

Programa Regional de Entrenamiento Geotérmico (PREG)

Diplomado de especialización en geotermia-2015

Universidad de El Salvador
Facultad de Ingeniería y Arquitectura
Unidad de Posgrados



PROYECTO DE GRADUACIÓN

Tema:

Caracterización de estructuras geológicas de un área geotérmica mediante la aplicación integrada de las técnicas de mapeo térmico, magnetometría y gravimetría

Presentado por:

Acevedo Granados Roberto José
Elizalde Guerrero José Daniel
Méndez Sandoval Idalia Beatriz
Rivera Méndez Mario
Ticas Lara José Arturo

Asesores:

Lic. Pedro Santos & MSc. José Rivas

San Salvador, Octubre de 2015

AGRADECIMIENTOS

Enumerar todas las personas que contribuyeron directa o indirectamente al desarrollo de este trabajo podría ser interminable, sin embargo, merecen especial mención, Lic. Pedro Santos, MSc. José Rivas, Ing. Arturo Quezada, Ing. Antonio Flores, Tec. Guillermo Canales, Tec. Julio Castellón, Lic. Elizabeth Torio, quienes se encargaron de supervisar el desarrollo del trabajo, así como, el cumplimiento eficaz de las etapas, mediante observaciones, comentarios, recomendaciones y sugerencias relacionadas con el proyecto, además de aportar su experiencia en el tema de estudio, para la interpretación de los resultados.

A Jennifer Aguilar y a Álvaro Campos quienes se encargaron de auxiliarnos en el levantamiento magnético, a Ricardo Medrano quien nos apoyo con imágenes y mapas diversos para el trabajo de campo.

Merece mención especial, Cesar de la Cruz Poma, quien nos apoyó en gran medida en la creación de los mapas.

Al Programa Regional de Entrenamiento Geotérmico, en conjunto con la Universidad de El Salvador y LaGeo por todo el apoyo otorgado durante el diplomado.

ÍNDICE

RESUMEN	5
1. FORMULACIÓN DEL ESTUDIO	6
1.1 INTRODUCCIÓN	6
<i>Planteamiento del problema</i>	<i>6</i>
<i>Justificación</i>	<i>6</i>
1.2 PROPÓSITO Y ALCANCE DEL ESTUDIO	7
<i>Objetivo general.....</i>	<i>7</i>
<i>Objetivos específicos</i>	<i>7</i>
<i>Alcance</i>	<i>7</i>
1.3 LOCALIZACIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO	8
<i>Ubicación geográfica.....</i>	<i>8</i>
<i>Rutas y accesos</i>	<i>8</i>
1.4 GEOLOGÍA DEL LUGAR.....	8
<i>Geología general de la zona</i>	<i>8</i>
<i>Geología del lugar de trabajo</i>	<i>9</i>
1.5 LOGÍSTICA Y ETAPA DE RECONOCIMIENTO.....	10
<i>Planeación</i>	<i>10</i>
<i>Reconocimiento</i>	<i>11</i>
<i>Plan del levantamiento geofísico</i>	<i>12</i>
<i>Descarga de datos.....</i>	<i>12</i>
2. TÉCNICAS DE ESTUDIO.....	13
2.1 MAPEO TÉRMICO.....	13
2.1.1 <i>Fundamentos.....</i>	<i>13</i>
2.1.2 <i>Metodología.....</i>	<i>15</i>
2.1.3 <i>Procesamiento de los datos de sensores remotos</i>	<i>16</i>
2.1.4 <i>Resultados e interpretacion</i>	<i>17</i>
2.2 PROSPECCIÓN GRAVIMÉTRICA	20
2.2.1 <i>Fundamentos.....</i>	<i>20</i>
2.2.2 <i>Metodología.....</i>	<i>22</i>
2.2.3 <i>Procesamiento de datos gravimétricos.....</i>	<i>24</i>
2.2.4 <i>Resultados e interpretación</i>	<i>25</i>
2.3 PROSPECCIÓN MAGNETOMÉTRICA	28
2.3.1 <i>Fundamentos.....</i>	<i>28</i>
2.3.2 <i>Metodología.....</i>	<i>28</i>
2.3.3 <i>Procesamiento de datos magnéticos</i>	<i>29</i>
2.3.4 <i>Resultados e Interpretación</i>	<i>30</i>
3. DISCUSIÓN DE RESULTADOS.....	32
4. CONCLUSIONES	33
RECOMENDACIONES	33
PROBLEMAS E IMPREVISTOS.....	34
REFERENCIAS	36

BIBLIOGRÁFICAS.....	36
PÁGINAS DE INTERNET	38
PROFESIONALES CONSULTADOS	39
ANEXOS	40
ANEXO 1. CRONOGRAMA DE ACTIVIDADES	40
ANEXO 2. PROCESO DE AJUSTE Y CALIBRACIÓN DEL EQUIPO CG-5.....	43
ANEXO 3. DATOS DEL LEVANTAMIENTO GRAVIMÉTRICO Y MAGNÉTICO.....	46
ANEXO 4. RESULTADOS DEL PROCESAMIENTO DE DATOS GRAVIMÉTRICOS Y MAGNÉTICOS.	50
ANEXO 5. GEOREFERENCIACIÓN CON GPS DIFERENCIAL	55

RESUMEN

En este trabajo se llevó a cabo un estudio de exploración geofísica a pequeña escala con el fin de caracterizar estructuras geológicas con los métodos de gravimetría, magnetometría y percepción remota en el flanco Norte del volcán de San Vicente (volcán Chichontepec) al oriente de El Salvador. Las manifestaciones más importantes del área son escarpes con emanaciones de vapor, alteración mineral en las rocas, manantiales de alta temperatura, suelos humeantes y fumarolas como Los Infiernillos de San Francisco Agua Agria y Los Infiernillos Ciegos.

Inicialmente se realizó una investigación bibliográfica de los métodos a implementar y se propuso una metodología de las técnicas a aplicar, para identificar en profundidad la falla inferida del sistema NE-SO que ha sido cartografiada en la zona de la fumarola Infiernillo Ciego. Se seleccionó el área de interés, para la cual fue necesario adquirir información y mapas diversos. Se elaboró el análisis digital de imágenes de satélite para el mapeo térmico del subsuelo, calculando su temperatura de brillantez y el mapeo de alteración hidrotermal mediante el realce espectral, con el objetivo de limitar la zona de estudio, definir la orientación y cantidad de perfiles. Con base en esta información se realizó un reconocimiento del área para evaluar el terreno y afinar el diseño de los perfiles, así como el alcance del proyecto considerando las limitantes, principalmente el tiempo y los recursos. Posteriormente se realizaron mediciones de magnetometría y gravimetría en perfiles transversales a la quebrada que lleva a la manifestación hidrotermal de Infiernillo Ciego, después se analizaron e interpretaron los resultados obtenidos del procesamiento con técnicas de análisis espectral. Se utilizaron programas como *IDRISI* para el análisis digital, *Trimble Business Center*, *GravMaster*, *WinGlink* y *GEMLink* para el procesamiento de las mediciones de potencial y, *Surfer* y *ArcGIS* como herramientas de visualización de datos.

Los resultados obtenidos de este estudio geofísico no proporcionan suficiente información para caracterizar a detalle una estructura geológica como la falla inferida de Infiernillo Ciego, sin embargo se obtuvieron resultados positivos del estudio de magnetometría y gravimetría, al demostrar que son técnicas sensibles a la presencia de estructuras geológicas, además los resultados logrados al aplicar las técnicas de mapeo térmico y realce espectral indican una zona de anomalía térmica en superficie que se relaciona con zonas de alteración hidrotermal, por lo tanto se comprobó que estas técnicas son útiles en la etapa de reconocimiento y prefactibilidad en estudios geotérmicos.

Se infiere que las anomalías magnéticas del área de estudio ocurran debido a cambios mineralógicos, producto de la alteración hidrotermal asociada al posible ascenso de fluidos geotérmicos del flanco Norte del volcán de San Vicente. Por lo tanto, se recomienda hacer una malla con perfiles magnéticos y gravimétricos más largos y con menor espaciamiento entre ellos, para densificar las mediciones y poder observar de mejor manera el contraste en el efecto de la presencia de la alteración hidrotermal.

1. FORMULACIÓN DEL ESTUDIO

1.1 INTRODUCCIÓN

El presente escrito forma parte del Programa Regional de Entrenamiento Geotérmico celebrado del 01 de Junio al 07 de Noviembre de 2015 para la realización del Diplomado de Especialización en Geotermia (PREG) en el Marco del Programa Regional de Entrenamiento Geotérmico Edición 2015, con sede en la ciudad de San Salvador, El Salvador, el cual es financiado por el Banco Interamericano de Desarrollo (BID) y Fondos Nórdicos para el Desarrollo por sus siglas en inglés (NDF), con el auspicio del Consejo Nacional de Energía del El Salvador, y la participación activa de LaGeo y la Universidad de El Salvador.

La geotermia contribuye en la generación de electricidad mediante el desarrollo de los sistemas hidrotermales, su identificación con métodos potenciales e imágenes de satélite es útil para resaltar rasgos superficiales como lineamientos estructurales, fallas, zonas mineralizadas y para obtener información de la superficie como la temperatura, con ello se pueden indicar las zonas de exploración con potencial geotérmico.

Este trabajo se ha dividido en cuatro capítulos, la descripción del proyecto, localización y geología general de la zona se encuentra en el primer capítulo. El segundo contiene los fundamentos de las técnicas empleadas, una explicación de los fenómenos en los cuales se basa el estudio, la metodología para la toma de datos y los resultados conseguidos del procesamiento de las mediciones de cada uno de los métodos. En el capítulo tres se presenta la discusión de los resultados obtenidos. El cuarto capítulo expone las conclusiones y recomendaciones del levamiento magnético, gravimétrico y de las técnicas empleadas para el análisis digital de imágenes de satélite. Por último en los anexos esta la base de datos generada a partir de este estudio y mapas útiles para interpretación de los mismos.

Planteamiento del problema

Esta investigación pretende ver estructuras geológicas en el subsuelo mediante técnicas de prospección geofísica, su identificación dependerá de los lineamientos e interpretación de estructuras, de la descarga de calor presente y de encontrar alteración hidrotermal. Por lo tanto se intentará hallar recursos geotérmicos con base en las evidencias superficiales que son las que se pueden localizar e identificar con las técnicas de percepción remota así también mediante la identificación e interpretación de anomalías observadas en las propiedades geofísicas medidas.

Justificación

Las fallas geológicas constituyen los canales preferenciales para el transporte de los fluidos geotérmicos, en algunos campos el reservorio se encuentra confinado en estas estructuras, es por esa razón que es muy importante la identificación y caracterización de

estos sistemas de fallas activas, lo que actualmente constituye uno de los retos más difíciles de la geociencia, sobre todo en los casos donde no existen evidencias morfológicas en superficie. Los métodos geofísicos constituyen una herramienta importante en la identificación de estas estructuras. Técnicas como la gravimetría, magnetometría y sísmica pasiva, han demostrado ser útiles en la caracterización de los sistemas de fallas activas.

Por lo tanto, el presente estudio se realiza debido a la dificultad que existe para identificar estructuras de falla en el flanco Norte del volcán de San Vicente (volcán Chichontepec), ya que han sido cubiertos en superficie por depósitos volcanogénicos más recientes borrando la evidencia superficial de las estructuras permeables de esta zona de interés. Se utilizan las técnicas de gravimetría, magnetometría y percepción remota para tener un mayor número de elementos para identificar en profundidad la falla inferida del sistema NE-SO que ha sido cartografiada en la zona de la fumarola Infiernillo Ciego.

1.2 PROPÓSITO Y ALCANCE DEL ESTUDIO

Objetivo general

- Identificar y caracterizar un lineamiento en la zona de Infiernillo Ciego mediante la implementación e integración de las técnicas de Gravimetría, Magnetometría y Percepción Remota.

Objetivos específicos

- Identificar zonas de alteración hidrotermal mediante el uso de imágenes de satélite, y caracterizar estructuras geológicas a partir de la interpretación de anomalías observadas en las propiedades geofísicas medidas.
- Realizar mediciones gravimétricas y magnéticas como métodos útiles en la exploración geotérmica.
- Presentar una metodología para utilizar las técnicas de magnetometría, gravimetría y percepción remota en la identificación de estructuras geológicas.

Alcance

Diseñar y ejecutar perfiles de gravimetría y magnetometría transversales al lineamiento estructural de interés, procesar, interpretar e integrar los datos obtenidos y correlacionados con la información geológica existente.

1.3 LOCALIZACIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO

Ubicación geográfica

El presente estudio se ubica en la zona paracentral-oriental de El Salvador, limitado al Norte por el Cantón Candelaria, al Oeste por el Cantón Loma Alta y al Sureste por el Cantón Los Laureles del Municipio de San Cayetano Istepeque, Tepetitán, y San Vicente respectivamente, del Departamento de San Vicente a 60 kilómetros de la capital. El área geotérmica de esta zona se localiza en el flanco norte del volcán del mismo nombre.

El área de investigación está delimitada entre las coordenadas geográficas 13°37'8.32" y 13°38'8.89" de latitud norte y los meridianos 88°49'39.05" y 88°50'2.90" de longitud oeste, con una superficie de 0.55 km² (850 x 650 m).

Rutas y accesos

Se puede acceder a la zona de estudio desde San Salvador a través de la carretera Panamericana hacia San Vicente tomando la salida a Nuevo Tepetitán.

1.4 GEOLOGÍA DEL LUGAR

Geología general de la zona

El área de estudio está ubicada en la parte centro-oriental del territorio salvadoreño, el cual desde el punto de vista de la tectónica de placas está comprendido dentro de la Placa Caribe, siendo los principales rasgos morfotectónicos producidos por la subducción de la Placa de Cocos bajo la Placa Caribe y por la interacción de la Placa Caribe con la Placa Norteamericana – Sistema de fallas Motagua-Polochic – (Figura 1.1).

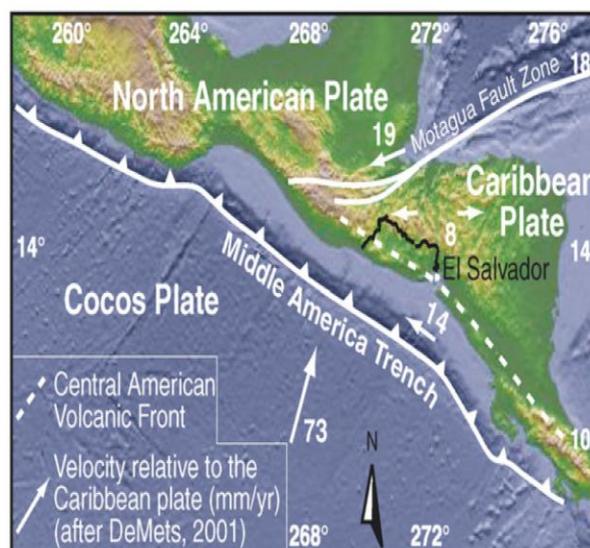


Figura 1.1. Estilo estructural de la región de América Central: Convergencia oblicua. Tomado de Agostini, S. et al., 2006.

Geológicamente el área de estudio está limitada al Norte por el Graben Central, estructura conocida actualmente como Zona de Falla de El Salvador (ZFES), la cual atraviesa todo el país y es parte de la estructura regional conocida como Graben Centroamericano, este sistema tiene dirección E-O a ESE-ONO, según Corti et al., 2005.

Geología del lugar de trabajo

De acuerdo a la información reportada en el mapa geológico de El Salvador escala 1:100,000 se sabe que el volcán de San Vicente tiene una composición geológica de tipo Efusiva básica-intermedias, piroclásticas subordinadas, de la Formación San Salvador, clasificada como s2 del Pleistoceno, y que la composición de las rocas que afloran sobre el área de estudio son Tobas y Andesitas de la formación San Salvador, clasificadas como s4; tierra blanca (piroclásticas ácidas) y epiclásticas volcánicas subordinadas, localmente efusivas ácidas (Figura 1.2).

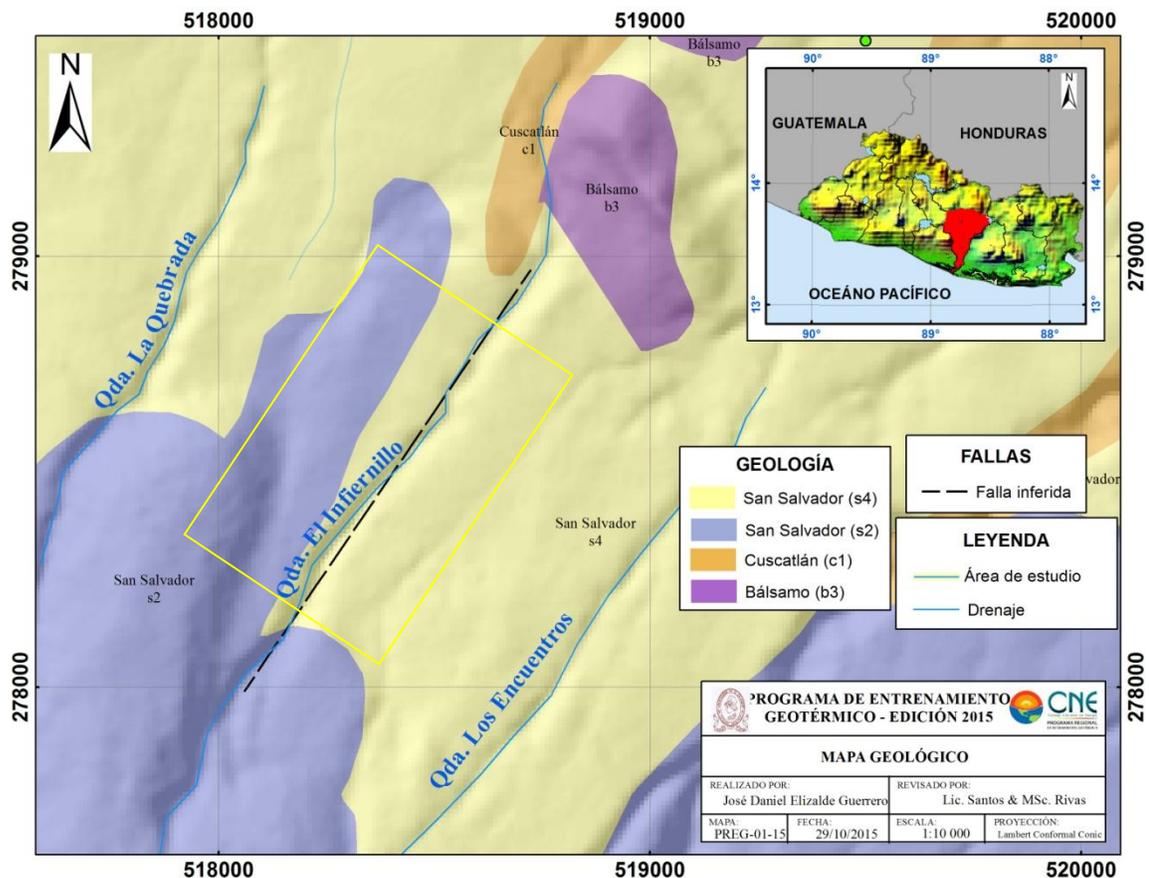


Figura 1.2. Mapa Geológico. En un rectángulo amarillo se muestra el perímetro del área de estudio.

Las manifestaciones geotérmicas más importantes del área se encuentran localizadas en el flanco Norte del volcán, caracterizadas principalmente por fumarolas, escarpes con emanaciones de vapor, manantiales de alta temperatura y suelos humeantes, observándose además una extensa zona de alteración hidrotermal (Infiernillo Ciego y

Agua Agria) y fuentes termales con temperaturas cercanas al punto de ebullición del agua.

Las principales fumarolas del flanco Norte del volcán de San Vicente son: La fumarola Agua Agria, ubicada en el Cantón San Francisco Agua Agria que se observa en el cauce de la Quebrada Infiernillo, y la fumarola Infiernillo Ciego que se encuentra aproximadamente dos kilómetros al Este, en el Cantón Loma Alta, sobre la quebrada también llamada Infiernillo donde las principales manifestaciones en su cauce y fuera de él son emanación de vapor moderado, fuentes termales y lodo hirviente. Los materiales observados en el área de emplazamiento de la fumarola son bloques lávicos en una matriz arenosa, producto de oleadas piroclásticas. El patrón de fracturación de la zona tiene una orientación NE-SO sobre el que se alinea la fumarola de Infiernillo Ciego, además se observa la presencia de arcillas de alteración hidrotermal asociadas a esta zona (Figura. 1.3).



Figura 1.3. En la zona de la fumarola de Infiernillo Ciego se observó la presencia de arcillas de alteración hidrotermal con coloraciones variadas que van de rojizas, amarillentas hasta blancas. Fotografía tomada por Daniel Elizalde, Octubre 2015.

1.5 LOGÍSTICA Y ETAPA DE RECONOCIMIENTO

En este apartado se describe la planeación del trabajo de campo durante los días 1 al 9 de Octubre del 2015 para la adquisición de los datos en la zona geotérmica del flanco norte del volcán San Vicente con el gravímetro CG-5, el magnetómetro de precesión de protones GSM-19TW y GPS diferencial.

Planeación

Inicialmente se realizó una investigación bibliográfica de los métodos a implementar y se propuso una metodología de las técnicas a aplicar, para identificar en profundidad la falla inferida del sistema NE-SO que ha sido cartografiada en la zona de la fumarola Infiernillo Ciego. Luego se seleccionó el área de interés, para la cual fue necesario adquirir

información y mapas diversos. Se elaboró el análisis digital de imágenes de satélite para el mapeo térmico del subsuelo, calculando su temperatura de brillantéz y el mapeo de alteración hidrotermal mediante el realce espectral, con el objetivo de limitar la zona de estudio, definir la orientación y cantidad de perfiles.

Se propusieron en gabinete ocho perfiles para hacer el estudio geofísico, con orientación NW-SE, una longitud de 500 m, un espaciamiento entre mediciones de 30 m, aunque cercana a la quebrada que lleva a la fumarola de Infiernillo Ciego sería de 10 m entre cada medición.

Con base en esta información se realizó un reconocimiento del área para evaluar el terreno y afinar el diseño de los perfiles, así como el alcance del proyecto considerando las limitantes, principalmente el tiempo y los recursos.

Respecto al proceso de ajuste y calibración del equipo para gravimetría se realizó la corrección por deriva y se calibró el gravímetro CG-5 (ver Anexo 2). Además se verificó el funcionamiento del magnetómetro y del GPS diferencial, así como de sus componentes y que estos estuvieran disponibles para su uso.

Reconocimiento

De acuerdo al cronograma propuesto (ver Anexo 1), se realizaron dos salidas para reconocer el área de estudio, las actividades fueron:

- Imprimir los mapas del Modelo Digital de Elevaciones (MDE), rutas de acceso, imagen de Google Earth donde se muestren los perfiles, mapa geológico-estructural y los planos de ubicación de los mojones.
- Conocer las rutas y accesos al área de interés.
- Evaluar el estado en que se encontraban las bases gravimétricas y de GPS.
- Ubicar en la zona con GPS las coordenadas de los perfiles propuestos en gabinete.
- Explorar sobre los perfiles los cambios en la topografía, y documentar los cambios de pendiente en los escarpes, además de marcar los accesos e identificar los terrenos fácilmente accesibles.
- Inspeccionar a pie la zona Este y Oeste de la quebrada, y la zona de alteración cercana a la fumarola.
- Calcular el tiempo que se requiere para trasladarse entre los puntos de medición y proponer cuánto tiempo tomará medir cada perfil.
- La elección de la fecha también es importante y se ha de tener en cuenta las condiciones meteorológicas y ambientales previstas, condiciones desfavorables que puedan afectar la operatividad de los equipos y degradar el alcance y precisión esperada. En general, el estudio no debe realizarse cuando existan tormentas magnéticas o factores medio ambientales que dificulten o degraden la precisión del sensor de medición en los equipos. Por ello se deben investigar las

condiciones climáticas antes y durante los días apartados para el levantamiento geofísico.

Plan del levantamiento geofísico

El propósito del levantamiento geofísico es obtener mediciones puntuales de la variación de la gravedad y la intensidad de campo magnético total a lo largo de una serie de perfiles perpendiculares a una estructura geológica, con el fin de obtener mayor cantidad de información del subsuelo que corrobore los resultados obtenidos con ambos métodos y estudios anteriores.

Las observaciones conseguidas en el reconocimiento del área sirvieron para redefinir los perfiles del levantamiento geofísico, por tanto de los ocho perfiles iniciales sólo se eligieron tres, porque en ellos sería adecuado implementar óptimamente los métodos.

Previo a la medición de magnetometría y gravimetría se hicieron las mediciones con GPS diferencial para determinar los puntos exactos de medición. Con un lazo de 30 metros se marcaron las distancias entre cada punto de inicio a fin, a excepción de los perfiles de difícil acceso, como los más cercanos a la fumarola. La metodología de adquisición y procesamiento de los datos de las técnicas utilizadas en este estudio, se describen en el capítulo dos.

Descarga de datos

Cada equipo tiene su cable y software propio para descargar los datos a la computadora en un archivo de texto, con este archivo se utilizó una hoja de cálculo para manipular tal información.

Se utilizaron programas como *IDRISI* para el análisis digital, *Trimble Business Center*, *GravMaster*, *WinGlink* y *GEMLink* para el procesamiento de las mediciones de potencial y, *Surfer* y *ArcGIS* como herramientas de visualización de datos

2. TÉCNICAS DE ESTUDIO

2.1 MAPEO TÉRMICO

2.1.1 Fundamentos

La percepción remota es conocida, generalmente, como el estudio de los objetos por medio de imágenes a distancia de dicho objeto. El principio básico mediante el cual funciona un sistema de percepción remota es el de la radiación de ondas electromagnéticas a través del espacio, que son las manifestaciones de energía presente en los cuerpos.

Con la tecnología de percepción remota se obtienen imágenes en diferentes frecuencias del espectro electromagnético que combinadas entre sí, resaltan diferentes rasgos superficiales, como pueden ser fallas, lineamientos y zonas mineralizadas a bajo costo y puede además cubrir grandes extensiones (Wright et al., 1990; Prol-Ledesma et al., 1993; Wannamaker et al., 1994; Ruiz-Armenta & Prol-Ledesma., 1998; Urai et al., 2000; Nash et al., 2004; Littlefield et al., 2009; Mboin, I., 2011; Mutua et al., 2011).

La resolución de una imagen tiene cuatro aspectos: espacial, espectral, radiométrica y temporal. La primera se refiere al tamaño del pixel de la imagen que representa el objeto o área mínima que puede ser observada; la segunda al rango de frecuencias discretas del espectro electromagnético que mide el sensor; la tercera, a los niveles de brillantez o escala de grises que el sistema de detectores puede medir y por último, la resolución temporal se refiere a la periodicidad con que el satélite obtiene las imágenes de un mismo sitio.

Radiación Electromagnética

La radiación electromagnética (en adelante REM) consiste de un campo eléctrico E que varía en magnitud en dirección perpendicular a la dirección en la cual la radiación está viajando, y un campo magnético H orientado en ángulo recto al campo eléctrico. (Chandra & Ghosh, 2006).

Espectro Electromagnético

Las ondas electromagnéticas tienen una clasificación basada en la localización de su longitud de onda dentro de un espectro electromagnético (Fig. 2.1). Dos importantes categorías son el espectro óptico de $0.30 \mu m$ a $15 \mu m$ el cual define las longitudes de onda que pueden ser reflejadas y refractadas con lentes y espejos. Los límites del visible son definidos por la sensibilidad de nuestro sistema visual. Se sabe que estos segmentos son los colores primarios aditivos, delimitados aproximadamente de 0.4 a $0.5 \mu m$ (azul), 0.5 a $0.6 \mu m$ (verde) y 0.6 a $0.7 \mu m$ (rojo).

La banda más importante para las mediciones superficiales de radiación térmica es el infrarrojo debido a que en esta región del espectro electromagnético se manifiesta la energía que tienen los cuerpos de la Tierra; este sector de ondas se divide a su vez en tres secciones principales: Infrarrojo Cercano, el más próximo al visible y que llega hasta $1.1 \mu m$; Infrarrojo Medio a los $15 \mu m$, y el Infrarrojo Térmico hasta los $100 \mu m$. (Campbell et al., 2011; Jensen, 1996).

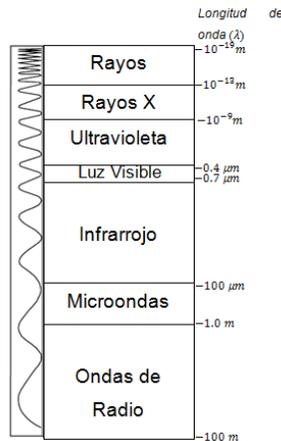


Figura 2.1. Espectro electromagnético. Las longitudes de onda corta están representadas en la parte superior, y las longitudes de onda larga en la parte inferior.

Leyes de la radiación

La propagación de la energía electromagnética sigue ciertas leyes físicas. Algunas de ellas son mencionadas a continuación.

1. Newton mantenía que la luz es un flujo de partículas minúsculas (“*corpuscles*”) que viajan en líneas rectas.
2. Ley de Stefan-Boltzman define la relación entre la radiación emitida total (W) y la temperatura (K). En esencia, esta ley establece que cuerpos negros calientes emiten más energía por unidad de área que cuerpos negros fríos.
3. Ley de Kirchhoff establece que todos los objetos emiten REM, excepto aquellos que se encuentren en el cero absoluto, es decir, todos los objetos con temperaturas por encima del cero absoluto tienen temperatura y emiten energía.
4. Ley del desplazamiento de Wien especifica la relación entre la longitud de onda de la radiación emitida y la temperatura del cuerpo negro.

$$\lambda = \frac{2897.8}{T} \quad \text{Ec. 2.1}$$

Donde λ es la longitud de onda a la cual la radiancia es máxima y T es la temperatura absoluta. Conforme los cuerpos negros lleguen a calentarse, la longitud de onda de máxima emitancia se desplaza hacia longitudes de onda corta.

Interacción de la radiación con la atmósfera

La REM interactúa con el estrato más alejado de la atmósfera, la ionósfera, situada aproximadamente entre los 50 y 1000 *km* de altura, antes de alcanzar la superficie terrestre, esta es sujeta a modificaciones por algunos procesos físicos que son: dispersión, absorción y refracción.

Interacción con la superficie

Cuando la REM alcanza la superficie de la Tierra, esta es absorbida, reflejada o transmitida. (Campbell et al, 2011).

Información radiométrica (emisión de radiación térmica del suelo)

Técnica Termométrica utilizada

- Mapeadores térmicos

Dentro de la variedad de sensores remotos, existe un grupo que detecta frecuencias del infrarrojo que incluyen la radiación térmica de objetos a temperaturas ambientales. Esta tecnología puede usarse para identificar anomalías térmicas en la superficie del terreno que pudieran estar asociadas a descargas de acuíferos hidrotermales.

2.1.2 Metodología

Mapeo de alteración hidrotermal de rocas

Es posible utilizar la percepción remota como una herramienta para recopilar datos y transformarlos en información distribuida espacialmente, utilizando técnicas de procesamiento e interpretación de imágenes y los métodos apropiados para conseguirlo.

Esta técnica incluye una secuencia de procedimientos en los que de manera general primero se plantea el problema a resolver, luego se obtienen los datos requeridos, después se realizan una serie de procedimientos que incluyen el análisis estadístico, el pre procesamiento radiométrico y geométrico, el procesamiento digital y la interpretación de las imágenes que registran la interacción entre la energía electromagnética y la materia, por último se presenta la información obtenida del análisis para la toma de decisiones con base en los datos procesados.

Una vez planteado el problema a resolver, es decir, identificar materiales como vegetación, óxidos e hidroxilos, se obtuvieron los datos de sensores remotos, para este trabajo fueron las imágenes del satélite Landsat 5 con el sensor Thematic Mapper (TM) de la zona de interés para el 19 de Enero de 2010, a las cuales se les aplicó un recorte para

delimitar el área de estudio (20 x 25 km), luego se les realizó un análisis estadístico de las bandas contenidas en la imagen, se corrigió la influencia del efecto atmosférico como parte del pre-procesamiento, luego se realizó el análisis digital con las técnicas de realce espectral y análisis de componentes principales dirigidas con las bandas 1, 4, 5, 7 para hidroxilos y para óxidos de hierro las bandas 1, 3, 4, 5, útiles para el reconocimiento y localización de posibles zonas mineralizadas y lineamientos estructurales (Ruiz-Armenta & Prol-Ledesma., 1998).

Mapeo térmico

El uso de imágenes de satélite en exploración geotérmica se está convirtiendo en una importante alternativa a los métodos convencionales para el mapeo térmico. (Mongillo et al., 1995; Calvin et al., 2002; Calvin et al., 2006; Haselwimmer., 2011; Gutiérrez et al., 2012).

Los datos que provienen del satélite generalmente vienen como valores en números digitales (DN), aunque también se encuentran como valores de radiancia, que es una medida absoluta de la brillantez del medio. Cuando las mediciones están en DN, se transforman a radiancia para poder hacer operaciones con valores que representen cantidades físicas absolutas a partir de una ecuación lineal. La ecuación tiene la siguiente forma:

$$L(DN) = ((L_{max} - L_{min})/255) * DN + L_{min}$$

Donde L es la radiancia, L_{max} y L_{min} son la máxima y la mínima radiancia medidas sobre el ancho de cada banda y, DN es el número digital de cada uno de los píxeles y depende de la resolución radiométrica del sensor.

La ecuación para calcular la temperatura fue desarrollada por Planck y se base en el concepto de radiancia de cuerpo negro, por lo que se puede obtener una temperatura absoluta.

2.1.3 Procesamiento de los datos de sensores remotos

Realce Espectral

El realce de imágenes se entiende como la modificación y mejoramiento del aspecto visual de la imagen para realzar o destacar información dentro de la misma y revelar rasgos que de otra manera no serían fácilmente visibles (Campbell, 2002). Se aplicó la técnica de composición en falso color para resaltar ciertos materiales (óxidos de hierro e hidroxilos) espectralmente. Se utilizó esta técnica para asociar los colores observados con las características de reflectancia espectral, como con una transformación de componentes principales, ésta consiste en representar los píxeles en un espacio vectorial con tantos ejes o dimensiones ya que tiene componentes espectrales asociadas a cada píxel. En una composición en falso color se eligen tres de las bandas registradas para

mostrarlas usando los colores primarios rojo, verde y azul, para dar una mejor discriminación visual entre los tipos de cobertura de interés o mediante una operación matemática básica, que es generalmente lineal como la suma, resta y división de los valores de brillo de dos o más bandas (Crosta & Moore, 1989; Fraser, S. J., 1991; Loughlin, 1991; Ruiz-Armenta & Prol-Ledesma., 1998; Fernández de la Vega-Márquez et al., 2001).

Mapeo Térmico

Se elige la banda 6 (10.4 – 12.5 μm) de la imagen TM para el mapeo térmico a través del cálculo de la temperatura de brillantez. El programa IDRISI Selva 17.0 de la Universidad de Clark, procesa la temperatura por medio de un algoritmo igual a la función inversa de Planck (Eastman, J. Ronald, 2005). Por tanto, solo se le da la instrucción al programa para que esté saque los valores de radiancia a partir de números digitales y obtenga la temperatura a partir de la radiancia.

2.1.4 Resultados e interpretación

Con una composición en falso color es posible extraer información combinando bandas que tengan diferencias en reflectancia para diferentes materiales (vegetación, minerales de alteración como óxidos e hidroxilos).

Para poder identificar los materiales es necesario conocer su firma espectral, así como sus rasgos característicos de absorción y de reflectancia, en la Tabla 1 se muestran algunos de ellos (Fernández de la Vega-Márquez et al., 2001; Ruiz-Armenta., & Prol-Ledesma, R. M., 1998).

Tabla 1. Características espectrales para vegetación, óxidos e hidroxilos del sensor TM.

Materiales	Reflectancia	Absorción
Vegetación	TM4, TM2, TM5 y TM7	TM3 y TM1
Hematita	TM3	TM2 y TM1
Goethita	TM3 y TM2	TM1
Jarosita	TM3, TM2 y TM1	
Minerales arcillosos, carbonatos, filosilitacos y sulfatos.	TM5	TM7

Del análisis de componentes principales dirigidas se realizó la composición a color mostrada en la Figura 2.2, en la banda del color rojo los óxidos de hierro, en la verde hidroxilos y en la azul óxidos más hidroxilos. En color magenta se encuentran las rocas alteradas hidrotermalmente.

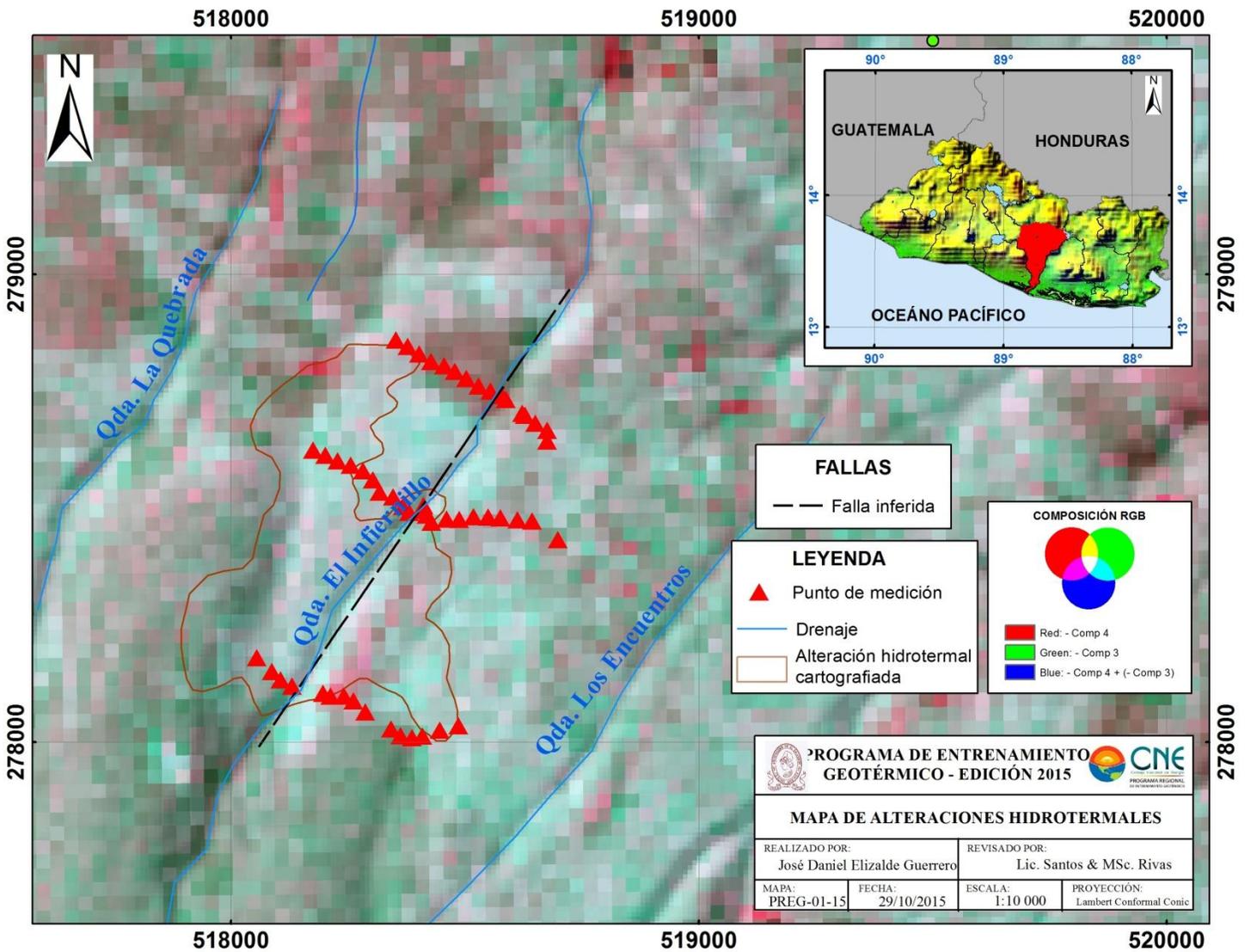


Figura 2.2. Composición en falso color. Rojo: Ox. Verde: Hx. Azul: Ox + Hx

Las imágenes que se generaron sirvieron para observar cuantitativamente, mediante una escala de colores la temperatura. En un rango de 23 a 35 °C se muestran anomalías de temperatura que posiblemente pudiera estar ligada a un efecto de actividad hidrotermal de la zona (Figura 2.3).

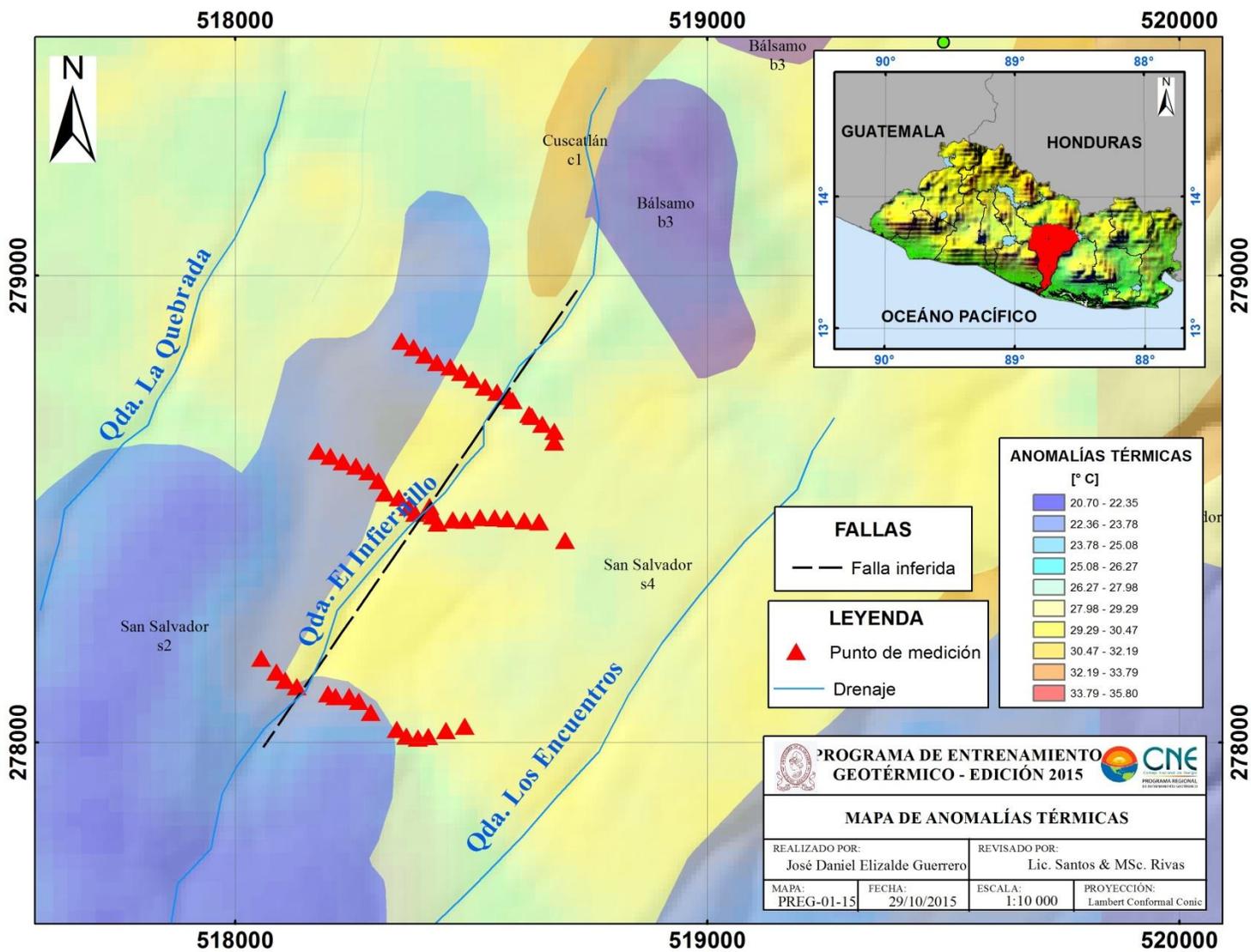


Figura 2.3. Mapa de anomalías térmicas.

2.2 PROSPECCIÓN GRAVIMÉTRICA

2.2.1 Fundamentos

La Gravimetría es un método pasivo en el cual se mide las variaciones de campo gravimétrico terrestre en superficie, debido a los contrastes de densidad de los cuerpos en el subsuelo. El método de la gravedad es un método relativamente barato, no invasivo, no destructivo.

Se basa en el estudio de las anomalías gravimétricas (diferencias entre los valores medidos del campo gravitatorio terrestre en un lugar y el valor que teóricamente debía tener en ese lugar). Las anomalías están originadas por heterogeneidad en la densidad del subsuelo, y son positivas o negativas según exista en el lugar un cuerpo de mayor o menor densidad que la propia del entorno. Esta técnica se aplicará para la realización de perfiles longitudinales, con base en puntos de medida alineados, o en retículas con espaciado constante. La separación de los puntos de medida se planteará en función de la magnitud y profundidad de la anomalía a investigar.

Gravímetro de cambio de gravedad relativa

Los cambios laterales de densidad en el subsuelo causan un cambio en la fuerza de la gravedad en la superficie. La intensidad de la fuerza de la gravedad debido a la diferencia de masa enterrada se superpone a la fuerza de la gravedad debido a la masa total de la Tierra. Los estudios gravimétricos miden variaciones en el campo gravitacional en la Tierra causados por diferencias en la densidad de las rocas subsuperficiales.

Correcciones a los datos gravimétricos

Con la finalidad de ser más útil en la prospección, los datos gravimétricos obtenidos en campo deben ser corregidos por la elevación, la influencia de la topografía cercana, y la latitud. El procesamiento de cualquier valor anómalo de gravedad está basado en el mismo principio fundamental: el valor anómalo en un punto de la tierra es igual al valor de la gravedad observada menos un valor predicho de gravedad basado en un modelo dado de la tierra.

$$g(\text{anomalía}) = g(\text{observada}) - g(\text{teórica})$$

- ◆ Corrección por latitud: se basa en la determinación analítica de la gravedad en cualquier punto de la tierra, la cual es modelada como un elipsoide de revolución, según el Sistema Geodésico de Referencia de 1967. Dicha expresión matemática depende solamente del cambio en latitud del punto de medición. Luego de una aproximación Chebychev, con un error máximo de 0.004 mGal, se puede utilizar la siguiente expresión:

$$g = (978.03185)(1 + 0.005278895 (\sin \varphi)^2 + 0.000023462(\sin \varphi)^4) \text{ Gal}$$

- ◆ Corrección por deriva: las mediciones instrumentales requieren una corrección debida a la deriva que sufre el gravímetro. Todos los valores de gravedad observados durante un día de operación del equipo, incluyendo las mediciones que se repitan, son graficadas con respecto al tiempo. Dichas mediciones son afectadas por la deformación que sufre el resorte interno del gravímetro, esto depende del tipo de equipo utilizado.
- ◆ Corrección por mareas: el valor normal de gravedad en cualquier punto varía cíclicamente en el transcurso del día en aproximadamente 0.3 mGal debido al cambio en las mareas. Se puede prescindir de la corrección por marea si el observador tiene el cuidado de regresar a la base en períodos suficientemente cercanos de modo que los efectos por mareas sean adecuadamente incorporados en la deriva instrumental por interpolación lineal.
- ◆ Corrección por terreno: En muchos levantamientos gravimétricos el terreno en la vecindad de una estación es suficientemente plano para que la corrección de elevación provea una compensación adecuada por los efectos topográficos. Si la topografía cercana causa distorsiones grandes en la gravedad observada debe compensarse dicho efecto para evitar que afecte la interpretación de las anomalías correspondientes a cuerpos enterrados que sean de interés en la investigación. Para el procesamiento de datos en este estudio, se utilizó el GravMaster para calcular la corrección por terreno.
- ◆ Corrección de Bouguer: El incremento esperado en la atracción gravitatoria debido a la roca entre la estación y el nivel del mar es modelado asumiendo que la roca puede aproximarse a una capa horizontal infinita de densidad uniforme con la superficie inferior a nivel del mar, y la superficie superior a la elevación del punto de medición. Esta corrección depende directamente del valor de densidad asumido para el material entre el lugar de medición y el nivel del mar.
- ◆ Corrección de aire libre: esta corrección se basa en el hecho de que la atracción de la tierra puede ser considerada como constante, como si toda su masa estuviese concentrada en el centro. Por lo tanto, si la elevación del gravímetro cambia su distancia con respecto al centro de la tierra cambia en la misma proporción.

La anomalía de Bouguer: representa el método comúnmente usado para corregir los valores observados de gravedad. Esta se compone de los siguientes tres elementos:

- El incremento en la gravedad debido a la latitud.
- El decremento en la gravedad debido al incremento en la elevación con respecto al nivel del mar.

- El incremento en la atracción gravitatoria debido a la masa de roca existente entre el nivel del mar y el punto de medición.

La gravedad esperada o teórica

$$g(\text{teorica}) = g(\text{lat}) + g(\text{aire libre}) + g(\text{Boug})$$

El primer elemento es la corrección por latitud, el segundo la corrección de aire libre, y el tercero la corrección de Bouguer. (Dobrin M. & Savit C. 1988).

Posicionamiento de los puntos gravimétricos

En un estudio de gravimetría se requiere de la ubicación precisa de los puntos de medida, debido a que el valor de gravedad es sensible a los cambios de elevación, por tal razón es importante determinar con precisión las coordenadas de ubicación (x, y, z) de cada punto de medición, por ello es recomendable utilizar GPS de doble frecuencia, en modo Cinemático con post-procesamiento de datos. En este proyecto se utilizó un set de GPS de doble frecuencia marca Trimble, modelo 5800, con el cual se obtuvo una precisión de $\pm 10 \text{ cm}$ (ver Anexo 6).

2.2.2 Metodología

Procedimiento de obtención de datos gravimétricos

Para el estudio gravimétrico se utilizó el gravímetro digital Autograv Modelo CG-5 de la empresa SCINTREX.

El procedimiento de medición es el siguiente.

1. Limpiar el terreno para colocar el trípode de nivelación.
2. Colocar el trípode de nivelación en el terreno teniendo el cuidado de que este apunte al norte magnético del lado de los tornillos XY, para esto es necesario el uso de una brújula, el trípode debe estar nivelado con respecto a la horizontal para esto tiene un indicador de nivelación por burbuja en una de sus patas.
3. Extraer el gravímetro con cuidado de la bolsa protectora y colocarlo en el trípode de nivelación, el gravímetro debe de estar siempre vertical y no debe ser golpeado ya que el sensor en el instrumento es sensible y se puede dañar o sufrir una descalibración momentánea, de ser este el caso se debe esperar un tiempo prudencial (pueden ser hasta horas) para que el sensor se estabilice.
4. Encender el gravímetro.
5. En la pantalla principal SET UP se establecieron los siguientes parámetros:
 - a. Nombre del levantamiento
 - b. Nombre del responsable que realiza el levantamiento.

- c. Latitud geográfica del punto gravimétrico
- d. Longitud geográfica del punto gravimétrico
- e. Acimut: 0
- f. Elevación: La altura ortométrica de la estación gravimétrica. (Datos obtenidos con el GPS diferencial).

NOTA: La posición de la persona que manipula el instrumento debe de ser adecuada para no inferir en la calibración de este, se recomienda colocarse de frente a la pantalla con las rodillas flexionadas

6. Nivelar el equipo observando la pantalla del menú de nivelación moviendo los tornillos de nivelación, que están en el trípode de nivelación. Comenzando por los tornillos XY (simultáneamente) y posteriormente con el tornillo F, (en la pantalla se indica la dirección de giro necesaria en los tornillos para nivelar el equipo), hasta que el equipo muestre que esta nivelado en los 2 ejes mostrando el siguiente símbolo: ☺
7. Una vez nivelado, presionar la función “READ GRAV” para comenzar a tomar la medición (Figura 2.4).

NOTA: El instrumento tiene un tiempo de retardo antes de empezar a tomar la medida, esto con el propósito de que la persona que manipula el equipo pueda alejarse a una distancia prudencial y no afectar la medida tomada.

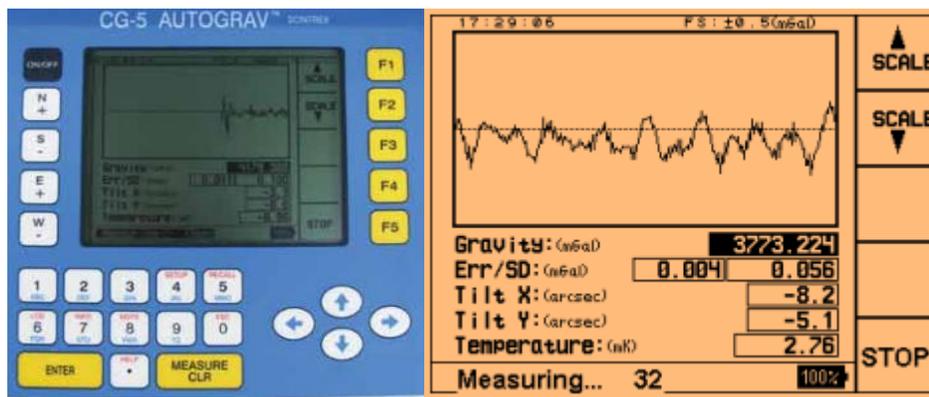


Figura 2.4. Pantalla del Gravímetro CG-5 durante la toma de datos.

8. El gravímetro fue programado para realizar dos ciclos de medida, una vez terminado los dos ciclos habilitará la opción FINAL DATA para mostrar un resumen de las mediciones efectuadas.

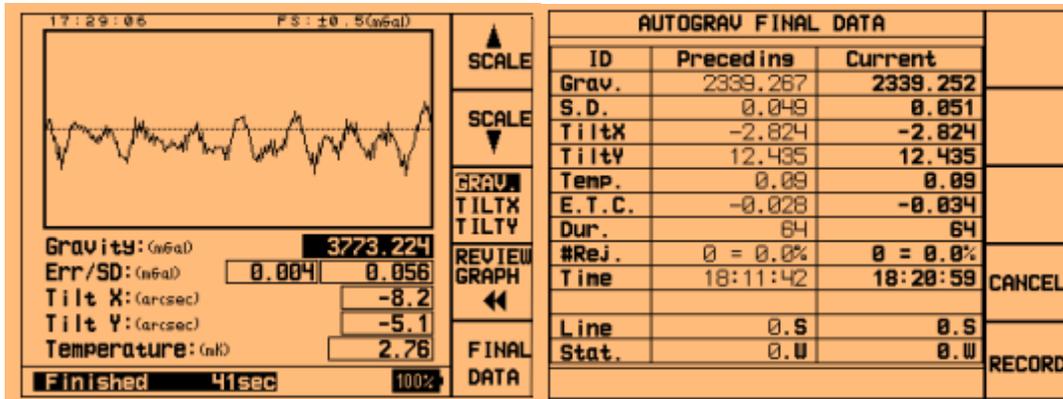


Figura 2.5. Pantalla del Gravímetro CG-5 durante el final del ciclo de medición.

9. Si el registro es útil, se guarda en la memoria para posteriormente ser descargado en la PC, presionando la función RECORD (Figura 2.5).
10. Si se ha terminado el muestreo en el punto definido, apagar el equipo de medición manteniendo presionado la tecla de encendido.
11. Guardar el equipo en el protector y dirigirse al nuevo punto de muestreo.
12. Otras consideraciones: Se llevó un control del recorrido de los puntos de muestreos, tomando medidas en la base como punto inicial y final, para eliminar errores por deriva.

2.2.3 Procesamiento de datos gravimétricos

En el caso de gravimetría el pre-procesamiento consiste en observar primero los valores medidos de gravedad relativa por el instrumento, en segundo lugar la desviación estándar, en tercer lugar la deriva en x e y, y por último en la fecha. La primera trata de ver que los valores no varíen en un mismo punto más de 0.100 mGal, la segunda consiste en revisar que la desviación estándar no tenga valores mayores a 0.1, la tercera que no pase de 20.0, aquellas observaciones que no cumplan estas condiciones son eliminadas. La fecha se utiliza para organizar las mediciones por circuitos.

Los datos del levantamiento gravimétrico fueron procesados utilizando los programas *Gravmaster*, *WinGlink* y para el despliegue de la información se utilizó *Surfer* y *ArcGIS*.

Una interpretación cualitativa se requiere una vez que se ha discriminado la señal residual de la regional. Las anomalías locales o residuales son objetivos de exploración de estructuras superficiales, mientras que las señales regionales vienen de estructuras más profundas ya sea el basamento.

Un mapa que represente la anomalía de Bouguer sirve para observar las propiedades del contraste de densidades de las rocas. Utilizando eficazmente técnicas de análisis espectral, tales como: segunda derivada, filtros de frecuencia y continuación hacia arriba y

hacia abajo, es posible destacar rasgos espaciales del mapa de anomalía de Bouguer (ver Anexo 4).

La segunda derivada aumenta los efectos cerca de la superficie a expensas de las fuentes profundas. En un mapa de segunda derivada vertical se percibe la exclusión de la señal regional.

Procesamiento de la información

- a) Se calculó la correlación lineal de los datos gravimétricos instrumentales.
- b) Se transformaron los datos instrumentales a datos de gravedad absoluta, gravedad teórica, y se calculó la corrección por terreno utilizando GravMaster.
- c) Se procesó la anomalía de Bouguer con una densidad de 2.2 g/m^3 , anomalía de Bouguer completa, la anomalía residual. Luego se aplicaron filtros de primera y segunda derivada, filtros pasa bajos y pasa altos. Se crearon perfiles 2D. Para todo lo anterior se utilizó WinGLink.
- d) Todas las redes obtenidas de WinGLink se exportaron a Surfer y ArcGIS para elaborar los mapas de anomalías que se analizaron.

2.2.4 Resultados e interpretación

En la Figura 2.6 se observa una tendencia proporcional inversa entre la gravedad y la elevación con una correlación del 0.9985, la cual está sustentada teóricamente con la ley de Gravitación Universal, e indica que los datos medidos en campo son representativos y con buena calidad.

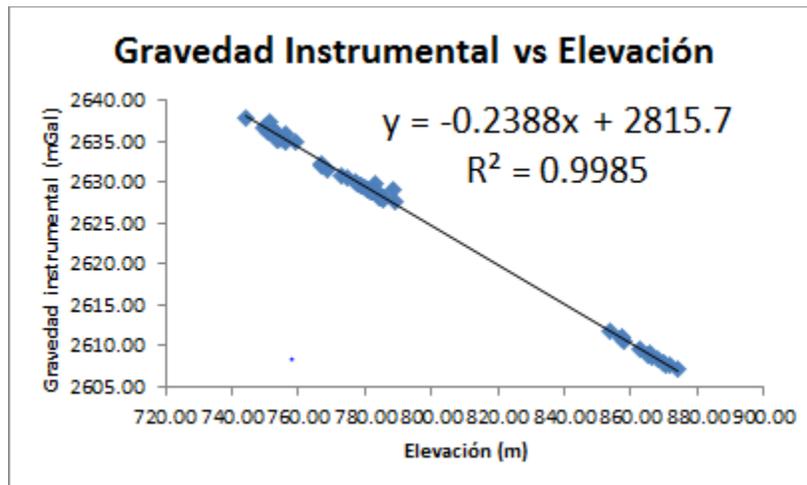


Figura 2.6. Representación gráfica de la correlación de gravedad instrumental contra elevación.

En el Figura 2.7 se observa la disminución de la gravedad en dirección hacia el Sur-Oeste, en esta dirección se encuentra el aumento de elevación debido a la presencia del volcán Chinchontepec. Los puntos de medición que conforman cada uno de los tres

perfiles también se muestran en la Figura 2.7, el perfil número uno se encuentra más al sur, el perfil dos al centro y el perfil tres más al norte.

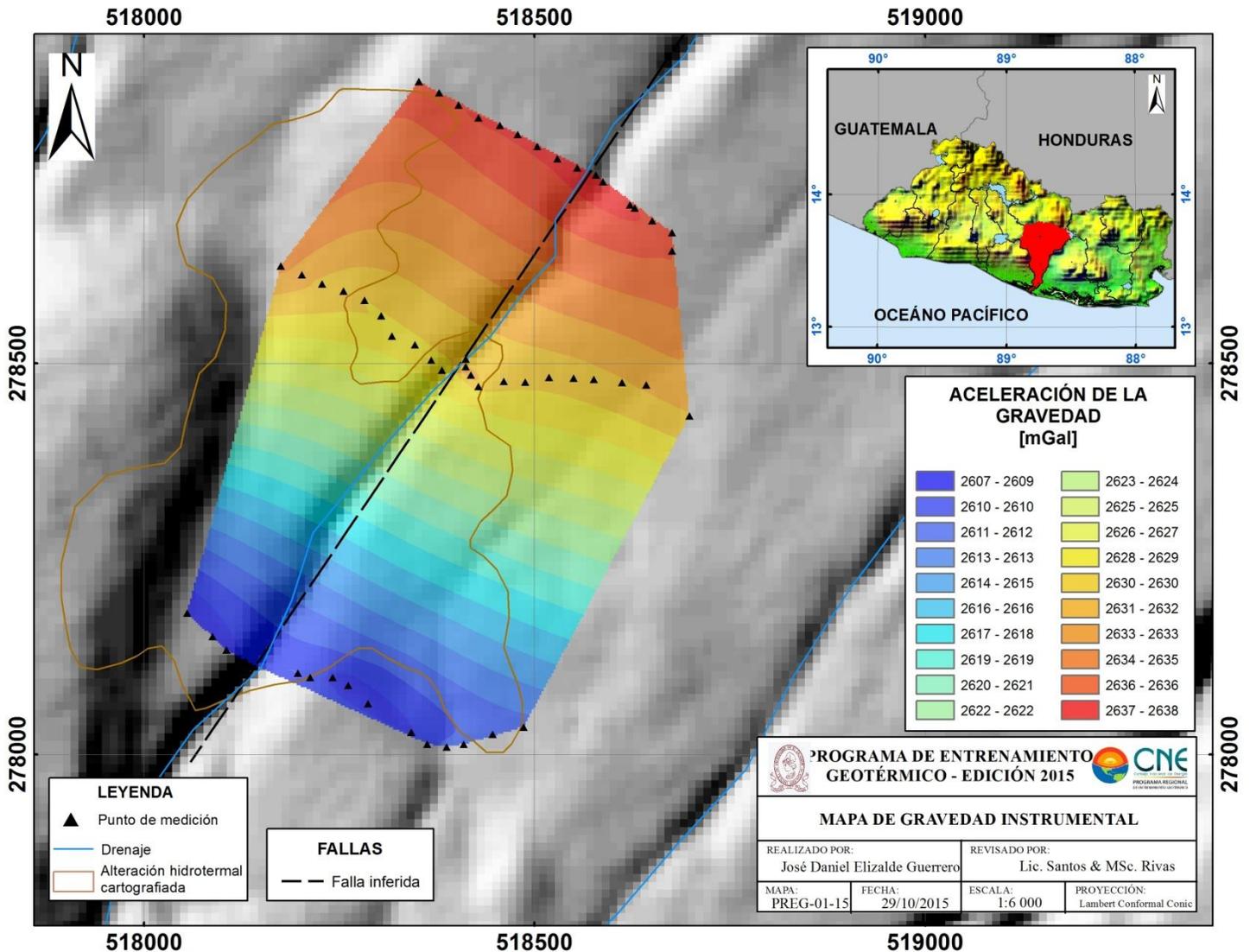


Figura 2.7. Mapa de isocontornos de Gravedad Instrumental.

La Figura 2.8 presenta el residual de la anomalía de Bouguer completa, donde las líneas azules son la representación de la Quebrada Infiernillo Ciego, la línea de color verde del perfil uno, dos y tres es la curva modelada y la línea de color rojo representa el perfil real. Las unidades del eje vertical son mGal y el eje horizontal distancia en metros.

De la Figura 2.8 los perfiles dos y tres se observa al lado izquierdo del lineamiento en superficie un cuerpo de menor densidad que puede corresponder con la estructura geológica o una alteración hidrotermal.

En el perfil uno se observa que al lado derecho ocurre un caso contrario que parece que el cuerpo se encuentra al lado Este de la falla inferida.

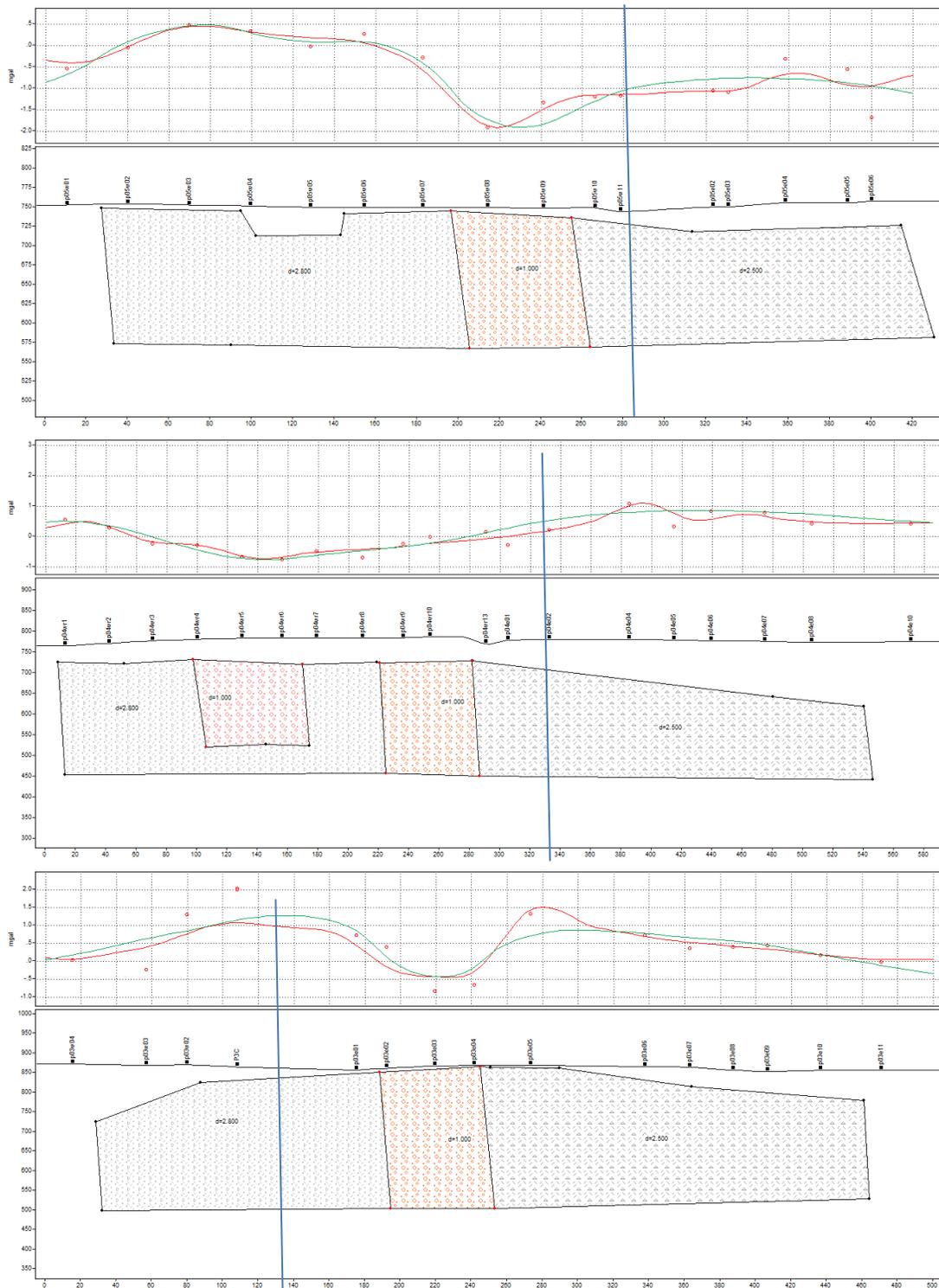


Figura 2.8. Perfiles modelados en 2D de la anomalía residual de Bouguer completa con dirección NW-SE. De abajo hacia arriba, perfil 1, 2 y 3.

2.3 PROSPECCIÓN MAGNETOMÉTRICA

2.3.1 Fundamentos

El método magnetométrico, consiste en el estudio de las variaciones locales del campo magnético terrestre, se obtienen medidas absolutas de la componente vertical del campo magnético, las variaciones en el campo magnético llamadas anomalías se asocian a contrastes en la susceptibilidad magnética de los distintos materiales que conforman el subsuelo y a la presencia de minerales magnéticos en cada sitio estudiado.

La mayor parte de las rocas no son magnéticas sin embargo, ciertos tipos de rocas contienen suficientes minerales para originar significantes anomalías magnéticas. La interpretación de los datos que refleje diferencias en abundancia local de magnetización es especialmente útil para localizar fallas y contactos geológicos. Los tipos de magnetización de las rocas son: diamagnéticos, paramagnéticos y ferromagnéticos. El Magnetismo tiene sus fundamentos en las leyes de Maxwell y Biot-Savart (Aplicación para método MT que se crea un circuito inducido).

Magnetómetro protónico

Este instrumento se utiliza principalmente en muestras cercanas a la superficie en estudios de ingeniería y medioambientales. El magnetómetro de precesión de protones requiere el uso de un líquido rico en átomos de hidrógeno para producir la señal de la precesión, el queroseno es un ejemplo de este líquido. Las corrientes directas y los campos magnéticos polarizan los átomos, y el instrumento lee su frecuencia de precesión. Existen limitaciones para este tipo de magnetómetro, como su bajo nivel de sensibilidad y su alto consumo de potencia. Sin embargo, es ideal para la exploración y el mapeo de tuberías subterráneas.

2.3.2 Metodología

Procedimiento de toma de datos magnéticos

La toma de datos de campo magnético se realizó a lo largo de tres perfiles de orientación NW-SE, aproximadamente atravesando el lineamiento estructural donde emerge la fumarola “El infiernillo ciego” mediante la utilización de equipos y procedimiento descritos a continuación.

Materiales y equipos

- Magnetómetro protónico.
- Brújula.
- Antena GPS.
- Bastón metálico.

Consideraciones previas a la medición

- Reconocimiento del área
- Carga de batería de equipos
- Configuración de equipos

Procedimiento de medición

1. Para iniciar la medición de un perfil de magnetometría se debe establecer un punto base la cual tendrá la función de registrar las variaciones temporales del campo magnético durante el tiempo en que se realice la medición.
2. Para realizar el registro de campo magnético primero debe cerciorarse que no exista en las cercanías del punto de medición objetos metálicos grandes que puedan causar interferencia con el sensor, además los operadores se deberán despojar de todo objeto metálico.
3. Una vez colocado el equipo y ubicado el punto se procede a configurar el equipo para realizar la medición creando en primer lugar una nueva sesión de medición.
4. Posteriormente a la configuración del equipo se procede a la medición del punto para lo cual en primer lugar se deja estabilizar el GPS del aparato y se procede a la medición.
5. Cuando la medición ha sido realizada, se verifica la calidad de la medición en forma de porcentaje de precisión, si esta se encuentra en un rango aceptable de error (>90%), el dato se acepta, almacena y se realiza la próxima medición.
6. Por último se vuelve a realizar la medición en el punto donde se inició si no se posee con un equipo base de medición.

2.3.3 Procesamiento de datos magnéticos

La metodología que se siguió para el procesamiento de los datos del levantamiento magnético es la siguiente: edición y eliminación de datos ruidosos, correcciones temporales por variación diurna, corrección por IGRF e interpolación; esto corresponde al pre-procesamiento para obtener los mejores resultados de anomalía de Campo Total. Posteriormente se realizó el procesamiento en el cual se obtuvo la anomalía situada en el polo magnético, la separación Regional y Residual; así como los procesos de Derivadas horizontales (X y Y) y Derivada Vertical.

Los datos del levantamiento magnético fueron procesados utilizando el programa *WinGlink*, *Surfer* y *ArcGIS* para el despliegue de la información.

2.3.4 Resultados e Interpretación

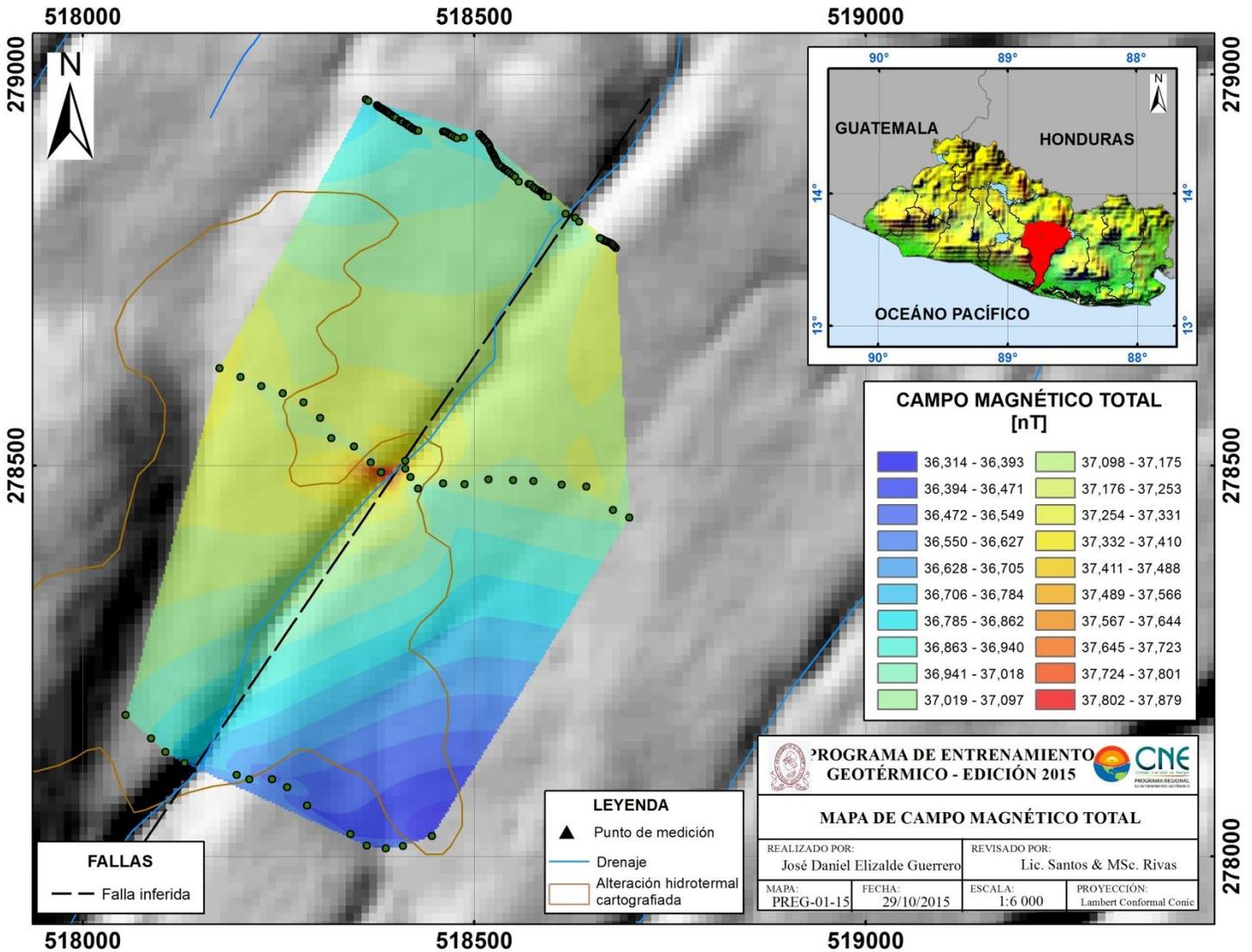


Figura 2.9. Mapa de isocontornos del Campo Magnético Total.

En Figura 2.10 se observa que la magnitud de la intensidad de campo oscila entre los 700 nT a los 600 nT. Se pueden observar dos áreas especialmente resaltadas por estos valores, al sur de la zona de estudio se obtuvo una anomalía negativa, la cual responde con la zona de mayor alteración hidrotermal observada en campo. En la zona central del área, se muestra el valor más alto de la anomalía magnética, se necesitará información geológica para poder dar una interpretación a este resultado.

Durante el procesamiento de los datos se le realizaron filtros como Reducción al Polo, Primera y Segunda Derivada sin encontrar alguna correlación con la falla inferida como con la anomalía hidrotermal, por lo que estos datos se presentan solamente en el Anexo 4.

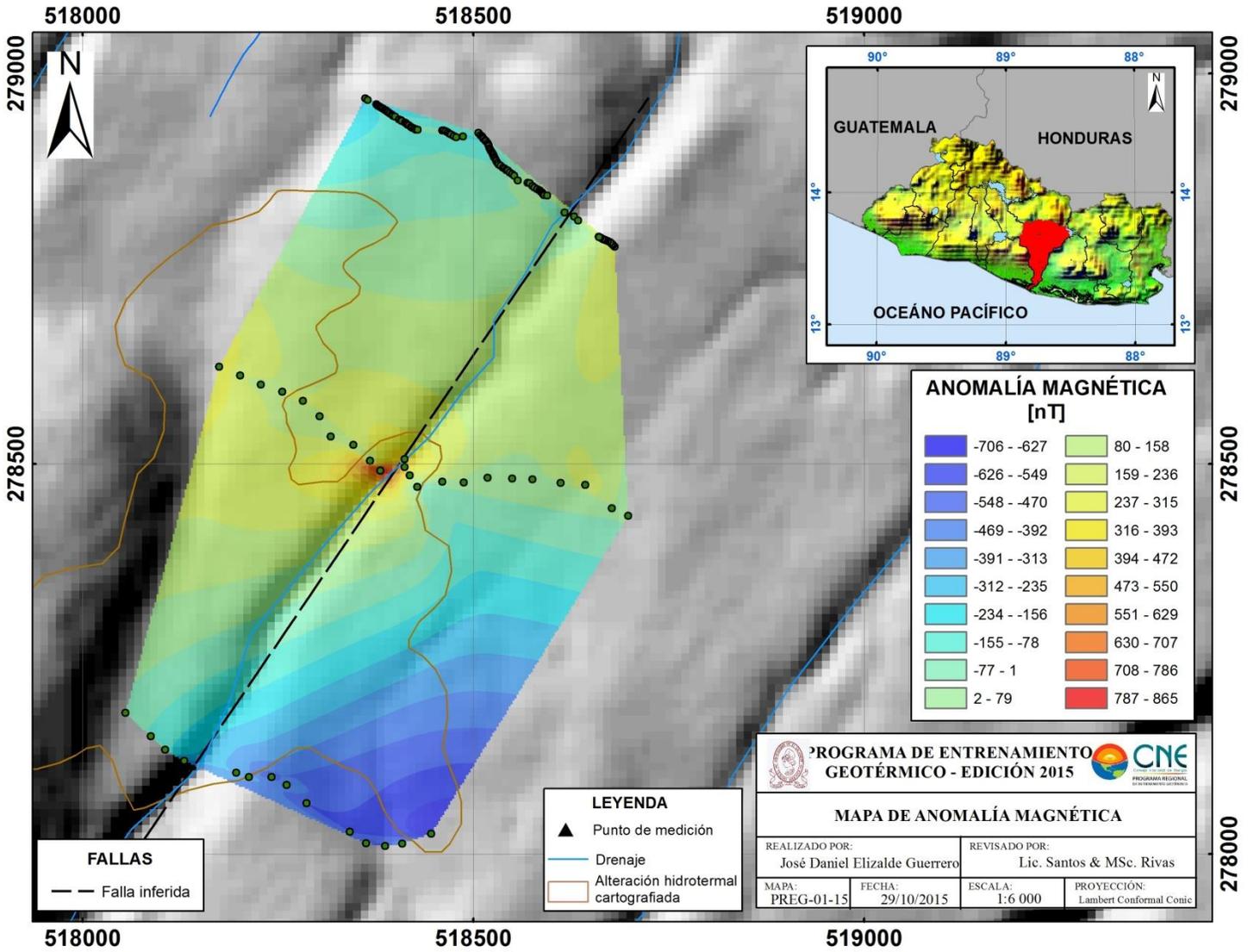


Figura 2.10. Mapa de isocontornos de la anomalía magnética.

3. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

A partir del análisis digital de las imágenes de satélite TM, se identificaron zonas de alteración hidrotermal y se obtuvo un mapa cualitativo de temperatura Figura 2.2 y 2.3 respectivamente. Ambas imágenes muestran una coincidencia en la posición de dos anomalías de temperatura y en la identificación de la zona de alteración, estos resultados sugieren que se trata de una zona de descarga de fluidos geotérmicos.

Las anomalías mencionadas anteriormente coinciden con el comportamiento mostrado en el modelado 2D de gravimetría de la Figura 2.8. La anomalía térmica que se encuentra al norte de la Figura 2.3 concuerda con el cuerpo de baja densidad descrito por los modelos 2D de los perfiles dos y tres de la Figura 2.8, además, la anomalía térmica que se encuentra al sur en la Figura 2.3 coincide con el cuerpo de baja densidad descrito en el perfil uno de la Figura 2.8.

En el estudio de magnetometría se observa en la Figura 2.10 que la anomalía negativa al Sur del área de estudio, concuerda en posición con la anomalía térmica que se encuentra también al Sur de la Figura 2.3, lo cual podría corresponder al efecto de una alteración hidrotermal, la cual fue reconocida durante la etapa de reconocimiento (Figura 1.3).

En las zonas cercanas a la falla inferida Infiernillo Ciego se observa una discontinuidad en los isocontornos de anomalía magnética, principalmente los contornos de los perfiles dos y tres de la Figura 2.10. Estas discontinuidades pueden representar el efecto relacionado con la estructura geológica, ya que los isocontornos al acercarse a la estructura se alinean con la misma dirección a ambos lados de la quebrada.

En la Figura 2.10, específicamente el perfil dos, que se encuentra relativamente cerca de la zona de anomalía térmica, no presenta una anomalía magnética negativa, la cual se esperaría ver en una zona de alta temperatura, en comparación a lo obtenido en el perfil uno; sin embargo, se obtuvo un valor máximo de anomalía magnética, el cual no concuerda con lo esperado.

4. CONCLUSIONES

A partir de los resultados obtenidos de aplicar las técnicas de mapeo térmico y realce espectral, se logró encontrar una zona de anomalía térmica en superficie y relacionarla con zonas de alteración hidrotermal, por lo tanto se comprobó que estas técnicas son útiles en la etapa de reconocimiento y prefactibilidad en estudios geotérmicos.

Los resultados obtenidos de este estudio geofísico no proporcionan suficiente información para caracterizar a detalle una estructura geológica como la falla inferida de Infiernillo Ciego, sin embargo se obtuvieron resultados positivos del estudio de magnetometría y gravimetría, al demostrar que son técnicas sensibles a la presencia de estructuras geológicas.

Se infiere que las anomalías magnéticas del área de estudio ocurren debido a cambios mineralógicos, producto de la alteración hidrotermal asociada al posible ascenso de fluidos geotérmicos del flanco Norte del volcán de San Vicente.

Se logró observar que existe una correlación inversa entre los valores de gravedad observada y del relieve topográfico.

Aún con los mapas de Reducción al Polo del campo magnético total y la derivada vertical de la anomalía magnética no fue posible resaltar los efectos estructurales del área de estudio, porque no se logró observar el contraste que se buscaba en los laterales de la quebrada, sin embargo, existe un contorno de gravedad observada en el perfil uno y tres que describe la misma dirección de la quebrada, esto también se observa en las secciones de anomalía gravimétrica y magnética contra distancia de los tres perfiles medidos.

RECOMENDACIONES

- Al momento de aplicar la técnica de Magnetometría es necesario que las condiciones ambientales sean las adecuadas, evitando tormentas eléctricas o solares con investigaciones previas, para evitar que estas afecten las mediciones probando datos incorrectos o con ruido.
- En la metodología de magnetometría debe considerarse siempre para la elección del punto base, un comportamiento magnético constante, esto se logra haciendo mediciones continuas dentro y fuera del área de estudio hasta encontrar un valor promedio que sirva de referencia.
- Para la técnica de Gravimetría, en caso de no tener una base con valor de gravedad conocido que sea referencia en las mediciones, se recomienda crear una base local que cumpla con requisitos tales como: ser un lugar estable, lejos de cuerpos másicos o en movimiento, como animales o automóviles que puedan

generar ruido en las mediciones y que el mismo no esté sujeto a efectos de subsidencia o hundimiento, para poder obtener de esa base datos confiables y correlacionables.

- Debido a que la estructura no pudo ser caracterizada se recomienda hacer una malla con perfiles más largos para observar de mejor manera el contraste en el efecto de la presencia de la misma. Además realizar más perfiles con menor espaciamiento entre ellos para densificar las mediciones y poder observar con mayor detalle los cambios en la anomalía a lo largo de la estructura.
- La organización, planificación y la obtención de información antes del estudio en campo es esencial para aprovechar al máximo el tiempo y los recursos disponibles y poder superar obstáculos o limitantes que se puedan presentar durante el desarrollo del levantamiento de datos.
- Vale la pena realizar este estudio en el área donde la estructura no se encuentra visible (hacia el norte de la Quebrada Infiernillo Ciego), pero donde existen evidencias por parte de otros métodos de prospección para definir si los métodos son útiles para cumplir los objetivos propuestos de caracterización estructuras geológicas, ya que en esa área el ruido cultural y la topografía del lugar no representan una limitante para dicho estudio.

PROBLEMAS E IMPREVISTOS

A continuación se enumeran los principales factores que afectaron la consecución de los objetivos planteados.

- La disponibilidad de tiempo para la realización del levantamiento geofísico fue la principal limitante para el desarrollo eficaz del proyecto, ya que la cantidad de datos adquiridos no fue suficiente para cumplir los objetivos propuestos inicialmente. Además debido a esta situación, no se pudieron realizar nuevamente mediciones para corregir ciertos errores observados al momento del procesamiento de los datos.
- La inaccesibilidad fue un imprevisto debido a que las condiciones del terreno o topografía, han significado el replanteo de los perfiles que inicialmente se propusieron.
- El clima representa un factor de retraso, ya que algunos equipos no son resistentes al agua lo que significó que en momentos se detuviera la toma de datos.
- Resolución radiométrica y temporal de las imágenes de satélite, al momento de descargar las imágenes es probable que algunas de ellas presenten un factor de

nubosidad mayor al 10%, lo que representa ruido o ausencia de datos en esa zona.

- Los permisos de trabajo en terrenos privados, representaron una limitante en la toma de datos, porque al no obtenerlos no fue posible entrar en las propiedades.
- El funcionamiento inadecuado del equipo representó un imprevisto, ya que la presencia de ganado dañó el arreglo original del mismo provocando que el equipo fuera incapaz de tomar datos.

REFERENCIAS

BIBLIOGRÁFICAS

- Agostini, S., Corti, G., Doglioni, C., Carminati, E., Innocenti, F., Tonarini, S., & Montanari, D. (2006). Tectonic and magmatic evolution of the active volcanic front in El Salvador: insight into the Berlin and Ahuachapán geothermal areas. *Geothermics*, 35(4), 368-408.
- Blakely, R.J., 1996. *Potential theory in gravity and magnetic applications*. Cambridge University press. USA.
- Calvin, W. M., Coolbaugh, M. & Vaughan, R.C., 2002. Thermal Infrared remote sensing for geothermal site characterization. The Geological Society of America GSA 2002 Denver Annual Meeting, paper no. 242-4. Abstract online http://gsa.confex.com/gsa/2002AM/finalprogram/abstract_43790.htm.
- Calvin, W. M., Coolbaugh, M. & Vaughan, R.C., 2006. Application of Remote Sensing Technology in Geothermal Exploration. <http://www.unr.edu/geothermal/pdffiles/CalvinGSN05.pdf>
- Campbell, J. B., 2002. *Introduction to Remote Sensing*. (3rd Ed). The Guilford Press. New York, USA, 6 p.
- Campbell, J. B., & Wynne, R. H., 2011. *Introduction to Remote Sensing*. (5th Ed). The Guilford Press. New York, USA.
- Chandra, A. M., & Ghosh, S. K., 2006. *Remote Sensing and Geographical Information System*. (1st Ed). Editorial Alpha Science International Ltd. Oxford, U.K.
- Corti, G., Carminati, E., Mazzarini, F., & Garcia, M. O., 2005. Active strike-slip faulting in El Salvador, central America. *Geology*, 33(12), 989-992.
- Crosta, A., & Moore, J., 1989. Enhancement of Landsat Thematic Mapper Imagery for Residual Soil Mapping in SW Minas Gerais State, Brazil: A Prospecting Case History in Greenstone Belt Terrain. *Proceedings of the Seventh Thematic Conference of Remote Sensing for Exploration Geology*, Calgary, Alberta, Canada, Oct. 2-6, pp. ERIM, 1173-1187.
- Dobrin, M.B., 1976. *Introduction to Geophysical Prospecting*. 3th edition, New York, McGraw-Hill Book Co.
- Eastman, J., 2006. *Idrisi Andes Guide to GIS and Image Processing*. Clark Labs, Clark University.

- Fernández de la Vega-Márquez, T., Prol-Ledesma, R. M., Orozco, G., 2001. Hydrothermal alteration and main structures mapping using TM images in La Primavera geothermal field (Mexico). *Geofísica Internacional* 40, 3, 147-162.
- Fraser, S. J., 1991. Discrimination and identification of ferric oxides using satellite Thematic Mapper data: A Newman case study. *International Journal of Remote Sensing* 12, 3, 635-641.
- GEM Systems, 2005. Instructivo de Operación del Magnetómetro GSM-19. USA.
- Gutiérrez, F., Lemus, M., Parada, M., Benavente, O., Aguilera, F., 2012. Contribution of ground surface altitude difference to thermal anomaly detection using satellite images: Application to volcanic/geothermal complexes in the Andes of Central Chile. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 237-238 (2012) 69-80.
- Haselwimmer, C., Prakash, A., & Holdmann, G., 2011. Geothermal Exploration at Pilgrim Hot Springs, Alaska using Airborne Thermal Infrared Remote Sensing. *GRC Transactions*, 35.
- Heriart, G., Gutiérrez-Negrín, L., Quijano-León, J., Ornelas, A., Espíndola, S., Hernández, I., 2011. Evaluación de la Energía Geotérmica en México. Informe para el Banco Interamericano de Desarrollo y la Comisión Reguladora de Energía. 112.
- Jensen, J. R., 1996. *Introductory Digital Image Processing: A Remote Sensing Perspective*. (2nd Ed). Prentice Hall Series in Geographic Information Science. USA.
- Littlefield, E., & Calvin, W., 2009. Remote Sensing for Geothermal Exploration Over Buffalo Valley, NV. *Geothermal Resources Council Transactions* 33, 495-499.
- Loughlin, W. P., 1991. Principal Component Analysis for Alteration Mapping. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing* 57, 9, 1163-1169.
- Mapa geológico de El Salvador escala 1:100,000, elaborado por la Misión Geológica Alemana finalizado en el año de 1977. Hoja 6 San Salvador elaborada por H. R. Bosse, A. Merino, M. Schmidt-Thomé.
- Mboin, I., 2011. Application of Landsat TM Satellite Imagery to Map Geothermal Resources and Land Cover: Case Study of Silali Prospect. *Geothermal Prospect Using Landsat TM*. *Geothermal Resources Council Transactions* 35, 911-916.

- Méndez-Martínez, L., 2003. Metodología de prospección magnética empleando magnetómetro de protones tipo Overhauser. El Salvador. Tesis de Licenciatura. Universidad de El Salvador.
- Mongillo M.A., Cochrane G.R. & Browne P.R.L., 1995. Application of satellite imagery to explore and monitor geothermal systems. Proceedings of the World Geothermal Congress 1995, Pisa Italy. Pp 951-956.
- Mutua, J., & Mibei, G., 2011. Remote Sensing Application in Geothermal Exploration: Case Study of Barrier Volcanic Complex, Kenya. Geothermal Resources Council Transactions 35, 943-948.
- Nash, G. D., Murphy, E., Umbriaco, J., 2004. Remote Sensing for Geothermal Resource Exploration and Characterization: A Summary of Results 2000 – 2004. Geothermal Resources Council Transactions 28, 31-36.
- Prol-Ledesma, R. M., Alcántara, A., & Chávez, M., 1993. Exploración geotérmica utilizando imágenes de satélite en Los Humeros, Puebla, México. Geofísica Internacional 32, 1, 99-109.
- Ruiz-Armenta, J. R., & Prol-Ledesma, R. M., 1998. Techniques for enhancing the spectral response of hydrothermal alteration minerals in Thematic Mapper images of Central Mexico. International Journal Remote Sensing 19, 10, 1981-2000.
- Urai, M., Muraoka, H., & Nasution, A., 2000. Remote Sensing Study for Geothermal Development in the Ngada District, Central Flores, Indonesia. Proceedings of the World Geothermal Congress, 1905-1908.
- Vázquez del Moral, M., 2010. Análisis de anomalías de temperatura por medio de imágenes de satélite en punta mita, Nayarit, México. Tesis de Licenciatura. UNAM. México.
- Wannamaker, P. E., Ross, H. P., Arellano, J. F., 1994. Geophysical Studies: Ceboruco Geothermal Reconnaissance Area. U.S. Department of Energy, 13-14.
- Wright, P. M., Lira, H., Ramsey, D. R., 1990. Interpretation of Landsat Thematic Mapper Satellite Imagery at Los Azufres Geothermal Field, Michoacan, Mexico. Geothermal Resources Council Transactions 14, 1553-1559.

PÁGINAS DE INTERNET

- Portal electrónico del Centro Nacional de Información Ambiental (NOAA, por sus siglas en inglés). Cálculo del campo magnético. Disponible en: <http://www.ngdc.noaa.gov/geomag-web/#igrfwmm>. Revisada el 29 de Octubre de 2015.

PROFESIONALES CONSULTADOS

Lic. Pedro Santos. Coordinador de estudios geofísicos de LaGeo S.A de C.V.

MSc. José Rivas. Asesor de estudios de Magnetometría y Gravimetría de LaGeo S.A de C.V.

Ing. Arturo Quezada. Coordinador de estudios geológicos de LaGeo, S.A de C.V.

Ing. Elizabeth Torio. Asesor de estudios geológicos de LaGeo S.A. de C.V.

Técnico Geofísico. Guillermo Canales. Asesor de estudios de Gravimetría de LaGeo S.A de C.V.

Técnico Geofísico. Julio Castellón. Asesor de estudios de Magnetometría y GPS de LaGeo S.A de C.V.

Ricardo Medrano. Dibujante Calculista de LaGeo S.A. de C.V.

ANEXOS

ANEXO 1. CRONOGRAMA DE ACTIVIDADES

Tabla 2. Cronograma de actividades del 16 de Septiembre al 03 de Noviembre.

Cronograma de Actividades				
No	Actividad	Inicio	Finalización	Días Calendario Estimados
1	Entrega de Perfil de Proyecto Final al Coordinador Académico	Miércoles 16 de Septiembre	Miércoles 16 de Septiembre	1
2	Aprobación del Perfil del Proyecto Final por el Comité Técnico del PREG	Jueves 17 de Septiembre	Jueves 17 de Septiembre	1
3	Comunicación a participantes y tutores de los Proyecto Finales aprobados por el Comité Técnico PREG	Viernes 18 de Septiembre	Viernes 18 de Septiembre	1
4	Inicio de Proyectos Finales Desarrollar el proceso de los métodos a utilizar (Gravimetría, magnetometría y flujo de calor/imágenes satelitales). Marco teórico	Lunes 21 de Septiembre	Martes 22 de Septiembre	2
5	Delimitar el área de estudio donde se aplicaran los métodos.	Martes 22 de Septiembre	Miércoles 23 de Septiembre	2
6	Investigación bibliográfica de los trabajos en ciencias de la Tierra aplicadas en el área de estudio.	Miércoles 23 Septiembre	Jueves 24 de Septiembre	2
7	Elaboración de la <i>grid</i> de puntos para cada uno de los métodos a realizar (Magnetometría y Gravimetría)	Jueves 24 de Septiembre	Lunes 28 de Septiembre	3
8	Calibración del Gravímetro. Revisión de la lista de equipo y material necesario para la visita de campo. Elaboración de la logística para el trabajo de campo.	Martes 29 de Septiembre	Martes 29 de Septiembre	1
9	Reconocimiento del lado Oeste de la zona de estudio. Revisión de las condiciones en las	Miércoles 30 de Septiembre	Miércoles 30 de Septiembre	1

	que se encuentran las bases gravimétricas. Selección de la base de GPS y comprobar si tiene coordenadas geodésicas.			
10	Reconocimiento del lado Este de la zona de estudio. Colocar la base de GPS.	Jueves 01 de Octubre	Jueves 01 de Octubre	1
11	Reunión con asesores	Lunes 05 de Octubre	Lunes 05 de Octubre	1
12	Levantamiento magnético del lado oeste del perfil 5. Medición con GPS de los puntos para gravimetría del lado oeste del perfil 5.	Martes 06 de Octubre	Martes 06 de Octubre	1
13	Levantamiento gravimétrico del lado oeste del perfil 5. Levantamiento magnético del lado oeste del perfil 4. Medición con GPS de los puntos para gravimetría del lado oeste del perfil 4.	Miércoles 07 de Octubre	Miércoles 07 de Octubre	1
14	Levantamiento gravimétrico del lado oeste del perfil 4. Levantamiento magnético del perfil 4. Medición con GPS de los puntos para gravimetría del perfil 4.	Jueves 08 de Octubre	Jueves 08 de Octubre	1
15	Levantamiento gravimétrico del lado este del perfil 4 y perfil 3. Levantamiento magnético del perfil 3. Medición con GPS de los puntos para gravimetría del perfil 3.	Viernes 09 de Octubre	Viernes 09 de Octubre	1
16	Descarga de los datos. Entrega de Avance de Proyecto Final al Coordinador Académico	Lunes 12 de Octubre	Lunes 12 de Octubre	1
17	Procesamiento de datos colectados	Martes 13 de Octubre	Miércoles 14 de Octubre	2
18	Correlacionar métodos (Magnetometría, Gravimetría y e imágenes satelitales)	Jueves 15 de Octubre	Jueves 15 de Octubre	1
19	Reunión con el asesor para discutir	Viernes 16	Viernes 16	1

	los resultados obtenidos del procesamiento de datos gravimétricos.	de Octubre	de Octubre	
20	Interpretación de los datos	Lunes 19 de Octubre	Martes 20 de Octubre	2
21	Identificación de fallamiento geológico (Conclusiones). Identificar que técnica describe mejor el fallamiento geológico.	Miércoles 21 de Octubre	Miércoles 21 de Octubre	1
22	Evaluación de las técnicas desarrolladas	Jueves 22 de Octubre	Jueves 22 de Octubre	1
23	Entrega del Resumen del proyecto	Viernes 23 de Octubre	Viernes 23 de Octubre	1
24	Revisión de documento del Proyecto Final	Lunes 26 de Octubre	Martes 27 de Octubre	2
25	Entrega del Proyecto Final al Coordinador Académico	Viernes 30 de Octubre	Viernes 30 de Octubre	1
26	Presentación de Proyectos Finales	Martes 3 de Noviembre	Martes 3 de Noviembre	1

ANEXO 2. PROCESO DE AJUSTE Y CALIBRACIÓN DEL EQUIPO CG-5.

- **Corrección por deriva**

El instrumento cuenta con una Drift=0.159; este cálculo de la deriva lo tiene desde el 25/08/15.

Programa SCTUTIL

El programa SCTUTIL sirve para descarga los datos del AutoGrav CG5. Se requiere el cable de datos para conectar el equipo (conexión USB) con la computadora (puerto USB) que contiene el programa SCTUTIL.

Se abre el programa. Seleccionar Start Dump para copiar los datos de la memoria interna del equipo a la computadora, en la carpeta elegida para almacenar la copia se crean tres archivos con las siguientes extensiones:

1104Sept292015.sgd
1104Sept292015.smp
1104Sept292015.txt

1104: hora exacta en que se copian los datos del instrumento a la computadora.
Sept292015: mes, día y año en que se copian los datos del instrumento a la computadora.

De estos tres archivos, sólo el que tiene extensión .txt es útil para continuar con el procesamiento de datos gravimétricos. Para esto se selecciona el botón *Convert*.

Se abre el archivo 1104Sept292015.txt en una hoja de cálculo y se seleccionan en columnas, la fecha, hora y valor de gravedad. Se colocan en otra hoja de cálculo, en ella se crea una representación gráfica, donde el eje horizontal será el tiempo [horas] y el eje vertical el valor de gravedad. Se elije un tiempo inicial junto con su valor de gravedad y se toma el tiempo final 24 hrs después del inicial junto con su valor de gravedad (de 0 hasta 96 horas, se toma t0=24 hrs, t1=48, entonces $\Delta t = t_1 - t_0 = 48 - 24 = 24 \text{hrs} = 1 \text{ día}$, es por esto que el denominador es igual a uno).

$$DRIFT = DRIFT + \left[\frac{R2 - R1}{T2 - T1} \right]$$

R1: Lectura inicial.

R2: Lectura final.

T1: Tiempo inicial.

T2: Tiempo final.

DRIFT: Valor de la deriva antes calculada.

$$DRIFT = DRIFT + \left[\frac{R2 - R1}{T2 - T1} \right] = 0.182 + (-0.031) = \mathbf{0.151} \dots 29/09/2015$$

Por lo tanto el valor calculado de la nueva deriva es 0.151, este valor se utilizará al momento de ingresar los parámetros de medición en el gravímetro y para el procesamiento de los datos.

PRIMER INTENTO

- **Corrección del OFFSET XY**

Nivelación y Ajuste

- $X=150, Y=0; X1=155.8, R1=2586.76$ mgal
- $X=-150, Y=0; X2=-148.0, R2=2586.743$ mgal
- $X=0, Y=150; Y1=158.0, R1=2586.736$ mgal
- $X=0, Y=-150; Y2=-149.7, R2=2586.745$ mgal

- **Ajuste de Sensibilidad del sensor de ladeo, Calibración**

- ◆ Calibration XY SENS
- ◆ Criterio de ajuste: el nuevo valor X,Y no debe tener una diferencia mayor a 10 con respecto al viejo valor X,Y, para que este nuevo valor sea aceptado.
- ◆ Nivelación y Ajuste
 - *Primera Prueba*
 - $X=0, Y=0; X1=0.5, R0=2586.747$ mgal
 - $X=150, Y=0; X2=150.6, R1=2586.739$ mgal
 - Old X=737.0
 - New X=748.0
 - $748.0 > 737.0$; Por lo tanto se rechaza.
 - *Segunda Prueba*
 - $X=0, Y=0; X1=0.0, R0=2586.751$ mgal
 - $X=150, Y=0; X2=149.9, R1=2586.739$ mgal
 - Old X=737.0
 - New X=751.0
 - $748.0 > 751.0$; Por lo tanto se rechaza.
 - *Tercera Prueba*
 - $X=0, Y=0; X1=0.5, R0=2586.756$ mgal
 - $X=150, Y=0; X2=150.3, R1=2586.741$ mgal
 - Old X=737.0
 - New X=757.0
 - $748.0 > 757.0$; Por lo tanto se rechaza.

SEGUNDO INTENTO

- **Corrección del OFFSET XY**

Nivelación y Ajuste

- $X=150, Y=0; X1=151.5, R1=2592.289$ mgal
 - $X=-150, Y=0; X2=-148.9, R2=2592.315$ mgal
 - $Ex=-3.8, \text{old } x:-10.9; \text{new } x: -14.7$
 - $X=0, Y=150; Y1=149.7, R1=2592.265$ mgal
 - $X=0, Y=-150; Y2=-152.6, R2=2592.280$ mgal
 - $Ey= 0.7; \text{old } y:17.8; \text{new } y:15.3.$
- *Ajuste de Sensibilidad del sensor de ladeo, Calibración*
 - ◆ Calibration XY SENS
 - ◆ Criterio de ajuste: el nuevo valor X,Y no debe tener una diferencia mayor a 10 con respecto al viejo valor X,Y, para que este nuevo valor sea aceptado.
 - ◆ Nivelación y Ajuste
 - $X=0, Y=0; X1=-0.8, R0=2592.279$ mgal
 - $X=150, Y=0; X2=151.0, R1=2592.274$ mgal
 - Old X=737.0
 - New X=743.1; $Ex=6.1$
 - $743.1 > 737.0$, por menos de 10; Por lo tanto no se rechaza.
 - $X=0, Y=0; Y1=-2.2, R0=2592.275$ mgal
 - $X=150, Y=0; Y2=147.5, R1=2592.270$ mgal
 - Old X=653.2
 - New X=659.1; $Ey= 5.9$
 - $659.1 > 653.2$; por menos de 10. Por lo tanto NO se rechaza.

Con base en estos últimos resultados, se determina que la calibración es aceptable.

ANEXO 3. DATOS DEL LEVANTAMIENTO GRAVIMÉTRICO Y MAGNÉTICO

Tabla 3. Muestra los datos gravimétricos.

ID	X Lamb. [m]	Y Lamb. [m]	Elev [m]	G Inst [mgal]	G ABS [mGal]	G Teo [mGal]	g(b) 2.2 [mGal]	C Terreno 1.0	Anomalia Bouguer Completa 2.2 g/cm3 [mGal]
p05w01	518351.92	278860.18	753.63	2635.28	978318.64	978318.54	163.09	3.13	166.22
p05w02	518377.89	278846.24	755.51	2635.10	978318.45	978318.54	163.31	3.52	166.83
p05w03	518402.53	278830.07	753.94	2636.01	978319.35	978318.53	163.89	3.18	167.06
p05w04	518427.74	278814.03	752.61	2636.39	978319.73	978318.53	163.98	3.10	167.08
p05w05	518455.52	278804.60	750.94	2636.25	978319.58	978318.52	163.48	3.11	166.59
p05w06	518478.45	278792.75	750.99	2636.38	978319.7	978318.52	163.61	3.47	167.09
p05w07	518502.91	278777.74	750.80	2636.47	978319.8	978318.51	163.68	3.05	166.73
p05w08	518529.09	278761.59	750.41	2636.56	978319.87	978318.51	163.67	2.88	166.55
p05w09	518554.29	278750.30	749.57	2636.54	978319.85	978318.50	163.47	2.87	166.34
p05w10	518578.21	278741.05	750.01	2637.00	978320.31	978318.50	164.02	2.84	166.86
p05w11	518587.59	278732.47	744.00	2637.76	978321.06	978318.50	163.48	2.84	166.32
p05w01	518351.92	278860.18	753.63	2635.36	978318.64	978318.54	163.09	3.13	166.22
p04wr1	518174.85	278624.40	766.86	2632.10	978318.53	978318.46	70.74	4.01	169.95
p04wr2	518201.85	278613.18	772.90	2630.86	978317.28	978318.45	71.30	3.66	169.66
p04wr3	518227.97	278601.66	778.77	2629.62	978316.04	978318.45	71.84	3.56	169.58
p04wr4	518255.40	278592.56	782.03	2628.92	978315.34	978318.44	72.14	3.47	169.50
p04wr5	518282.12	278580.82	784.07	2628.49	978314.91	978318.44	72.33	3.36	169.41
p04wr6	518303.28	278561.20	784.09	2628.41	978314.82	978318.43	72.33	3.38	169.36
p04wr7	518317.39	278534.94	785.25	2628.08	978314.50	978318.42	72.44	3.42	169.34
p04wr8	518346.56	278524.16	784.32	2628.12	978314.54	978318.42	72.35	3.49	169.24
p04wr9	518367.72	278504.27	785.48	2627.93	978314.35	978318.41	72.46	3.53	169.36
p04wr10	518381.18	278491.33	788.84	2627.72	978314.13	978318.41	72.77	3.55	169.89
p04wr11	518411.80	278505.87	788.25	2629.08	978315.48	978318.41	72.71	3.61	171.16
p04wr12	518411.75	278496.18	783.00	2629.88	978316.29	978318.41	72.23	3.63	170.86
p04wr13	518418.55	278485.50	768.61	2631.46	978317.87	978318.40	70.90	3.63	169.33
p04e01	518428.01	278470.76	780.40	2628.98	978315.38	978318.40	71.99	3.67	169.43
p04e02	518460.45	278477.13	781.87	2628.87	978315.26	978318.40	72.12	3.93	169.89
p04e03	518487.70	278476.14	782.03	2628.84	978315.23	978318.40	72.14	4.02	169.99
p04e04	518518.19	278482.13	782.24	2628.80	978315.19	978318.40	72.16	3.52	169.49
p04e05	518549.77	278481.39	780.10	2629.28	978315.67	978318.40	71.96	3.37	169.36
p04e06	518575.58	278480.05	778.57	2629.61	978316.00	978318.40	71.82	3.40	169.39
p04e07	518611.73	278475.75	777.40	2629.85	978316.24	978318.40	71.71	3.37	169.35
p04e08	518643.05	278472.82	774.48	2630.49	978316.87	978318.40	71.44	3.33	169.30
p04e10	518698.07	278433.23	776.91	2629.95	978316.33	978318.39	71.67	3.51	169.48
p04wr1	518174.85	278624.40	766.86	2632.16	978318.53	978318.46	70.74	4.01	169.95
p05w01	518351.92	278860.18	753.63	2635.14	978318.64	978318.54	163.09	3.13	166.22
p05e02	518621.99	278702.94	751.02	2637.35	978320.83	978318.49	164.77	2.86	167.63
p05e03	518627.99	278698.73	751.82	2636.03	978319.52	978318.48	163.64	2.86	166.50
p05e04	518650.59	278682.29	756.21	2635.95	978319.43	978318.48	164.50	2.92	167.42
p05e05	518676.00	278667.13	756.34	2634.98	978318.46	978318.47	163.56	2.92	166.48
p05e06	518675.78	278643.63	758.94	2634.91	978318.39	978318.46	164.06	2.95	167.01
p03e01	518196.67	278104.24	857.75	2610.65	978294.11	978318.26	161.37	4.28	165.65
p03e02	518212.81	278098.91	862.73	2609.55	978293.01	978318.26	161.35	4.33	165.68
p03e03	518241.66	278098.77	868.03	2608.29	978291.75	978318.26	161.23	4.41	165.64
p03e04	518261.28	278088.61	869.94	2607.85	978291.31	978318.26	161.21	4.53	165.75
p03e05	518286.56	278065.04	870.46	2607.75	978291.20	978318.25	161.23	5.09	166.31
p03e06	518341.86	278028.66	866.33	2608.63	978292.08	978318.23	161.23	5.18	166.40
p03e07	518362.47	278013.70	865.08	2608.95	978292.39	978318.23	161.27	5.06	166.33
p03e08	518387.12	278010.12	857.16	2610.82	978294.26	978318.23	161.43	5.09	166.52
p03e09	518409.03	278013.54	853.62	2611.79	978295.23	978318.23	161.63	5.13	166.76
p03e10	518446.15	278026.05	857.45	2611.10	978294.54	978318.23	161.77	5.15	166.92
p03e11	518486.00	278035.26	857.55	2611.10	978294.54	978318.24	161.78	5.12	166.90
p03w01	518130.17	278119.61	865.80	2609.07	978292.50	978318.27	161.49	4.16	165.65
p03w02	518105.39	278133.63	871.87	2607.75	978291.17	978318.27	161.48	4.06	165.54
p03w03	518087.45	278150.87	869.84	2607.85	978291.28	978318.28	161.14	3.98	165.12
p03w04	518054.83	278180.85	873.98	2607.18	978290.61	978318.29	161.35	3.82	165.17
p05w01	518351.92	278860.18	753.63	2635.23	978318.64	978318.54	163.09	3.13	166.22

Tabla 4. Muestra los datos magnéticos.

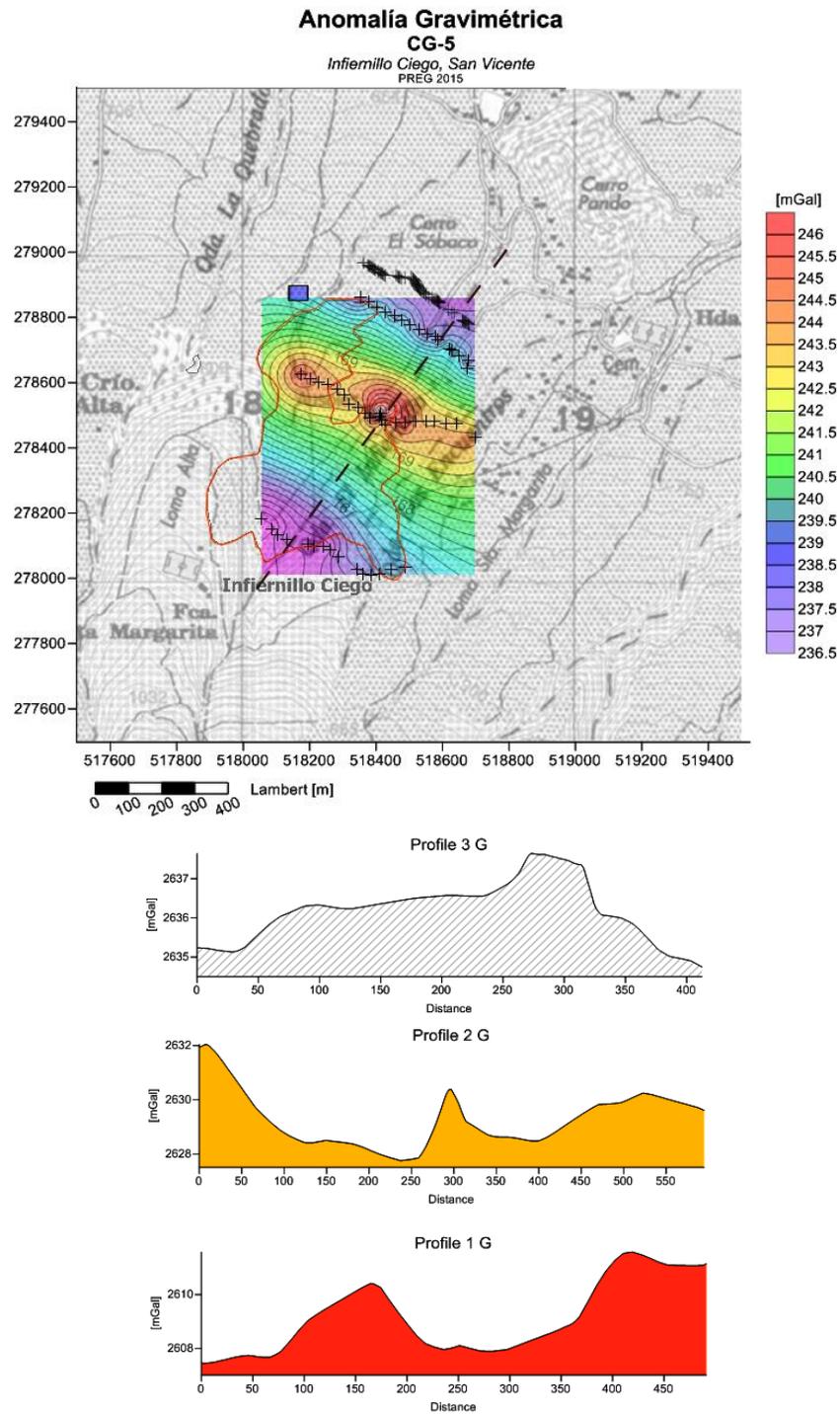
Línea	Punto	Longitud X [m]	Latitud Y [m]	Elev [m]	Tiempo utc	Campo obs [nT]	Campo Base [nT]	IGRF [nT]	Anomalía M. [nT]
P5/1W	4.00	518361.70	278968.15	753.63	200542.00	36763.69	36518.94	37026.70	-262.55
P5/1W	5.00	518364.51	278966.41	753.63	200612.00	36895.62	36519.10	37026.70	-130.69
P5/1W	10.00	518375.65	278960.56	753.63	200802.00	36711.55	36519.26	37026.70	-314.59
P5/1W	11.00	518377.26	278959.29	753.63	200942.00	36781.03	36519.42	37026.70	-244.97
P5/1W	12.00	518378.93	278958.25	753.63	200952.00	36825.36	36519.58	37026.70	-200.76
P5/1W	13.00	518380.82	278957.25	753.63	201002.00	36888.39	36519.73	37026.70	-137.86
P5/1W	14.00	518382.39	278956.31	753.63	201022.00	36891.81	36519.89	37026.70	-134.54
P5/1W	15.00	518384.47	278954.94	753.63	201042.00	36933.74	36520.05	37026.70	-92.71
P5/1W	16.00	518386.51	278953.76	753.63	201102.00	36976.38	36520.21	37026.70	-50.17
P5/1W	17.00	518388.08	278952.92	753.63	201112.00	36952.58	36520.37	37026.70	-74.10
P5/1W	18.00	518389.65	278951.70	755.51	201142.00	36966.47	36520.53	37026.70	-60.28
P5/1W	19.00	518391.09	278950.60	755.51	201152.00	36933.90	36520.69	37026.70	-92.98
P5/1W	20.00	518393.21	278948.95	755.51	201212.00	36936.18	36520.85	37026.70	-90.80
P5/1W	21.00	518395.57	278947.50	755.51	201232.00	36950.05	36521.01	37026.70	-77.03
P5/1W	22.00	518397.46	278946.17	755.51	201252.00	36965.21	36521.16	37026.70	-61.97
P5/1W	23.00	518399.54	278944.75	755.51	201402.00	36944.31	36521.32	37026.70	-82.81
P5/1W	26.00	518405.08	278941.55	755.51	201452.00	36961.47	36521.48	37026.70	-65.66
P5/1W	27.00	518407.26	278940.22	755.51	201512.00	36943.06	36521.64	37026.70	-84.17
P5/1W	28.00	518408.55	278939.43	755.51	201532.00	36875.29	36521.80	37026.70	-152.04
P5/1W	30.00	518412.29	278937.54	755.51	201612.00	36790.86	36521.96	37026.70	-236.51
P5/1W	31.00	518413.91	278936.55	753.94	201632.00	36887.57	36522.12	37026.70	-139.90
P5/1W	32.00	518415.76	278935.04	753.94	201652.00	36843.99	36522.28	37026.70	-183.58
P5/1W	33.00	518417.61	278933.76	753.94	201702.00	36864.50	36522.44	37026.70	-163.20
P5/1W	34.00	518420.24	278931.88	753.94	201722.00	36831.19	36522.60	37026.70	-196.61
P5/1W	35.00	518421.67	278930.93	753.94	201742.00	36837.11	36522.75	37026.70	-190.79
P5/1W	36.00	518423.94	278929.52	753.94	201752.00	36881.47	36522.91	37026.70	-146.56
P5/1W	37.00	518426.06	278928.20	753.94	201812.00	36929.58	36523.07	37026.70	-98.55
P5/1W	38.00	518428.79	278928.35	753.94	201912.00	36999.52	36523.23	37026.70	-28.58
P5/1W	48.00	518460.15	278927.27	753.94	202322.00	36974.06	36523.39	37026.70	-53.46
P5/1W	49.00	518462.37	278927.04	753.94	202352.00	36946.60	36523.55	37026.70	-80.98
P5/1W	50.00	518464.82	278926.11	752.61	202402.00	36931.36	36523.71	37026.70	-96.35
P5/1W	51.00	518467.50	278924.55	752.61	202422.00	36915.45	36523.87	37026.70	-112.36
P5/1W	52.00	518469.35	278923.41	752.61	202432.00	36921.35	36524.03	37026.70	-106.59
P5/1W	53.00	518471.28	278922.37	752.61	202442.00	36949.85	36524.18	37026.70	-78.22
P5/1W	54.00	518475.07	278920.06	752.61	202502.00	36970.19	36524.34	37026.70	-57.98
P5/1W	55.00	518477.80	278918.65	752.61	202512.00	36933.13	36524.50	37026.70	-95.17
P5/1W	57.00	518486.72	278919.60	752.61	203042.00	36825.00	36524.66	37026.70	-202.47
P5/1W	59.00	518506.48	278924.43	752.61	204342.00	36936.14	36524.82	37026.70	-89.16
P5/1W	61.00	518509.07	278921.04	752.61	204422.00	36942.90	36524.98	37026.70	-82.44
P5/1W	62.00	518511.01	278919.57	752.61	204442.00	36892.76	36525.14	37026.70	-132.67
P5/1W	63.00	518512.21	278918.11	750.94	204452.00	36891.85	36525.30	37026.70	-133.71
P5/1W	64.00	518513.28	278916.55	750.94	204512.00	36877.66	36525.46	37026.70	-148.00
P5/1W	65.00	518514.94	278914.71	750.94	204532.00	36862.55	36525.61	37026.70	-163.21
P5/1W	66.00	518516.24	278913.62	750.94	204552.00	36831.17	36525.77	37026.70	-194.69
P5/1W	67.00	518518.13	278911.22	750.94	204612.00	36780.48	36525.93	37026.70	-245.48
P5/1W	68.00	518519.11	278909.18	750.94	204632.00	36768.27	36526.09	37026.70	-257.79
P5/1W	69.00	518519.85	278907.16	750.94	204652.00	36782.28	36526.25	37026.70	-243.88
P5/1W	70.00	518520.54	278904.56	750.94	204702.00	36815.54	36526.41	37026.70	-210.75
P5/1W	71.00	518521.28	278903.38	750.94	204722.00	36857.71	36526.57	37026.70	-168.68
P5/1W	72.00	518522.21	278901.07	750.94	204732.00	36924.93	36526.73	37026.70	-101.59
P5/1W	73.00	518523.64	278899.18	750.99	204752.00	36939.27	36526.89	37026.70	-87.34
P5/1W	74.00	518524.05	278898.32	750.99	204812.00	36985.75	36527.04	37026.70	-40.96
P5/1W	75.00	518524.61	278896.91	750.99	204832.00	37014.53	36527.20	37026.70	-12.28
P5/1W	76.00	518525.76	278895.49	750.99	204902.00	37042.84	36527.36	37026.70	15.96

P5/1W	77.00	518526.27	278893.33	750.99	204922.00	37065.59	36527.52	37026.70	38.61
P5/1W	78.00	518527.29	278892.33	750.99	204942.00	37051.84	36527.68	37026.70	24.76
P5/1W	79.00	518528.45	278890.31	750.99	204952.00	37035.75	36527.84	37026.70	8.54
P5/1W	80.00	518529.23	278888.13	750.99	205012.00	37005.68	36528.00	37026.70	-21.63
P5/1W	81.00	518530.71	278885.40	750.99	205032.00	36934.93	36528.16	37026.70	-92.48
P5/1W	82.00	518532.57	278883.74	750.99	205042.00	36908.60	36528.32	37026.70	-118.94
P5/1W	83.00	518534.83	278882.09	750.80	205052.00	36897.96	36528.47	37026.70	-129.71
P5/1W	85.00	518537.78	278879.45	750.80	205132.00	36897.01	36528.63	37026.70	-130.69
P5/1W	86.00	518540.05	278878.31	750.80	205142.00	36908.67	36528.79	37026.70	-119.16
P5/1W	87.00	518542.27	278876.57	750.80	205202.00	36943.86	36528.95	37026.70	-84.07
P5/1W	88.00	518544.26	278875.86	750.80	205212.00	36979.15	36529.11	37026.70	-48.91
P5/1W	89.00	518546.70	278873.55	750.80	205232.00	37001.68	36529.27	37026.70	-26.48
P5/1W	90.00	518549.62	278871.24	750.80	205252.00	37055.24	36529.43	37026.70	26.98
P5/1W	91.00	518552.30	278869.54	750.80	205322.00	37052.17	36529.59	37026.70	23.84
P5/1W	92.00	518556.92	278863.17	750.80	205522.00	37090.85	36529.75	37026.70	62.72
P5/1W	94.00	518569.58	278860.06	750.80	205822.00	37049.77	36529.91	37026.70	22.02
P5/1W	95.00	518572.16	278859.50	750.41	205842.00	37082.78	36530.06	37026.70	54.93
P5/1W	97.00	518575.77	278856.15	750.41	205922.00	37085.14	36530.22	37026.70	57.25
P5/1W	98.00	518578.17	278853.98	750.41	205942.00	37120.26	36530.38	37026.70	92.27
P5/1W	99.00	518581.78	278852.18	750.41	210502.00	37159.98	36530.54	37026.70	132.79
P5/1W	100.00	518581.69	278851.90	750.41	210622.00	37161.02	36530.70	37026.70	133.91
P5/1W	101.00	518584.50	278850.68	749.57	210642.00	37126.54	36530.86	37026.70	99.33
P5/1W	102.00	518585.71	278849.35	749.57	210702.00	37107.34	36531.02	37026.70	80.03
P5/1W	103.00	518586.72	278848.55	749.57	210722.00	37117.70	36531.18	37026.70	90.29
P5/1W	104.00	518588.01	278847.27	750.01	210822.00	37169.45	36531.34	37026.70	142.07
P5/1W	105.00	518588.90	278845.77	750.01	211512.00	37165.61	36531.49	37026.70	139.29
P5/1W	106.00	518588.90	278845.81	750.01	211522.00	37168.77	36531.65	37026.70	142.32
P5/1W	107.00	518590.37	278844.40	744.00	211602.00	37093.68	36531.81	37026.70	67.19
P5/1W	108.00	518590.98	278844.30	744.00	211622.00	37116.17	36531.97	37026.70	89.59
P5/1W	109.00	518594.20	278843.69	744.00	211702.00	37093.07	36532.13	37026.70	66.45
P5/1E	3.00	518616.90	278821.94	746.98	212202.00	36909.64	36518.94	37022.40	-116.52
P5/2E	4.00	518628.78	278816.95	746.98	213022.00	37110.73	36514.43	37022.40	90.68
P5/3E	5.00	518634.09	278811.89	751.02	213622.00	37132.74	36517.35	37022.40	110.93
P5/4E	6.00	518660.26	278791.23	751.02	214602.00	37084.26	36520.92	37022.40	60.74
P5/5E	7.00	518680.91	278778.35	751.02	215112.00	37284.00	36520.36	37022.40	262.04
P5/6E	8.00	518678.65	278780.66	751.82	221732.00	37292.27	36524.87	37022.40	270.88
P5/7E	9.00	518676.98	278782.12	751.82	221812.00	37303.72	36526.56	37022.40	280.76
P5/8E	10.00	518674.99	278784.10	751.82	221852.00	37298.41	36526.56	37022.40	275.58
P5/9E	11.00	518672.27	278785.38	756.21	221932.00	37288.22	36526.56	37022.40	265.52
P5/10E	12.00	518669.73	278786.74	756.21	222012.00	37273.22	36526.56	37022.40	250.65
P5/11E	13.00	518668.34	278787.03	756.21	222052.00	37256.60	36526.56	37022.40	234.16
P5/12E	14.00	518666.45	278787.73	756.34	222152.00	37230.04	36526.56	37022.40	207.79
P5/13E	15.00	518664.78	278788.67	756.34	222252.00	37196.90	36526.56	37022.40	174.84
P5/14E	16.00	518662.66	278790.04	758.94	222342.00	37154.56	36526.56	37022.40	132.67
P5/15E	17.00	518660.95	278790.66	758.94	222442.00	37143.96	36532.13	37022.40	116.69
P04wr1	5.00	518174.85	278624.40	766.86	160502.00	37331.81	36529.20	37021.60	309.34
P04wr2	8.00	518201.85	278613.18	772.90	161102.00	37208.15	36529.20	37021.60	185.79
P04wr3	9.00	518227.97	278601.66	778.77	161432.00	37130.57	36533.07	37021.60	104.40
P04wr4	10.00	518255.40	278592.56	782.03	161732.00	37198.29	36533.07	37021.60	172.17
P04wr5	11.00	518282.12	278580.82	784.07	162302.00	37191.52	36533.07	37021.60	165.49
P04wr6	12.00	518303.28	278561.20	784.09	162542.00	37172.61	36533.07	37021.60	146.62
P04wr7	13.00	518317.39	278534.94	785.25	163142.00	37160.68	36533.07	37021.60	134.80
P04wr8	14.00	518346.56	278524.16	784.32	163832.00	37125.15	36533.07	37021.60	99.38
P04wr9	15.00	518367.72	278504.27	785.48	164642.00	37124.89	36528.50	37021.60	103.83
P04wr10	16.00	518381.18	278491.33	788.84	165652.00	37886.59	36515.82	37021.60	878.38

P04wr11	28.00	518411.80	278505.87	788.25	171922.00	37398.40	36517.37	37021.60	389.02
P04wr12	29.00	518411.75	278496.18	783.00	172712.00	37427.23	36519.46	37021.60	415.90
P04wr13c	30.00	518418.55	278485.50	768.61	173932.00	37246.49	36525.07	37021.60	229.75
P04wr13c1	31.00	518418.55	278485.50	768.61	174642.00	37281.42	36527.16	37021.60	262.72
P04wr13c2	32.00	518418.55	278485.50	768.61	174832.00	37290.67	36530.08	37021.60	269.08
P04e01	33.00	518428.01	278470.76	780.40	175722.00	36947.32	36530.40	37021.60	-74.44
P04e02	41.00	518460.45	278477.13	781.87	193132.00	37072.25	36532.99	37021.60	49.49
P04e03	42.00	518487.70	278476.14	782.03	193732.00	37065.36	36531.84	37021.60	43.85
P04e04	43.00	518518.19	278482.13	782.24	194402.00	37038.96	36532.66	37021.60	16.74
P04e05	44.00	518549.77	278481.39	780.10	195022.00	37057.69	36532.06	37021.60	36.18
P04e06	45.00	518575.58	278480.05	778.57	195652.00	37103.30	36533.75	37021.60	80.21
P04e07	46.00	518611.73	278475.75	777.40	200142.00	37072.03	36535.22	37021.60	47.55
P04e08	48.00	518643.05	278472.82	774.48	201932.00	37269.91	36533.56	37021.60	247.39
P04e09	49.00	518677.05	278442.88	775.47	202632.00	37028.07	36533.35	37021.60	5.88
P04e10	50.00	518698.07	278433.23	776.91	203132.00	37040.73	36532.40	37021.60	19.58
P3/1E	4	518196.67	278104.24	857.748	181132	36712.93	36530.96	37017.7	-306.47
P3/2E	5	518212.81	278098.91	862.731	181742	36680.72	36531.32	37017.7	-339.88
P3/3E	6	518241.66	278098.77	868.027	182902	36456.31	36531.64	37017.7	-566.15
P3/4E	7	518261.28	278088.61	869.937	183542	36633.96	36529.32	37017.7	-387.09
P3/5E	8	518286.56	278065.04	870.462	184622	36454.88	36524.17	37017.7	-562.47
P3/6E	9	518341.86	278028.66	866.33	185352	36457.28	36522.28	37017.7	-559.20
P3/7E	15	518362.47	278013.7	865.084	190112	36537.42	36518.48	37017.7	-476.26
P3/8E	17	518387.12	278010.12	857.155	190822	36389.12	36518.52	37017.7	-625.58
P3/9E	23	518409.03	278013.54	853.619	191722	36684.35	36519.83	37017.7	-332.89
P3/10E	25	518446.15	278026.05	857.449	192222	36308.73	36522.1	37017.7	-711.46
P3/CentroW	27	518130.17	278119.61	865.796	205632	36642.33	36499.47	37017.7	-368.06
P3/1W	28	518105.39	278133.63	871.874	212412	37073.11	36498.4	37017.7	60.02
P3/2W	34	518087.45	278150.87	869.835	215202	36939.99	36505.34	37017.7	-83.83
P3/3W	35	518054.83	278180.85	873.983	215712	36994.84	36504.71	37017.7	-29.06

ANEXO 4. RESULTADOS DEL PROCESAMIENTO DE DATOS GRAVIMÉTRICOS Y MAGNÉTICOS.

Gravimetría

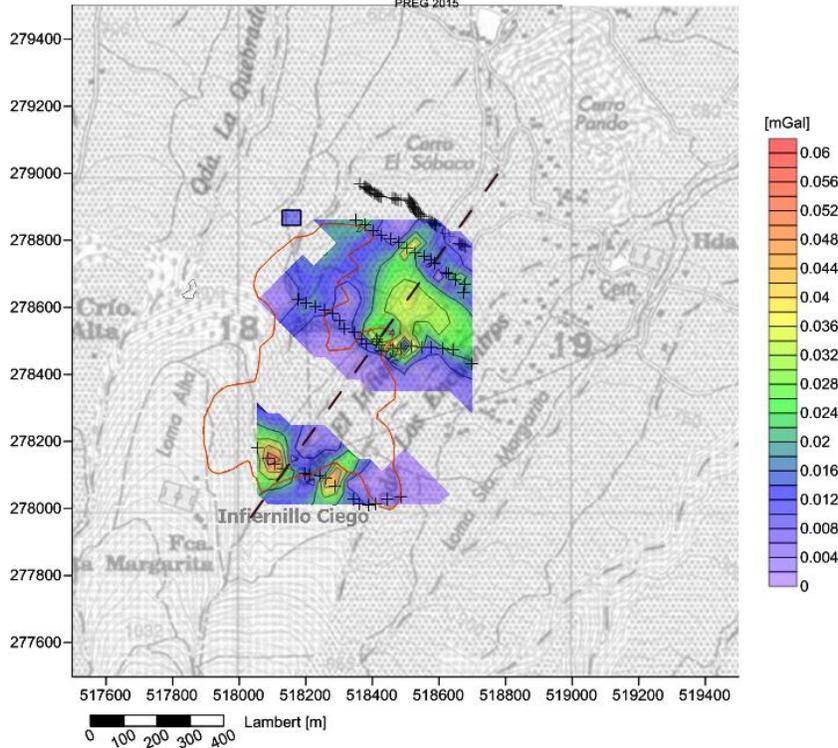


1ra Derivada Horizontal Anomalia Gravimétrica

CG-5

Infiernillo Ciego, San Vicente

PREG 2015

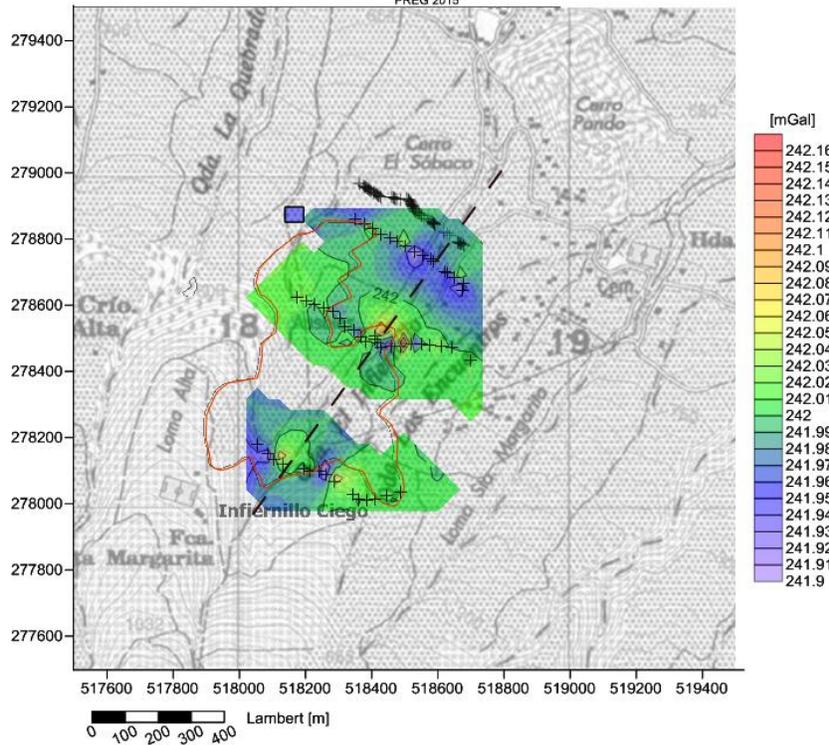


1ra Derivada Vertical Anomalia Gravimétrica

CG-5

Infiernillo Ciego, San Vicente

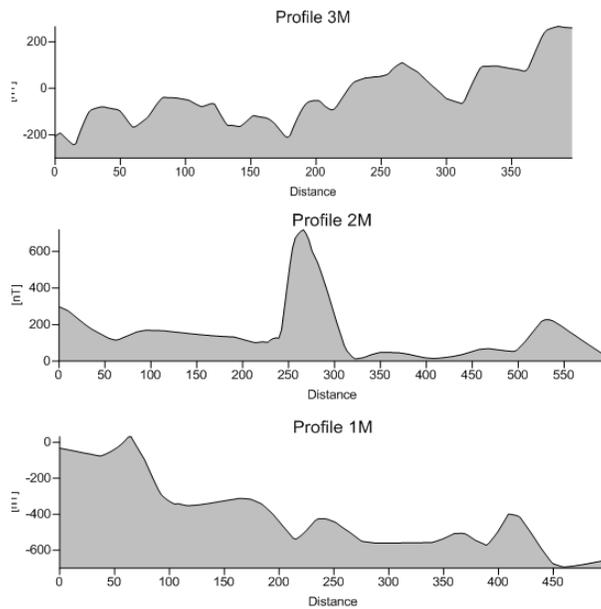
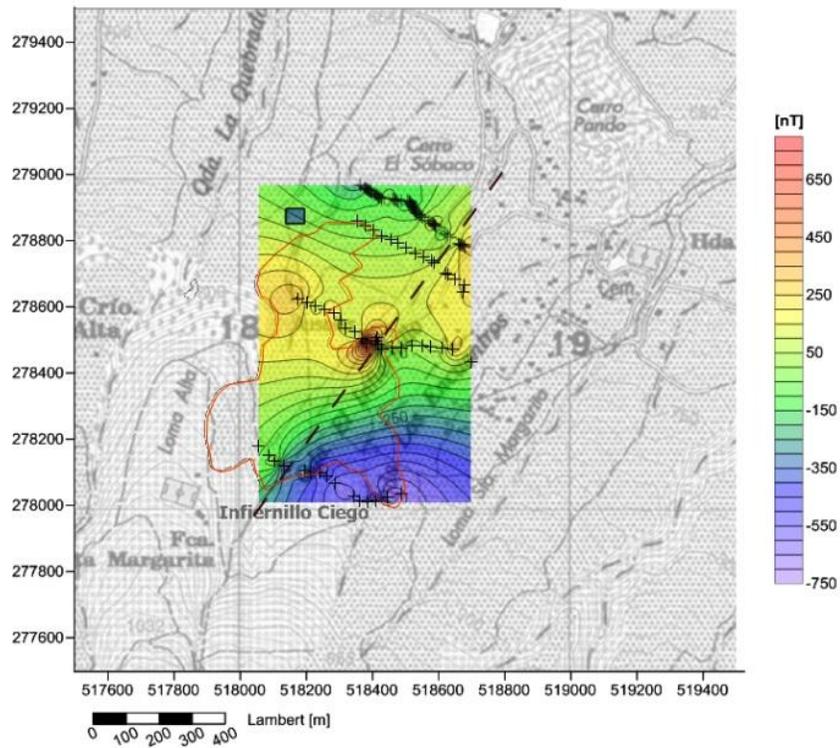
PREG 2015



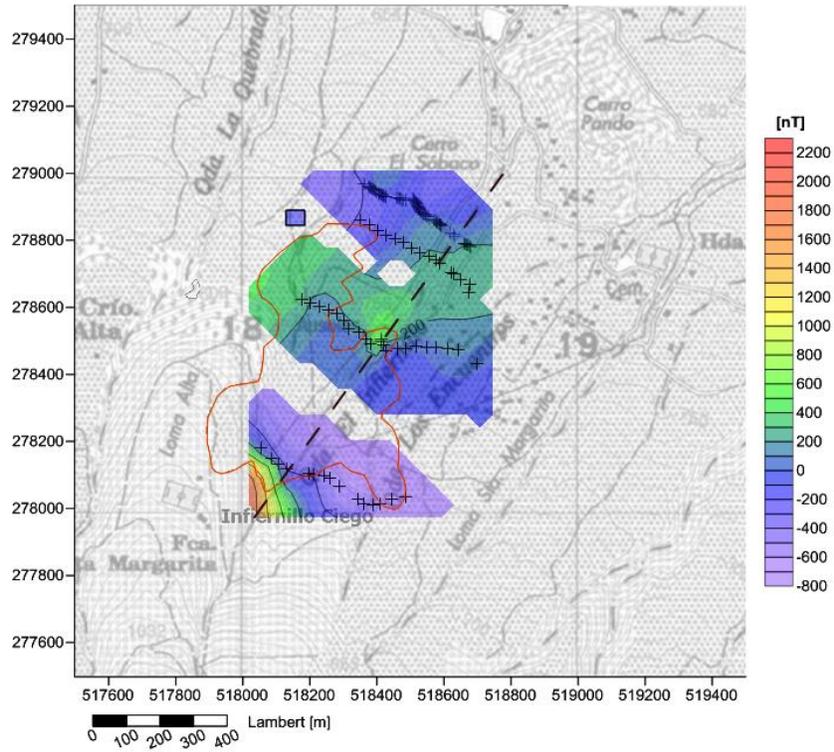
Magnetometría

Anomalia Magnética

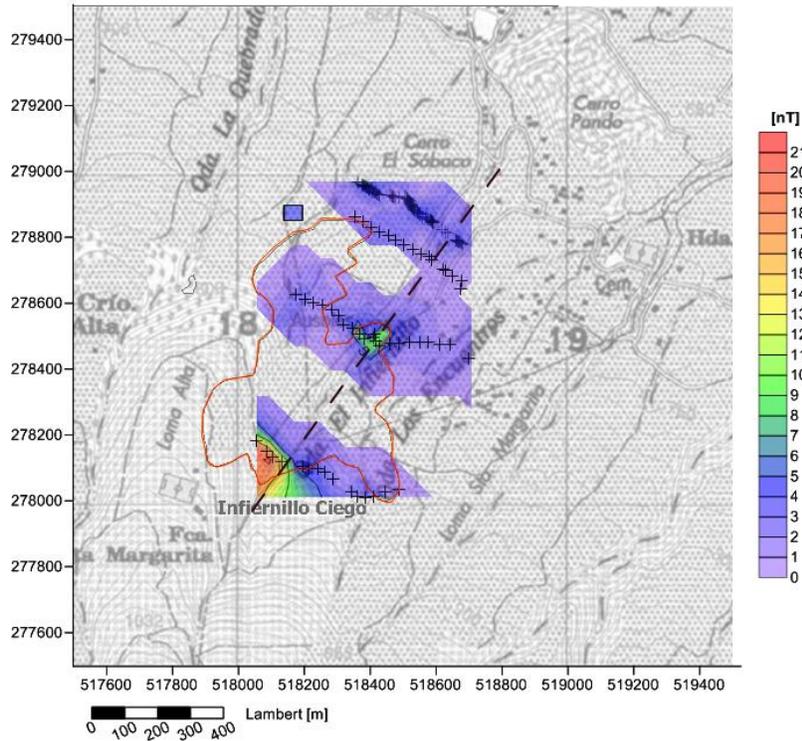
Infiernillo Ciego, San Vicente
PREG 2015



Reducción al Polo
Anomalia Magnética
Infiernillo Ciego, San Vicente
 PREG 2015



1a Derivada Horizontal
Anomalia Magnética
Infiernillo Ciego, San Vicente
 PREG 2015



ANEXO 5. GEOREFERENCIACIÓN CON GPS DIFERENCIAL

Fundamentos

Su fundamento es un Sistema Geodésico, sistema geográfico, este es el que nos permitirá colocar coordenadas a un punto en el espacio a través de un sistema satelital. Por medio de posición y correcciones de los satélites.
GPS (Sistema de posicionamiento global).

Metodología

Equipo

- Estación base GPS, unidad receptora de señal satelital.
- Unidad GPS móvil.
- Antena de comunicación estación base – unidad móvil.
- Panel de control Trimble.
- Brújula.
- Cinta de medición.

a) Georeferenciación de puntos de medición mediante GPS de alta precisión se debe realizar el ensamble de la estación base receptora de GPS el cual consiste un receptor GPS montado sobre un trípode para su mayor estabilidad, este dispositivo posee la característica de poder recibir y transmitir datos. Se ubicó la base de GPS diferencial en un punto conocido, en nuestro caso fue la plataforma del SV2.

b) Como segundo paso se realiza el montaje de la antena transmisora de datos del equipo GPS base la cual permite sincronizar el equipo base con el GPS móvil hasta una distancia aproximada de 5 Km.

c) Se configuró el modo de levantamiento PPK (Post Processing Kinematic), esta técnica nos permite editar en el software y obtener mayor precisión.

d) Se usó el receptor móvil medir en los puntos propuestos, posteriormente a la identificación del punto se procede a realizar la medición, manteniendo el báculo que sostiene el equipo GPS móvil lo más vertical posible para mejorar la precisión de la medición tanto en las coordenadas como en la vertical.

e) En cada medición se evaluaron las condiciones mínimas que debe cumplir el receptor móvil para poder almacenar los datos (Los datos fueron guardados en la colectora):

- i. Tiempo de medición de 3 minutos.
- ii. PDOP menor a 6. Este indica la precisión. Se determina por medio de un factor numérico que indica la posición y geometría de los satélites.
- iii. Cantidad de satélites, mínimo 4.

Procesamiento de datos GPS

- a) Se crea un nuevo proyecto en el software Trimble Business Center.
- b) Se cambia el sistema de coordenadas. Proyección conforme cónica de Lambert de 2 paralelos. Y escoger datum NAD 1927 (Central América).
- c) Se importan los datos desde la Colectora y los dos receptores, tanto del móvil como de la base.
- d) Unimos los puntos que tomamos como base para los tres días. Le introducimos coordenadas de control al punto, las cuales ya conocemos.
- e) Para nuestro caso, medimos 4 perfiles, pero 1 de ellos no se pudo procesar debido a que tenía un rumbo distinto al que se había planeado inicialmente, además la inicialización de la base no fue posible por falta de espacio en la memoria de la misma.
- f) Importamos solo los datos que correspondan a la fecha de la medición, es recomendable siempre llevar una libreta de campo donde se coloquen los datos que se vayan tomando en las mediciones
- g) Son 56 puntos por todos en total.
- h) Se procesan líneas de medición.
- i) Se editan las que se considere conveniente debido a la falta de precisión en la medida.

Resultados

Se obtuvieron coordenadas de cada uno de los puntos donde se realizaron las mediciones, la precisión se muestra en la Tabla 5.

Tabla 5. Opciones de configuración del proyecto (a)

CRITERIOS DE ACEPTACIÓN	Indicador	Fallida
Si la precisión horizontal >	0.050 m + 1.0 ppm	0.100 m + 1.0 ppm
Si la precisión vertical >	0.050 m +1.0 ppm	0.100 m + 1.0 ppm

Se exportaron los datos a un Excel con el nombre del punto que se le había asignado a cada uno, y estos sirvieron para georeferenciar los datos de gravimetría, como se muestra en la Tabla 6.

Tabla 6. Muestra los datos de GPS diferencial.

Información del proyecto		Sistema de coordenadas	
Nombre:		Nombre:	El Salvador
Tamaño:		Datum:	NAD 1927 (Central America)
Modificado/a:		Zona:	El Salvador
Zona horaria:		Geoide:	EGM96 (Global)
Número de referencia:		Datum vertical:	
Descripción:			

Lista de puntos

ID	Este (Metro)	Norte (Metro)	Elevación (Metro)	Código de característica
	518549.773	278481.394	780.092	
	518675.780	278643.627	760.827	
	518178.898	278132.152	834.922	
	518105.394	278133.630	871.877	
basediplo	518195.231	278834.122	740.503	
p03e01	518196.666	278104.243	857.748	
p03e02	518212.811	278098.915	862.731	
p03e03	518241.656	278098.766	868.027	
p03e04	518261.278	278088.609	869.937	

p03e05	518286.558	278065.045	870.462
p03e06	518341.864	278028.663	866.330
p03e07	518362.473	278013.695	865.084
p03e08	518387.117	278010.118	857.155
p03e09	518409.031	278013.537	853.619
p03e10	518446.154	278026.055	857.449
p03e11	518486.000	278035.260	857.547
p03w01	518130.173	278119.615	865.796
p03w02	518105.391	278133.631	871.874
p03w03	518087.446	278150.867	869.835
p03w04	518054.828	278180.851	873.983
p04e01	518428.007	278470.764	780.399
p04e02	518460.453	278477.134	781.869
p04e03	518487.702	278476.141	782.033
p04e04	518518.186	278482.127	782.240
p04e05	518549.774	278481.391	780.104
p04e06	518575.578	278480.051	778.570
p04e07	518611.726	278475.746	777.395
p04e08	518643.049	278472.824	774.476
p04e10	518698.074	278433.233	776.908
p04wc	518418.790	278488.944	779.624
p04wr1	518174.853	278624.401	766.861
p04wr2	518201.855	278613.179	772.899
p04wr3	518227.969	278601.660	778.770
p04wr4	518255.397	278592.560	782.031
p04wr5	518282.121	278580.820	784.074
p04wr6	518303.279	278561.198	784.094
p04wr7	518317.388	278534.942	785.248
p04wr8	518346.560	278524.164	784.317
p04wr9	518367.725	278504.267	785.476
p04wr10	518381.179	278491.326	788.842
p04wr11	518411.802	278505.873	788.254
p04wr12	518411.745	278496.181	782.997
p04wr13C	518418.547	278485.502	768.608
p05e01	518612.720	278710.248	746.983
p05e02	518621.927	278702.940	751.015
p05e03	518627.988	278698.727	751.817
p05e04	518650.592	278682.291	756.210
p05e05	518676.004	278667.133	756.343
p05e06	518675.783	278643.630	758.935
p05w01	518351.920	278860.178	753.633
p05w02	518377.892	278846.244	755.508
p05w03	518402.527	278830.065	753.936
p05w04	518427.744	278814.031	752.614
p05w05	518455.524	278804.603	750.937
p05w06	518478.449	278792.749	750.987
p05w07	518502.909	278777.740	750.802
p05w08	518529.089	278761.589	750.414
p05w09	518554.294	278750.303	749.571
p05w10	518578.212	278741.053	750.005
p05w11	518587.592	278732.467	743.995