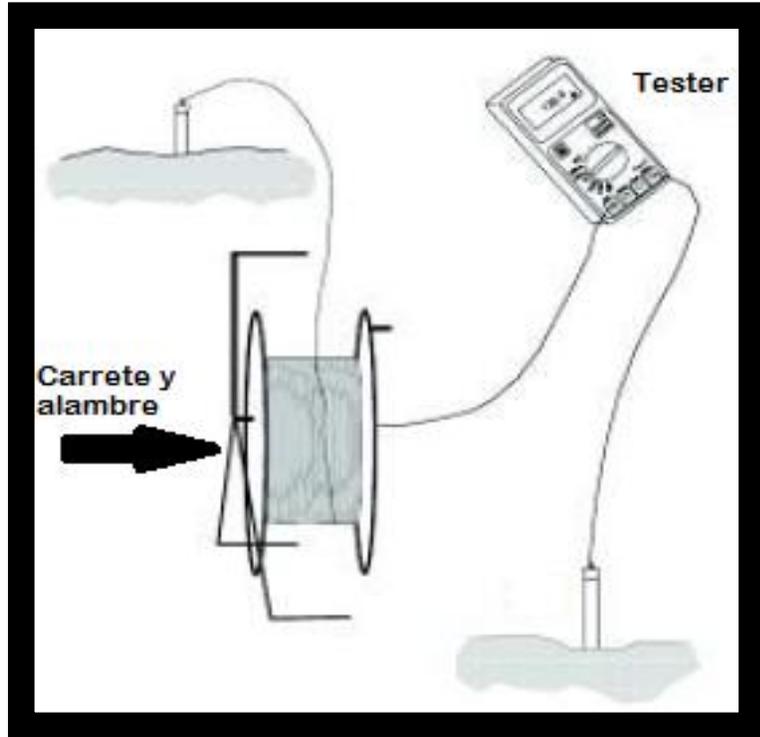


Figura 4.1: Montaje experimental

Fuente: *Métodos geoelectricos aplicados a la exploración de aguas subterráneas y termales (modificada)*

Los electrodos impolarizables pueden ser construidos con un tubo de PVC, relleno de una solución sobre saturada de sulfato de cobre (CuSO_4) y en la que se ha sumergido un cable de cobre.



Figura 4.2: Sulfato de Cobre (CuSO_4)

Con respecto a la química, en estricto rigor el sulfato de cobre CuSO_4 son cristales, o sales.

En la parte exterior al tubo de PVC, esta varilla de cobre posee un terminal que es conectado al cable conductor. El extremo inferior del tubo de PVC consta de un tapón de madera o material permeable.

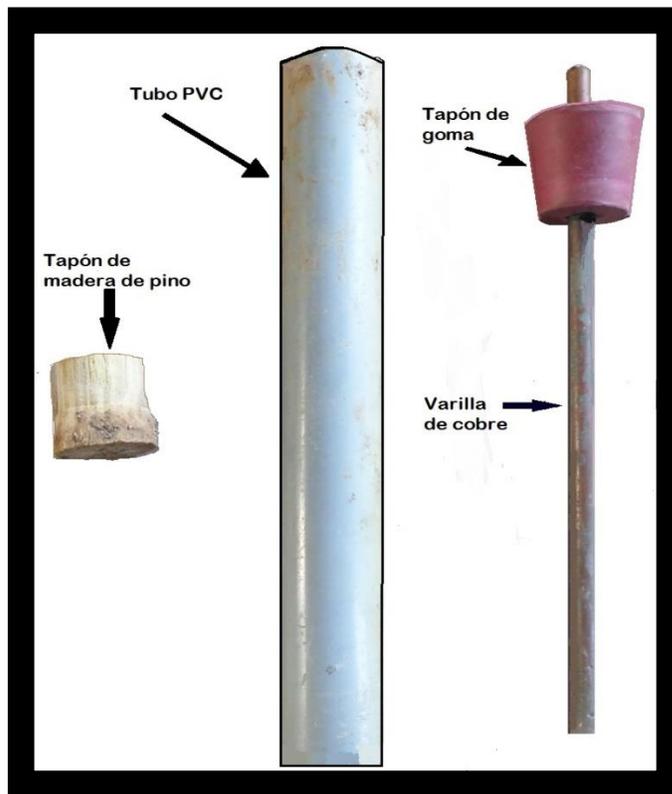


Figura 4.3: Partes de los electrodos impolarizables

Con respecto a la madera, es importante que sea de textura porosa, a través de la cual se asegure la continuidad en el contacto del electrodo con el suelo y por consiguiente el intercambio iónico; en nuestro caso se usó tapones de pino, el disco de madera va en la parte inferior del tubo de PVC, pero no totalmente metido, sino la mitad de su grosor.

En el extremo superior se utilizó un tapón de hule #5 incrustado al cable de cobre.

Independientemente de la configuración de medida empleada, la construcción del dispositivo para medir el potencial espontáneo es el mismo.

Los elementos necesarios para la medición de SP en esta investigación son:

Tubos de PVC de 16 cm de la largo.

100 gramos de sulfato de cobre (CuSO_4)

1 litro de agua destilada

Cables de cobre de 16 cm.

Tapón de madera de igual diámetro al diámetro interno del tubo de PVC.

Tapones #5 de hule para poder cerrar el tubo en la parte superior.

300 metros de cable flexible, ligero y con buen recubrimiento aislante.

Carrete para el cable.

Picos.

Multitester Keysight-U1271A

Termocupla tipo K

Libreta para anotaciones

Cámara fotográfica

Para analizar los datos de SP se utilizará:

PC portátil

Software: SURFER 11

Google Earth

Google Maps

4.4 Procedimiento experimental

El método de SP se desarrollará utilizando el multitester Keysight-U1271A en modo de voltímetro y al menos 30 electrodos impolarizables en una solución sobresaturada de CuSO_4 , enterrados en el suelo (un electrodo fijo y los demás móviles) unos 10 cm, unidos al voltímetro por un cable conductor.



Figura 4.4: Mutitester Keysight-U1271A

La polaridad de los electrodos en este método la decide el investigador a la hora de iniciar las mediciones, ya una vez establecida la polaridad no debe cambiarse. Por lo que la polaridad que se usará será: el polo positivo estará en el electrodo fijo y el polo negativo en los electrodos móviles.

La distancia de las medidas de SP será a cada 4 metros de distancia, al igual que la temperatura medida con una Termocupla tipo K, que viene junto al Multitester Keysight-U1271A.



Figura 4.5: Termocupla tipo K

El mapeo se realizara con un diseño de malla, se cruzará el campo de sur a norte, con el propósito de registrar al menos 250 datos de toda la cancha de Chiquirín.

4.5 Análisis de Datos

Se utilizará el programa Google Earth para mostrar imágenes del lugar y puntos donde se realizaron las mediciones.

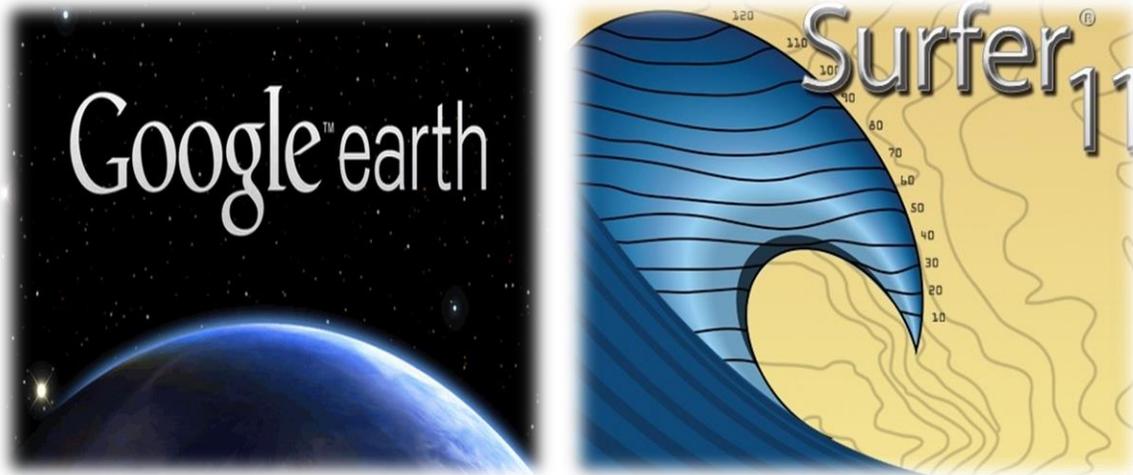


Figura 4.6: Portadas de los softwares

Se utilizará el software SURFER 11, para presentar las variaciones de las medidas registradas de SP y T y establecer anomalías del sistema hidrotermal, que es nuestro objetivo.

Así mismo, se elaborará el mapa de SP y Temperatura con diferentes perfiles, a partir de los resultados obtenidos.

La etapa final en esta investigación es la interpretación de los mapas y gráficas de SP obtenidos.

Y Google Maps se utilizará para la presentación de mapas requeridos.

4.6 Ventajas y limitaciones del método.

Las principales ventajas de este método son:

- ☞ Método muy económico.

- ☞ Sencilla puesta en terreno, como también electrodos impolarizables fáciles de construir.
- ☞ Es uno de los más rápidos en adquisición de datos lo que permite mapear grandes zonas en poco tiempo.
- ☞ Puede ser utilizado en condiciones geográficas difíciles.
- ☞ Se puede llevar a cabo con dos operadores.
- ☞ Puede ser utilizado en ecosistemas delicados dado que no lo perturba en absoluto, simplemente mide las señales naturales del subsuelo.

En cuanto a las limitaciones que presenta este método tenemos:

- ☞ Es un método que no nos permite estimar la profundidad del flujo.
- ☞ No tenemos la capacidad de controlar la profundidad de investigación.
- ☞ Dado que es un método pasivo nuestra señal de campo en general se verá afectada por niveles significativos de ruido.

En consecuencia la calidad del estudio dependerá en gran medida de la capacidad que tengamos de detectar y minimizar todos esos “ruidos” y “errores”, a fin de quedarnos simplemente con las variaciones del potencial electrocinético.

Con objeto de solventar el problema anteriormente expuesto, se requiere que el responsable del proyecto tenga cierta experiencia o contar con un especialista.

V. RESULTADOS Y CONCLUSIONES

En la metodología se planteó que cada electrodo estaría ubicado a cada cuatro metros de distancia, obteniéndose así una cuadrícula de 18 x 14 puntos, por lo tanto el área de trabajo fue de 4032 m².

La Figura 5.1, muestra la ubicación de los puntos donde se midió SP y Temperatura:

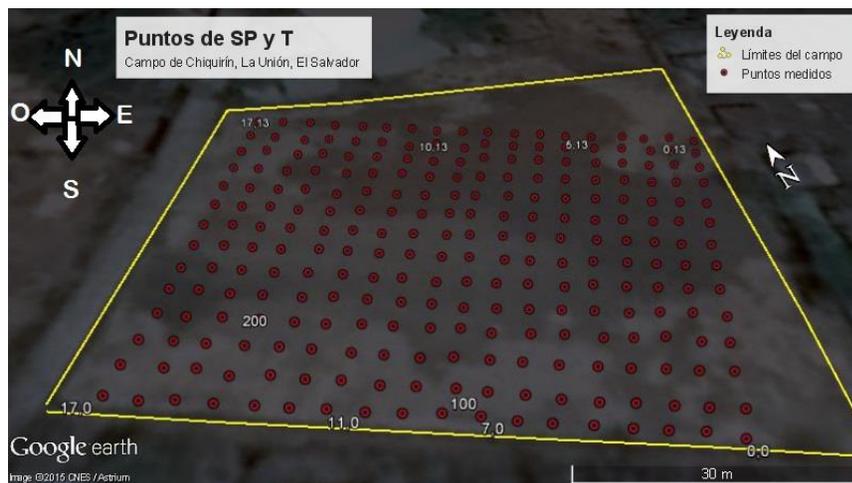


Figura 5.1: Puntos para malla. Google Earth

En las primeras dos mediciones se consideró un punto de referencia ubicado a 50 metros de distancia en el costado oeste del campo, en la Figura 5.2, se muestra la ubicación de este punto de referencia mencionado:

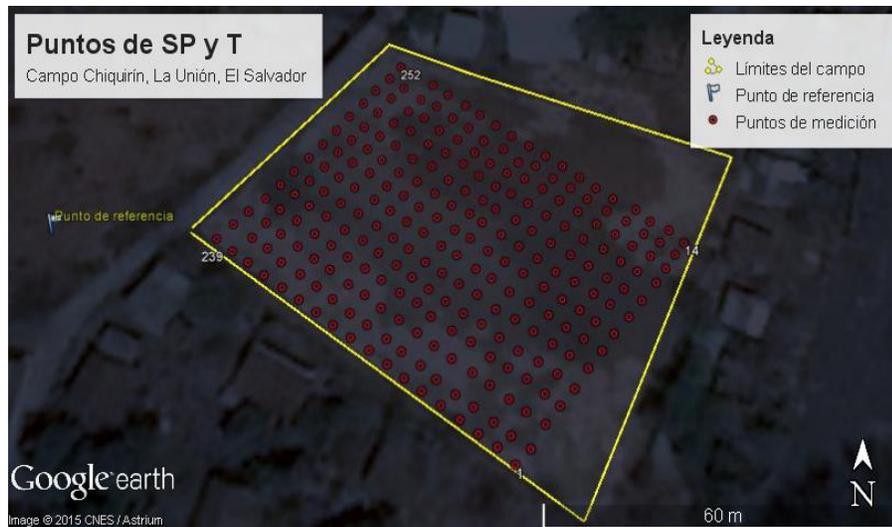


Figura 5.2: Puntos para malla y punto de referencia. Google Earth

Estos puntos se mantuvieron constantes en cada medición realizada

La Figura 5.3, muestra el lugar dentro de la cancha donde el sistema hidrotermal aflora, frente al Centro Escolar “Caserío Chiquirín”



Figura 5.3: Punto de afloramiento de Sistema hidrotermal, frente a la escuela.

El lugar donde aflora el sistema hidrotermal dentro de la cancha se delimita y se muestra en la Figura 5.4:



Figura 5.4: Delimitación de punto de afloramiento de zona hidrotermal dentro del campo.

5.1 RESULTADOS

Se realizaron tres mediciones, cada una de ellas en diferentes meses del año, fueron catalogadas así:

Estación lluviosa: 4 de agosto de 2015

Estación semi-lluviosa: 16 de octubre de 2015

Estación seca: 15 de enero de 2016

Los datos de SP y Temperatura obtenidos en cada medición son los siguientes:

👉 **Estación lluviosa: 4 de agosto de 2015**

Los datos medidos para el periodo de la estación lluviosa, que fueron tomados el día 4 de agosto de 2015 en un lapso de 5 horas aproximadamente, se detallan en la tabla 5.1, que abarca desde la página 98 hasta la página 106, los resultados obtenidos son los siguientes:

Tabla 5.1: Estación lluviosa: 4 de agosto de 2015

Punto	LATITUD (N)	LONGITUD (O)	X,Y	SP (mV)	Temperatura (°C)
0	13.293787°	87.787632°		3.0	
1	13.293425	87.786842	0,0	3.6	36.1
2	13.293447	87.786817	0,1	0.1	34.9
3	13.293483	87.786792	0,2	-2.5	33.3
4	13.293511	87.786767	0,3	-4.6	35.9
5	13.293536	87.786742	0,4	-3.9	34.0
6	13.293569	87.786717	0,5	-5.8	32.2
7	13.293597	87.786692	0,6	-2.6	32.3
8	13.293625	87.786669	0,7	-11.3	33.1
9	13.293653	87.786642	0,8	-6.5	37.1
10	13.293681	87.786617	0,9	2.4	36.1
11	13.293711	87.786589	0,10	-9.9	34.6
12	13.293736	87.786569	0,11	-4.2	34.0
13	13.293761	87.78655	0,12	0.6	33.5
14	13.293783	87.786531	0,13	-5.0	37.4
15	13.29345	87.786869	1,0	-3.4	35.0
16	13.293467	87.786847	1,1	-3.9	34.6
17	13.293503	87.786822	1,2	-6.8	34.0
18	13.293528	87.786792	1,3	-1.9	39.3
19	13.293561	87.786769	1,4	-0.7	43.5
20	13.293589	87.786747	1,5	0.2	38.0
21	13.293617	87.786722	1,6	-2.3	35.3
22	13.293644	87.7867	1,7	0.4	36.0
23	13.293675	87.786672	1,8	-0.3	36.4
24	13.2937	87.786644	1,9	-2.0	37.7
25	13.293731	87.786619	1,10	-5.0	37.5
26	13.293758	87.786594	1,11	-12.4	37.1

27	13.293783	87.786575	1,12	-6.1	37.1
28	13.293806	87.786556	1,13	-4.1	40.0
29	13.293469	87.7869	2,0	-5.1	43.5
30	13.293486	87.786875	2,1	-3.3	43.9
31	13.293522	87.78685	2,2	-3.4	35.6
32	13.293553	87.786819	2,3	-3.7	34.4
33	13.293581	87.7868	2,4	-2.8	25.3
34	13.293608	87.786775	2,5	0.0	36.2
35	13.293636	87.78675	2,6	4.3	41.4
36	13.293664	87.786725	2,7	-0.4	36.7
37	13.293692	87.7867	2,8	-1.4	34.7
38	13.293719	87.786675	2,9	-1.3	35.2
39	13.293747	87.786647	2,10	-2.4	38.4
40	13.293775	87.786625	2,11	1.9	39.2
41	13.293797	87.7866	2,12	-1.7	40.3
42	13.293822	87.786589	2,13	-4.8	37.6
43	13.293489	87.786928	3,0	2.8	39.2
44	13.293508	87.786906	3,1	-1.1	44.7
45	13.293542	87.786881	3,2	0.6	38.2
46	13.293569	87.78685	3,3	-2.8	39.5
47	13.293597	87.786831	3,4	-4.8	35.7
48	13.293628	87.786806	3,5	-4.9	42.3
49	13.293656	87.786778	3,6	5.4	39.4
50	13.293683	87.786753	3,7	-4.9	40.0
51	13.293714	87.786731	3,8	-3.4	45.0
52	13.293742	87.786703	3,9	-1.8	43.2
53	13.293769	87.786675	3,10	3.4	39.0
54	13.293797	87.786653	3,11	-3.4	39.4
55	13.293822	87.786631	3,12	5.2	37.2

56	13.293842	87.786611	3,13	4.0	37.5
57	13.293511	87.786958	4,0	5.9	46.2
58	13.293528	87.786936	4,1	1.3	40.0
59	13.293561	87.786908	4,2	6.9	38.8
60	13.293586	87.786878	4,3	5.9	39.7
61	13.293619	87.786861	4,4	6.9	36.9
62	13.29365	87.786836	4,5	4.1	38.8
63	13.293678	87.786811	4,6	4.9	40.2
64	13.293703	87.786783	4,7	-2.7	38.1
65	13.293731	87.786761	4,8	6.3	36.1
66	13.293761	87.786733	4,9	2.3	37.8
67	13.293789	87.786708	4,10	1.1	37.4
68	13.293817	87.786683	4,11	-1.7	36.6
69	13.293842	87.786664	4,12	-0.3	38.1
70	13.293864	87.786665	4,13	5.1	41.6
71	13.293533	87.786992	5,0	2.5	38.4
72	13.29355	87.786967	5,1	0.0	37.6
73	13.293583	87.786942	5,2	4.5	40.1
74	13.293611	87.786911	5,3	0.9	40.2
75	13.293639	87.786892	5,4	2.6	38.8
76	13.293664	87.786867	5,5	3.1	42.8
77	13.293694	87.786844	5,6	3.3	37.8
78	13.293728	87.786819	5,7	-1.1	40.9
79	13.293753	87.786792	5,8	-5.3	38.7
80	13.293781	87.786767	5,9	1.6	39.1
81	13.293811	87.786742	5,10	-1.7	39.5
82	13.293839	87.786717	5,11	-0.5	39.5
83	13.293864	87.786697	5,12	4.4	40.4
84	13.293883	87.786681	5,13	-0.1	39.9

85	13.293553	87.787019	6,0	25.9	46.6
86	13.293572	87.786994	6,1	-0.2	47.8
87	13.293606	87.786972	6,2	-0.6	42.3
88	13.293631	87.786942	6,3	4.4	40.7
89	13.293658	87.786922	6,4	2.8	38.7
90	13.293689	87.7869	6,5	5.1	39.0
91	13.293717	87.786875	6,6	-5.7	40.5
92	13.293747	87.78685	6,7	2.3	39.6
93	13.293775	87.786825	6,8	-1.3	36.5
94	13.293803	87.7868	6,9	4.0	35.4
95	13.293831	87.786772	6,10	1.4	38.1
96	13.293861	87.786747	6,11	6.9	34.9
97	13.293883	87.786728	6,12	-1.2	37.4
98	13.293906	87.786708	6,13	-5.7	37.0
99	13.293575	87.787047	7,0	6.2	41.5
100	13.293594	87.787025	7,1	5.7	41.8
101	13.293625	87.787	7,2	-1.7	47.5
102	13.293653	87.786978	7,3	-1.6	42.3
103	13.293678	87.786953	7,4	-1.2	41.9
104	13.293708	87.786931	7,5	-3.2	41.0
105	13.293733	87.7869	7,6	-3.2	39.5
106	13.293767	87.786878	7,7	-5.7	40.4
107	13.293794	87.786856	7,8	-4.7	39.1
108	13.293822	87.786828	7,9	-3.6	40.0
109	13.293853	87.786806	7,10	-6.3	42.0
110	13.293881	87.786778	7,11	0.7	37.1
111	13.293903	87.786758	7,12	-3.8	39.4
112	13.293925	87.786739	7,13	-3.6	42.0
113	13.293597	87.787078	8,0	2.9	40.1

114	13.293614	87.78705	8,1	-3.6	45.1
115	13.293647	87.787031	8,2	-4.7	49.5
116	13.293675	87.787003	8,3	-9.7	51.9
117	13.293697	87.786983	8,4	-1.6	49.5
118	13.293728	87.786958	8,5	-5.9	47.9
119	13.293758	87.786933	8,6	2.2	45.6
120	13.293789	87.786911	8,7	-0.7	42.5
121	13.293819	87.786889	8,8	-3.5	40.7
122	13.293844	87.786864	8,9	-2.8	41.3
123	13.293872	87.786836	8,10	-3.5	44.5
124	13.293903	87.786808	8,11	-1.7	39.2
125	13.293928	87.786789	8,12	-3.5	40.9
126	13.293947	87.786769	8,13	-3.5	43.9
127	13.293617	87.787111	9,0	5.5	41.4
128	13.293636	87.787083	9,1	-5.2	40.9
129	13.293664	87.787061	9,2	3.3	40.7
130	13.293692	87.787031	9,3	2.3	47.5
131	13.293719	87.787011	9,4	-12.6	45.4
132	13.293744	87.786989	9,5	2.3	43.2
133	13.293775	87.786961	9,6	2.2	39.7
134	13.293803	87.786936	9,7	-11.7	36.3
135	13.293833	87.786911	9,8	5.2	38.3
136	13.293858	87.786886	9,9	2.7	38.0
137	13.293886	87.786864	9,10	6.7	41.3
138	13.293911	87.786842	9,11	3.2	41.1
139	13.293933	87.786819	9,12	9.3	40.3
140	13.293967	87.7868	9,13	8.7	44.7
141	13.293636	87.787142	10,0	-1.4	43.9
142	13.293656	87.787114	10,1	-8.0	45.3

143	13.293686	87.787092	10,2	6.5	40.3
144	13.293714	87.787064	10,3	-3.3	46.0
145	13.293739	87.787039	10,4	8.9	41.9
146	13.293769	87.787019	10,5	5.3	40.3
147	13.293797	87.786992	10,6	8.2	47.1
148	13.293825	87.786969	10,7	9.2	46.1
149	13.29385	87.786942	10,8	3.7	46.1
150	13.293878	87.786919	10,9	8.4	44.7
151	13.293906	87.786894	10,10	14.5	48.4
152	13.293931	87.786872	10,11	2.9	46.6
153	13.293961	87.786847	10,12	-1.5	44.0
154	13.293986	87.786831	10,13	2.6	41.0
155	13.293658	87.787172	11,0	3.5	44.8
156	13.293681	87.787144	11,1	2.0	40.7
157	13.293706	87.787119	11,2	8.1	42.4
158	13.293733	87.787092	11,3	7.5	40.0
159	13.293761	87.787069	11,4	-4.2	40.4
160	13.293786	87.787047	11,5	2.5	40.1
161	13.293817	87.787022	11,6	0.1	43.8
162	13.293844	87.787003	11,7	-4.0	41.9
163	13.293872	87.786972	11,8	5.2	41.4
164	13.293897	87.78695	11,9	-4.4	41.9
165	13.293931	87.786922	11,10	3.0	41.5
166	13.293953	87.7869	11,11	-9.8	44.8
167	13.293975	87.786883	11,12	10.9	49.4
168	13.294008	87.786858	11,13	-1.4	50.4
169	13.293678	87.787203	12,0	-0.8	44.9
170	13.2937	87.787175	12,1	7.5	52.5
171	13.293731	87.787153	12,2	4.0	49.2

172	13.293753	87.787125	12,3	3.1	49.4
173	13.293783	87.7871	12,4	1.2	43.0
174	13.293808	87.787075	12,5	-0.7	59.2
175	13.293839	87.787053	12,6	16.3	61.2
176	13.293867	87.787031	12,7	11.0	46.7
177	13.293894	87.787006	12,8	0.6	44.5
178	13.293922	87.786981	12,9	0.7	41.7
179	13.29395	87.786956	12,10	5.5	43.4
180	13.293978	87.786933	12,11	10.2	67.4
181	13.294003	87.786911	12,12	3.0	61.8
182	13.294028	87.786889	12,13	16.8	59.0
183	13.293697	87.787231	13,0	10.5	40.5
184	13.293722	87.787203	13,1	25.9	41.9
185	13.29375	87.787181	13,2	9.1	42.2
186	13.293772	87.787153	13,3	3.6	40.7
187	13.2938	87.787131	13,4	5.3	37.2
188	13.293831	87.787108	13,5	3.5	40.4
189	13.293858	87.787081	13,6	4.6	43.0
190	13.293883	87.787061	13,7	5.4	45.8
191	13.293911	87.787039	13,8	-0.4	46.9
192	13.293936	87.787017	13,9	6.9	43.3
193	13.293967	87.786986	13,10	14.1	51.7
194	13.293997	87.786967	13,11	2.5	55.0
195	13.294022	87.786942	13,12	12.9	42.2
196	13.294047	87.786917	13,13	9.3	79.8
197	13.293719	87.787264	14,0	6.6	41.7
198	13.293742	87.787239	14,1	-6.3	47.6
199	13.293769	87.787211	14,2	0.3	49.5
200	13.293794	87.787183	14,3	7.0	58.2

201	13.293825	87.787167	14,4	23.5	50.5
202	13.29385	87.787142	14,5	11.8	45.3
203	13.293881	87.787119	14,6	0.8	55.7
204	13.293908	87.787094	14,7	2.1	73.2
205	13.293933	87.787072	14,8	0.0	60.8
206	13.293964	87.787047	14,9	3.7	45.4
207	13.293992	87.787019	14,10	2.5	39.8
208	13.294019	87.786994	14,11	-1.9	33.6
209	13.294044	87.786972	14,12	4.9	36.7
210	13.294069	87.78695	14,13	8.5	41.3
211	13.293742	87.787294	15,0	14.3	40.9
212	13.293767	87.787264	15,1	7.9	39.4
213	13.293792	87.787244	15,2	0.5	41.2
214	13.293817	87.787217	15,3	1.5	40.0
215	13.293844	87.787197	15,4	15.7	44.7
216	13.293872	87.787172	15,5	18.2	49.1
217	13.2939	87.787147	15,6	19.2	52.5
218	13.293928	87.787125	15,7	15.7	44.6
219	13.293956	87.7871	15,8	15	46.3
220	13.293981	87.787078	15,9	5.8	51.2
221	13.294008	87.787053	15,10	-2.7	48.6
222	13.294033	87.787025	15,11	10.7	40.2
223	13.294058	87.787003	15,12	10.7	43.8
224	13.294092	87.786978	15,13	18.4	57.3
225	13.293758	87.787325	16,0	12.6	45.7
226	13.293783	87.787292	16,1	14.9	51.6
227	13.293811	87.787272	16,2	2.8	43.5
228	13.293836	87.78725	16,3	-0.4	45.5
229	13.293867	87.787225	16,4	3.9	75.7

230	13.293892	87.7872	16,5	14.1	50.6
231	13.293919	87.787175	16,6	0.8	46.2
232	13.293947	87.787153	16,7	-3.5	44.7
233	13.293972	87.787131	16,8	1.5	41.9
234	13.294	87.787108	16,9	10.4	42.0
235	13.294031	87.787083	16,10	7	44.8
236	13.294061	87.787058	16,11	5.4	46.2
237	13.294083	87.787036	16,12	18.3	61.1
238	13.294111	87.787011	16,13	11.3	90.7
239	13.293781	87.787353	17,0	26.3	45.1
240	13.293808	87.787328	17,1	0.4	45.9
241	13.293831	87.787303	17,2	6.2	44.2
242	13.293856	87.787275	17,3	6.8	43.7
243	13.293883	87.787253	17,4	4.6	40.2
244	13.293908	87.787231	17,5	-1.1	39.5
245	13.293936	87.787206	17,6	10.9	40.2
246	13.293964	87.787183	17,7	6.8	41.7
247	13.293992	87.787158	17,8	11.6	44.5
248	13.294019	87.787136	17,9	12.9	58.1
249	13.294047	87.787111	17,10	9	45.1
250	13.294075	87.787089	17,11	8.4	49.9
251	13.294103	87.787064	17,12	0.7	51.2
252	13.294128	87.787042	17,13	-11.3	56.2

De estos datos podemos establecer ciertos resultados importantes:

El valor máximo de SP medido es de 26.3 mV en el punto 239, cerca de la fumarola, y, el valor mínimo es de -12.6 mV en el punto 131 que está ubicado casi al centro de la cancha. (Ver Figura 5.1 para ubicar tales puntos)

El valor máximo de Temperatura medido es de 90.7 °C en el punto 238, cerca de donde aflora el sistema hidrotermal y el valor mínimo es de 25.3 °C en el punto 33 ubicado entre los primeros puntos en la parte este de la cancha.

☞ **Estación semi-lluviosa: 16 de septiembre de 2015**

Los datos medidos para el periodo de la estación semi-lluviosa, que fueron tomados el día 16 de septiembre de 2015 en un lapso de 5 horas aproximadamente, se detallan en la tabla 5.2, que abarca desde la página 107 hasta la página 116, los resultados obtenidos son los siguientes:

Tabla 5.2: Estación semi-lluviosa: 16 de septiembre de 2015

Punto	LATITUD (N)	LONGITUD (O)	X,Y	SP (mV)	Temperatura (°C)
0	13.293787°	87.787632°		1.2	
1	13.293425	87.786842	0,0	-12.2	36.1
2	13.293447	87.786817	0,1	-8.1	34.9
3	13.293483	87.786792	0,2	-3.7	33.3
4	13.293511	87.786767	0,3	-6.1	35.9
5	13.293536	87.786742	0,4	6.1	34
6	13.293569	87.786717	0,5	-5.8	32.2
7	13.293597	87.786692	0,6	-5.2	32.3
8	13.293625	87.786669	0,7	-11.2	33.1
9	13.293653	87.786642	0,8	-21.2	37.1
10	13.293681	87.786617	0,9	-24.2	36.1
11	13.293711	87.786589	0,10	-4.2	34.6
12	13.293736	87.786569	0,11	-0.9	34
13	13.293761	87.78655	0,12	-0.9	33.5
14	13.293783	87.786531	0,13	-2.4	37.4
15	13.29345	87.786869	1,0	0.3	35
16	13.293467	87.786847	1,1	-0.2	34.6

17	13.293503	87.786822	1,2	0	34
18	13.293528	87.786792	1,3	0.4	39.3
19	13.293561	87.786769	1,4	-0.4	43.5
20	13.293589	87.786747	1,5	3	38
21	13.293617	87.786722	1,6	-0.6	35.3
22	13.293644	87.7867	1,7	1.7	36
23	13.293675	87.786672	1,8	2.6	36.4
24	13.2937	87.786644	1,9	0.4	37.7
25	13.293731	87.786619	1,10	3.9	37.5
26	13.293758	87.786594	1,11	-0.6	37.1
27	13.293783	87.786575	1,12	1.5	37.1
28	13.293806	87.786556	1,13	0.4	40
29	13.293469	87.7869	2,0	0.4	43.5
30	13.293486	87.786875	2,1	-0.6	43.9
31	13.293522	87.78685	2,2	0.4	35.6
32	13.293553	87.786819	2,3	3.9	34.4
33	13.293581	87.7868	2,4	1.9	25.3
34	13.293608	87.786775	2,5	-0.9	36.2
35	13.293636	87.78675	2,6	0.7	41.4
36	13.293664	87.786725	2,7	1.1	36.7
37	13.293692	87.7867	2,8	-0.1	34.7
38	13.293719	87.786675	2,9	-0.2	35.2
39	13.293747	87.786647	2,10	1.6	38.4
40	13.293775	87.786625	2,11	0.9	39.2
41	13.293797	87.7866	2,12	1.1	40.3
42	13.293822	87.786589	2,13	0.4	37.6
43	13.293489	87.786928	3,0	-4.2	39.2
44	13.293508	87.786906	3,1	1.1	44.7
45	13.293542	87.786881	3,2	0.3	38.2

46	13.293569	87.78685	3,3	-1.6	39.5
47	13.293597	87.786831	3,4	1	35.7
48	13.293628	87.786806	3,5	0.3	42.3
49	13.293656	87.786778	3,6	0	39.4
50	13.293683	87.786753	3,7	0.2	40
51	13.293714	87.786731	3,8	0.7	45
52	13.293742	87.786703	3,9	-0.2	43.2
53	13.293769	87.786675	3,10	-1.1	39
54	13.293797	87.786653	3,11	0.3	39.4
55	13.293822	87.786631	3,12	0.3	37.2
56	13.293842	87.786611	3,13	0.2	37.5
57	13.293511	87.786958	4,0	0.4	46.2
58	13.293528	87.786936	4,1	-0.3	40
59	13.293561	87.786908	4,2	0.2	38.8
60	13.293586	87.786878	4,3	-0.4	39.7
61	13.293619	87.786861	4,4	3.3	36.9
62	13.29365	87.786836	4,5	-0.5	38.8
63	13.293678	87.786811	4,6	-0.2	40.2
64	13.293703	87.786783	4,7	-0.5	38.1
65	13.293731	87.786761	4,8	0.5	36.1
66	13.293761	87.786733	4,9	0.6	37.8
67	13.293789	87.786708	4,10	0.6	37.4
68	13.293817	87.786683	4,11	0	36.6
69	13.293842	87.786664	4,12	-0.1	38.1
70	13.293864	87.78665	4,13	-0.4	41.6
71	13.293533	87.786992	5,0	-0.5	38.4
72	13.29355	87.786967	5,1	0.1	37.6
73	13.293583	87.786942	5,2	-0.2	40.1
74	13.293611	87.786911	5,3	-0.3	40.2

75	13.293639	87.786892	5,4	-0.2	38.8
76	13.293664	87.786867	5,5	-0.2	42.8
77	13.293694	87.786844	5,6	0	37.8
78	13.293728	87.786819	5,7	-0.5	40.9
79	13.293753	87.786792	5,8	-0.5	38.7
80	13.293781	87.786767	5,9	0.1	39.1
81	13.293811	87.786742	5,10	0.4	39.5
82	13.293839	87.786717	5,11	0.1	39.5
83	13.293864	87.786697	5,12	0.9	40.4
84	13.293883	87.786681	5,13	1.9	39.9
85	13.293553	87.787019	6,0	0.8	46.6
86	13.293572	87.786994	6,1	1.5	47.8
87	13.293606	87.786972	6,2	0	42.3
88	13.293631	87.786942	6,3	0.5	40.7
89	13.293658	87.786922	6,4	0.7	38.7
90	13.293689	87.7869	6,5	-0.4	39
91	13.293717	87.786875	6,6	-4.1	40.5
92	13.293747	87.78685	6,7	-1.14	39.6
93	13.293775	87.786825	6,8	-0.3	36.5
94	13.293803	87.7868	6,9	0.4	35.4
95	13.293831	87.786772	6,10	1	38.1
96	13.293861	87.786747	6,11	0.6	34.9
97	13.293883	87.786728	6,12	0.3	37.4
98	13.293906	87.786708	6,13	0	37
99	13.293575	87.787047	7,0	0	41.5
100	13.293594	87.787025	7,1	2.2	41.8
101	13.293625	87.787	7,2	-0.8	47.5
102	13.293653	87.786978	7,3	-0.2	42.3
103	13.293678	87.786953	7,4	0.5	41.9

104	13.293708	87.786931	7,5	0.6	41
105	13.293733	87.7869	7,6	0.7	39.5
106	13.293767	87.786878	7,7	0.3	40.4
107	13.293794	87.786856	7,8	0.5	39.1
108	13.293822	87.786828	7,9	1.7	40
109	13.293853	87.786806	7,10	2.9	42
110	13.293881	87.786778	7,11	3.2	37.1
111	13.293903	87.786758	7,12	0.1	39.4
112	13.293925	87.786739	7,13	2.3	42
113	13.293597	87.787078	8,0	0.1	40.1
114	13.293614	87.78705	8,1	0.9	45.1
115	13.293647	87.787031	8,2	1.9	49.5
116	13.293675	87.787003	8,3	0.9	51.9
117	13.293697	87.786983	8,4	1.2	49.5
118	13.293728	87.786958	8,5	1.3	47.9
119	13.293758	87.786933	8,6	0	45.6
120	13.293789	87.786911	8,7	0.3	42.5
121	13.293819	87.786889	8,8	-15.2	40.7
122	13.293844	87.786864	8,9	-15.2	41.3
123	13.293872	87.786836	8,10	-10.2	44.5
124	13.293903	87.786808	8,11	-10.8	39.2
125	13.293928	87.786789	8,12	-11.2	40.9
126	13.293947	87.786769	8,13	-10	43.9
127	13.293617	87.787111	9,0	-13.2	41.4
128	13.293636	87.787083	9,1	-8.2	40.9
129	13.293664	87.787061	9,2	-9.6	40.7
130	13.293692	87.787031	9,3	-9	47.5
131	13.293719	87.787011	9,4	-9.7	45.4
132	13.293744	87.786989	9,5	-14.2	43.2

133	13.293775	87.786961	9,6	-13.2	39.7
134	13.293803	87.786936	9,7	-8.8	36.3
135	13.293833	87.786911	9,8	-13.2	38.3
136	13.293858	87.786886	9,9	-10.2	38
137	13.293886	87.786864	9,10	-11.2	41.3
138	13.293911	87.786842	9,11	-3.2	41.1
139	13.293933	87.786819	9,12	-14.2	40.3
140	13.293967	87.7868	9,13	-15.2	44.7
141	13.293636	87.787142	10,0	6.4	43.9
142	13.293656	87.787114	10,1	-10.2	45.3
143	13.293686	87.787092	10,2	-0.3	40.3
144	13.293714	87.787064	10,3	-5.2	46
145	13.293739	87.787039	10,4	-7.4	41.9
146	13.293769	87.787019	10,5	-10.2	40.3
147	13.293797	87.786992	10,6	-9.2	47.1
148	13.293825	87.786969	10,7	-12.2	46.1
149	13.29385	87.786942	10,8	-6.2	46.1
150	13.293878	87.786919	10,9	-3.2	44.7
151	13.293906	87.786894	10,10	0	48.4
152	13.293931	87.786872	10,11	-0.9	46.6
153	13.293961	87.786847	10,12	-14.2	44
154	13.293986	87.786831	10,13	-9.2	41
155	13.293658	87.787172	11,0	-12.2	44.8
156	13.293681	87.787144	11,1	-8.2	40.7
157	13.293706	87.787119	11,2	-4.2	42.4
158	13.293733	87.787092	11,3	0.1	40
159	13.293761	87.787069	11,4	2.1	40.4
160	13.293786	87.787047	11,5	-4.8	40.1
161	13.293817	87.787022	11,6	-5.6	43.8

162	13.293844	87.787003	11,7	-4.7	41.9
163	13.293872	87.786972	11,8	-4.6	41.4
164	13.293897	87.78695	11,9	-8	41.9
165	13.293931	87.786922	11,10	-12.3	41.5
166	13.293953	87.7869	11,11	-6.1	44.8
167	13.293975	87.786883	11,12	4.1	49.4
168	13.294008	87.786858	11,13	-9.9	50.4
169	13.293678	87.787203	12,0	-14.2	44.9
170	13.2937	87.787175	12,1	-7.5	52.5
171	13.293731	87.787153	12,2	-3.2	49.2
172	13.293753	87.787125	12,3	0.7	49.4
173	13.293783	87.7871	12,4	-2.5	43
174	13.293808	87.787075	12,5	-21.2	59.2
175	13.293839	87.787053	12,6	-4.6	61.2
176	13.293867	87.787031	12,7	-0.7	46.7
177	13.293894	87.787006	12,8	-1.1	44.5
178	13.293922	87.786981	12,9	-0.5	41.7
179	13.29395	87.786956	12,10	-1	43.4
180	13.293978	87.786933	12,11	-1.11	67.4
181	13.294003	87.786911	12,12	-10.3	61.8
182	13.294028	87.786889	12,13	-7.5	59
183	13.293697	87.787231	13,0	-14.2	40.5
184	13.293722	87.787203	13,1	-11.2	41.9
185	13.29375	87.787181	13,2	-3.7	42.2
186	13.293772	87.787153	13,3	-3.6	40.7
187	13.2938	87.787131	13,4	-6.3	37.2
188	13.293831	87.787108	13,5	-5	40.4
189	13.293858	87.787081	13,6	-1.8	43
190	13.293883	87.787061	13,7	-0.9	45.8

191	13.293911	87.787039	13,8	-0.8	46.9
192	13.293936	87.787017	13,9	-0.7	43.3
193	13.293967	87.786986	13,10	-0.8	51.7
194	13.293997	87.786967	13,11	-3.7	55
195	13.294022	87.786942	13,12	-1.04	42.2
196	13.294047	87.786917	13,13	-0.8	79.8
197	13.293719	87.787264	14,0	0	41.7
198	13.293742	87.787239	14,1	0	47.6
199	13.293769	87.787211	14,2	0.1	49.5
200	13.293794	87.787183	14,3	-0.4	58.2
201	13.293825	87.787167	14,4	-0.6	50.5
202	13.29385	87.787142	14,5	-0.3	45.3
203	13.293881	87.787119	14,6	-0.8	55.7
204	13.293908	87.787094	14,7	-7.2	73.2
205	13.293933	87.787072	14,8	-9.2	60.8
206	13.293964	87.787047	14,9	-12.2	45.4
207	13.293992	87.787019	14,10	11.8	39.8
208	13.294019	87.786994	14,11	-13.2	33.6
209	13.294044	87.786972	14,12	-14.2	36.7
210	13.294069	87.78695	14,13	-11.2	41.3
211	13.293742	87.787294	15,0	0.3	40.9
212	13.293767	87.787264	15,1	-0.5	39.4
213	13.293792	87.787244	15,2	-0.4	41.2
214	13.293817	87.787217	15,3	-0.3	40
215	13.293844	87.787197	15,4	0.9	44.7
216	13.293872	87.787172	15,5	0.3	49.1
217	13.2939	87.787147	15,6	0.2	52.5
218	13.293928	87.787125	15,7	-0.3	44.6
219	13.293956	87.7871	15,8	0.1	46.3

220	13.293981	87.787078	15,9	-0.1	51.2
221	13.294008	87.787053	15,10	-0.4	48.6
222	13.294033	87.787025	15,11	-0.1	40.2
223	13.294058	87.787003	15,12	-0.4	43.8
224	13.294092	87.786978	15,13	-0.4	57.3
225	13.293758	87.787325	16,0	3.1	45.7
226	13.293783	87.787292	16,1	-10.6	51.6
227	13.293811	87.787272	16,2	-12.6	43.5
228	13.293836	87.78725	16,3	-13	45.5
229	13.293867	87.787225	16,4	-6.7	75.7
230	13.293892	87.7872	16,5	-12.9	50.6
231	13.293919	87.787175	16,6	-8.1	46.2
232	13.293947	87.787153	16,7	-10.2	44.7
233	13.293972	87.787131	16,8	-9.2	41.9
234	13.294	87.787108	16,9	-9.2	42
235	13.294031	87.787083	16,10	-12.2	44.8
236	13.294061	87.787058	16,11	-16.2	46.2
237	13.294083	87.787036	16,12	-10.2	61.1
238	13.294111	87.787011	16,13	-13.2	90.7
239	13.293781	87.787353	17,0	1.6	45.1
240	13.293808	87.787328	17,1	-13.1	45.9
241	13.293831	87.787303	17,2	-4.6	44.2
242	13.293856	87.787275	17,3	-11.1	43.7
243	13.293883	87.787253	17,4	-5	40.2
244	13.293908	87.787231	17,5	-10.8	39.5
245	13.293936	87.787206	17,6	-5.1	40.2
246	13.293964	87.787183	17,7	13.8	41.7
247	13.293992	87.787158	17,8	-12	44.5
248	13.294019	87.787136	17,9	-16.2	58.1

249	13.294047	87.787111	17,10	-15.6	45.1
250	13.294075	87.787089	17,11	-14.5	49.9
251	13.294103	87.787064	17,12	-9.5	51.2
252	13.294128	87.787042	17,13	-11.1	56.2

De estos datos podemos establecer ciertos resultados importantes:

El valor máximo de SP medido es de 13.8 mV en el punto 246, ubicado en la parte oeste de la cancha, cerca de la calle y, el valor mínimo es de -24.2 mV en el punto 10, entre los puntos de medición, la parte este de la cancha.

El valor máximo de Temperatura medido es de 90.7 °C en el punto 238, en la fumarola, y el valor mínimo es de 25.3 °C medido en el punto 35, entre los primeros datos medidos en la parte este.

☞ **Estación seca: 15 de enero de 2016**

Los datos medidos para el periodo de la estación seca, que fueron tomados el día 15 de enero de 2016, en un lapso de 4 horas aproximadamente, se detallan en la tabla 5.3, que abarca desde la página 116 hasta la página 125, los resultados obtenidos son los siguientes:

Tabla 5.3: Estación seca: 15 de enero de 2016

PUNTOS	ESTE (m)	NORTE (m)	SP (mV)	Temperatura (°C)
1	414772.76	1469719.42	0.9	36
2	414775.48	1469721.87	2.7	36
3	414778.20	1469725.86	10.8	35
4	414780.92	1469728.92	13.4	34
5	414783.64	1469731.81	12.2	35
6	414786.35	1469735.36	2.8	36
7	414789.07	1469738.42	-2.3	37
8	414791.49	1469741.49	4.5	37

9	414794.50	1469744.55	4.6	35
10	414797.22	1469747.61	3.8	36
11	414800.24	1469750.98	-7.3	35
12	414802.36	1469753.74	-3.7	35
13	414804.47	1469756.50	23.2	36
14	414806.46	1469758.81	10.6	36
15	414769.76	1469722.20	53.1	35
16	414772.17	1469724.04	20.6	36
17	414774.89	1469728.02	30	37
18	414778.21	1469730.77	43.2	36
19	414780.63	1469734.45	47.1	35
20	414783.05	1469737.44	31.1	36
21	414785.77	1469740.58	7.9	35
22	414788.18	1469743.65	7.3	36
23	414791.20	1469747.02	3.1	37
24	414794.22	1469749.77	17	36
25	414796.94	1469753.14	7	34
26	414799.66	1469756.21	18.6	35
27	414801.77	1469758.96	28.8	34
28	414803.89	1469761.42	50.7	34
29	414766.46	1469724.36	35.2	34
30	414769.17	1469726.20	25	34
31	414771.89	1469730.18	15.6	36
32	414775.21	1469733.55	9.9	36
33	414777.33	1469736.61	31.1	33
34	414780.05	1469739.68	21.9	34
35	414782.76	1469742.74	-10.4	34
36	414785.48	1469745.81	32	35
37	414788.20	1469748.87	20.5	34

38	414790.92	1469751.93	44.7	33
39	414793.94	1469755.00	-0.4	34
40	414796.35	1469758.06	45.2	34
41	414799.07	1469760.51	16.2	32
42	414800.28	1469763.27	48.2	34
43	414763.46	1469726.52	25	37
44	414765.87	1469728.66	48.6	37
45	414768.59	1469732.34	43.9	35
46	414771.91	1469735.40	-23.3	35
47	414774.02	1469738.47	2.4	35
48	414776.74	1469741.84	-17.3	35
49	414779.76	1469744.90	13.7	35
50	414782.48	1469747.97	19.8	34
51	414784.90	1469751.34	47.9	34
52	414787.92	1469754.40	55.1	36
53	414790.93	1469757.46	43.5	36
54	414793.35	1469760.53	20	36
55	414795.77	1469763.28	32.9	34
56	414797.88	1469765.43	71.3	33
57	414760.15	1469728.99	23.6	37
58	414762.57	1469730.82	71.9	35
59	414765.59	1469734.50	64.1	35
60	414768.91	1469737.26	39.9	34
61	414770.72	1469740.94	9.9	35
62	414773.44	1469744.31	0.8	36
63	414776.16	1469747.37	-10.3	36
64	414779.18	1469750.13	2.5	36
65	414781.59	1469753.19	9.4	34
66	414784.61	1469756.56	13	35

67	414787.33	1469759.62	-27.2	35
68	414790.05	1469762.69	-4.1	31
69	414792.16	1469765.45	58.2	31
70	414793.68	1469767.90	54.3	33
71	414756.55	1469731.46	37.3	37
72	414759.26	1469733.29	-7.1	37
73	414761.98	1469736.97	26	37
74	414765.30	1469740.03	-5.8	36
75	414767.42	1469743.10	-5.6	37
76	414770.14	1469745.85	-5.1	36
77	414772.55	1469749.23	-4.9	35
78	414775.27	1469752.90	5.1	36
79	414778.29	1469755.66	43	36
80	414781.01	1469758.72	54.1	36
81	414783.73	1469762.09	44	35
82	414786.45	1469765.16	49.6	30
83	414788.56	1469767.92	58.4	28
84	414790.00	1469770.00	79.9	29
85	414753.55	1469733.62	2.4	35
86	414756.26	1469735.76	13.8	35
87	414758.68	1469739.44	0.9	36
88	414762.00	1469742.19	-12.2	34
89	414764.12	1469745.26	-9.6	33
90	414766.53	1469748.63	14.7	35
91	414769.25	1469751.69	44.7	36
92	414771.97	1469755.07	74.4	34
93	414774.69	1469758.13	-56.7	34
94	414777.41	1469761.19	5.7	33
95	414780.42	1469764.25	40.3	32

96	414783.14	1469767.63	74.5	32
97	414785.26	1469770.08	56	30
98	414787.37	1469772.53	7.3	29
99	414747.25	1469738.55	37.6	34
100	414750.26	1469740.39	25.2	32
101	414755.68	1469741.60	25.7	31
102	414758.10	1469744.66	41.4	31
103	414760.81	1469747.42	-15.2	33
104	414763.23	1469750.79	-10.1	33
105	414766.55	1469753.55	-23.2	32
106	414768.97	1469757.23	38.3	33
107	414771.39	1469760.29	49.8	32
108	414774.40	1469763.35	52.3	32
109	414776.82	1469766.72	5.2	30
110	414779.84	1469769.79	37.2	29
111	414781.95	1469772.24	43.2	29
112	414784.07	1469774.69	90	28
113	414747.25	1469738.55	42.9	35
114	414750.26	1469740.39	74.7	35
115	414752.38	1469744.07	32.5	36
116	414755.40	1469747.13	31.2	36
117	414757.51	1469749.58	31.5	34
118	414760.23	1469752.95	-26	33
119	414762.95	1469756.32	-17.3	33
120	414765.37	1469759.69	-6.1	32
121	414767.78	1469763.07	15.6	35
122	414770.50	1469765.82	43.9	34
123	414773.52	1469768.89	-30	31
124	414776.54	1469772.25	36	28

125	414778.65	1469775.01	95.8	27
126	414780.77	1469777.16	-48	27
127	414743.64	1469740.72	84.8	31
128	414746.66	1469742.86	25.7	31
129	414749.07	1469745.92	99.5	34
130	414752.39	1469748.98	52	36
131	414754.51	1469752.05	38.1	34
132	414756.93	1469754.81	20.1	31
133	414759.94	1469758.18	44	32
134	414762.66	1469761.24	41.3	32
135	414765.38	1469764.61	31.3	31
136	414768.10	1469767.37	31	35
137	414770.51	1469770.43	13.9	31
138	414772.93	1469773.19	6.8	30
139	414775.35	1469775.64	22.9	30
140	414777.46	1469779.32	5.3	30
141	414740.34	1469742.88	42.3	36
142	414743.35	1469745.02	38	35
143	414745.77	1469748.39	15.3	35
144	414748.79	1469751.45	7.7	34
145	414751.51	1469754.21	34.8	35
146	414753.62	1469757.58	38.5	34
147	414756.64	1469760.64	82.4	34
148	414759.06	1469763.71	46.2	35
149	414762.08	1469766.46	48.2	33
150	414764.49	1469769.53	54.4	37
151	414767.21	1469772.59	89	36
152	414769.63	1469775.35	56	37
153	414772.35	1469778.72	10.9	36

154	414774.16	1469781.48	19.1	34
155	414737.04	1469745.34	97.8	36
156	414740.05	1469747.79	39.2	35
157	414742.77	1469750.55	56.2	35
158	414745.79	1469753.61	27.3	36
159	414748.21	1469756.68	99.7	35
160	414750.62	1469759.43	93.6	34
161	414753.34	1469762.80	61.1	37
162	414755.46	1469765.87	61.7	35
163	414758.78	1469768.93	24.5	36
164	414761.19	1469771.69	67.1	37
165	414764.21	1469775.37	32.4	36
166	414766.63	1469777.82	67	35
167	414768.44	1469780.27	97.7	37
168	414771.16	1469783.95	40.2	38
169	414733.73	1469747.51	94	33
170	414736.75	1469749.95	85.4	34
171	414739.17	1469753.33	48.2	36
172	414742.18	1469755.77	36.7	33
173	414744.90	1469759.14	28.8	31
174	414747.62	1469761.90	18.8	37
175	414750.04	1469765.27	4.5	43
176	414752.45	1469768.34	47.1	36
177	414755.17	1469771.40	54.2	32
178	414757.89	1469774.46	81.9	35
179	414760.61	1469777.53	61.7	38
180	414763.02	1469780.59	93.7	33
181	414765.44	1469783.35	46.6	33
182	414767.86	1469786.11	95.5	31

183	414730.73	1469749.67	25.7	35
184	414733.75	1469752.42	-36	35
185	414736.17	1469755.49	-4.5	36
186	414739.18	1469757.93	-18.8	35
187	414741.60	1469761.00	-6	33
188	414744.02	1469764.37	-31	31
189	414747.04	1469767.43	3.5	31
190	414749.15	1469770.19	19	30
191	414751.57	1469773.26	22.3	28
192	414753.98	1469776.01	21.3	27
193	414757.30	1469779.38	1.5	26
194	414759.42	1469782.75	0.9	29
195	414762.14	1469785.51	55.7	30
196	414764.85	1469788.27	29.7	30
197	414727.13	1469752.13	-6.2	34
198	414729.84	1469754.58	-13	35
199	414732.86	1469757.65	-2.3	34
200	414735.88	1469760.40	-2.2	36
201	414737.70	1469763.78	1.8	36
202	414740.41	1469766.53	-12.5	33
203	414742.83	1469769.90	-3.8	33
204	414745.55	1469772.97	-4.4	29
205	414747.96	1469775.72	9.4	23
206	414750.68	1469779.10	46.9	18
207	414753.70	1469782.16	18.2	24
208	414756.42	1469785.22	4.8	27
209	414758.84	1469787.98	-5.4	29
210	414761.25	1469790.74	23	29
211	414723.83	1469754.60	17.6	33

212	414727.14	1469757.36	0.5	32
213	414729.26	1469760.12	-7.6	33
214	414732.28	1469762.87	-4.2	34
215	414734.39	1469765.94	6.4	36
216	414737.11	1469769.00	14.1	36
217	414739.83	1469772.06	9.9	34
218	414742.25	1469775.13	-5.1	30
219	414744.96	1469778.19	19.7	29
220	414747.38	1469780.95	2.7	28
221	414750.10	1469784.01	-5.3	25
222	414753.11	1469786.77	-2.3	25
223	414755.53	1469789.53	6.7	24
224	414758.25	1469793.20	-5.8	23
225	414720.52	1469756.46	-0.7	31
226	414724.14	1469759.21	-7.6	33
227	414726.26	1469762.28	-8.3	32
228	414728.67	1469765.03	2.7	35
229	414731.39	1469768.40	-0.5	35
230	414734.11	1469771.16	6.4	31
231	414736.83	1469774.22	14.1	29
232	414739.24	1469777.29	9.9	29
233	414741.66	1469780.05	-5.1	31
234	414744.08	1469783.11	19.7	32
235	414746.79	1469786.48	2.7	29
236	414749.51	1469789.85	-5.3	29
237	414751.93	1469792.30	-2.3	31
238	414754.65	1469795.37	6.7	30
239	414717.52	1469758.92	-5.8	33
240	414720.24	1469761.99	-0.7	33

241	414722.95	1469764.44	-7.6	31
242	414725.97	1469767.19	-8.3	30
243	414728.39	1469770.26	2.7	29
244	414730.80	1469773.01	-0.5	31
245	414733.52	1469776.08	6.4	33
246	414735.94	1469779.14	14.7	32
247	414738.66	1469782.21	26.2	34
248	414741.07	1469785.27	21.8	35
249	414743.79	1469788.33	-2.3	31
250	414746.21	1469791.40	-0.7	32
251	414748.93	1469794.46	-4.4	31
252	414751.34	1469797.22	0.2	31

De estos datos podemos establecer ciertos resultados importantes:

El valor máximo de SP medido es de 99.7 mV en el punto 159 en la parte sur de la cancha y el valor mínimo es de -56.7 mV medido en el punto 93 próximo al centro de la cancha.

El valor máximo de Temperatura medido es de 43.0 °C en el punto 175 cercano a la fumarola y el valor mínimo es de 18.0 °C medido en el punto 206 en la orilla de la fumarola.

Cabe aclarar que en las primeras dos mediciones se utilizó un punto de referencia para establecer la diferencia entre valores dentro de la cancha con ese punto fijo, pero, en la tercera medición no se consideró, tomando en cuenta algunos aspectos técnicos avanzados dados por especialistas en el área, por lo que se tabularon los datos medidos originalmente.

A partir de los datos medidos y presentados se obtuvieron los siguientes mapas (Figura 5.5) procesados con el software SURFER 8:

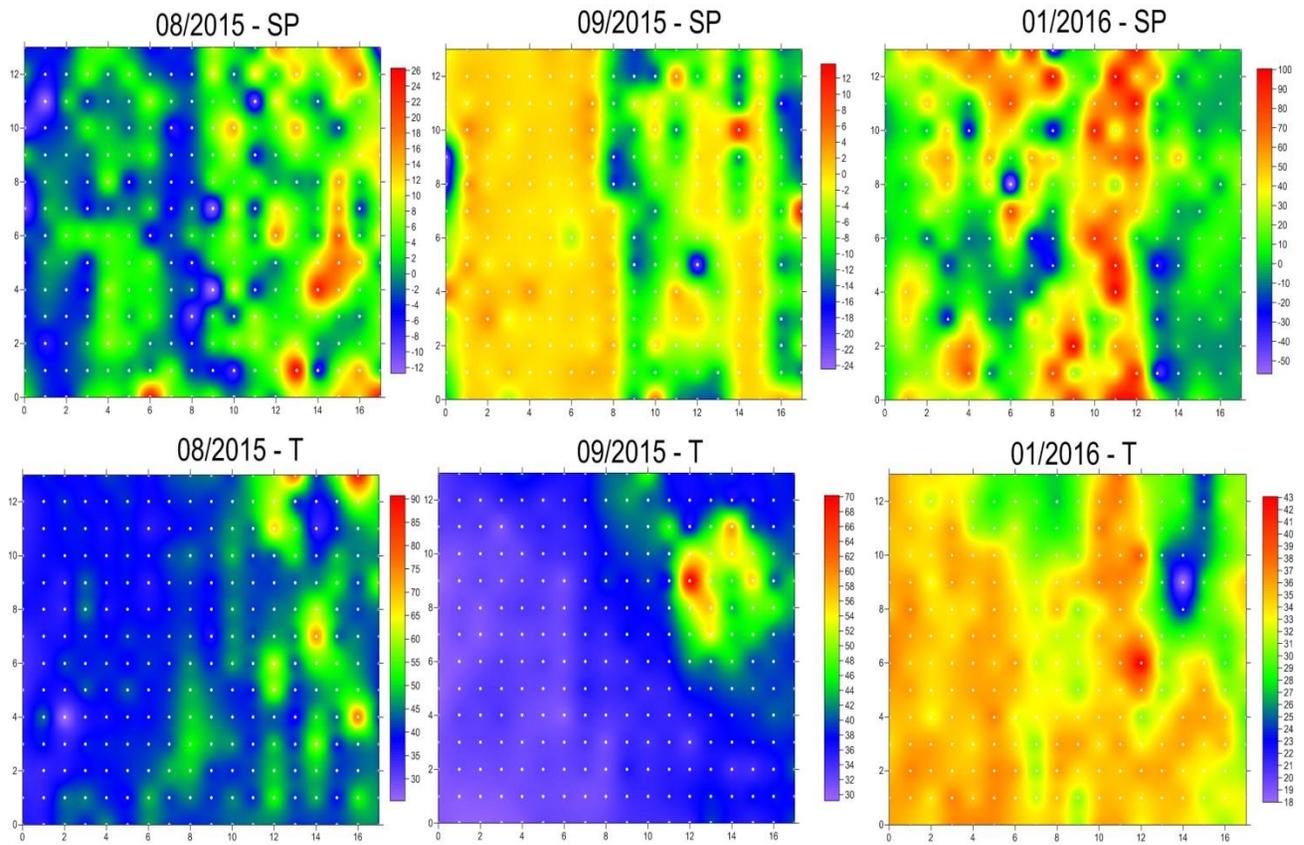


Figura 5.5: Conjunto de Mapas de SP y Temperatura, elaborados con SURFER 8

Cada mapa corresponde a cada una de las mediciones dadas.

A partir de los mapas resultantes podemos inferir los siguientes resultados:

☞ **Mapas obtenidos en la Estación lluviosa: 4 de agosto de 2015**

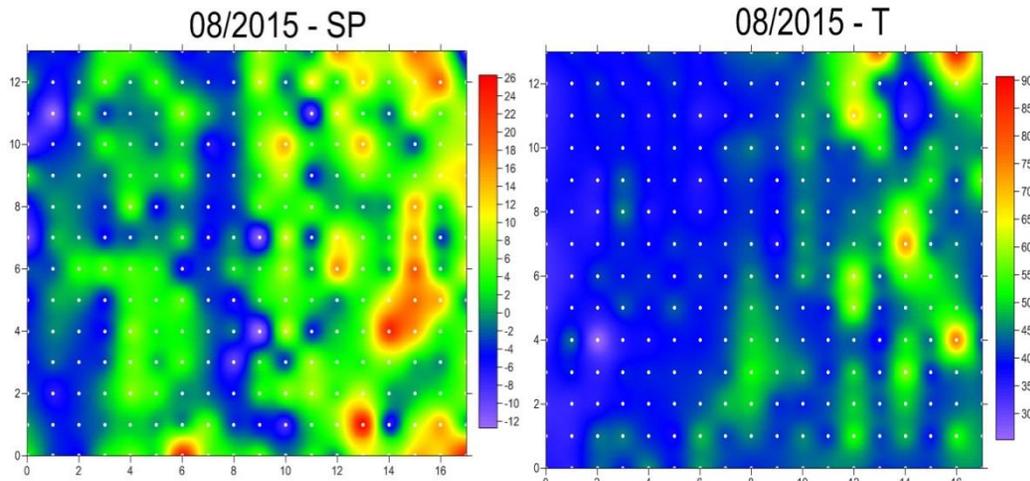


Figura 5.6: Mapas de SP y Temperatura, primera medición (SURFER 8)

En el caso del SP, la parte donde de los valores negativos son más visibles es en la parte este de la cancha, donde se encuentra la línea de costa; mientras que los valores positivos más grandes están en la parte oeste y dispersos.

En el caso de la Temperatura, en la mayor parte de la cancha los valores de temperatura son bastante bajos en relación al valor máximo, y, es en la parte noroeste donde se encuentran los valores máximos de temperatura, en dirección al sistema hidrotermal.

De estos resultados podemos argumentar que la presencia de valores negativos de SP y valores de Temperatura mínimos en la misma región de la cancha (Figura 5.6) se debe a dos razones naturales: intrusión salina por la cercanía a la línea de costa por el lado Este y por la presencia de agua lluvia en la región.

Además, los valores máximos de temperatura se deben a la presencia de la zona hidrotermal y en sus cercanías se observan la mayor parte de SP positivo.

El agua infiltrada tanto por precipitación como por infiltración, al llegar cerca del sistema hidrotermal, produce dos efectos: que el agua infiltrada en el subsuelo una parte se evapore y es lo que se observa en la fumarola, y, otra parte se condense,

que produce el enfriamiento en ciertos puntos de la cancha, por el desplazamiento de humedad en el subsuelo.

☞ **Mapas obtenidos en la Estación semi-lluviosa: 16 de septiembre de 2015**

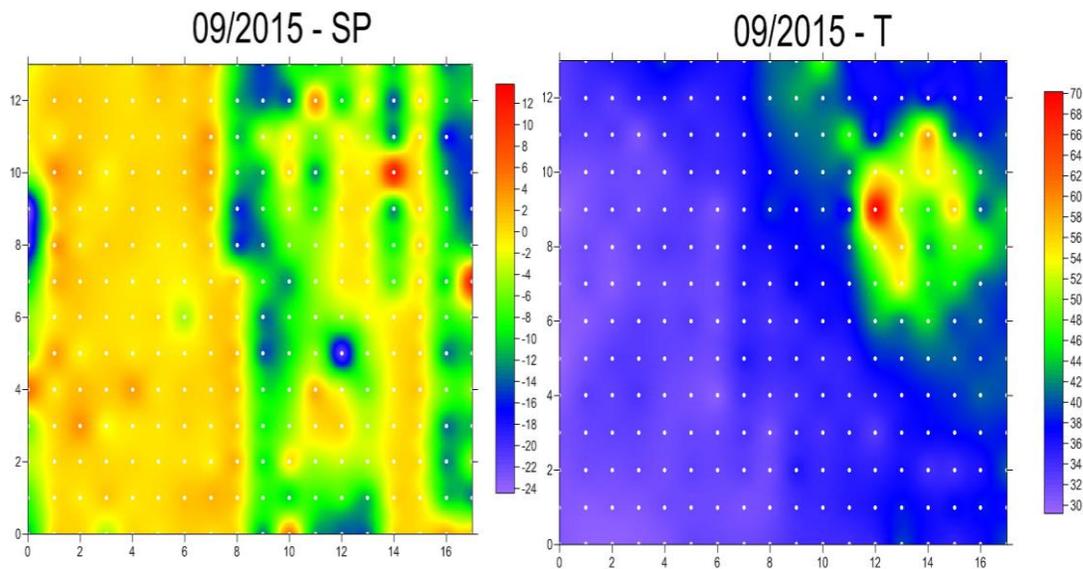


Figura 5.7: Mapas de SP y Temperatura, segunda medición

En el caso del SP, la parte donde de los valores negativos medios son más visibles es en la parte central de la cancha y en la parte oeste; mientras que los valores positivos en el intervalo entre 0 a 6 mV están más visibles en la línea de costa y a dirección oeste.

En el caso de la Temperatura, en la mayor parte de la cancha los valores no son mayores de 40 °C, y, solo en la parte centro en dirección noroeste donde se encuentran los valores máximos de temperatura, es donde está el sistema hidrotermal.

Según se observa en la Figura 5.7, la mayor parte de la cancha se ve afectada por intrusión salina, aunque sea aún época de poca lluvia, el agua por precipitación sobesatura la zona, ésta a la vez es afectada por el fenómeno de intrusión salina, donde la densidad del agua de mar es ligeramente mayor que el agua por precipitación, por ello este efecto es más predominante en la zona.

Podemos inferir que a menor temperatura, existen valores de SP positivos.

☞ **Mapas obtenidos en la Estación seca: 15 de enero de 2016**

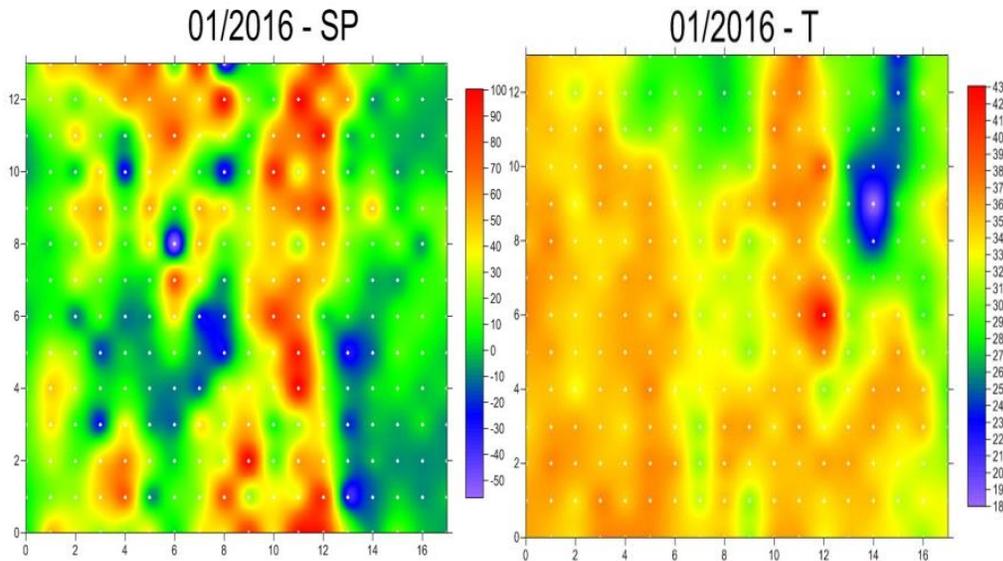


Figura 5.8: Mapas de SP y Temperatura, tercera medición

En el caso del SP, la parte donde de los valores negativos más pequeños son más visibles es en la parte sureste de la cancha; mientras que los valores positivos más grandes están en la parte tanto noreste como sureste y en el centro de la cancha, y, valores entre -10 a 30 mV son más visibles en casi toda la cancha.

En el caso de la Temperatura, en la mayor parte de la cancha los valores de temperatura entre 33 y 38 °C son más notorios; valores entre 28 a 32 °C en la parte central en dirección noroeste son visibles, y, en la parte noroeste en dirección al sistema hidrotermal, se encuentran los valores mínimos de temperatura.

En el mes de enero no hay indicios de lluvia y si puedes observar en la Figura 6.8 la parte de la temperatura, en ella hay una ligera disminución de la temperatura pero hay valores de anomalías de SP positivas. Esto indica que los valores de temperatura están variando con respecto al tiempo. Es decir que a menor temperatura incrementa a valores positivos de SP.

Si tomamos la Figura 5.5 y comparamos toda la región sur de la cancha (Figura 5.9), que es la zona donde se observan las variaciones con más detalles, entonces los resultados para cada par de mapas nos permiten aseverar los resultados obtenidos y así establecer algunos patrones de variación de SP y Temperatura no tan visibles por el alcance de esta investigación que otro investigador podría corroborar.

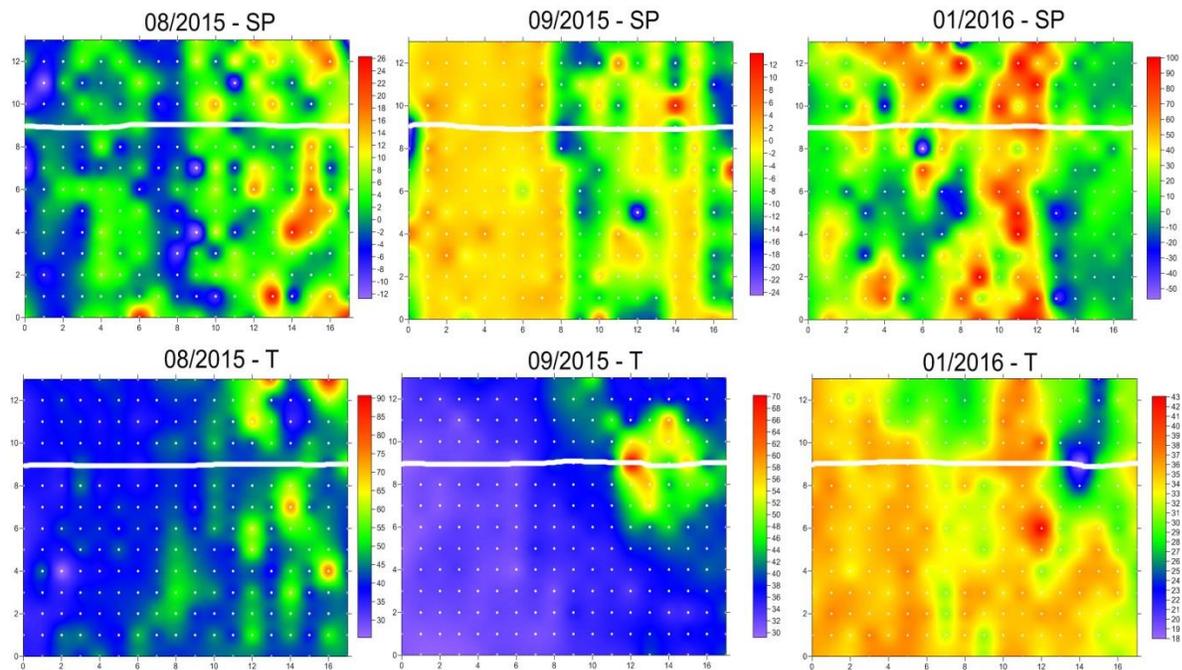


Figura 5.9: Bajo la línea blanca, es la zona que se utilizó como comparación para establecer resultados más visibles en esta investigación, la zona izquierda es una zona peculiar térmicamente hablando.

Al observar detenidamente podemos reargumentar los resultados ya mencionados al analizar los mapas individualmente: el efecto de intrusión salina y la precipitación en el caso de los mapas de agosto y septiembre 2015, el efecto de condensación por causa de la fumarola, las variaciones de SP y Temperatura que nos hacen pensar que esta zona es atípica en cuanto a estabilidad tanto geofísica como geológica se refiere, y demás resultados mencionados con anterioridad.

Reorganizando todo lo expuesto e inferencias propuestas, podemos darnos cuenta que en la zona de estudio, se tiene una zona hidrotermal afectada por la intrusión salina, por razón de estar en línea de costa de las aguas del Golfo de Fonseca y además esto interviene en el descenso de temperatura en el campo, y, entonces el aumento de temperatura es por causa de la fumarola.

Todo este proceso produce que el agua infiltrada a la región en estudio se evapore al llegar a la fumarola una parte y otra parte del vapor se condensa, permitiendo la existencia de un flujo de calor de la región de mayor temperatura a la de menor temperatura (conducción de calor) cuando no llueve.

Con esto podemos plantearnos una serie de preguntas, como las siguientes:

¿Si lloviese, los valores de SP negativos pueden atribuirse a la cantidad de agua lluvia infiltrada y por escorrentía?

La respuesta es que si, por el proceso de electrofiltración (streaming potential)

¿El valor positivo de SP se debe al proceso de condensación?

Las anomalías positivas son normalmente relacionadas al ascenso de cargas positivas. El proceso de condensación en sí, no produce diferencia de potencial

¿Podría ser lo contrario?

Salvo casos particulares, por lo demás, hay que considerar siempre un desplazamiento de cargas positivas. Es por eso, que los perfiles clásicos de SP que cruzan volcanes activos son representados por una señal en forma de "W".

En el caso de un periodo de lluvias aisladas y cortas, ¿el valor de SP tendría la misma explicación?

La respuesta es que sí, porque siempre desplazamiento de cargas positivas en la dirección del flujo de agua (por infiltración durante evento de lluvia o por vaporización encima de una fuente de calor)

5. 2 CONCLUSIONES

En presencia de valores bajos de temperatura, existe presencia de valores positivos de SP.

La amplitud de las anomalías son bastante variables en el tiempo, dado que la región de estudio es una zona inestable y atípica.

Existen regiones variables en temperatura, dependientes del tiempo cuando se realizó cada medición, es decir, puntos fríos que se vuelven calientes con el tiempo. En presencia de lluvia, y por el efecto de la intrusión salina, el efecto que más predomina en la cancha es la condensación y a esto se debe la presencia de valores negativos de SP.

La zona de afloramiento hidrotermal, es solo un punto, la zona hidrotermal es más grande y se distribuye subterráneamente como una vena hacia la región tanto norte como noroeste y posiblemente sur, ya sea siguiendo la línea de costa o en dirección a las Islas del Golfo de Fonseca (en dirección a la zona de fallamiento regional).

VI. RECOMENDACIONES

Realizar un perfil de monitoreo discreto en el tiempo (cada dos meses como ejemplo) para determinar un patrón del comportamiento de la zona hidrotermal, asumiendo que la intrusión salina afecta en gran medida los valores y además considerando las mareas altas y mareas bajas.

El perfil recomendado se tendría que realizar cada 0.5 m o 1.0 m con ambos métodos de SP y T para luego hacer la comparación directamente de la variación de la señal en el tiempo.

Realizar un estudio donde en un mismo gráfico se analice la variación de la señal (SP y Temperatura) en función del tiempo en diversos perfiles.

Para ser más precisos en las mediciones el equipo de medición debe ser de la mejor precisión posible y el investigador debe tener la mayor pericia posible a la hora de medir para reducir los ruidos por efecto natural y artificial.

VII. BIBLIOGRAFIA

- [1] Aguirre F. 2005. **Caracterización de la fracción líquida de condensados de emisiones fumarólicas y sedimentos en varios puntos de la cadena volcánica activa de El Salvador.** Trabajo de graduación. Universidad de El Salvador, Facultad de Ciencias Naturales y Matemática. Escuela de Química. San Salvador. Enero del 2005.
- [2] Alatorre-Zamora, M., Cortina L., Campos-Enríquez J., Birch F. 2007. **Interpretación de anomalías de potencial espontáneo aplicada a un vertedero de desechos urbanos en el occidente de México.** e-Gnosis, vol. 6, 2008, pp. 1-24. Universidad de Guadalajara, Guadalajara, México. 20 de febrero de 2007.
- [3] Alvarado D., DeMets C., Tikoff B., Hernández D., Wawrzyniec T. F., Pullinger C., Mattioli G., Turner H .L., Rodriguez M., Correa-Mora F. 2011. **Forearc motion and deformation between El Salvador and Nicaragua: GPS, seismic, structural, and paleomagnetic observations.** LITHOSPHERE; v. 3; no. 1; p. 3–21. Geological Society of América (GSA). USA. 8 de septiembre de 2010.
- [4] Arias F. 1999. **El Proyecto de investigación: guía para su elaboración.** (3a Ed). Caracas: Episteme
- [5] Auge M. 2008. **Métodos Geoeléctricos para la Prospección de Agua Subterránea.** Universidad de Buenos Aires. Buenos Aires, Argentina. 2008.
- [6] Benítez E., Olmos R., Barahona F., Henríquez B., Funes R., Cartagena R., Larios D., Finizola A., 2012. **Comparación de Potencial Espontáneo (SP) y temperatura del suelo en el Volcán de Santa Ana, El Salvador, Centroamérica.** Segundo Seminario Científico. Universidad de El Salvador.
- [7] Bennati L., Finizola A., Walker J., Higuera-Díaz C., López D., Barahona F., Cartagena R., Conde V., Funes C., Ríos C. 2009. **Fluid circulation and structural discontinuities on the Santa María - Cerro Quemado - Zunil volcanic complex**

(Guatemala), from self-potential and soil CO₂ surveys. Northern Illinois University Rockford: 215-217. North-Central Section - 43rd Annual Meeting (2-3 April 2009).

[8] Briceno, L.A & León, R. **Los potenciales espontáneos: aspectos básicos y sus aplicaciones.** Geofis. Colomb. N° 2, pp. 21-24, 1993. ISSN 0121-2974. Santafé de Bogotá, Colombia.

[9] Cantos J. 1978. **Tratado de Geofísica Aplicada.** (2a Ed). Madrid: LITOPRINT. España.

[10] Carrasco P. 2011. **Mejora de técnicas geofísicas para la caracterización del subsuelo mediante innovación y el uso de herramientas de gestión de información espacial.** Proyecto fin de Máster en Geotecnologías cartográficas en Ingeniería y Arquitectura. E. P. S. Ávila. Universidad de Salamanca. España.

[11] Daza F., 2012. **Aplicación de métodos geofísicos para el reconocimiento de recursos hídricos y termales.** Tesis profesional. Universidad de Concepción, Chile.

[12] Domínguez J. P. 2011. **Caracterización biofísica del área marina frente a Playa Las Tunas, Playas Negras, Playas Blancas, Playa Maculís, y las Mueludas, Municipio de Conchagua, Departamento de La Unión, El Salvador.** USAID. Diciembre 2010.

[13] Enjambre sísmico en La Unión 2015. **Actualización informe técnico: Enjambre sísmico en municipio de Conchagua.** SNET, Área de Sismología. Registros. Enjambres Sísmicos 2015. 9 de octubre de 2015.

[14] Escobar C. 2002. **Volcanes activos de El Salvador.** Servicio Geológico de El Salvador. Área de Vulcanología, SNET. Archivo HTML. 2002.

- [15] Estrada L. A. 2012. **Apuntes de Prospección Geofísica para alumnos de Geología**. Cátedra de Geofísica. Universidad Nacional de Tucuman, Facultad de Ciencias Exactas y Tecnología, Departamento de Geodesia y Topografía.
- [16] Finizola A., Lénat F., Macedo O., Ramos D., Thouret J., Sortino F. 2004. **Fluid circulation and structural discontinuities inside Misti volcano (Peru) inferred from self-potential measurements**. Journal of Volcanology and Geothermal Research 135 (2004) 343– 360.
- [17] Galindo J. 2007. **Normas APA, Descripción y Aplicación práctica**.
- [18] Gonzales K. 2000. **Método de Potencial Espontáneo aplicado en el volcán Ubinas y métodos geoquímicos aplicados en vigilancia volcánica y sísmica**. Revista de Trabajos de Investigación. CNDG – Biblioteca Instituto Geofísico del Perú (2000), Lima, p. 47 - 58.
- [19] Hashimoto T., Mogi T., Nishida Y., Ogawa Y., Ujihara N., Oikawa M., Saito M., Nurhasan., Mizuhashi S., Wakabayashi T., Yoshimura R., Hurst., Anthony W., UTsugi M., Tanaka Y. 2004. **Self-potential studies in volcanic areas(5) : Rishiri, Kusatsu-Shirane, and White Island**. Bulletin. Journal of the Faculty of Science, Hokkaido University. Series 7, Geophysics, 12(2): 97-113. 3 de marzo de 2004.
- [20] Hradecký P., Havlíček P., Mrázová Š., Rapprich V., Šebesta J., Ševčík J., Vorel T., Pullinger C., Hernández W. 2003. **Estudio de los peligros geológicos en el departamento de La Unión, El Salvador**. Servicio Geológico Checo (SĚC), PRAHA, SNET. San Salvador. 2003.
- [21] Jouniaux L., Maineult A., Naudet V., Pessel M., Sailhac P. 2009. **Review of self-potential methods in hydrogeophysics**, C. R. Geoscience, doi:10.1016/j.crte.2009.08.008, 2009.
- [22] Kinkler J. **América Central. Fallas Geológicas y Sísmicas**. HTML.

[23] Lewicki J. L., Connor C., St-Amand K., Stix J., Spinner W., 2003. **Self-potential, soil CO₂ flux, and temperature on Masaya volcano, Nicaragua.** Geophysical Research Letters, vol. 30, no. 15, 1817, doi: 10.1029/2003gl017731, 2003.

[24] Macedo O., Gonzales K., Finizola A., Métaixian J-Ph., Fournier N., Sortino F. 2002. **Estudio estructural y del sistema hidrotermal del volcán Ubinas por métodos geofísicos y geoquímicos.** Resúmenes Extendidos del XI Congreso Peruano de Geología, Lima-Perú, 26-28 Setiembre, 2002.

[25] Manilla A. 2003. **Geofísica aplicada en los proyectos básicos de Ingeniería civil.** Publicación técnica N° 229. Secretaría de Comunicaciones y Transportes. Instituto Mexicano del Transporte. Sanfadila, Querétaro, México.

[26] Marroquín G. 1991. **Sismicidad en los alrededores del Volcán Conchagua, febrero – marzo 1991.** Centro de Investigaciones Geotécnicas. Departamento de Investigaciones Sismológicas. 1991.

[27] Martínez C., **Fallas tectónicas.** HTML.

[28] Martínez L., Portillo A. 2006. **Determinación de los mecanismos focales de los sismos ocurridos entre el volcán San Salvador y la caldera del Lago de Ilopango en el período de 1994 a marzo de 2005.** Trabajo de graduación. Universidad de El Salvador, Facultad de Ciencias Naturales y Matemática. Escuela de física. San Salvador. Diciembre de 2006.

[29] Martínez M. 1978. **Cronología sísmica y eruptiva de la República de El Salvador a partir de 1520.** Ministerio de Obras Públicas. Centro de Investigaciones Geotécnicas. Abril de 1978, p. 20.

[30] Meyer-Abich H. 1956. **Los volcanes activos de Guatemala y El Salvador (América Central); con 20 Fig. en el texto y 48 fotos en tablas I - XXVI.** Anales del Servicio Geológico Nacional de El Salvador. Boletín N° 3. San Salvador. Diciembre de 1956, p. 86, 91 – 93.

[31] Ramos D., Antayhua Y., Masías P., Finizola A., Svetlana B. 2010. **Estudio estructural del volcán Ticsani-sur del Perú, mediante Potencial Espontáneo.** XV Congreso Peruano de Geología. Resúmenes Extendidos. Sociedad Geológica del Perú, Pub. Esp. N° 9 (2010), Cusco p. 1140-1143.

[32] Revil A., Ehouarne L., Thyreault E. 2001. **Tomography of Self-potential anomalies of electrochemical nature.** Geophysical Research Letters, Vol 28, N° 23, p. 4363 – 4366. GCNRS-CEREGE, Dept of Geophysics, Aix-en-Provence, France. 1 de diciembre de 2001.

[33] Revil, A., Naudet V., Nouzaret J., Pessel M. 2003. **Principles of electrography applied to self-potential electrokinetic sources and hydrogeological applications,** Water Resour. Res., 39(5), 1114, doi: 10.1029/2001WR000916, 2003.

[34] Roy S. 1956. **Estado actual de los volcanes de Centro América.** Chicago, USA. 1956

[35] Salaguer, J. 1988. **Fenómenos electrocinéticos.** Cuaderno FIRP S611-A. Módulo de enseñanza en fenómenos interfaciales en español. Versión #1. Universidad de los Andes, Facultad de ingeniería, Escuela de ingeniería química. Mérida, Venezuela.

[36] Sermeño J., Henríquez B., Dueñas S., Benítez E., Olmos R., Funes R., Barahona F. 2007. **Mediciones de potencial espontaneo (SP) del área fumarólica del cerro La Hoya, volcán San Salvador.**

[37] Serrano J. 2003. **Caracterización geofísica de filtraciones de agua en el subsuelo.** Tesis. Septiembre de 2003.

[38] Torres L., 2013. **Análisis de métodos geofísicos en la evaluación del volcán activo Misti (Región sur del Perú).** Trabajo profesional. Universidad Nacional de San Agustín, Arequipa, Perú.

[39] Yavorski B.M., Detlaf A.A. 1977. **Manual de Física. Para ingenieros y estudiantes.** (2a Ed). Moscú: MIR. Rusia.

VIII. ANEXOS



Fotografía 1: Vista del Cerro Bandera desde cancha Chiquirín, la hendidura según muchos es debido a una actividad volcánica de la cual no hay registros oficiales.



Fotografía 2: Punto de afloramiento y escuela al fondo, vista desde el costado suroeste de la cancha.



Fotografía 3: Punto de afloramiento fumarólico



Fotografía 4: Entrada al Centro Escolar



Fotografía 5: Primer toma de datos, 4 de agosto de 2015



Fotografía 6: Segunda toma de datos, 16 de octubre de 2015



Fotografía 7: Vista de cancha de oeste a este, 16-10-15



Fotografía 8: Punto de afloramiento total, la parte que se observa húmeda, 15-01-16



Fotografía 9: Revisión de Carrete y cable de tercera medición, 15 de enero de 2016



Fotografía 10: Punto fumarólico en estación lluviosa, 4 de agosto de 2015



Fotografía 11: Equipo de reconocimiento, julio 2015



Fotografía 12: Equipo para primer toma de datos, 4 de agosto 2015



Fotografía 13: Equipo para segunda toma de datos, 16 de octubre de 2015



Fotografía 14: Equipo para tercer toma de datos, 15 de enero de 2016



Fotografía 15: Línea de costa o playa



Fotografía 16: Entrada a zona de estudio