

**UNIVERSIDAD CENTRAL DE VENEZUELA**  
**FACULTAD DE CIENCIAS**  
**ESCUELA DE FISICA**



**ESTUDIO GEOFISICO INTEGRADO CON FINES DE EXPLORACION**  
**DIAMANTIFERA EN LA ZONA DE SANTA ELENA DE UAIREN, EDO.**  
**BOLIVAR.**

**Tutor:** PhD. Laura Piñero Feliciangeli.

Presentado ante la Ilustre  
UNIVERSIDAD CENTRAL DE VENEZUELA  
Por el Br. Jackson J. Pérez R.  
Para optar al título de Licenciado en Física.

Caracas, Mayo de 2011

Caracas, Mayo de 2011.

Quienes suscriben, miembros del jurado que examinó el trabajo presentado por el **Br. Jackson José Pérez Rojas**. Titulado:

**ESTUDIO GEOFISICO INTEGRADO CON FINES DE EXPLORACION  
DIAMANTIFERA EN LA ZONA DE SANTA ELENA DE UAIREN, EDO.  
BOLIVAR.**

Para optar al título de Licenciado en Física, consideramos que dicho trabajo cumple con los requisitos exigidos por los reglamentos respectivos y por lo tanto lo declaramos Aprobado en nombre de la Universidad Central de Venezuela.

---

**PhD. Laura Piñero**  
**Tutor**

---

**Lic. Cesar Espinoza**  
**Jurado**

---

**Dr. José Jorge**  
**Jurado**

## DEDICATORIA

*A mis padres, a mis hermanos,  
A mis sobrinos y a toda mi familia.*

## AGRADECIMIENTOS

Principalmente quiero agradecer a Dios por haberme dado el don de vivir, ser mi guía día a día, mi protector y nunca abandonarme a lo largo de todo este camino y por darme la oportunidad de estudiar en la mejor universidad: la UCV.

A mis padres, Eduardo y Carmen por haberme dado la vida, quienes me han apoyado siempre y con su mayor sacrificio me han dado una formación académica y personal. Gracias por ser un buen ejemplo para mí. ¡Los Amo!

A mis hermanos y a mis dos sobrinos, los cuales han sido motivo de inspiración, los quiero!

A mis tías Reina, Mary y Carmencita y a mi abuelo Morales por todo su apoyo en todo momento, así como también al tío Faustino.

A la Sra. Marcolina, al Sr. Juan (Joao) y a Willian quienes de verdad me han ayudado mucho y nunca podre agradecerles todo lo hecho por mí, siempre les estaré agradecido.

A mi tutora la Prof. Laura Piñero por haberme brindado sus conocimientos y su gran apoyo durante el tramo final y sé que sin ella no hubiera podido realizar este trabajo, de corazón muchísimas gracias prof.

A todos mis profesores quienes me han formado profesionalmente y me han brindado todo el conocimiento posible.

A la Prof. Nury Hurtado por haber convencido a la Prof. Laura de continuar siendo mi tutora.

A todos mis amigos de la Facultad de Ciencias (son bastantes) quienes juntos hemos superado todos los obstáculos que hemos encontrado, gracias por ser grandes personas y buenos amigos, son los mejores de verdad, si pusiera los nombres serian muchísimos y se me podría olvidar alguno, pero todos saben quiénes son.

A Werner y el personal de *INGEOMIN* por su colaboración y darme la oportunidad de ir a Santa Elena de Uairén.

A Rafa por haberme ayudado en Química II.

A toda mi familia en Valera, abuelos, tíos y primos a quienes siempre recuerdo a pesar de las pocas visitas que he hecho durante los últimos tiempos.

A todos mis amigos externos a la Facultad de Ciencias y externos a la Universidad Central de Venezuela que siempre me han apoyado y siempre escuchaban sin saber de que estaba hablando.

A los profesores y compañeros del Colegio Salesianos aunque no la leerán, nunca olvido el lema de Don Bosco: “Ser buenos cristianos y honrados ciudadanos”.

**Jackson J. Pérez R.**

**ESTUDIO GEOFISICO INTREGADO CON FINES DE EXPLORACION  
DIAMANTIFERA EN LA ZONA DE SANTA ELENA DE UAIREN, EDO.  
BOLIVAR.**

**Tutora: PhD. Laura Piñero.**

**RESUMEN**

**Palabras claves:** métodos magnéticos, radiométricos y electromagnéticos, Kimberlitas, diamantes, Provincia Geológica de Roraima y Provincia Geológica de Cuchivero.

A nivel mundial se ha encontrado que las pipas kimberlitas pueden generar anomalías magnéticas y/o electromagnéticas siendo posible la utilización de estos métodos geofísicos para la detección de su ubicación.

En este trabajo se realizó el levantamiento y verificación en tierra de 12 perfiles obtenidos en un levantamiento aerogeofísico (magnético, electromagnético y radiométrico) realizado por *INGEOMIN* entre los años 2007 y 2008, con la finalidad de determinar posible presencia de pipas kimberlíticas.

De estos doce perfiles verificados en tierra se pudo evidenciar la anomalía (magnética, electromagnética y/o radiométrica) en siete de ellos. Estos fueron propuestos para realizarles perfiles paralelos o cruzados a fin de delimitar la anomalía en forma y tamaño.

De los siete perfiles seleccionados, se realizó el modelaje directo de pipas kimberlitas a tres perfiles con anomalías magnéticas negativas. Las pipas kimberlitas obtenidas en estos modelos se encuentran a profundidades superiores a 150m con respecto a la superficie, con diámetros cercanos a los 300m y una extensión en profundidad mayor a los 450m.

A partir del modelaje directo se determinó el espesor de la Provincia de Roraima al Nor-Este de la zona de estudio, el espesor máximo obtenido fue de 277m el cual disminuye en forma de cuña hacia el Sur-Oeste hasta llegar al borde del dique, ya que a partir del dique solo se afloran rocas de la Provincia Geológica de Cuchivero.

**INDICE GENERAL**

| <b>CONTENIDO</b>  | <b>PAGINA</b> |
|---|---------------|
| 1 INTRODUCCION.....   | 1             |
| 1.1 Introducción.....   | 1             |
| 1.2 Estructura de la tesis.....   | 3             |
| 1.3 Planteamiento del problema.....   | 4             |
| 1.4 Características del levantamiento aerogeofísico realizado por INGEOMIN..... | 7             |
| 1.5 Ubicación del área de estudio.....  | 10            |
| 1.6 Objetivos.....  | 10            |
| 1.6.1 Objetivo General.....   | 10            |
| 1.6.2 Objetivos Específicos.....  | 11            |
| 1.7 Antecedentes.....   | 12            |
| 2 MARCO GEOLOGICO.....  | 16            |
| 2.1 La Provincia Geológica de Roraima.....                                      | 16            |
| 2.2 La Provincia Geológica de Cuchivero.....                                    | 17            |
| 2.3 Kimberlitas.....  | 18            |
| 2.3.1 Características macroscópicas de las Kimberlitas.....                     | 20            |
| 2.3.2 Emplazamiento de las Pipas de Kimberlitas.....                            | 20            |
| 2.3.3 Propiedades físicas de las kimberlitas.....                               | 22            |
| 2.3.4 Dimensiones de las kimberlitas.....                                       | 24            |
| 3 MARCO TEORICO.....  | 25            |
| 3.1 Métodos Radiométricos.....  | 25            |
| 3.1.1 Decaimiento Radioactivo.....  | 28            |
| 3.2 Series de desintegracion.....   | 29            |

|       |  |    |
|-------|--|----|
| 3.3   | Métodos Magnéticos.....  | 30 |
| 3.4   | La naturaleza del Campo Geomagnético. ....   | 31 |
| 3.4.1 | El Campo Principal.....  | 31 |
| 3.4.2 | El IGRF (Campo de Referencia Geomagnético Internacional o International Geomagnetic Reference Field) ..... | 33 |
| 3.4.3 | El Campo Magnético Externo. ....   | 34 |
| 3.4.4 | Magnetismo de las Rocas y Minerales. ....  | 36 |
| 3.4.5 | Campo magnético regional. ....   | 38 |
| 3.4.6 | Campo magnético residual. ....   | 38 |
| 3.4.7 | Anomalía magnética. ....   | 38 |
| 3.5   | Técnicas de interpretación cualitativa y transformación de los datos.....                                  | 39 |
| 3.5.1 | Reducción al ecuador magnético.....  | 39 |
| 3.5.2 | Derivada horizontal. ....  | 40 |
| 3.5.3 | Derivadas verticales.....  | 40 |
| 3.5.4 | Señal analítica.....   | 40 |
| 3.6   | Interpretacion cuantitativa. ....  | 41 |
| 3.6.1 | Programa de procesamiento de datos (Oasis Montaj) .....  | 41 |
| 3.6.2 | El GM-SYS. ....  | 41 |
| 3.7   | Métodos Electromagnéticos.....   | 42 |
| 3.7.1 | Métodos electromagnéticos en el Dominio de la Frecuencia. ....   | 45 |
| 3.7.2 | Profundidad de penetración.....  | 47 |
| 3.7.3 | Fase y Cuadratura. ....  | 48 |
| 3.7.4 | Numero de inducción.....   | 50 |
| 4     | ADQUISICION Y PROCESAMIENTO DE LOS DATOS. ....   | 52 |
| 4.1   | Actividades preliminares a la actividad de campo.....  | 52 |

|       |   |     |
|-------|---|-----|
| 4.2   | Planificación del levantamiento geofísico terrestre. ....   | 54  |
| 4.3   | Equipos utilizados y características. ....  | 57  |
| 4.3.1 | Radiómetro (GRS-101). ....  | 57  |
| 4.3.2 | Magnetómetro (G-856).....   | 59  |
| 4.3.3 | Equipo Electromagnético (FDEM-8). ....  | 62  |
| 4.4   | Logística de adquisición de datos del levantamiento geofísico terrestre. ....   | 65  |
| 4.5   | Descarga y procesamiento de los datos adquiridos.....   | 69  |
| 4.5.1 | Datos radiométricos.....  | 69  |
| 4.5.2 | Datos Magnéticos. ....  | 69  |
| 4.5.3 | Datos electromagnéticos.....  | 70  |
| 4.6   | Modelado de pipas kimberlitas para los perfiles seleccionados en el levantamiento geofísico. ....   | 73  |
| 4.7   | Construcción de un modelo geológico para determinar el espesor de la Provincia Geológica de Roraima al Nor-Este de la zona de estudio. .... | 74  |
| 5     | RESULTADOS Y ANALISIS DE LOS DATOS.....   | 77  |
| 5.1   | Interpretación cualitativa de los perfiles.....   | 77  |
| 5.2   | Modelado de pipas kimberlitas para los perfiles seleccionados con anomalías magnéticas. ....  | 122 |
| 5.3   | Modelo geológico para determinar el espesor de la Provincia Geológica de Roraima. ....  | 133 |
| 6     | CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....   | 138 |
|       | RECOMENDACIONES.....  | 140 |
| 7     | REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS.....   | 141 |
| 8     | APENDICE.....   | 144 |

**INDICE DE FIGURAS**

| <b>FIGURA</b>  | <b>PÁGINA</b> |
|--|---------------|
| Figura N° 1.1 Principales países productores de diamantes en el Mundo (Tomada de <a href="http://www.diamantes-infos.com">www.diamantes-infos.com</a> ).....   | 2             |
| Figura N° 1.2 Mapa de anomalía magnética obtenido en el levantamiento aerogeofísico. ...   | 6             |
| Figura N° 1.3 Se observan los doce perfiles a realizar en el levantamiento geofísico terrestre en los cuales se observan las soluciones de Keating sobre los perfiles.....                           | 7             |
| Figura N° 1.4 Equipo Humming Bird utilizado en el levantamiento aerogeofísico.....   | 8             |
| Figura N° 1.5 Área de estudio del levantamiento geofísico terrestre.....   | 11            |
| Figura N° 1.6 Fotomicrografías de cristales de diamante donde se puede observar algunas variedades morfológicas características: 1 Octaedro, 2 Trioctaedro, 3 Cubo, 4 geminado policristalino, ..... | 13            |
| Figura N° 1.7 Mapas de Uranio (superior izquierdo), Torio (superior derecho) y Potasio (Inferior) (Tomado de Guevara, 2008). .....   | 14            |
| Figura N° 2.1 Mapa Geológico del sector Icabarú, en la imagen con ampliada se observan los 12 perfiles a verificar en este trabajo (Guevara et al, 2008). .....                                      | 19            |
| Figura N° 2.2 Método de emplazamiento de las pipas de Kimberlitas. (Tomada de <a href="http://www.mountainprovince.com">www.mountainprovince.com</a> ) .....   | 21            |
| Figura N° 2.3 Modelo utilizado para obtener respuestas geofísicas de una kimberlita meteorizada casi circular (tomada de Macnae, 1979). .....  | 22            |
| Figura N° 2.4 Mina Mirny en Rusia (tomada de <a href="http://www.futuropasado.com">www.futuropasado.com</a> ) .....  | 24            |
| Figura N° 3.1 Partículas alfa (tomada de <a href="http://sagan-gea.org">http://sagan-gea.org</a> ) .....   | 26            |
| Figura N° 3.2 Partículas Beta (tomada de <a href="http://oxoacidosenaccion.blogspot.com">http://oxoacidosenaccion.blogspot.com</a> ) .....   | 27            |
| Figura N° 3.3 Radiación Gamma (Tomada de <a href="http://oxoacidosenaccion.blogspot.com">http://oxoacidosenaccion.blogspot.com</a> ) ....  | 27            |
| Figura N° 3.4 Tipos de radiaciones (tomada de <a href="http://www.educarchile.cl">www.educarchile.cl</a> ) .....   | 28            |
| Figura N° 3.5 Serie radioactiva del Uranio <sup>238</sup> (tomada de <a href="http://bibliotecadigital.ilce.edu.mx">http://bibliotecadigital.ilce.edu.mx</a> ).....                                  | 30            |
| Figura N° 3.6 Elementos del Campo Magnético de la Tierra (Guía Janckarlos Reyes, 2003). .....  | 32            |

|  |    |
|--|----|
| Figura N° 3.7 Rango de conductividad para rocas y algunos minerales (Tomada y modificada de Lane, 2002).   | 43 |
| Figura N° 3.8 Dirección de propagación de las ondas electromagnéticas.   | 45 |
| Figura N° 3.9 Principio general de los métodos electromagnéticos (Tomada y modificada de Lane, 2002).  | 46 |
| Figura N° 3.10 Se observa la profundidad de penetración de las ondas electromagnéticas en función de las frecuencias (Tomada y modificada de Allen, 2007).                                 | 48 |
| Figura N° 3.11 La diferencia de fase entre dos longitudes de onda. (Tomada de Reynold, 1998).  | 48 |
| Figura N° 3.12 Diagrama de vectores ilustrando la relación de amplitud y fase entre los campos electromagnéticos primario, secundario y resultante (tomada y modificada de Reynold, 1998). | 50 |
| Figura N° 3.13 Ejemplo para número de inducción bajo y alto  | 51 |
| Figura N° 4.1 Los 12 perfiles a realizar en el levantamiento geofísico terrestre.  | 55 |
| Figura N° 4.2 Anomalía electromagnética detectada a partir del levantamiento electromagnético aéreo en el perfil <i>L_3120_53A</i> .   | 56 |
| Figura N° 4.3 Anomalía magnética detectada en el perfil <i>L_2860_20A</i> , en la cual coinciden varias soluciones de Keating.   | 56 |
| Figura N° 4.4 Radiómetro utilizado en el levantamiento geofísico terrestre.  | 58 |
| Figura N° 4.5 Panel frontal del magnetómetro G-856 utilizado en el levantamiento magnético terrestre (Tomada de Geometrics, 1994).   | 59 |
| Figura N° 4.6 Sensor del magnetómetro de precesión protónica (Tomada de Geometrics, 1994).   | 60 |
| Figura N° 4.7 Principio físico del magnetómetro de precesión protónica (Tomada de Kearey, 1991).   | 61 |
| Figura N° 4.8 Bobinas del equipo FDEM-8 (tomada de <a href="http://www.geoafrica.co.za">www.geoafrica.co.za</a> ).   | 62 |
| Figura N° 4.9 Transmisor del equipo FDEM-8 (tomada de <a href="http://www.geoafrica.co.za">www.geoafrica.co.za</a> ).  | 63 |
| Figura N° 4.10 Receptor del equipo FDEM-8 (tomada de <a href="http://www.geoafrica.co.za">www.geoafrica.co.za</a> ).   | 64 |
| Figura N° 4.11 Adquisición de los datos radiométricos.   | 65 |
| Figura N° 4.12 Esquema de adquisición de los datos magnéticos y radiométricos.   | 66 |
| Figura N° 4.13 Adquisición de los datos magnéticos.  | 67 |

|   |    |
|---|----|
| Figura N° 4.14 Metodología de adquisición de los datos electromagnéticos.....   | 68 |
| Figura N° 4.15 Adquisición de los datos electromagnéticos (configuración coplanar). ....  | 68 |
| Figura N° 4.16 Parámetros para el cálculo del IGRF en el programa Oasis Montaj v.7.1.0.<br>.....  | 70 |
| Figura N° 4.17 Mapa de la relación Th/K del levantamiento aerogeofísico (Tomada de Guevara et al, 2008).....  | 75 |
| Figura N° 4.18 Mapa de anomalía magnética obtenido en el levantamiento aerogeofísico, en la cual se observan los doce perfiles y el perfil A-A' para la construcción del modelo geológico. .... | 76 |
| Figura N° 5.1 a) Topografía del perfil b) Respuesta magnética del levantamiento aerogeofísico y geofísico terrestre.....  | 79 |
| Figura N° 5.2 Respuesta electromagnética del levantamiento aerogeofísico del perfil L_3120_53A: a) Cuadratura, b) Fase. ....  | 80 |
| Figura N° 5.3 Respuesta electromagnética del levantamiento electromagnético terrestre del perfil L_3120_53A: a) Cuadratura, b) Fase.....  | 81 |
| Figura N° 5.4 a) Conductividad, b) Radiación del perfil L_3120_53A. ....  | 82 |
| Figura N° 5.5 Afloramiento de conglomerados en el perfil L3120_53A.....   | 83 |
| Figura N° 5.6 a) Topografía del perfil b) Respuesta magnética de levantamiento aerogeofísico y geofísico terrestre.....   | 86 |
| Figura N° 5.7 Respuesta electromagnética del levantamiento aerogeofísico del perfil L_2860_20A: a) Cuadratura, b) Fase. ....  | 87 |
| Figura N° 5.8 Respuesta electromagnética del levantamiento geofísico terrestre del perfil L_2860_20A: a) Cuadratura, b) Fase. ....  | 88 |
| Figura N° 5.9 a) Conductividad, b) Radiación del perfil L_2860_20A. ....  | 89 |
| Figura N° 5.10 Afloramiento de lavas densas. ....   | 90 |
| Figura N° 5.11 Afloramientos de rocas de composición acida a intermedia .....   | 92 |
| Figura N° 5.12 a) Topografía del perfil b) Respuesta magnética del levantamiento aerogeofísico y geofísico terrestre.....   | 93 |
| Figura N° 5.13 Respuesta electromagnética del levantamiento aerogeofísico del perfil L_2960_14A: a) Cuadratura, b) Fase. ....   | 94 |

|   |     |
|---|-----|
| Figura N° 5.14 Respuesta electromagnética del levantamiento geofísico terrestre del perfil 2960_14A: a) Cuadratura, b) Fase.....    | 95  |
| Figura N° 5.15 a) Conductividad, b) Radiación del perfil L_2960_14A. ....   | 96  |
| Figura N° 5.16 Lavas acidas con fenocristales de Feldespato.....  | 98  |
| Figura N° 5.17 a) Topografía del perfil b) Respuesta magnética de levantamiento aerogeofísico y geofísico terrestre. ....           | 99  |
| Figura N° 5.18 Respuesta electromagnética del levantamiento aerogeofísico del perfil L_2990_11A: a) Cuadratura, b) Fase. ....       | 100 |
| Figura N° 5.19 Respuesta electromagnética del levantamiento geofísico terrestre del perfil L_2990_11A: a) Cuadratura, b) Fase. .... | 101 |
| Figura N° 5.20 a) Conductividad, b) Radiación del perfil L_2990_11A. ....   | 102 |
| Figura N° 5.21 a) Topografía del perfil b) Respuesta magnética de levantamiento aerogeofísico y geofísico terrestre. ....           | 105 |
| Figura N° 5.22 Respuesta electromagnética del levantamiento aerogeofísico del perfil L_2960_15A: a) Cuadratura, b) Fase. ....       | 106 |
| Figura N° 5.23 Respuesta electromagnética del levantamiento geofísico terrestre del perfil L_2960_15A: a) Cuadratura, b) Fase. .... | 107 |
| Figura N° 5.24 a) Conductividad, b) Radiación del perfil L_2960_15A. ....   | 108 |
| Figura N° 5.25 Afloramientos de lavas acidas tipo riolitas en el perfil L_2960_15A. ....  | 109 |
| Figura N° 5.26 Vista del perfil L_2960_15A. ....  | 109 |
| Figura N° 5.27 a) Topografía del perfil b) Respuesta magnética de levantamiento aerogeofísico y geofísico terrestre. ....           | 112 |
| Figura N° 5.28 Respuesta electromagnética del levantamiento aerogeofísico del perfil L_3210_4A: a) Cuadratura, b) Fase. ....        | 113 |
| Figura N° 5.29 Respuesta electromagnética del levantamiento geofísico terrestre del perfil L_3210_4A: a) Cuadratura, b) Fase. ....  | 114 |
| Figura N° 5.30 a) Conductividad, b) Radiación del perfil L_3210_4A ....   | 115 |
| Figura N° 5.31 Topografía del perfil b) Respuesta magnética de levantamiento aerogeofísico y geofísico terrestre. ....              | 118 |
| Figura N° 5.32 Respuesta electromagnética del levantamiento aerogeofísico del perfil L_3120_53A: a) Cuadratura, b) Fase. ....       | 119 |

|   |     |
|---|-----|
| Figura N° 5.33 Respuesta electromagnética del levantamiento geofísico terrestre del perfil L_2981_12A: a) Cuadratura, b) Fase. .... | 120 |
| Figura N° 5.34 a) Conductividad, b) Radiación del perfil L_2981_12A. ....   | 121 |
| Figura N° 5.35 Afloramientos de cuarzo blanco. ....   | 122 |
| Figura N° 5.36 Derivadas y Señal Analítica obtenida para el perfil L_2860_20A. ....   | 126 |
| Figura N° 5.37 Modelo de pipa kimberlita obtenido para el perfil L_2860_20A. ....   | 127 |
| Figura N° 5.38 Derivadas y Señal Analítica obtenida para el perfil L_2960_14A. ....   | 129 |
| Figura N° 5.39 Modelo de pipa kimberlita obtenido para el perfil L_2960_14A. ....   | 130 |
| Figura N° 5.40 Derivadas y Señal Analítica obtenida para el perfil L_2990_11A. ....   | 131 |
| Figura N° 5.41 Modelo de pipa kimberlita obtenido para el perfil L_2990_11A. ....   | 132 |
| Figura N° 5.42 Derivadas y Señal analítica calculadas para realizar el modelado del perfil geológico. ....                          | 136 |
| Figura N° 5.43 Modelo geológico para determinar el espesor de la provincia geológica de Roraima. ....                               | 137 |
| Figura N° 8.1 Hoja de anotación de los datos electromagnéticos (I). ....  | 144 |
| Figura N° 8.2 Hoja de anotación de los datos electromagnéticos (II). ....   | 145 |
| Figura N° 8.3 Hoja de anotación de los datos magnéticos y radiométricos (I). ....   | 146 |
| Figura N° 8.4 Hoja de anotación de los datos magnéticos y radiométricos (II). ....  | 147 |

**INDICE DE TABLAS**

| <b>TABLA</b>  | <b>PÁGINA</b> |
|---|---------------|
| Tabla N° 1.1 Soluciones de Keating aplicadas a los datos aeromagnéticos.....  | 5             |
| Tabla N° 1.2 Orientación y separación para las frecuencias utilizadas en el levantamiento aerogeofísico.....                                | 9             |
| Tabla N° 1.3 Características del equipo Humming Bird.....   | 9             |
| Tabla N° 1.4 ventanas utilizadas por el equipo Pico-Envirotec GRS-10. ....  | 10            |
| Tabla N° 3.1 Susceptibilidad magnética de algunos tipos de rocas. $\chi \times 10^6$ (SI) (Tomada y modificada del Reynold, 1998). ....     | 35            |
| Tabla N° 4.1 Anomalías obtenidas y extensión de los doce perfiles seleccionados por INGEOMIN a partir del levantamiento aerogeofísico. .... | 53            |
| Tabla N° 4.2 Los doce perfiles seleccionados para realizar en el levantamiento geofísico terrestre. ....                                    | 54            |
| Tabla N° 4.3 Características de salida del transmisor del equipo FDEM-8 (tomada del manual de FDEM-8).....                                  | 63            |
| Tabla N° 4.4 Formato de descarga de los datos del equipo FDEM-8 (modificada del manual de FDEM-8).....                                      | 71            |
| Tabla N° 4.5 Profundidad de penetración para las frecuencias utilizadas.....  | 72            |
| Tabla N° 5.1 Máximos obtenidos mediante el cálculo de la derivada horizontal. ....  | 133           |
| Tabla N° 5.2 Algunos puntos donde se observan cambios de concavidad en la curva de la derivada vertical. ....                               | 133           |
| Tabla N° 5.3 Algunos puntos donde la segunda derivada vertical se hace cero. ....   | 134           |
| Tabla N° 5.4 Algunos máximos de la señal analítica. ....  | 134           |

# ***1 INTRODUCCION***

## ***1.1 Introducción.***

Los diamantes se pueden encontrar en grandes cantidades en depósitos aluviales y en pipas de Kimberlitas. Los Diamante se forman a grandes profundidades (altas presiones y temperaturas) y aparecen en la superficie, ligado siempre a fenómenos volcánicos, en el interior de una roca básica (pobre en sílice) llamada kimberlita.

El nombre de Kimberlitas es debido a la ciudad de Kimberley en Sudáfrica, ciudad donde fue hallado el primer diamante en el mundo en el año 1866, dicho diamante tenía un peso de 21,25 quilates (4,25 g). Luego en el año de 1871 se encontró una nueva evidencia de diamantes el cual pesaba 83,5 quilates (16,7 g) desencadenando así la primera gran búsqueda de diamantes en la región.

Hasta los años 70 la prospección de diamantes estaba principalmente limitada a técnicas geoquímicas y geológicas. Cuando un área era definida mediante estas técnicas geológicas y geoquímicas, y el objetivo no era totalmente obvio, la ubicación final de la pipa de kimberlita se podía conocer mediante la aplicación de métodos geofísicos sobre el área seleccionada.

Los principales métodos geofísicos que han sido utilizados para la detección de las pipas de kimberlitas son: magnéticos, electromagnéticos y radiométricos, así como también métodos gravimétricos.

Los principales países productores de diamante en el mundo son Sudáfrica, Rusia, Australia, Canadá. Venezuela se encuentra entre los primeros 20 países productores de diamante, en la Figura N° 1.1 se pueden observar los principales países productores de diamante en el mundo.

En Venezuela la mayor fuente de diamantes se encuentra ubicada en el sector minero de Guaniamo, al Nor-Oeste del Edo. Bolívar. La producción de diamantes en el sector

Guaniamo fue descubierta en 1970, dicha producción se ha limitado en gran medida a fuentes aluviales.

Desde su descubrimiento el área de Guaniamo tiene reputación de haber producido más 15 millones de quilates, con una producción que está cercana a 1 millón de quilates por año.



Figura N° 1.1 Principales países productores de diamantes en el Mundo (Tomada de [www.diamantes-infos.com](http://www.diamantes-infos.com)).

En la zona de Santa Elena de Uairén también se han encontrado diamantes provenientes de fuentes aluviales principalmente en los ríos Icabarú y Uaiparú. El diamante más grande encontrado en Venezuela se halló en el año 1942 en la población de Santa Elena de Uairén (Léxico estratigráfico de Venezuela, 1997).

Actualmente en la bolsa de diamantes existe una variedad de 122677 diamantes, los cuales se pueden diferenciar por la calidad y forma del tallado, la calidad del pulido, la simetría y la fluorescencia, el peso, el color y la pureza.

Las principales Bolsas del diamante están situadas en: Amberes, Londres, Nueva York, Tel Aviv y Bombay. La más importante es la de Amberes ya que más de la mitad del mercado mundial de diamantes pasa por Amberes ([www.diamantes-infos.com](http://www.diamantes-infos.com)).

## ***1.2 Estructura de la tesis.***

El objetivo principal de este trabajo es verificar a través de un levantamiento geofísico terrestre un conjunto de anomalías geofísicas obtenidas por **INGEOMIN** mediante un levantamiento aerogeofísico. El trabajo consistió en la adquisición, procesamiento e interpretación de datos magnéticos, electromagnéticos en el dominio de la frecuencia y radiométricos.

En el capítulo 1 se presenta una breve introducción donde se explica el levantamiento aerogeofísico realizado por **INGEOMIN** en el año 2008, los objetivos general y específicos de este trabajo, la ubicación de la zona de estudio del levantamiento geofísico terrestre y los trabajos previos realizados en la zona y en otras partes del mundo.

En el capítulo 2 se indican los aspectos generales de la geología en la zona de estudio, así como también una descripción de las pipas kimberlíticas las cuales son de gran importancia en este trabajo.

En el capítulo 3 se explican los principios y fundamentos teóricos en los que se basan cada uno de los métodos aplicados durante la adquisición, así como también los métodos aplicados para detectar contactos entre los cuerpos (derivada vertical, derivada horizontal, segunda derivada vertical y señal analítica).

En el capítulo 4 se explica la metodología empleada en la adquisición de los datos del levantamiento geofísico terrestre, así como también se explica el procesamiento realizado a estos datos.

En el capítulo 5 se observan los resultados obtenidos a través del levantamiento geofísico terrestre, así como también los resultados del levantamiento aerogeofísico y las discusiones realizadas a partir de ambos levantamientos.

En el capítulo 6 se muestran las principales conclusiones obtenidas en la realización de este trabajo, así como también se muestran un conjunto de recomendaciones a seguir en levantamientos similares posteriores a realizarse en la zona.

### ***1.3 Planteamiento del problema.***

A finales del año 2007 y principios del año 2008, el Instituto Nacional de Geología y Minería (*INGEOMIN*) realizó la primera etapa de un levantamiento magnético, electromagnético y gammaespectrométrico en el Estado Bolívar con la finalidad de caracterizar las zonas con más alta potencialidad para la mineralización diamantífera y aurífera en la zona, así como generación de mapas temáticos que incrementen el conocimiento geológico de la región.

Posterior al levantamiento, *INGEOMIN* realizó el procesamiento e interpretación de los datos a partir de la generación de mapas (electromagnéticos, magnéticos, Torio, Potasio, Uranio así como también de las relaciones Th/K, U/Th, U/K), y fueron seleccionados un conjunto de anomalías de interés diamantífero.

A partir de los datos magnéticos, las principales anomalías seleccionadas o consideradas se obtuvieron al aplicar soluciones de Keating sobre el mapa anomalía magnética. Las soluciones de Keating simulan cuerpos cilíndricos con radios diferentes y soterrados a diferentes profundidades y con distintos coeficientes de correlación. Las soluciones utilizadas se muestran en la tabla N° 1.1.

El coeficiente de correlación de Keating es una técnica la cual consiste en el reconocimiento de patrones simples para localizar anomalías magnéticas que se asemejan a la respuesta de una pipa de kimberlita modelo. La respuesta magnética de un cilindro vertical de inmersión se calcula en forma de cuadrícula. Los parámetros del modelo que se pueden ajustar son la profundidad, el radio y la longitud del cilindro, la inclinación y declinación magnética local. La malla del modelo se pasa sobre una rejilla de intensidad magnética total como una "ventana móvil". La correlación entre los datos modelados y observados se calcula en cada nodo de la red utilizando una regresión de primer orden y se

archivan. Los coeficientes de correlación que superan un umbral específico (por ejemplo, el 75%) se conservan para la comparación de los datos de exploración magnética y otros.

| <b>Radio (m)</b> | <b>Profundidad (m)</b> | <b>Coefficiente de correlación (%)</b> |
|------------------|------------------------|--|
| <b>100</b>       | <b>40</b>              | <b>Positivo (0,80 – 0,952)</b>         |
| <b>100</b>       | <b>40</b>              | <b>Negativo (0,80 – 0,952)</b>         |
| <b>250</b>       | <b>40</b>              | <b>Positivo (0,80 -0,873)</b>          |
| <b>250</b>       | <b>40</b>              | <b>Negativo (0,80 – 0,881)</b>         |
| <b>400</b>       | <b>60</b>              | <b>Positivo (0,751 -0,819)</b>         |
| <b>400</b>       | <b>60</b>              | <b>Negativo (0,751 – 0,786)</b>        |
| <b>400</b>       | <b>80</b>              | <b>Positivo (0,751 -0,815)</b>         |
| <b>400</b>       | <b>80</b>              | <b>Negativo (0,751 – 0,815)</b>        |

Tabla N° 1.1 Soluciones de Keating aplicadas a los datos aeromagnéticos.

En la figura N° 1.2 se observa el mapa de anomalía magnética realizado por INGEOMIN y en la figura N° 1.3 se observan las soluciones de Keating en la zona de estudio para este trabajo.

Adicionalmente, fueron consideradas anomalías electromagnéticas en base a la respuesta en fase y cuadratura de la señal.

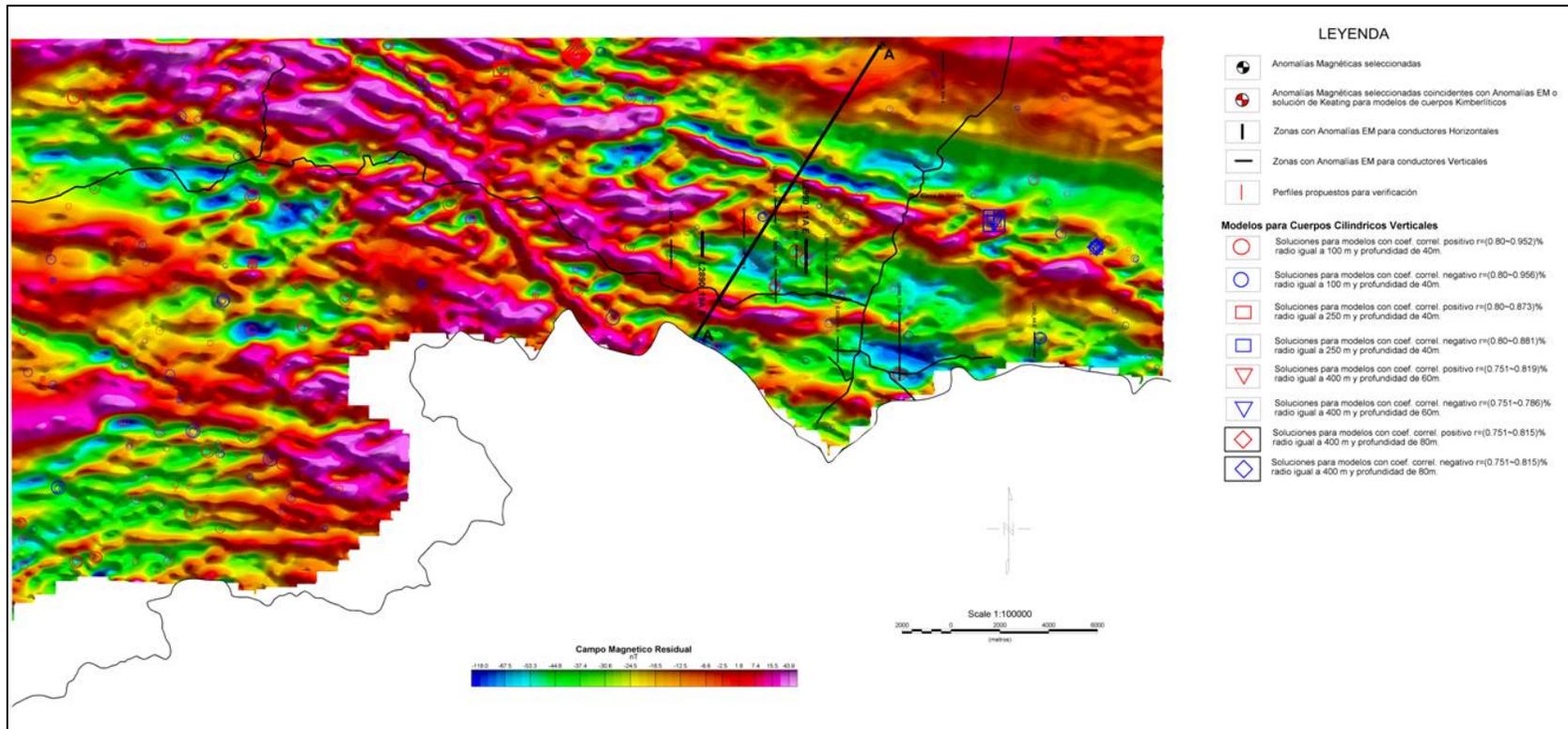


Figura N° 1.2 Mapa de anomalía magnética obtenido en el levantamiento aerogeofísico.

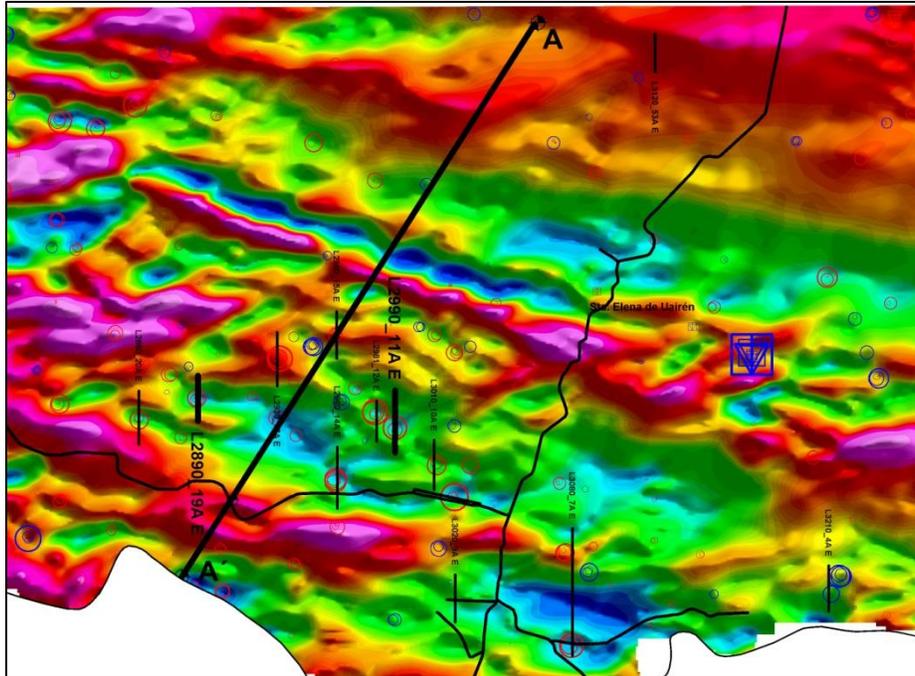


Figura N° 1.3 Se observan los doce perfiles a realizar en el levantamiento geofísico terrestre en los cuales se observan las soluciones de Keating sobre los perfiles.

A partir de la integración del análisis de las anomalías magnéticas (evaluación de Keating y métodos de mejoramiento de señal), anomalías electromagnéticas y radiométricas INGEOMIN seleccionó en total alrededor de 200 anomalías de posible interés diamantífero en la zona del levantamiento aerogeofísico, las cuales se plantea verificarlas a través de levantamientos geofísicos terrestres posteriores. En este trabajo se realizó la verificación mediante un levantamiento geofísico (Magnético, Electromagnético y Radiométrico) terrestre de 12 de las anomalías seleccionadas.

#### ***1.4 Características del levantamiento aerogeofísico realizado por INGEOMIN.***

El levantamiento aerogeofísico (helitransportado) se realizó a una velocidad de vuelo promedio de 100 Km/h y a una altura de 80m, dicho vuelo se realizó en la dirección Norte-Sur con una separación entre líneas de vuelo de 500m y con líneas de amarre orientadas

Este-Oeste con espaciamento de 5000m, en este levantamiento se aplicaron tres (3) métodos geofísicos como lo son: magnético, gammaespectrométrico y electromagnético en el dominio de la frecuencia.

El equipo utilizado en dicho levantamiento aerogeofísico para la adquisición de los datos electromagnéticos en el dominio de la frecuencia fue el *Hummingbird Electromagnetic System* de *GEOTECH Ltd.* (Figura N° 1.4) este es el equipo electromagnético más avanzado en el dominio de la frecuencia hoy en día (adicionalmente el equipo posee un magnetómetro de vapor de cesio integrado el cual fue el utilizado para tomar las medidas magnéticas).



Figura N° 1.4 Equipo Humming Bird utilizado en el levantamiento aerogeofísico.

El equipo electromagnético trabaja con cinco frecuencias, y se pueden utilizar diferentes configuraciones (coplanar y coaxial) y separadas a distancias diferentes como se observa en la tabla N° 1.2.

| <b>Frecuencia</b> | <b>Orientación</b> | <b>Separación de bobinas</b> | <b>Canal</b>      |
|-------------------|--------------------|------------------------------|-------------------|
| <b>880 Hz.</b>    | Coplanar           | 6 metros                     | Fase y Cuadratura |
| <b>980 Hz.</b>    | Coaxial            | 6 metros                     | Fase y Cuadratura |
| <b>6000 Hz.</b>   | Coplanar           | 6,3 metros                   | Fase y Cuadratura |
| <b>7000 Hz.</b>   | Coaxial            | 6,3 metros                   | Fase y Cuadratura |
| <b>34000 Hz.</b>  | Coplanar           | 4,9 metros                   | Fase y Cuadratura |

Tabla N° 1.2 Orientación y separación para las frecuencias utilizadas en el levantamiento aerogeofísico.

El *Hummingbird Electromagnetic System* posee un tiempo de medición para cada uno de los métodos (magnético y electromagnético) de 0,1 seg., es decir que el equipo tomaba las medidas aproximadamente cada 3mts dicha distancia dependía de la velocidad del helicóptero a través de la línea de vuelo. Otras características con las que cuenta este equipo se especifican en la tabla N° 1.3.

|                             |  |
|-----------------------------|--|
| <b>Rango de temperatura</b> | <b>-40°C a 40°C</b>                      |
| <b>Tiempo de muestreo</b>   | <b>0,1 seg.</b>                          |
| <b>Nivel de ruido</b>       | <b>2 a 4 ppm en condiciones ideales.</b> |
| <b>Fuente de energía</b>    | <b>(22 a 28)V DC, 30A máximo.</b>        |
| <b>Memoria</b>              | <b>Disco duro extraíble de 540 MB</b>    |
| <b>Peso</b>                 | <b>195 Kg.</b>                           |
| <b>Longitud</b>             | <b>7,5 m, dividido en tres secciones</b> |

Tabla N° 1.3 Características del equipo Humming Bird.

El equipo utilizado para la adquisición de los datos gammaespectrométrico en el levantamiento aerogeofísico fue el espectrómetro de rayos gamma Pico-Envirotec GRS-10 de 256 canales. Dicho equipo es un espectrómetro avanzado con detectores de NaI(Tl) de 16,8 litros orientado hacia abajo y de 4,2 litros orientado hacia arriba.

Con este equipo se realizaron medidas de radiación de conteo total (CT), Torio (Th), Uranio (U) y Potasio (K), dichas medidas fueron tomadas con un intervalo de muestreo de 1seg, es decir a una distancia aproximada de 30m la cual dependía de la velocidad del helicóptero. El equipo se encontraba en el interior del helicóptero y es auto-calibrado. Las ventanas de medición utilizadas para el Uranio, Torio, Potasio y Conteo total son mostradas a continuación en la tabla N° 1.4.

| <b>Elemento</b>    | <b>Umbral inferior (MeV)</b> | <b>Umbral superior (MeV)</b> |
|--------------------|------------------------------|------------------------------|
| <b>Campo Total</b> | <b>0,41</b>                  | <b>2,81</b>                  |
| <b>Potasio</b>     | <b>1,37</b>                  | <b>1,57</b>                  |
| <b>Uranio</b>      | <b>1,66</b>                  | <b>1,86</b>                  |
| <b>Torio</b>       | <b>2,41</b>                  | <b>2,81</b>                  |

Tabla N° 1.4 ventanas utilizadas por el equipo Pico-Envirotec GRS-10.

### ***1.5 Ubicación del área de estudio.***

La zona de estudio se encuentra ubicada al Sur-Este de Venezuela, específicamente en el Estado Bolívar en los sectores Icabarú y Santa Elena de Uairén, frontera con la Republica Federativa de Brasil. En la figura N° 1.3 se observa el área de estudio en la cual se realizó el levantamiento geofísico terrestre de los doce (12) perfiles seleccionados por *INGEOMIN* para ser verificados en esta primera etapa.

### ***1.6 Objetivos.***

#### ***1.6.1 Objetivo General.***

Aplicar métodos magnéticos, electromagnéticos y radiométricos en una zona de Santa Elena de Uairén con la finalidad de identificar las dimensiones y morfología específica de posibles zonas de interés diamantífero.

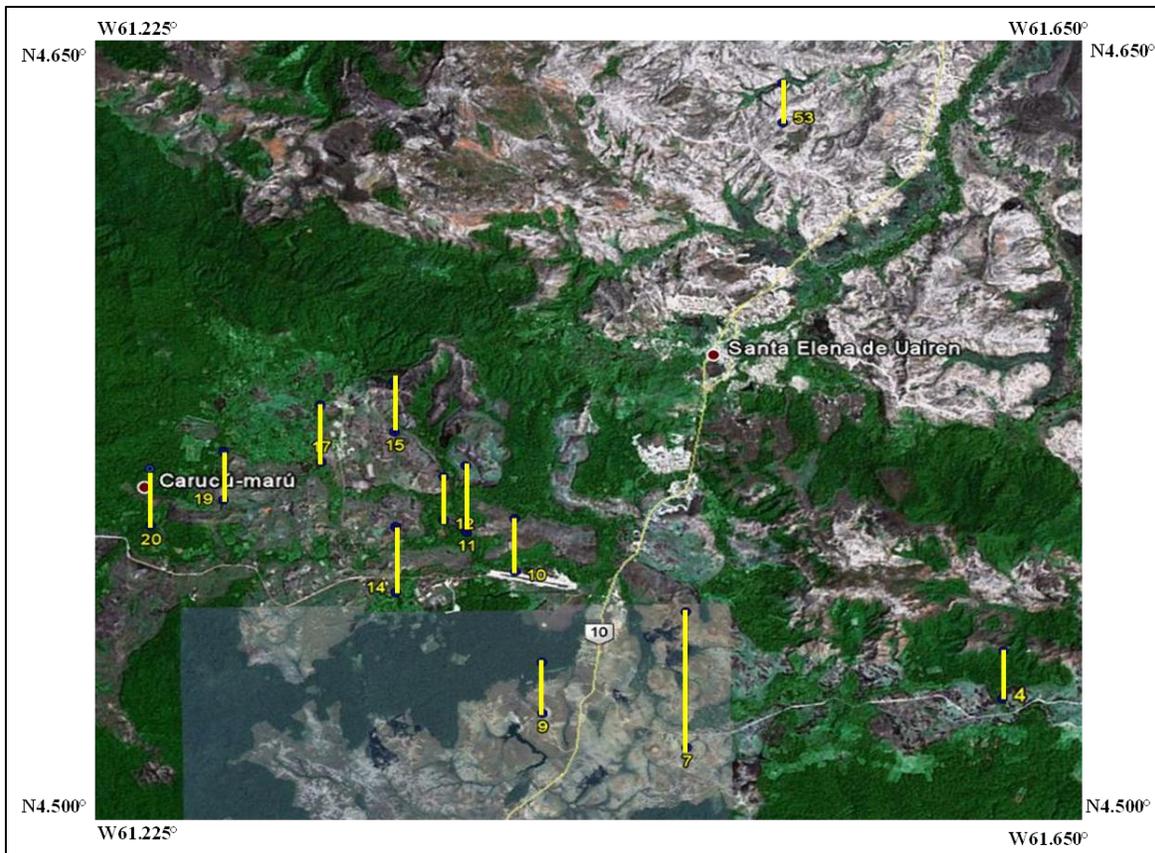


Figura N° 1.5 Área de estudio del levantamiento geofísico terrestre.

### 1.6.2 *Objetivos Específicos.*

1. Adquirir datos terrestres radiométricos, magnéticos y electromagnéticos a lo largo de perfiles que corten las anomalías seleccionadas del levantamiento aerogeofísico realizado previo en el área por *INGEOMIN*.
2. Realizar el procesamiento de los datos radiométricos, magnéticos y electromagnéticos terrestres haciendo uso del programa *Oasis Montaj v.7.1.0*.
3. Realizar la evaluación y comparación de las anomalías obtenidas en tierra con las aéreas para la posterior selección de perfiles de posible interés diamantífero.
4. Realizar un modelado de las principales anomalías magnéticas verificadas utilizando la extensión *GM-SYS* del programa *Oasis Montaj v.7.1.0* y obtener la morfología y dimensiones específicas de los posibles cuerpos causantes de las anomalías geofísicas.

5. Determinar el espesor de la Provincia Geológica de Roraima al Nor-Este de la zona de estudio a través de un perfil geológico obtenido a partir de los datos magnéticos aéreos.

### ***1.7 Antecedentes.***

Las zonas diamantíferas venezolanas se encuentran situadas en el Estado Bolívar, en Guaniamo y en la Gran Sabana. En Venezuela todos los distritos diamantíferos se relacionan íntimamente con la Formación Roraima, una extensa unidad precámbrica constituida por conglomerados, areniscas lutitas y cuerpos de diabasas, que ocupa gran parte de la región sur del país. Muy probablemente la fuente de diamantes esté directamente asociada con conglomerados basales de esa formación (Lexico estratigrafico de Venezuela).

La explotación de diamantes en Venezuela ha sido a nivel de minería rudimentaria, la cual se encuentra en depósitos aluviales. Los depósitos aluviales tropicales (los placeres) son saturados con agua. Se usan dragas flotantes para minar los depósitos aluviales. Este tipo de explotación es el método menos caro de la minería.

Mundialmente han sido aplicadas las técnicas de prospección geofísica para la localización de pipas de Kimberlitas (Macnae, 1979). En un gran levantamiento realizado en Sudáfrica las técnicas electromagnéticas demostraron ser muy eficaces a la hora de detectar la presencia de arcillas erosionadas ubicadas sobre las pipas de kimberlita. Así como también los métodos magnéticos aplicados en levantamientos geofísicos en la antigua U.S.S.R demostraron ser los más útiles a la hora de detectar las pipas de kimberlitas, los cuales también pueden ser aplicados mediante levantamiento geofísicos aéreos. En dicho trabajo igualmente se encontró que los métodos radiométricos en levantamientos terrestres son de utilidad secundaria en la identificación de pipas de kimberlitas.

A nivel de exploración en Venezuela aun no se han realizados levantamientos geofísicos para la búsqueda de pipas kimberlitas. Algunos de los trabajos realizados en Venezuela han sido a nivel geológico y se explican a continuación.

Somoza (2005) realizó un estudio geológico en el sector minero de Guaniamo, Estado Bolívar con la finalidad de delimitar y reconocer las unidades geológicas. De acuerdo con análisis de laboratorio de las muestras recolectadas en la zona de estudio se encontraron rocas graníticas y volcánicas muy lateritizadas pertenecientes a la Provincia Geológica de Cuchivero. En dicho trabajo no se encontraron indicios de rocas kimberlíticas, aunque se encontraron muestras de brechas periodotíticas con un posible origen kimberlítico debido a algunas características presentes en la roca.

Newman (et al 2008) recolectaron 458 cristales de diamante provenientes de la región Santa Elena de Uairén, específicamente en los placeres aluvionales localizados en los ríos Icabarú, Uaiparú, El Mosquito y Surucun. A dichos diamantes entre las variedades gemológicas e industriales cuyo peso promedio de los cristales fue entre 0,2 y 1,0 quilates se les aplicó Microscopia Electrónica de Barrido para la caracterización de la morfología de los mismos. Se consiguió reconocer figuras superficiales como trigons, cuadrons, crecimiento en bloque, crecimiento laminar, estrías, surcos y colinas que permitieron establecer la evolución morfológica, partiendo del octaedro primitivo y pasando por fenómenos de disolución originando formas de transición. En la figura N° 1.6 se observan alguna de las formas obtenidas en este trabajo.

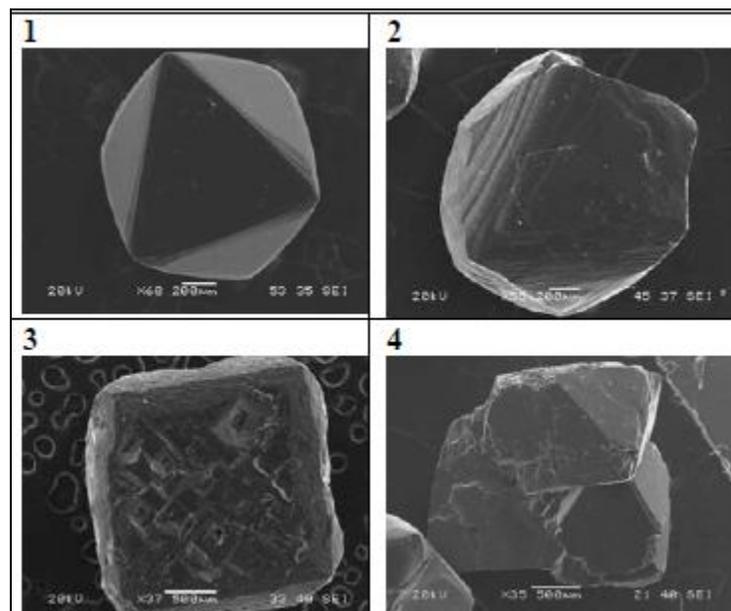


Figura N° 1.6 Fotomicrografías de cristales de diamante donde se puede observar algunas variedades morfológicas características: 1 Octaedro, 2 Trioctaedro, 3 Cubo, 4 geminado policristalino,

A partir del levantamiento aerogeofísico recientemente realizado por INGEOMIN, mediante los mapas de Uranio, Torio y Potasio realizados y el mapa ternario, se cartografiaron las diferentes variedades litológicas de la zona. Esto permitió caracterizar los grupos geológicos de Roraima y Cuchivero por la distribución superficial de las concentraciones de estos elementos, así como identificar algunas diferencias con el mapa geológico vigente para la región (Guevara, 2008).

En la figura N° 1.7 se observa el mapa de Uranio obtenido en la zona donde se realizó el levantamiento aerogeofísico. Guevara (2008), obtuvo los siguientes resultados en cada una de las zonas del mapa:

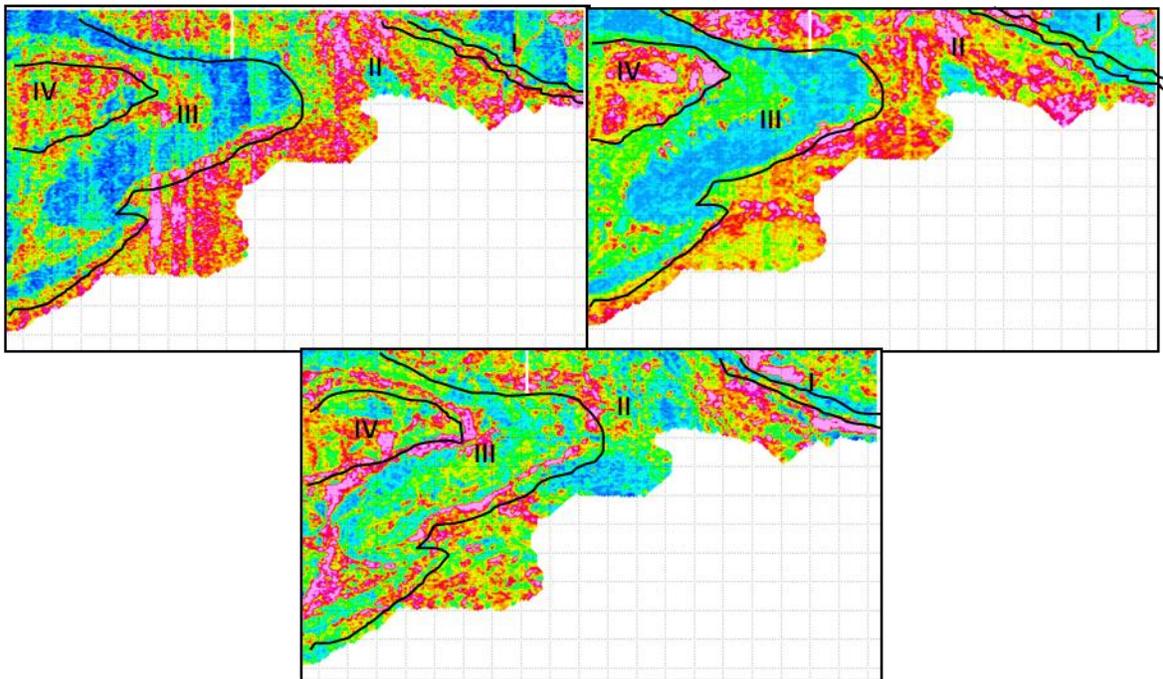


Figura N° 1.7 Mapas de Uranio (superior izquierdo), Torio (superior derecho) y Potasio (Inferior) (Tomado de Guevara, 2008).

**Zona I:** observo un contenido de bajo a ausente de uranio, torio y potasio.

**Zona II:** alto contenido de uranio y torio y de bajo a intermedio de potasio.

**Zona III:** dos sectores bien diferenciados en el mapa de torio, uno con bajo contenido y el otro con contenido intermedio. En el mapa de uranio se observa el mismo comportamiento. En el mapa de potasio se observa contenido de intermedio a alto.

**Zona IV:** Contenido intermedio a alto de torio, de intermedio a bajo en uranio y potasio.

## **2 MARCO GEOLOGICO**

En nuestra zona de estudio afloran principalmente las rocas de dos provincias geológicas como son La Provincia Geológica de Roraima y La Provincia Geológica de Cuchivero tal como se observa en el mapa de la figura N° 2.1.

### **2.1 La Provincia Geológica de Roraima.**

La Provincia Geológica de Roraima (1500 ~ 1800 ma) esta dividida en cuatro formaciones como lo son: Uairén, Cuquenán, Uaimapué y Matauí de la más antigua a la más joven (Mendoza, 2000).

- **La Formación Uairén** con un espesor de 850 m aproximadamente, es la formación basal de la Provincia Geológica de Roraima, la cual descansa sobre una superficie de rocas metamorizadas y tectonizadas de origen ígneo, de la Formación Caicara de Provincia Geológica de Cuchivero, está compuesta de areniscas cuarcíticas de grano grueso bien escogidas con estratificación cruzada y festeonada, intercalada con lentes conglomeraticos de matriz silíceo y con escasas limolitas arcillosas, algunas lutitas y una capa superior delgada (2-4 m) de laterita hematítica. Esta formación aflora en y cerca de Santa Elena de Uairén, al final de la Gran Sabana (Mendoza, 2000).

Se ha evidenciado que la base de la secuencia en el área fue intrusionada por diques concordantes y discordantes de diabasas (Lexico estratigrafico de Venezuela).

- **La Formación Cuquenán** con un espesor entre 50m y 100m se encuentra concordante encima de la Formación Uairén está integrada de paquetes alternantes, compuestos cada uno de tope a base de areniscas feldespáticas, limolitas feldespáticas y lutitas o arcillitas (Mendoza, 2000).
- **La Formación Uaimapué** con un espesor máximo de 250m, se encuentra concordante sobre la Formación Cuquenán, esta formación puede ser separada

también en dos miembros, uno inferior similar litológicamente a la Formación Uairén, constituido por areniscas de grano fino a grueso con estratificación cruzada y conglomerados intercalados con delgadas capas de limolitas y arcillitas; y un miembro superior formado por arcosas, jaspes, limolitas y tobas vítreas de variados colores (Mendoza, 2000).

- **La Formación Matauí** con un espesor de 600m, es la unidad más joven de la provincia Geológica de Roraima y suprayace concordante sobre la Formación Uaimapué y ocupa gran parte de los elevados y verticales tepuis, está conformada por ortocuarcitas y areniscas cuarzo-feldespáticas con estratificación cruzada, marcas de oleaje y areniscas masivas con algunos horizontes muy delgados de areniscas arcillosas o lutaceas (Mendoza, 2000).

Como se observa en la figura N° 2.1 en el sector Icabarú afloran las formaciones Uairén y Uaimapué (Guevara, et al. 2008).

## ***2.2 La Provincia Geológica de Cuchivero.***

La Provincia Geológica de Cuchivero (1700 ~ 2000 ma), está constituida por un conjunto de rocas ígneas extrusivas e intrusivas comagmáticas, predominantemente ácidas, con menores cantidades de ígneas básicas y algunos sedimentos. Todas estas rocas muestran un metamorfismo de bajo grado. Las rocas de esta Provincia afloran desde los alrededores de Santa Elena de Uairén, siguen hacia el sur hasta Brasil y al oeste bordeando a las rocas del grupo Roraima, a la cual conforman el basamento (Chirinos, et al, 2008).

Las estructuras más resaltantes en esta provincia son los diques, en menor escala las fallas, generalmente de dirección norte-oeste; también son comunes las foliaciones y las diaclasas (Somoza, 2005).

En el sector Icabarú, predomina la Formación Caicara (Figura N° 2.1).

**Formación Caicara:** está constituida por un conjunto de rocas volcánicas predominantemente ácidas, tales como riolitas y riolitas porfídicas y porfiríticas con matriz

de grano fino a medio, seguidas en orden de abundancias por riodacitas y dacitas porfídicas (Lexico estratigrafico de Venezuela, 1997).

Exhiben una alineación estructural N5°-10°W y buzamiento de muy alto a vertical. Se observa además intercalaciones de rocas muy finas, afaníticas, muy ricas en cuarzo que probablemente representan tobas cristalinas silicificadas (ignimbritas). La composición mineralógica es muy similar en toda la región; cuarzo (30-60%), feldespato (25-60%). La biotita es el principal constituyente ferromagnesiano (hasta un 5%). Como minerales accesorios se distinguen: epidoto, muscovita, pirita y óxidos de hierro (Lexico Estratigrafico de Venezuela, 1997).

### **2.3 Kimberlitas.**

Las kimberlitas son rocas ígneas ultrabásicas, ricas en volátiles (alto contenido de H<sub>2</sub>O y CO<sub>2</sub>), potasio (con una gran relación K/Na) que tienen una textura distintiva inequigranular resultante de la presencia de macrocristales situados esencialmente en una matriz microporfirítica (Macnae, 1979).

Las rocas kimberlitas pueden ocurrir en sills, diques o diatremas (pipas). Los sills y diques son raramente explotados, pero uno de cada cien pipas contiene diamantes en cantidades económicas (Smith, 1996)

La matriz contiene como prominentes primarios fenocristales y/o componentes de masa fundamental, olivino y varios de los siguientes minerales: flogopita, calcita, la serpentina, dióxidos, monticellita, apatita, espinelas e ilmenita. Otros minerales primarios pueden estar presentes en cantidades accesorias (Macnae, 1979).

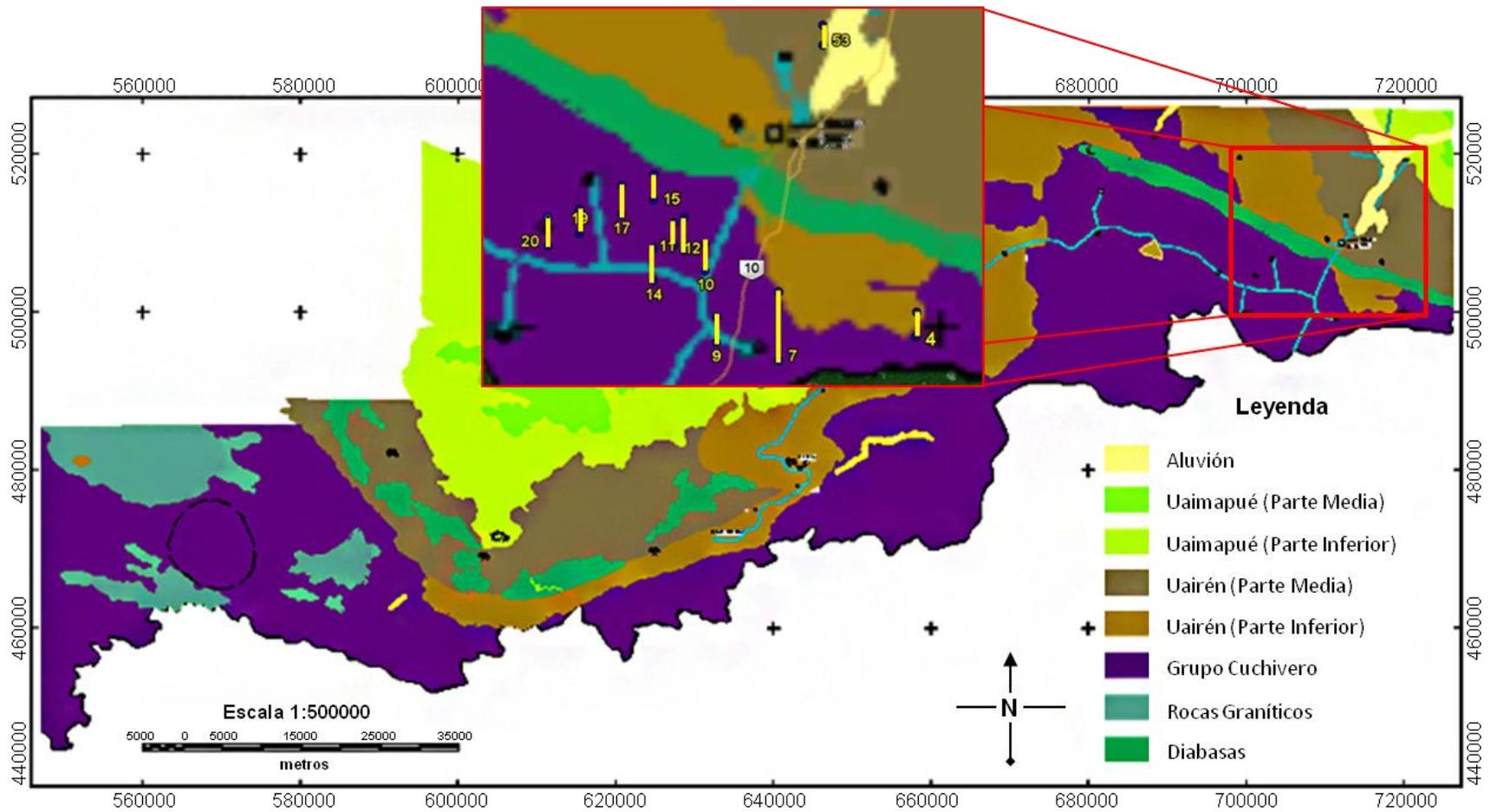


Figura N° 2.1 Mapa Geológico del sector Icabarú, en la imagen con ampliada se observan los 12 perfiles a verificar en este trabajo (Guevara et al, 2008).

### **2.3.1 *Características macroscópicas de las Kimberlitas.***

Los macrocristales (y en algunos casos megacristales) pertenecen casi exclusivamente a un conjunto de minerales anhedrales, criptogénicos (de origen oculto), minerales ferromagnesianos que incluyen olivino, flogopita, picroilmenita (Ilmenita con un alto contenido de MgO), granate de magnesio, dióxido de cromo y enstatita. Olivino es muy abundante en relación con los otros minerales, que no tienen que estar todos los presentes. Además de macrocristales, los granos más pequeños que pertenecen al mismo conjunto también ocurren. Las Kimberlitas pueden contener diamantes, pero sólo como un componente muy raro (Macnae, 1979).

Las kimberlitas comúnmente contienen inclusiones redondeadas de una variedad de rocas ultramáficas caracterizadas por peridotitas, eclogitas y piroxenitas derivadas del manto. Cantidades variables de xenolitos de la corteza y xenocristales también pueden estar presentes (Macnae, 1979).

Los diamantes se encuentran en muchos tipos de roca, incluyendo sedimentos consolidados, rocas metamórficas, kimberlita, y lamproitas. Pero sólo los dos últimos tipos ofrecen los diamantes en las concentraciones económicas (Menezes y García, 2007).

### **2.3.2 *Emplazamiento de las Pipas de Kimberlitas.***

Se supone que el modo de emplazamiento de las pipas kimberlíticas consiste en rápidas erupciones del manto, muy violentas y muy explosivas debido a la descompresión de los gases en su subida. Al llegar a la superficie forman una depresión en forma de cráter relleno de material proveniente del manto y de material derivado de la roca encajante durante su ascenso (piroclastos) como se observa en la figura N° 2.2 (Somoza, 2005).

Cercano a la superficie, la forma de las pipas de kimberlitas varían de circular a completamente elípticas. (Macnae, 1979) El modelo clásico de una pipa se asemeja a una forma de zanahoria o geometría cónica (Menezes y García, 2007).

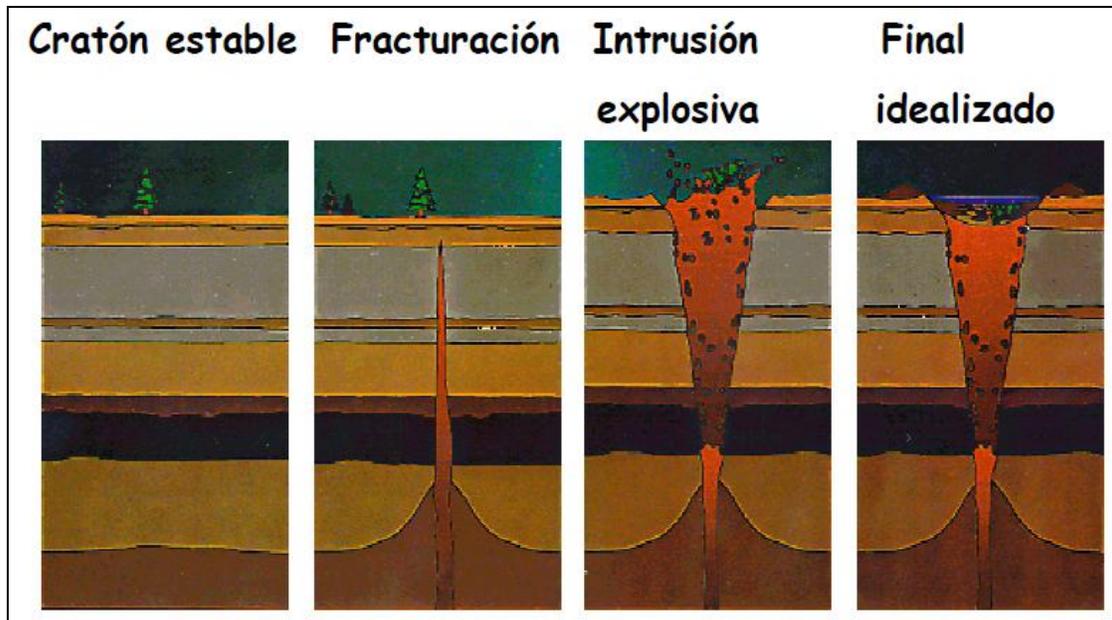


Figura N° 2.2 Método de emplazamiento de las pipas de Kimberlitas. (Tomada de [www.mountainprovince.com](http://www.mountainprovince.com))

Tres tipos de cuerpos de kimberlitas han sido reconocidos. Cada tipo se caracteriza por su geometría y geología diferente. Tienen en común la pipa como estructura.

Cuerpos de kimberlita clase 1: se encuentran en rocas duras del basamento cristalino (ejemplo: kimberlitas Venecia y Kimberley en Suráfrica). Ellos consisten de pipas empinadas con forma de zanahoria, compuesta de tres zonas distintas: la zona raíz, la zona de la pipa y la zona cráter. La zona cráter raramente se conserva debido a la erosión después del emplazamiento. Se extienden a una profundidad aproximada de 2Km y pueden tener diámetros de varios cientos de metros. Las pipas pueden tener inclinación en las paredes entre  $75^\circ$  y  $85^\circ$ .

Cuerpos de kimberlitas clase 2: son considerados poco profundos (<1300m) y cráteres pequeños (<200m) que son llenados predominantemente con material piroclásticos (ejemplo: kimberlita Fort à la Corne en Canada). Estas kimberlitas son emplazadas a través de sedimentos poco consolidados.

Cuerpos de kimberlita clase 3: son pipas con pequeña inclinación y son rellenados con kimberlita volcanoclastica resedimentada (ejemplo: kimberlita Lac de Gras, Canada).

Rocas de kimberlitas han sido encontradas en algunos de estos cuerpos. Las kimberlitas de clase 3 son encontradas en ambientes donde el basamento de la roca está cubierto por una capa de sedimentos poco consolidados. Estas kimberlitas son poco profundas que se extienden hasta profundidades de 400 a 500 m en el basamento (Nermoen, 2006).

### 2.3.3 Propiedades físicas de las kimberlitas.

La conductividad de una kimberlita es variable porque depende de la porosidad, la composición química, la profundidad, la meteorización, alteración, y el contraste con la roca caja (Menezes y García, 2007).

Debido a su alta porosidad y permeabilidad, los materiales kimberlíticos erosionan muy fácilmente. Normalmente, las kimberlitas tienen tres zonas principales cuando estas se erosionan y meteorizan, específicamente, una zona de material de textura friable llamado tierra amarilla (*yellow ground*) es la parte meteorizada más cerca de la superficie, mas hacia abajo una zona de transición llamada tierra azul (*blue ground*), y luego la roca fresca de la kimberlita (*hardebank*), figura 3.2 (Macnae, 1979).

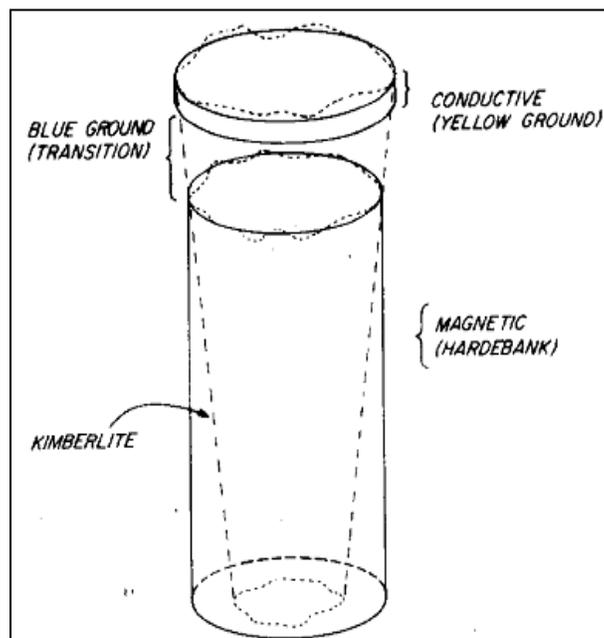


Figura N° 2.3 Modelo utilizado para obtener respuestas geofísicas de una kimberlita meteorizada casi circular (tomada de Macnae, 1979).

La tierra amarilla (*yellow ground*) consiste principalmente de arcillas. La meteorización de la Kimberlita Finsch en Sudáfrica geoquímicamente, indica que el CaO, el MgO, y el CO<sub>2</sub> son lixiviados cerca de la superficie, el CaO y el CO<sub>2</sub> son redepositados en la zona media (tierra azul). La concentración total de Fe está empobrecida en la zona media, esta es posiblemente una consecuencia de la reacción en la que la magnetita se convierte en limonita y otros hidróxidos de hierro. Como resultado, tanto la tierra amarilla y azul tienen menores susceptibilidades que la kimberlita inalterada conteniendo magnetita (Macnae, 1979).

Las kimberlita en general contienen de 5 a 10 % de hierro en forma de óxidos. En el material inalterado predominantemente, algunos de estos están presentes como magnetitas. Ilmenitas ricas en magnesio están presentes en toda la pipa, y dependiendo de la concentración de titanio en la ilmenita, puede o no ser magnético.

Debido a su alta susceptibilidad, la magnetita dominará en la respuesta magnética de una pipa kimberlita. Por lo tanto la fuente de una anomalía magnética sobre una pipa está localizada predominantemente en la kimberlita inalterada (Hardebank) y puede ser visto como un cilindro vertical a cierta profundidad bajo la superficie (Macnae, 1979).

Las pipas de kimberlita son moderadamente a fuertemente magnetizadas, con susceptibilidades magnéticas en el rango de 1 a  $80 \times 10^{-3}$  en el SI (0,00007 – 0,0063 en cgs). Sin embargo, la respuesta magnética observada puede variar en función de varios factores, dependiendo de la meteorización química y el contenido de minerales magnéticos, la profundidad, el nivel de erosión, y la magnetización remanente, así como la orientación e intensidad del campo inductor (Menezes y García, 2007).

La respuesta electromagnética sobre una pipa kimberlita está asociada a la parte meteorizada de la pipa la cual es mas conductora que las rocas a su alrededor, el contraste entre la conductividad es generalmente entre esta capa meteorizada y las rocas alrededor. Esta capa conductora puede ser modelada como un disco que se encuentra en la parte superior de la kimberlita (Smith, et al, 1996).

La zona meteorizada algunas veces presenta señales radiométricas (Macnae, 1979). Aunque los datos radiométricos a menudo son adquiridos con los datos aeromagnéticos,

hay poco ejemplos de datos publicados sobre datos radiométricos sobre exploración de kimberlitas (Smith, et al, 1996).

#### **2.3.4 Dimensiones de las kimberlitas.**

El diámetro de una kimberlita en la superficie es de unos cientos de metros, los cuales varían desde los 200m y pueden llegar hasta los 1000m como es el caso de la mina de diamantes más grande del mundo, la mina Mirny (Siberia, Rusia), esta mina tiene un diámetro aproximado de 1025m y una profundidad de 525m, en la figura N° 2.4 se observa la superficie de esta mina.



Figura N° 2.4 Mina Mirny en Rusia (tomada de [www.futuropasado.com](http://www.futuropasado.com))

### 3 MARCO TEORICO.

#### 3.1 Métodos Radiométricos.

Los métodos radiométricos están basados en el registro de la radioactividad emitida por ciertos isótopos minerales que se encuentran en el subsuelo, por ejemplo Uranio ( $U^{238}$ ), Torio ( $Th^{232}$ ) y Potasio ( $K^{40}$ ) (Cassiraga, 1999).

El estudio de la radioactividad de las rocas y los minerales es de gran importancia en geología y geofísica. Por un lado, el calor producido por la desintegración de un material radioactivo es el factor más importante en el establecimiento de las condiciones térmicas dentro de la Tierra. Por otro lado la tasa de desintegración radioactiva de ciertos elementos en las rocas, proporciona una herramienta poderosa para datar eventos geológicos como la formación de las rocas en la corteza terrestre (Cassiraga, 1999).

Algunos de los isótopos presentes en la naturaleza son inestables y pueden desintegrarse espontáneamente para formar otros elementos. Esta desintegración está acompañada por la emisión de energía y de partículas de masa y constituye lo que se conoce como radioactividad (Cassiraga, 1999).

Podemos encontrar tres tipos diferentes de emisiones radioactivas: partículas alfa, beta y gamma (radiación electromagnética). Dado que los rayos alfa son mucho menos penetrantes y bastan unos pocos centímetros de cobertura sobre el emisor para que no puedan detectarse, la búsqueda geofísica de elementos radioactivos en la corteza terrestre se limita a la localización de áreas con alta radiación gamma y beta. En general, el nivel de actividad natural que se puede medir en las rocas y minerales es bajo. Cuando una cantidad de actividad anormalmente alta es detectada en una roca, se deberá en general a la existencia de trazas de materiales como el uranio, potasio o el torio (Cassiraga, 1999).

a) **Radiación alfa ( $\alpha$ ):** Son flujos de partículas cargadas positivamente compuestas por dos neutrones y dos protones (núcleos de helio) como se observa en la figura N° 3.1. Estas partículas son desviadas por campos eléctricos y magnéticos. Son poco penetrantes

debido a su gran tamaño aunque muy ionizantes. Las partículas alfa son muy energéticas (Eisberg & Resnick, 2006). A continuación se muestra la fórmula para la desintegración de partículas alfa:

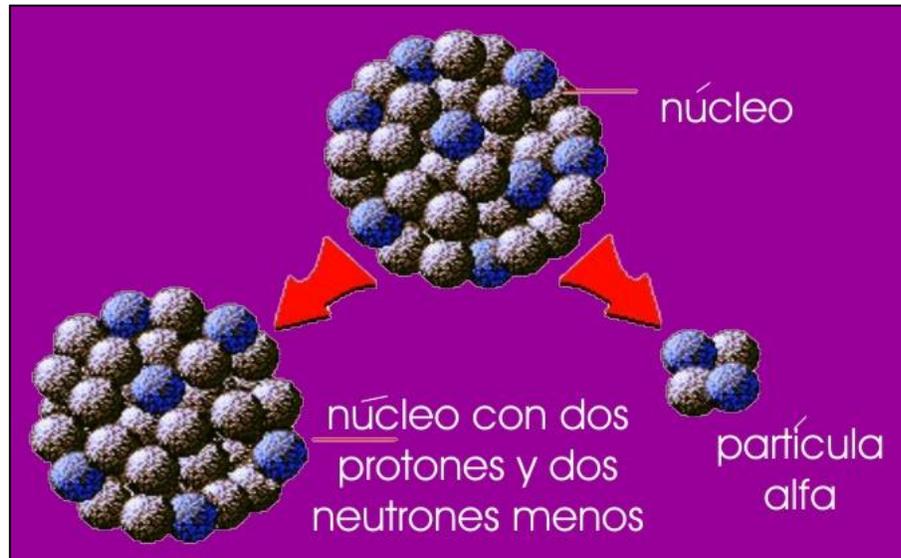
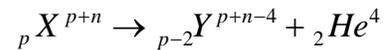
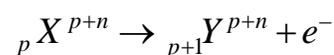


Figura N° 3.1 Partículas alfa (tomada de <http://sagan-gea.org>)

- b) **Radiación beta ( $\beta$ ):** Son flujos de electrones (beta negativas) o positrones (beta positivas) resultantes de la desintegración de los neutrones o protones del núcleo cuando este se encuentra en un estado excitado, en la figura N° 3.2 se observa una partícula  $\beta$ . Son desviadas por campos magnéticos. Son más penetrante aunque su poder de ionización no es tan elevado como el de las partículas alfa. Por lo tanto cuando un átomo expulsa una partícula beta aumenta o disminuye su número atómico una unidad (debido al protón ganado o perdido) (Eisberg & Resnick, 2006). La fórmula de desintegración de partículas beta es la siguiente:



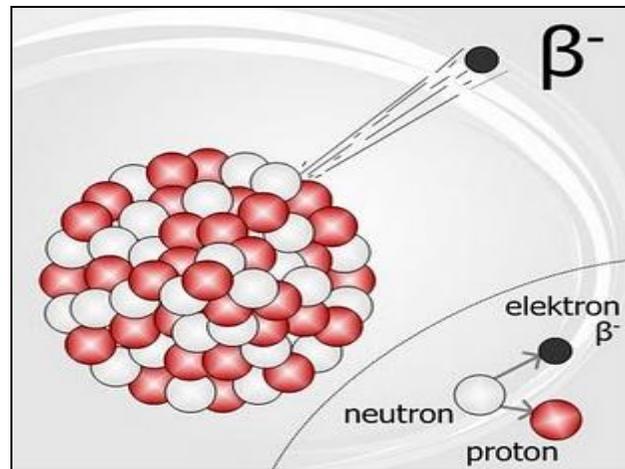


Figura N° 3.2 Partículas Beta (tomada de <http://oxoacidosenaccion.blogspot.com>)

- c) **Radiación gamma ( $\gamma$ ):** Son ondas electromagnéticas de longitud de onda corta (Figura N° 3.3), lo cual las hace muy penetrantes y energéticas por lo cual se necesitan capas muy gruesas de plomo u hormigón para detenerlas. Este tipo de radiación acompaña a las radiaciones alfa y beta. En esta radiación el núcleo se desprende de la energía que le sobra para pasar a otro estado de energía más bajo emitiendo rayos gamma, o sea fotones muy energéticos (Eisberg & Resnick, 2006). Fórmula para la desintegración gamma:

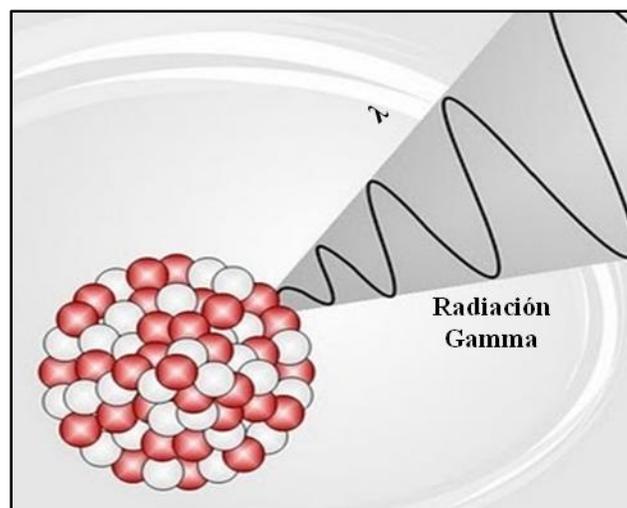
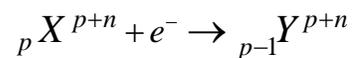


Figura N° 3.3 Radiación Gamma (Tomada de <http://oxoacidosenaccion.blogspot.com>)

En la figura N° 3.4 se observan los tres tipos de radiaciones (alfa, beta y gamma) en la cual se observa que las partículas alfa son las menos penetrantes así como también que la radiación gamma es la de mayor penetración.

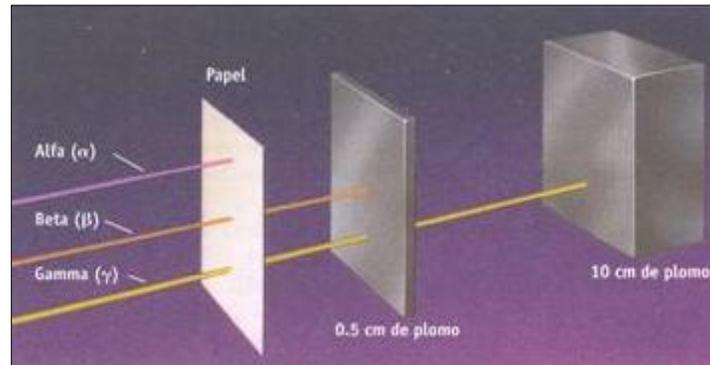


Figura N° 3.4 Tipos de radiaciones (tomada de [www.educarchile.cl](http://www.educarchile.cl))

### 3.1.1 *Decaimiento Radioactivo.*

La desintegración radioactiva es un proceso aleatorio y se expresa en términos de la probabilidad de que una partícula de un núcleo escape a través de la barrera de potencial que lo liga a ese núcleo. Esta probabilidad no está afectada por condiciones físicas tales como la presión y la temperatura, y depende del número de átomos presentes, lo que puede expresarse matemáticamente como:

$$\frac{dN_p}{dt} = -\lambda N_p, \quad [3.1]$$

cuya solución tiene la forma siguiente:

$$N_p = N_0 \cdot e^{-\lambda \cdot t} \quad [3.2]$$

Donde  $N_0$  es el número de átomos para el tiempo inicial,  $N_p$  es el número de átomos presentes en el instante  $t$ , y  $\lambda$  es la constante de desintegración que es característica de cada especie química. El hecho de que esta constante no esté afectada por condiciones externas como la presión, la temperatura y la composición química, y de que pueda ser

conocida para los distintos elementos radioactivos, permite utilizar la formulación anterior para calcular la edad de eventos geológicos tal como la formación de las rocas (Cassiraga, 1999).

A pesar de que los métodos geofísicos radioactivos adquirieron importancia con la demanda de uranio para las centrales nucleares, su aplicación no se restringe a la búsqueda de este tipo de materiales. Compuestos radioactivos pueden ser detectados también en el agua y en el petróleo, como así también en yacimientos de oro u otros minerales. Un reconocimiento radiométrico puede servir para cartografiar distintos tipos de rocas en función de su contenido típico de elementos radioactivos. Se sabe, por ejemplo, que los valores correspondientes al granito y a las pizarras son claramente superiores a los demás tipos de rocas, y que la radioactividad se concentra frecuentemente a lo largo de las fallas. La interpretación de los datos radioactivos es principalmente cualitativa y suele hacerse en relación a otras fuentes de prospección tales como las magnéticas (Cassiraga, 1999).

La aplicación más importante en la detección de rayos gamma se realiza en reconocimientos de perforaciones. Sin embargo los levantamientos radioactivos que miden radiación gamma pueden implementarse sobre un avión o un helicóptero debido a que viajan unos cientos de metros. Por medio de un espectrómetro es posible detectar la presencia de Potasio, Uranio o Torio en el terreno. Utilizando una expresión empírica para la atenuación de los rayos gamma en el aire, la radiación registrada puede convertirse en una medida cuantitativa de la existencia de tales minerales. Esta variante de los métodos radiométricos puede dar una indicación general sobre la forma de cuerpos radioactivos y delimitar la extensión de rocas tales como granitos. Sin embargo, dada la importante atenuación que la radiación gamma puede sufrir, se debe complementar la información obtenida con otro tipo de reconocimiento aéreo (Cassiraga, 1999).

### ***3.2 Series de desintegración.***

Cuando un núcleo se va desintegrando, emite radiación y da lugar a otro núcleo distinto también radiactivo, que emite nuevas radiaciones. Este proceso continuará hasta

que aparezca un núcleo estable, no radiactivo. Todos los núcleos que proceden del núcleo inicial (núcleo padre) forman una serie o cadena radiactiva.

En la naturaleza existen tres series radiactivas, la serie del Uranio, Torio y la del Actinio-Uranio, en la figura N° 3.5 se observa la serie radiactiva del Uranio ( $U^{238}$ ).

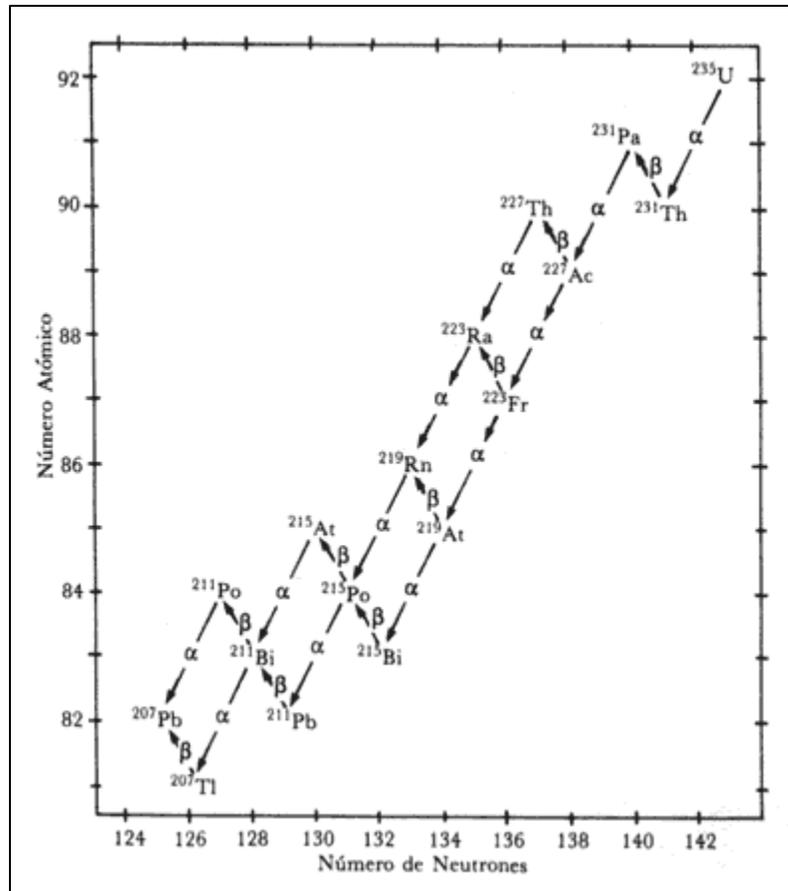


Figura N° 3.5 Serie radioactiva del Uranio<sup>238</sup> (tomada de <http://bibliotecadigital.ilce.edu.mx>)

### 3.3 Métodos Magnéticos.

Los métodos magnéticos se basan en la medición del campo magnético debido a los cambios de susceptibilidad de las rocas en el subsuelo (Sheriff, 2002).

Las anomalías del campo magnético de la Tierra están relacionadas directamente con las características magnéticas y la distribución espacial de las rocas de la corteza terrestre. Dicho de otro modo, estas anomalías dependen de las propiedades magnéticas, forma, volumen, orientación y profundidad de su causa geológica (Cassiraga, 1999).

La ley de Coulomb en cuanto a la fuerza magnética está dada por la ecuación siguiente:

$$F = \frac{P_1 \cdot P_2}{\mu \cdot r^2} . \quad [3.3]$$

Donde  $r$  es la distancia entre los dos polos, los cuales poseen diferentes intensidades magnéticas  $P_1$  y  $P_2$ ,  $\mu$  es la permeabilidad magnética del medio (Gomes y Sandoval, 2008).

### ***3.4 La naturaleza del Campo Geomagnético.***

En lo que concierne a la exploración geofísica, el campo geomagnético de la Tierra está compuesto de tres partes:

1. El campo principal, el cual varía relativamente lento y es de origen interno.
2. Un campo externo (pequeño comparado con el campo principal), el cual varía con mucha rapidez y es originado en el exterior de la Tierra.
3. Anomalías magnéticas locales generadas por rocas en la superficie de la corteza de la Tierra. Estas son el objetivo en prospección magnética (Telford, 1990).

#### ***3.4.1 El Campo Principal.***

- a) El Campo Principal de la Tierra. Se puede describir si una aguja de acero imantada puede ser colgada por su centro de gravedad, por lo que es libre para orientarse en cualquier dirección, y si otros campos magnéticos están ausentes, esta podría asumir la dirección del campo magnético total de la Tierra, una dirección que por lo general

no está ni horizontal ni en línea con el meridiano geográfico. La magnitud total de este campo ( $F_e$ ), la inclinación o buzamiento ( $I$ ), de la aguja con la horizontal, y la declinación ( $D$ ) el ángulo que forma con el norte magnético, definen el campo magnético principal como se observa en la figura N° 3.6 (Telford, 1990).

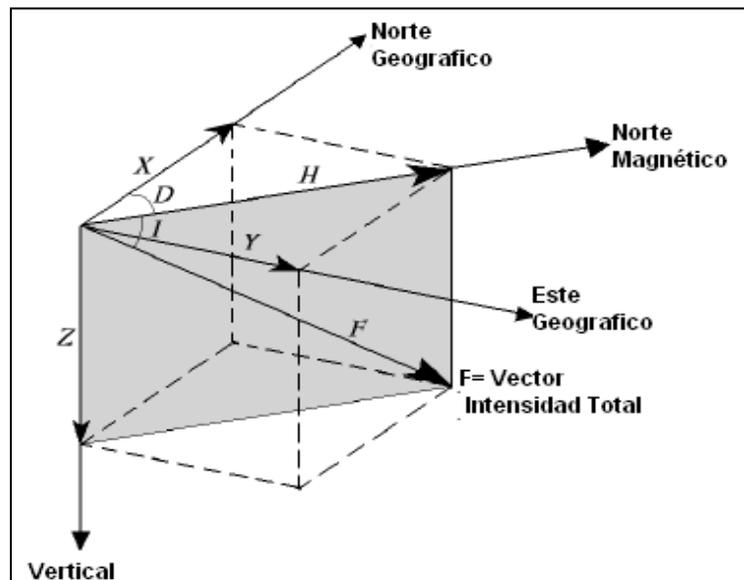


Figura N° 3.6 Elementos del Campo Magnético de la Tierra (Guía Janckarlos Reyes, 2003).

$$\text{Intensidad del campo magnético total} \quad F = \sqrt{H^2 + Z^2} = \sqrt{X^2 + Y^2 + Z^2} \quad [3.4]$$

$$\text{Inclinación} \quad I = \text{Arctg} \left( \frac{Z}{H} \right) \quad [3.5]$$

$$\text{Declinación magnética} \quad D = \text{Arc cos} \left( \frac{X}{H} \right) \quad [3.6]$$

- b) Origen del Campo Principal. Análisis con armónicos esféricos del campo magnético observado muestran que más del 99% se debe a las fuentes internas de la Tierra. La teoría actual es que el campo principal es causado por las corrientes de convección de materiales conductores circulando en el núcleo externo líquido (el cual se extiende en profundidades entre 2800 a 5000 km). El núcleo de la Tierra se supone

que es una mezcla de hierro y níquel, ambos buenos conductores eléctricos (Telford, 1990).

- c) Variaciones seculares del campo principal. Por cientos de años de estudios continuos del campo de la Tierra se ha establecido que este cambia poco a poco. La inclinación ha cambiado a unos 10 ° y la declinación del cerca de 35 ° durante este periodo. La fuente de esta itinerancia se cree que es por los cambios en las corrientes de convección en el núcleo. El campo magnético de la Tierra también ha invertido su dirección varias veces (Telford, 1990).

### 3.4.2 *El IGRF (Campo de Referencia Geomagnético Internacional o International Geomagnetic Reference Field)*

El IGRF es una descripción estándar matemática del campo principal de la Tierra, matemáticamente el modelo del IGRF consiste de los coeficientes de Gauss los cuales definen una expansión en armónicos esféricos del potencial geomagnético.

$$V(r, \phi, \theta) = a \sum_{l=1}^L \sum_{m=0}^l \left(\frac{a}{r}\right)^{l+1} (g_l^m \cos m\phi + h_l^m \sin m\phi) P_l^m(\cos \theta) \quad [3.7]$$

donde  $a$  es el radio de la Tierra,  $l$  es el máximo grado de la expansión,  $\phi$  es la longitud Este y  $\theta$  es la colatitud (el ángulo polar) y  $r$  es la distancia radial desde el centro de la Tierra.  $g_l^m$  Y  $h_l^m$  son los coeficientes de Gauss y  $P_l^m(\cos \theta)$  son las funciones de Legendre de grado  $l$  y orden  $m$ .

El IGRF fue introducido por la Asociación Internacional de Geomagnetismo y Aeronomía (The International Association of Geomagnetism and Aeronomy, IAGA) en 1968, y es producto de la colaboración entre los modeladores del campo magnético y los institutos implicados en recoger y almacenar datos del campo magnético de satélites, observatorios y de diferentes estudios alrededor del mundo. Igualmente, el IGRF es revisado, generalmente cada cinco (5) años por un grupo de modeladores de IAGA (González y Martínez, 2008).

### 3.4.3 *El Campo Magnético Externo.*

Parte del 1% restante del campo geomagnético parece estar asociada con corrientes eléctricas en la capa ionizada de la atmósfera superior. Los tiempos de variación de esta parte son mucho más rápidos que para el campo principal "permanente". Algunos efectos son:

1. Un ciclo de 11 años de duración que se correlaciona con actividades de manchas solares.
2. Variación solar diurna con un periodo de 24h y un rango de 30nT que varia con la latitud y con la época, y son probablemente controladas por acción del viento solar en corrientes ionosfericas.
3. Variación lunar con un periodo de 25h y en amplitud 2nT que varía cíclicamente en todo el mes y parece estar asociada con la interacción Luna-ionosfera.
4. Tormentas magnéticas que son perturbaciones transitorias con amplitudes sobre los 100nT en la mayor parte de las latitudes y aun mayor en las regiones polares, donde se asocian con la aurora, aunque errático, ellas a menudo ocurren en intervalos de 27 días y se correlacionan con la actividad de manchas solares. A la altura de la tormenta magnética (que puede durar durante varios días), la recepción de radio de largo alcance es afectada y la prospección magnética debe ser suspendida.

Estas variaciones del campo magnético de la Tierra no afectan significativamente la prospección magnética excepto por las tormentas magnéticas ocasionales donde la adquisición debe ser suspendida (Telford, 1990).

#### 3.4.3.1 *Susceptibilidad magnética.*

La susceptibilidad magnética ( $\chi$ ) es en esencia una medida de cuan susceptible es un material a ser magnetizado, es posible expresar la relación entre  $\mathbf{B}$  y  $\mathbf{H}$  ( $\mathbf{B}=\mu\mathbf{H}$ ) en términos de este parámetro de diagnostico geológicamente. La susceptibilidad magnética ( $\chi$ ) es un coeficiente adimensional (Reynold, 1998).

$$\vec{M} = \chi \vec{H} \quad [3.8]$$

donde  $\vec{M}$  es la magnetización del material (la intensidad del momento magnético por unidad de volumen) y  $\vec{H}$  es la intensidad del campo magnético aplicado (Reynold, 1998).

La susceptibilidad magnética de una roca dependerá directamente de la forma, tamaño y tipo de los granos que la conforman, así como también de la magnitud del campo magnético (Pérez, 2006).

En la tabla N° 3.1 se muestran valores de susceptibilidad magnética para algunos de los diferentes tipos de rocas.

| Tipo de Roca                   | Susceptibilidad ( $\chi$ ) |
|--------------------------------|----------------------------|
| <b>Sedimentaria</b>            |                            |
| Caliza                         | 10 - 25000                 |
| Arenisca                       | 0 - 21000                  |
| Lutitas                        | 60 - 18600                 |
| <b>Promedio Sedimentarias</b>  | <b>0 - 360</b>             |
|                                |                            |
| <b>Metamórficas</b>            |                            |
| Pizarra                        | 0 - 38000                  |
| Gneis                          | 125 - 25000                |
| Serpentinita                   | 3100 - 75000               |
| <b>Promedio Metamórficas</b>   | <b>0 - 73000</b>           |
|                                |                            |
| <b>Ígneas</b>                  |                            |
| Riolitas                       | 250 - 37700                |
| Riodacitas                     | 5880 - 10080               |
| Pegmatita                      | 3000 - 75000               |
| Gabro                          | 800 - 76000                |
| Basaltos                       | 500 - 182000               |
| <b>Promedio ígneas acidas</b>  | <b>40 - 82000</b>          |
| <b>Promedio ígneas básicas</b> | <b>550 - 122000</b>        |

Tabla N° 3.1 Susceptibilidad magnética de algunos tipos de rocas.  $\chi \times 10^6$  (SI) (Tomada y modificada del Reynold, 1998).

Todos los átomos tienen un momento magnético, como resultado del movimiento orbital de los electrones alrededor del núcleo y el spin de los electrones. De acuerdo a la teoría cuántica, dos electrones pueden existir en la misma capa electrónica (o estado), siempre y cuando sus spines estén en sentido contrario. Los momentos magnéticos de estos dos electrones, llamados los pares de electrones, se cancelarán. En la mayoría de las sustancias, cuando no hay ningún campo magnético externo aplicado, los momentos magnéticos de los átomos adyacentes están distribuidos al azar por lo que no hay magnetización total (Reynold, 1998).

#### **3.4.4 Magnetismo de las Rocas y Minerales.**

Las anomalías magnéticas son causadas por minerales magnéticos contenidos en las rocas (principalmente magnetita y pirrotita). Magnéticamente minerales importantes son asombrosamente pocos (Telford, 1990).

Los materiales se pueden dividir en base a su comportamiento cuando se les coloca un campo externo en:

- ***Diamagnéticos:***

En un material diamagnético todas las capas de electrones están completas y no hay electrones impares. Cuando un campo magnético externo es aplicado, se induce una magnetización. La órbita de electrones produce un campo magnético el cual se opone al campo aplicado, creando una débil y negativa susceptibilidad magnética ( $\chi \ll 1$ ) (Reynold, 1998).

- ***Paramagnéticos:***

En los materiales paramagnéticos los electrones no están apareados en las capas electrónicas, produciendo un desequilibrio del spin del momento magnético y débiles interacciones magnéticas entre los átomos. En un campo externo aplicado, los momentos magnéticos se alinean a sí mismos en la misma dirección aunque este proceso se retrasa por la agitación térmica. El resultado es una susceptibilidad magnética positiva pero decrece

inversamente con la temperatura absoluta de acuerdo a la Ley de Curie-Weiss. El paramagnetismo es generalmente de al menos un orden de magnitud más fuerte que diamagnetismo ( $0 < \chi \ll 1$ ) (Reynold, 1998).

- ***Ferromagnéticos:***

En materiales ferromagnéticos la susceptibilidad magnética es grande pero depende de la temperatura y del campo magnético aplicado. Los momentos de spin de electrones no apareados son acoplados magnéticamente, debido a la interacción muy fuerte entre los átomos adyacentes y la superposición de las órbitas de electrones. Un pequeño grano en el cual ocurre un acoplamiento magnético forma lo que se llama un dominio magnético único y tiene unas dimensiones del orden de un micrón. Esto da lugar a una fuerte “magnetización espontánea” la cual puede existir incluso cuando no hay campo externo aplicado. El acoplamiento magnético puede ser tal que los momentos magnéticos se alinean paralelos o antiparalelos ( $\chi \gg 1$ ) (Reynold, 1998).

Exactamente materiales ferromagnéticos se presentan sólo en raras ocasiones en la naturaleza pero que incluyen sustancias como el cobalto, el níquel y hierro, donde todos estos tienen alineación paralela de los momentos magnéticos. El ferromagnetismo desaparece cuando la temperatura del material aumenta por encima de la temperatura de Curie y a partir de entonces el material exhibe un comportamiento paramagnético (Reynold, 1998).

- ***Antiferromagnéticos:***

En materiales antiferromagnéticos los momentos son alineados en una manera antiparalela. Aunque los campos magnéticos de los dipolos orientados en sentidos opuestos se anulan entre sí, los defectos de la red cristalina resultan en un momento residual neto o parasitario. Poseen baja susceptibilidad magnética, casi cero aunque con signo positivo (Reynold, 1998).

- ***Ferrimagnéticos:***

En materiales ferrimagnéticos, las sub-redes son diferentes y antiparalelas. Esto resulta en una magnetización neta. Magnetización espontánea y grandes susceptibilidades positivas son características de los materiales ferrimagnéticos (Reynold, 1998)

### ***3.4.5 Campo magnético regional.***

Es el campo magnético producido por cuerpos a gran escala (que generan componentes de grandes longitudes de ondas o bajas frecuencias), ignorando las anomalías de tamaños menores generadas por cuerpos más someros y tamaños pequeños. Este es el campo producido por las variaciones de susceptibilidades magnéticas dentro del basamento (Sheriff, 2002).

### ***3.4.6 Campo magnético residual.***

El campo magnético residual es el campo magnético que queda luego de remover el campo magnético asociado a las grandes longitudes de onda (campo magnético regional), el IGRF es usado como el valor regional (Sheriff, 2002). Corresponde entonces a las anomalías generadas por cuerpos de pequeñas dimensiones y someros.

### ***3.4.7 Anomalía magnética.***

Una anomalía magnética es la diferencia entre el campo magnético teórico y el valor del campo magnético medido (Sheriff, 2002).

La forma de la anomalía magnética depende de la geometría del cuerpo, la dirección del campo magnético de la Tierra así como de la dirección e intensidad del magnetismo remanente de los cuerpos (Sheriff, 2002).

Para el cálculo de la anomalía magnética se realiza a través de la siguiente fórmula:

$$AM = T_{obs} - T_{IGRF} - T_{tv}$$

Donde  $T_{obs}$  es el campo magnético medido con el magnetómetro,  $T_{IGRF}$  es el Campo de Referencia Geomagnético Internacional que se utiliza para eliminar el campo magnético principal y  $T_{tv}$  es la corrección por las variaciones diurnas.

### 3.5 *Técnicas de interpretación cualitativa y transformación de los datos.*

Las técnicas de interpretación cualitativa y transformación de datos son un conjunto de ecuaciones matemáticas las cuales son aplicadas sobre datos magnéticos, entre estas se encuentran: reducción al polo o ecuador magnético, primera derivada vertical, primera derivada horizontal, segunda derivada vertical y señal analítica.

#### 3.5.1 *Reducción al ecuador magnético.*

La reducción al ecuador magnético está basada en remover la dependencia de los datos magnéticos con la inclinación magnética, es decir; convertir los datos que han sido guardados con la inclinación del campo magnético de la Tierra a lo que habría parecido si el campo magnético hubiera sido horizontal. La reducción al ecuador elimina las anomalías simétricas causadas por la inclinación y localiza los cuerpos causantes de anomalías asumiendo que el magnetismo remanente es pequeño comparado con el inducido. La reducción al ecuador es recomendable para inclinaciones magnéticas bajas, de lo contrario se recomienda realizar la reducción al polo (Sheriff, 2002). La fórmula para la reducción al ecuador es la siguiente:

$$L(\theta) = \frac{[\text{sen}(I) - i \cos(I) \cos(D - \theta)]^2 (-\cos^2(D - \theta))}{[\text{sen}^2(Ia) + \cos^2(Ia) \cos^2(D - \theta)] [\text{sen}^2(I) + \cos^2(I) \cos^2(D - \theta)]}$$

Donde I es la inclinación geomagnética, Ia es la inclinación por la corrección de amplitud (nunca menor que I) y D la declinación geomagnética (Geosoft, 2007)

El análisis cualitativo de los datos se realiza a partir del análisis o descripción cualitativa de los mapas o perfiles de anomalía magnética. Análisis posteriores pero que sin embargo aun son considerados semi-cuantitativos es la utilización o aplicación de las

derivadas direccionales de la anomalía magnética, esto me permite ubicar contactos entre los cuerpos

### 3.5.2 *Derivada horizontal.*

En coordenadas cartesianas la derivada horizontal es  $dAM/dX$  o  $dAM/dY$ , donde  $AM$  es la anomalía magnética y  $X$  e  $Y$  son las coordenadas del punto de medida. La primera derivada horizontal puede ser útil en delinear contactos magnéticos. Esta se ve severamente afectada por la inclinación del cuerpo magnético y por lo tanto no es un buen indicador de la verdadera ubicación del contacto. Puede ser calculada simplemente en el dominio del espacio. La localización de los bordes se encuentra ubicada en los puntos en los cuales se alcanzan máximos (Fairhead, 2000).

### 3.5.3 *Derivadas verticales.*

La primera derivada vertical se calcula mediante la siguiente ecuación  $dAM/dZ$  donde  $AM$  es la anomalía magnética y  $Z$  la profundidad. La primera derivada vertical (gradiente vertical) es un buen método para resolver anomalías de campo magnético. No puede ser calculada en el dominio del espacio como es el caso de la derivada horizontal. La ubicación de los bordes del cuerpo están ubicados donde existen cambios de concavidad (Fairhead, 2000).

La segunda derivada vertical  $d^2AM/dZ^2$  tiene la propiedad de hacerse cero sobre los contactos. Una desventaja de la segunda derivada vertical es que puede llegar a ser muy ruidosa (Fairhead, 2000).

### 3.5.4 *Señal analítica.*

La señal analítica ( $A$ ) es una técnica de mejoramiento de señal que puede ser usada para definir los bordes de los contactos magnéticos, independiente de la inclinación magnética. Alcanza un máximo directamente sobre el tope de los cuerpos y en los contactos, pero puede ser muy ruidosa y posee baja resolución (Fairhead, 2000). La ecuación de la señal analítica es la siguiente

$$A = \sqrt{\left(\frac{dAM}{dX}\right)^2 + \left(\frac{dAM}{dY}\right)^2}$$

### 3.6 Interpretación cuantitativa.

#### 3.6.1 Programa de procesamiento de datos (Oasis Montaj)

El *Oasis Montaj* es un poderoso programa para procesar, visualizar y analizar grandes volúmenes de datos de geociencias, incluyendo geofísica, geología y geoquímica. También dispone de programas específicos y extensiones de programas para geofísica avanzada, geoquímica estadística, control de calidad de levantamientos aéreos. Entra las extensiones con la que cuenta este programa se encuentra el módulo de GM-SYS (Geosoft, 2007).

#### 3.6.2 El GM-SYS.

El *GM-SYS* es un programa para el cálculo de la respuesta de gravedad y magnética de un modelo geológico. *GM-SYS* proporciona una interfaz fácil de usar para crear y realizar modelaje directo basado en el método de Talwani (Geosoft, 2007).

Este método divide el subsuelo en polígonos con susceptibilidades magnéticas constantes. Una anomalía magnética calculada en un punto para cada polígono del modelo interpretativo, es obtenida a través de la siguiente ecuación:

$$A = \gamma \sum_{k=1}^n a_k \sin(\phi_k) \cos(\phi_k) \left[ \theta_k - \theta_{k-1} + \tan(\phi_k) \ln \left( \frac{\cos(\theta_k) \tan(\theta_k) - \tan(\phi_k)}{\cos(\theta_{k+1}) \tan(\theta_{k+1}) - \tan(\phi_{k+1})} \right) \right]$$

Donde  $k$  representa un índice del polígono de  $n$  vértices,  $z_k$  y  $x_k$  son las coordenadas de los vértices del polígono en el punto donde desea calcular la anomalía magnética (Talwani, 2009).

$$\theta_k = \arctan \left( \frac{z_k}{x_k} \right)$$

$$\phi_k = \arctan \left( \frac{z_{k+1} - z_k}{x_{k+1} - x_k} \right)$$

$$a_k = x_{k+1} + z_{k+1} \left( \frac{z_{k+1} - z_k}{x_{k+1} - x_k} \right)$$

Muchos cuerpos y estructuras geológicas pueden ser simplificados mediante estructuras lineales (Costa, 2006). *GM-SYS* nos permite simular la respuesta magnética de las estructuras geológicas en profundidad de manera que dicha respuesta se ajuste a la repuesta magnética observada lo más preciso posible (Geosoft, 2007).

*GM-SYS* calcula los cambios en la respuesta instantáneamente, prácticamente al siguiente instante al que usted realizó cambios en el modelo, acelerando el proceso de interpretación y permitiendo que rápidamente pruebe varias hipótesis geológicas de alternativas de solución (Geosoft, 2007).

En el modelaje directo 2D de datos magnéticos se construye un modelo inicial para el cuerpo a partir de un modelo geológico, se calcula la anomalía magnética de dicho modelo y se compara con la anomalía magnética observada (Mendoza, 2004).

### 3.7 *Métodos Electromagnéticos.*

Los métodos electromagnéticos se basan en determinar la variación de la conductividad eléctrica en el suelo, la conductividad es la propiedad física del método electromagnético. Con excepción las técnicas de prospección magnética las técnicas de prospección electromagnéticas son las más comúnmente usadas en la exploración mineral. Como su nombre lo indica el método envuelve la propagación de ondas continuas o campos electromagnéticos transitorios dentro y sobre la Tierra (Telford, 1990).

En la figura N° 3.7 se observa el rango de conductividad para diferentes elementos y tipos de rocas.

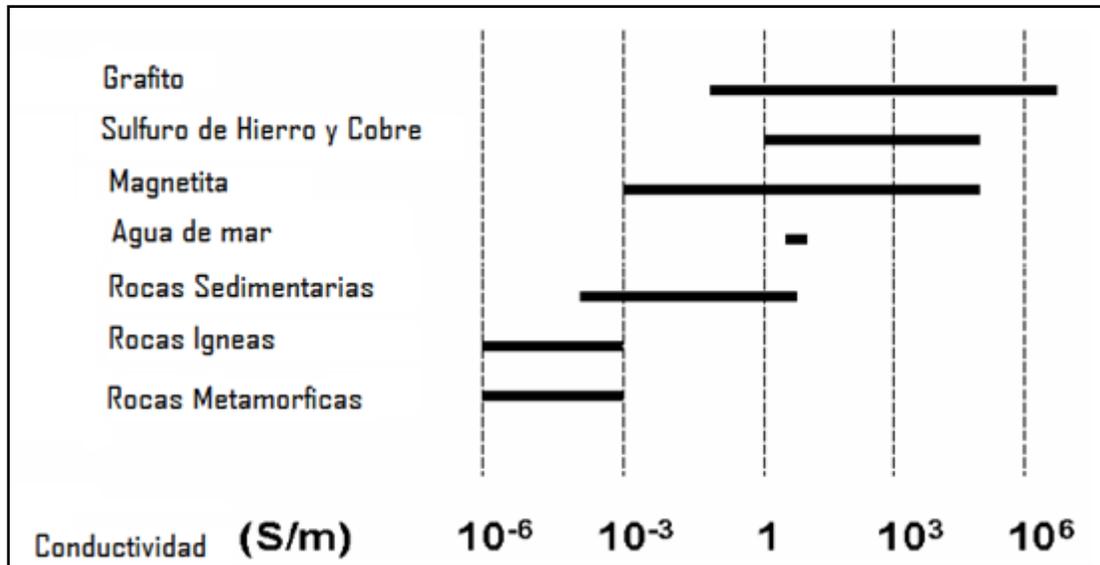


Figura N° 3.7 Rango de conductividad para rocas y algunos minerales (Tomada y modificada de Lane, 2002).

Un desarrollo elemental de la teoría electromagnética puede ser empleado para describir la propagación de ondas. Para entender la propagación y atenuación de dichas ondas es necesario el uso de las ecuaciones de Maxwell (sistema M.K.S) en forma relativa de los vectores de campo eléctrico y magnético (Telford, 1990):

$$\nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (\text{Ley de Faraday}) \quad [3.9]$$

$$\nabla \times \vec{H} = \vec{J} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \quad (\text{Ley de Ampere}) \quad [3.10]$$

$$\nabla \cdot \vec{D} = \rho \quad (\text{Ley de Coulomb}) \quad [3.11]$$

$$\nabla \cdot \vec{B} = 0 \quad [3.12]$$

Donde  $\vec{E}$  (V/m) es el vector intensidad del campo eléctrico,  $\vec{D}$  (C/m<sup>2</sup>) es el vector intensidad del flujo eléctrico,  $\vec{J}$  (A/m<sup>2</sup>) es el vector densidad de corriente,  $\vec{H}$  (A/m) el vector intensidad de campo magnético,  $\rho$  (C/m<sup>3</sup>) la distribución de la carga eléctrica, y  $\vec{B}$  (Wb/m<sup>2</sup> o Tesla) vector densidad de flujo magnético (Telford, 1990). Además de estas

expresiones, para la descripción del comportamiento de los campos electromagnéticos también se precisa de las siguientes ecuaciones constitutivas:

$$\vec{J} = \sigma \vec{E}, \quad [3.13]$$

$$\vec{D} = \epsilon \vec{E}, \quad [3.14]$$

$$\vec{B} = \mu \vec{H}. \quad [3.15]$$

Donde  $\epsilon$  (F/m) es la permitividad dieléctrica relativa,  $\mu$  (H/m) la permeabilidad magnética relativa del medio, y  $\sigma$  (S/m) es la conductividad eléctrica. Nosotros podemos simplificar las ecuaciones [3.9] y [3.10] haciendo uso de las ecuaciones constitutivas:

$$\nabla \times \vec{E} = \mu \frac{\partial \vec{H}}{\partial t} \quad [3.16]$$

$$\nabla \times \vec{H} = \sigma \vec{E} + \epsilon \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \quad [3.17]$$

Si ahora relacionamos todas las expresiones anteriormente descritas, sea  $i = \sqrt{-1}$  e  $\omega = 2\pi f$  (rad / seg) la frecuencia angular del campo y además asumimos que  $\vec{E}$  y  $\vec{H}$  presentan una dependencia con el tiempo de la forma:

$$E(t) = E_0 e^{i\omega t} \quad [3.18]$$

$$H(t) = H_0 e^{i\omega t} \quad [3.19]$$

Se obtienen las ecuaciones electromagnéticas para la propagación de los vectores campo eléctrico y magnético en un medio isotrópico homogéneo, teniendo conductividad  $\sigma$ , permeabilidad relativa  $\mu$  y permitividad dieléctrica  $\epsilon$ , en la figura N° 3.8 se observan las ondas electromagnéticas y su dirección de propagación (Telford, 1990).

$$\nabla^2 \vec{H} = i\omega\mu\sigma\vec{H} - \epsilon\mu\omega^2\vec{H} \quad [3.20]$$

$$\nabla^2 \vec{E} = i\omega\mu\sigma\vec{E} - \epsilon\mu\omega^2\vec{E} \quad [3.21]$$

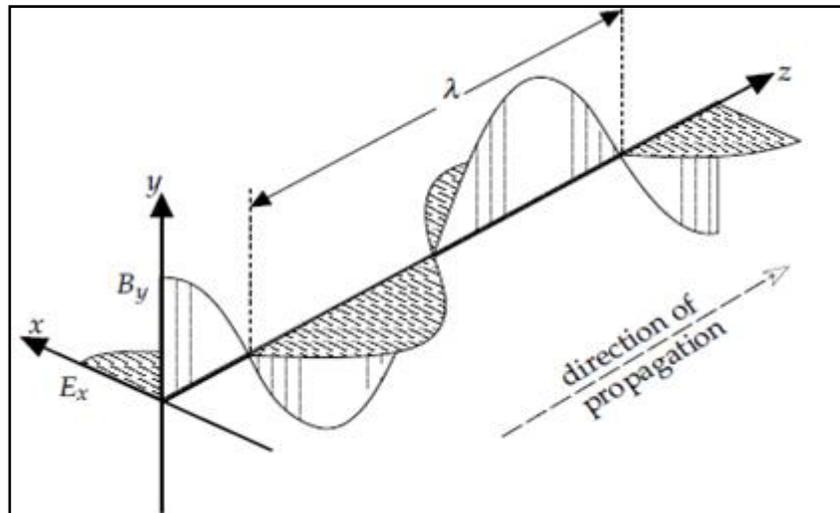


Figura N° 3.8 Dirección de propagación de las ondas electromagnéticas.

El método electromagnético generalmente usa bobinas (al menos dos bobinas son necesarias) y este método tiene la ventaja que no necesita estar en contacto con el suelo para realizar la exploración geofísica (Lane, 2002).

### 3.7.1 Métodos electromagnéticos en el Dominio de la Frecuencia.

En el método electromagnético en el dominio de la frecuencia (**FDEM** por sus siglas en inglés) la bobina transmisora genera ondas sinusoidales, este es el campo primario, mientras que la bobina receptora recibe una señal por la bobina transmisora (campo primario) y otra generada por los cuerpos en el suelo, este es el campo secundario (Kearey y Brooks, 1991).

El campo electromagnético primario viaja desde la bobina transmisora a la bobina receptora a través del aire y por el suelo. Si el suelo es homogéneo no hay diferencia entre los campos propagados por el aire y por el suelo. Si la Tierra no sea homogénea se genera una pequeña reducción en la amplitud del campo propagado por el suelo con respecto al campo primario (Lane, 2002)

Sin embargo, en presencia de un cuerpo conductor la componente magnética del campo electromagnético penetra en el subsuelo e induce corrientes alternantes o corrientes Eddy que fluyen en el conductor tal como se observa en la Figura N° 3.9 (Kearey y Brooks, 1991).

Estas corrientes generan un campo secundario el cual es medido también en la bobina receptora, es decir la bobina receptora mide el campo primario y el campo secundario. Como se observa en la figura N° 3.9 en la cual en la bobina receptora se mide el campo primario (líneas azules) y el campo secundario (líneas rojas) generados por el conductor en el suelo.

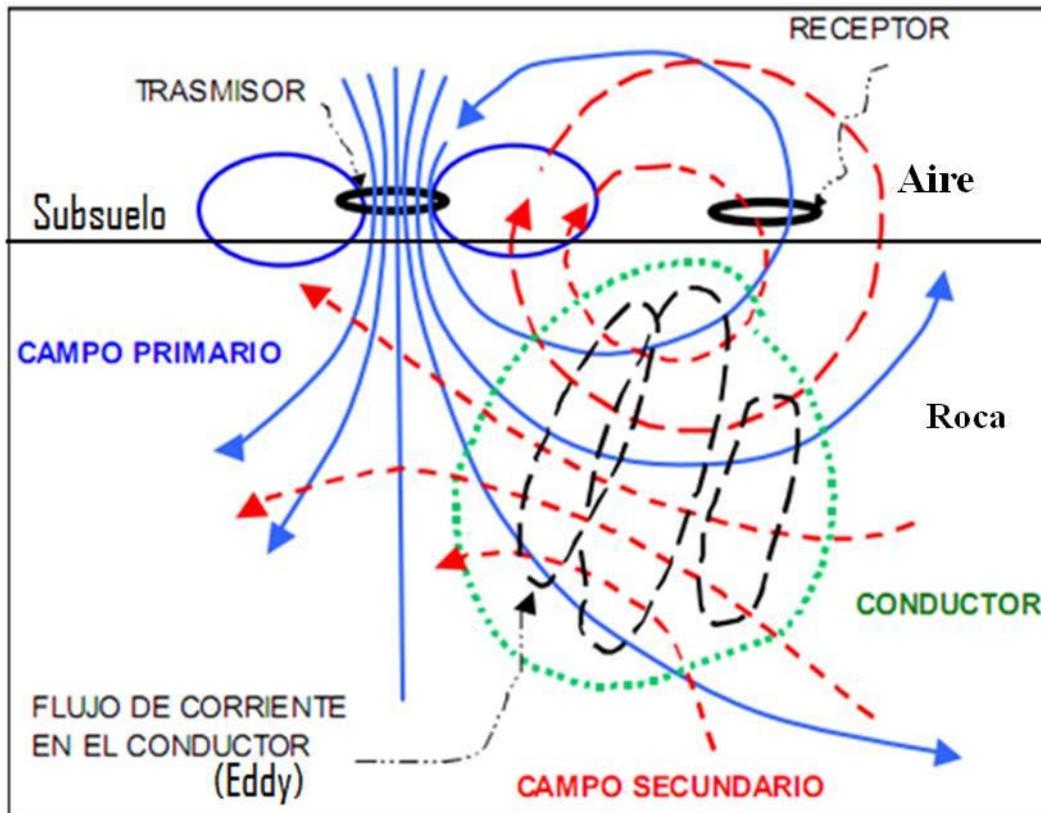


Figura N° 3.9 Principio general de los métodos electromagnéticos (Tomada y modificada de Lane, 2002).

### 3.7.2 Profundidad de penetración.

La profundidad de penetración (también conocido como *Skin depth*) de un campo electromagnético depende a la vez de su frecuencia y de la conductividad eléctrica de el medio a través del cual se está propagando, así como también de la distancia a la cual se encuentran separados el transmisor y el receptor. Los campos electromagnéticos son atenuados durante su paso a través del suelo, su amplitud decrece exponencialmente con la profundidad. La profundidad de penetración ( $\delta$ ) puede ser definida como la profundidad a la cual la amplitud ( $A_d$ ) del campo se reduce en un factor  $1/e$  (~37%) de la amplitud original ( $A_0$ ) (Kearey y Brooks, 1991), es decir:

$$A_d = A_0 e^{-1} . \quad [3.22]$$

Para un sistema electromagnético en el dominio de la frecuencia se tiene que:

$$\delta \approx 503.8 \sqrt{\frac{1}{\sigma \cdot f}} \quad [3.23]$$

Donde la profundidad de penetración ( $\delta$ ) está dada en metros, la conductividad ( $\sigma$ ) de la Tierra en S/m y la frecuencia ( $f$ ) del campo electromagnético en Hz.

La profundidad de penetración es mayor debido al aumento de la distancia de separación entre el transmisor y el receptor, y de la conductividad del suelo así como también debido a la disminución de la frecuencia del campo electromagnético tal como se observa en la figura N° 3.10 (Kearey y Brooks, 1991). Las frecuencias más altas proporcionan información más superficial, mientras que frecuencias más bajas nos proporcionan la información a mayor profundidad en el suelo.

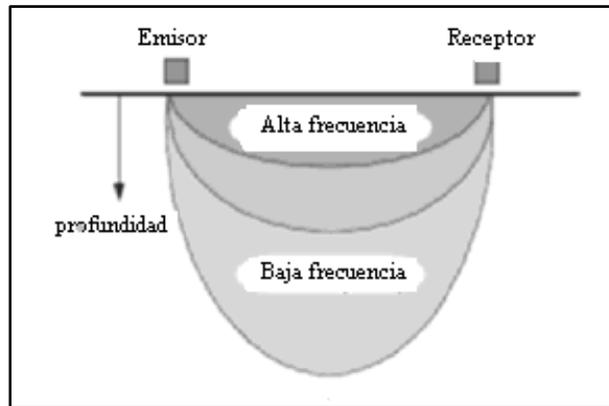


Figura N° 3.10 Se observa la profundidad de penetración de las ondas electromagnéticas en función de las frecuencias (Tomada y modificada de Allen, 2007).

### 3.7.3 Fase y Cuadratura.

Un campo electromagnético alternante puede ser representado por una onda sinusoidal con una longitud de onda de  $2\pi$  ( $360^\circ$ ) como se observa en la figura N° 3.11. Cuando una onda se encuentra por detrás de otra onda se dice que esta fuera de fase. La diferencia de fase puede ser representada por un ángulo de fase  $\theta$  correspondiente a la separación angular de las formas de la onda. La relación de fase de las ondas electromagnéticas pueden ser representadas en un diagrama de vectores espacial en el cual la longitud del vector es proporcional a la amplitud del campo y el ángulo medido en sentido antihorario desde el vector primario hasta el vector secundario, esto representa el desfase angular del campo secundario detrás del campo primario (Kearey, 1991).

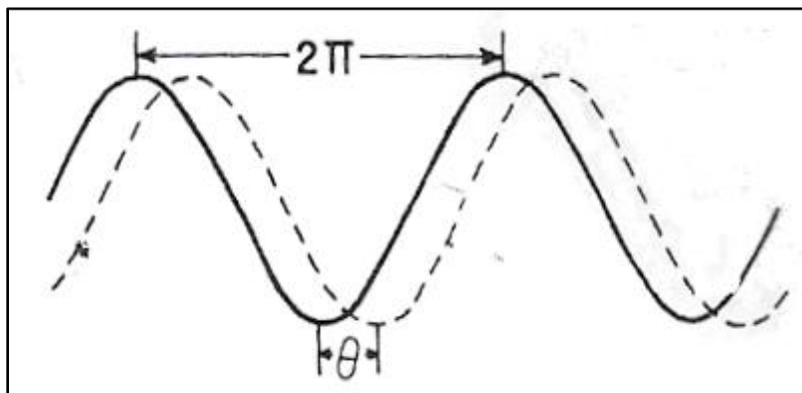


Figura N° 3.11 La diferencia de fase entre dos longitudes de onda. (Tomada de Reynold, 1998)

El campo principal ( $\mathbf{P}$ ) viaja desde el transmisor hasta el receptor por el aire y no sufre ninguna otra modificación que una pequeña reducción en la amplitud causada por la dispersión geométrica. A medida que el campo primario penetra en el suelo se reduce en mayor medida la amplitud, pero permanece en fase con la onda principal. El campo primario induce un voltaje alternante en un conductor bajo la superficie con la misma frecuencia que el primario, pero con un retraso de fase de  $\pi/2$  ( $90^\circ$ ) según las leyes de inducción electromagnética (Kearey & Brooks, 1991).

Las propiedades eléctricas del conductor causan un nuevo retraso de fase  $\varphi$ :

$$\varphi = \tan^{-1}\left(\frac{2\pi \cdot fL}{R}\right), \quad [3.24]$$

donde  $f$  es la frecuencia del campo electromagnético,  $L$  la inductancia del conductor (esta tiende a oponerse a cambiar en el campo aplicado) y  $R$  la resistencia del conductor. Para un buen conductor  $\varphi$  se aproximara a  $\pi/2$  ( $90^\circ$ ) mientras que para un pobre conductor  $\varphi$  será casi cero. El efecto neto es que el campo secundario ( $\mathbf{S}$ ) producido por el conductor va detrás del campo primario con un ángulo de fase de  $(\pi/2 + \varphi)$ . El campo resultante puede ser ahora construido como se muestra en la Figura N° 3.12.

La proyección del campo secundario ( $\mathbf{S}$ ) en el eje horizontal (campo primario) es  $S \cdot \sin(\varphi)$  y es un ángulo  $\pi$  fuera de fase con el campo primario ( $\mathbf{P}$ ). Esta es conocida como la *componente real o en fase* del campo secundario. La proyección vertical es  $S \cdot \cos(\varphi)$ ,  $\pi/2$  fuera de fase con el campo primario ( $\mathbf{P}$ ), y esta es conocida como la *componente imaginaria, fuera de fase o cuadratura*.

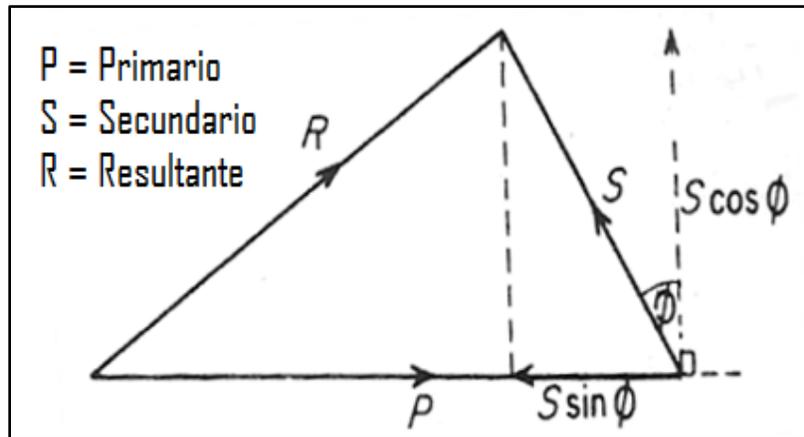


Figura N° 3.12 Diagrama de vectores ilustrando la relación de amplitud y fase entre los campos electromagnéticos primario, secundario y resultante (tomada y modificada de Reynold, 1998).

Los más sofisticados sistemas de prospección electromagnética miden las relaciones de la fase y amplitud entre el campo electromagnetismo primario, secundario y del campo resultante.

#### 3.7.4 Numero de inducción.

El numero de inducción ( $B$ ) está dado por el espaciamiento entre bobinas dividido por el Skin depth.

Cuando el numero de inducción es mucho menor que uno ( $B \ll 1$ ) corresponde al caso que la separación entre bobinas es pequeña (mucho menor que el Skin depth). En este caso la señal electromagnética viaja hacia el receptor a través de la tierra y por el aire como se puede observar en la figura N° 3.13. Este caso es llamado *low induction number*.

Cuando el numero de inducción es mayor que uno corresponde al caso que la separación entre bobinas es muy grande (mayor al Skin depth). En este caso la señal electromagnética viaja del transmisor al receptor a través del aire, cuando la señal entra en el suelo es completamente atenuada antes de llegar al receptor, esto se puede observar en la figura N° 3.13. Este es el caso llamado *high induction number*.

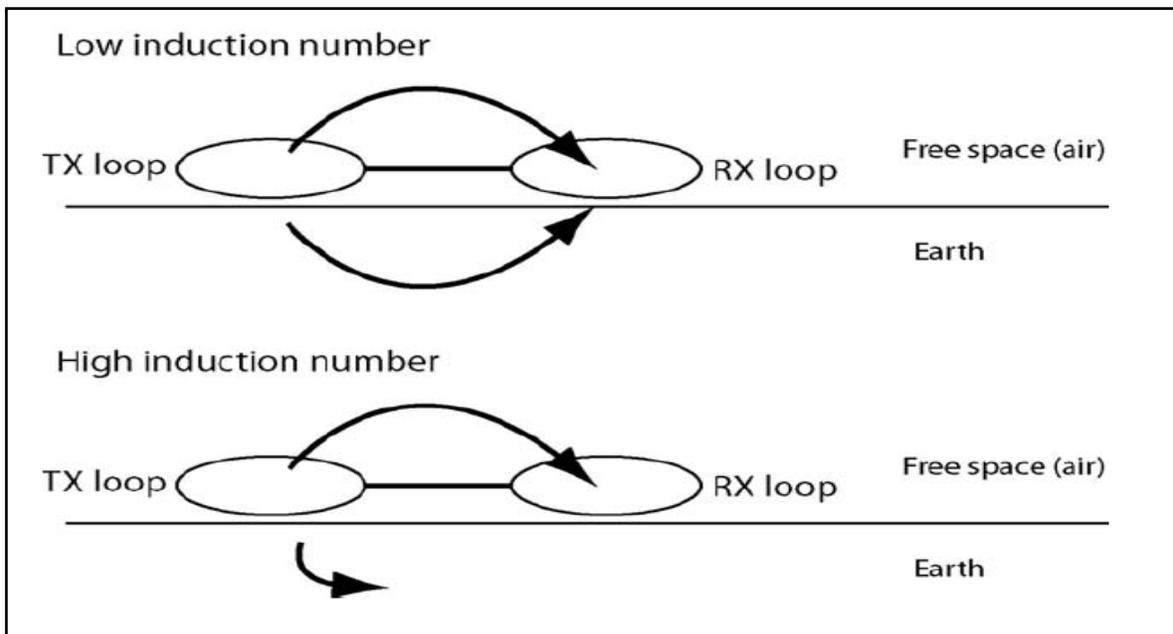


Figura N° 3.13 Ejemplo para número de inducción bajo y alto

Cuando nos encontramos en el caso que  $B \ll 1$  (low induction number) la conductividad aparente del terreno puede ser calculada a través de la siguiente ecuación:

$$\sigma_a = \frac{4}{\omega \mu_0 S^2} \left( \frac{H_s}{H_p} \right) \quad [3.25]$$

donde  $S$  es la separación entre las bobinas transmisora y receptora,  $\omega = 2\pi f$ ,  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$  y la

cuadratura dada por  $\left( \frac{H_s}{H_p} \right)$ .

Para el caso  $B \gg 1$  el caso es más complicado ya que se utiliza la siguiente ecuación:

$$H_z = \frac{IA}{2\pi k^2 r^5} \left\{ 9 - (9 + 9ikr - 4k^2 r^2 - ik^3 r^3) e^{-ikr} \right\} \quad [3.26]$$

Donde  $r$  es la separación entre bobinas, y  $k = (i\omega\mu\sigma)^{1/2}$

## ***4 ADQUISICION Y PROCESAMIENTO DE LOS DATOS.***

### ***4.1 Actividades preliminares a la actividad de campo.***

- ✓ Recopilación y revisión de la documentación conformada por datos aerogeofísicos de la zona de estudio.
- ✓ Revisión bibliográfica sobre cada uno de los métodos a emplear para la verificación de las anomalías seleccionadas.
- ✓ Visita al área de levantamiento a fin de evaluar las condiciones de acceso y topografía de cada perfil a verificar.
- ✓ Prueba de los equipos electromagnético en el dominio de la frecuencia, magnético y radiométrico.

La selección de los 12 perfiles a verificar en el levantamiento geofísico terrestre estuvo basada en un conjunto de anomalías magnéticas, electromagnéticas y gammaespectrométricas obtenidas a partir del levantamiento aerogeofísico realizado por INGEOMIN. A continuación en la tabla N° 4.1 se indican las características y ubicación de las anomalías obtenidas en dichos perfiles.

| <b>N°</b> | <b>PERFIL</b>     | <b>ANOMALIA</b>                        | <b>EXTENSION</b>                |
|-----------|-------------------|--|---------------------------------|
| <b>4</b>  | <b>L_3210_4A</b>  | Electromagnética<br>Radiométrica       | (0 - 300m)<br>(0 - 400m)        |
| <b>7</b>  | <b>L_3080_7A</b>  | Magnética negativa                     | (850m - 1200m)                  |
| <b>9</b>  | <b>L_3020_9A</b>  | Magnética negativa<br>Radiométrica     | (150m – 500m)<br>(200m – 500m)  |
| <b>10</b> | <b>L_3010_10A</b> | Magnética negativa                     | (500m – 850m)                   |
| <b>11</b> | <b>L_2990_11A</b> | Magnética negativa<br>Electromagnética | (550m - 850m)<br>(400m - 700m)  |
| <b>12</b> | <b>L_2981_12A</b> | Magnética negativa<br>Electromagnética | (550m - 850m)<br>(700m - 1000m) |
| <b>14</b> | <b>L_2960_14A</b> | Magnética negativa<br>Radiométrica     | (650m - 950m)<br>(500m - 900m)  |
| <b>15</b> | <b>L_2960_15A</b> | Magnética positiva                     | (400m - 800m)                   |
| <b>17</b> | <b>L_2930_17A</b> | Magnética positiva<br>Electromagnética | (550m – 850m)<br>(450m- 800m)   |
| <b>19</b> | <b>L_2890_19A</b> | Magnética negativa                     | (400m – 750)                    |
| <b>20</b> | <b>L_2860_20A</b> | Magnética negativa<br>Electromagnética | (550m - 850m)<br>(400m - 600m)  |
| <b>53</b> | <b>L_3120_53A</b> | Electromagnética                       | (300m - 700m)                   |

Tabla N° 4.1 Anomalías obtenidas y extensión de los doce perfiles seleccionados por INGEOMIN a partir del levantamiento aerogeofísico.

## 4.2 Planificación del levantamiento geofísico terrestre.

De acuerdo a las dimensiones del cuerpo que se espera encontrar en el suelo, como son las pipas kimberlitas se planeo el levantamiento geofísico terrestre seleccionando doce (12) perfiles los cuales se muestran en la figura N° 4.1, con una distancia entre estaciones de 25m y una separación entre bobinas de 50m aplicando los siguientes tres métodos geofísicos: magnético, electromagnético en el dominio de la frecuencia.

En la tabla N° 4.2 se observan los doce perfiles seleccionados a realizar en este levantamiento geofísico terrestre donde se puede observar el número de estaciones en cada perfil así como también la extensión que posee cada uno de ellos. Dichos perfiles (figura N° 4.1) fueron seleccionados por anomalías (magnéticas, electromagnética y espectrométricas) obtenidas a partir del levantamiento aerogeofísico realizado por *INGEOMIN*.

| N° | Perfil     | Estaciones | Distancia (m) |
|----|------------|------------|---------------|
| 4  | L_3210_4A  | 38         | 950           |
| 7  | L_3080_7A  | 129        | 3225          |
| 9  | L_3020_9A  | 48         | 1200          |
| 10 | L_3010_10A | 50         | 1250          |
| 11 | L_2990_11A | 63         | 1575          |
| 12 | L_2981_12A | 41         | 1025          |
| 14 | L_2960_14A | 62         | 1550          |
| 15 | L_2960_15A | 47         | 1175          |
| 17 | L_2930_17A | 54         | 1350          |
| 19 | L_2890_19A | 46         | 1150          |
| 20 | L_2860_20A | 54         | 1350          |
| 53 | L_3120_53A | 40         | 1150          |

Tabla N° 4.2 Los doce perfiles seleccionados para realizar en el levantamiento geofísico terrestre.

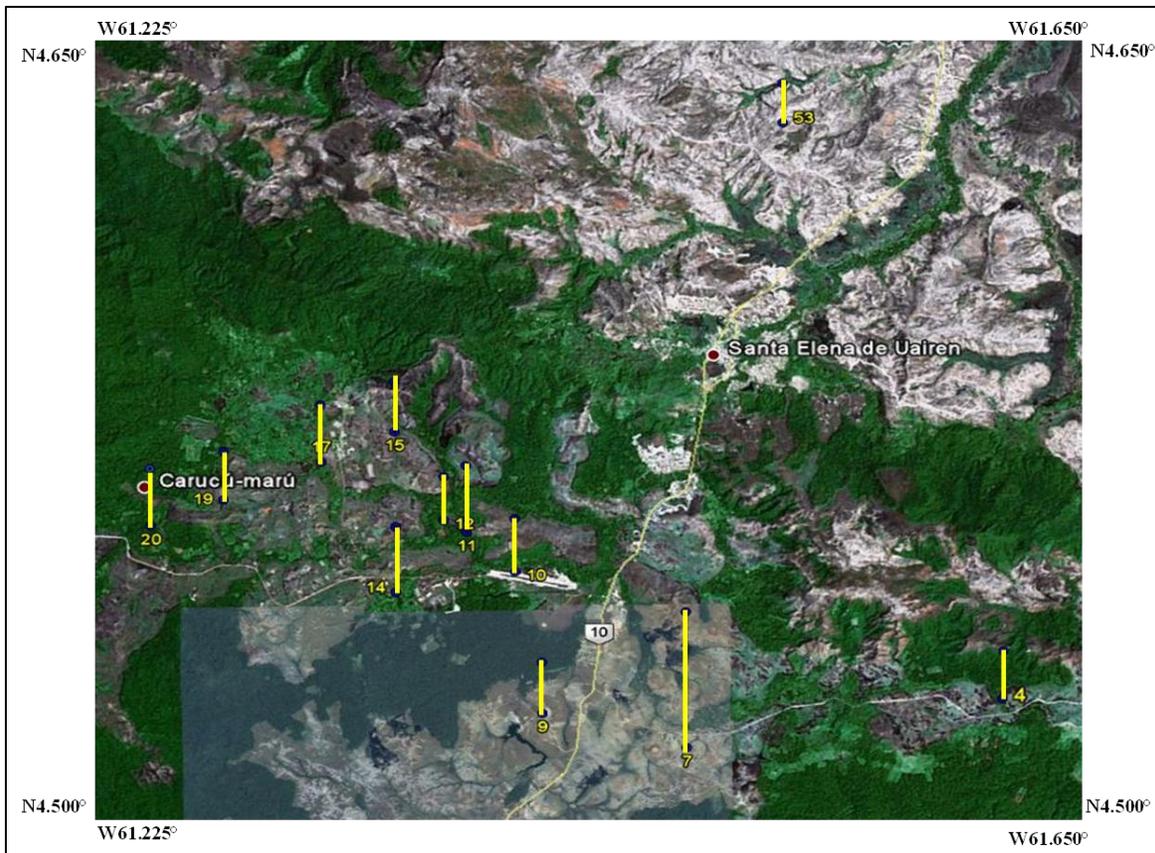


Figura N° 4.1 Los 12 perfiles a realizar en el levantamiento geofísico terrestre.

A continuación se muestran dos ejemplos de anomalías obtenidas en el levantamiento aerogeofísico.

En la figura N° 4.2 se observa la anomalía electromagnética detectada en el perfil *L\_3120\_53A* con la frecuencia de 880Hz del levantamiento aerogeofísico y la cual es de interés para verificar en el levantamiento geofísico terrestres.

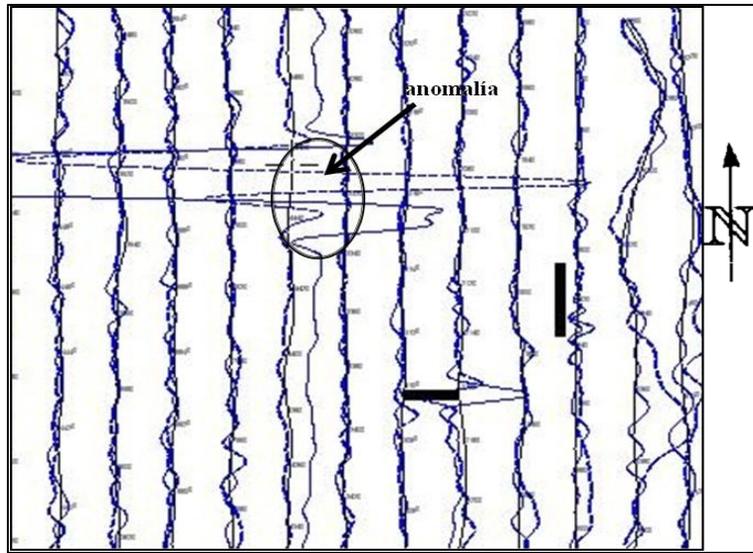


Figura N° 4.2 Anomalía electromagnética detectada a partir del levantamiento electromagnético aéreo en el perfil *L\_3120\_53A*.

En la figura N° 4.3 se muestra una anomalía magnética negativa detectada en el levantamiento aeromagnético en el perfil *L\_2860\_20A* en la cual se observan coinciden varias soluciones de Keating.

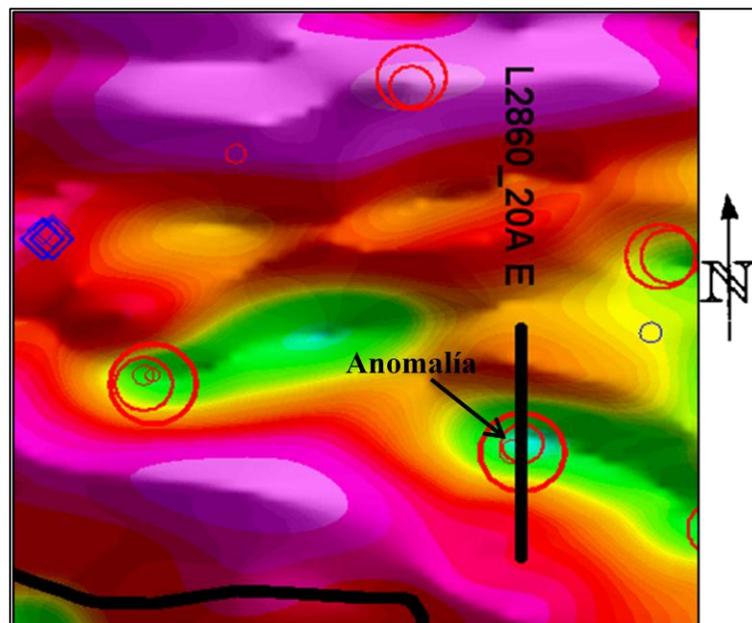


Figura N° 4.3 Anomalía magnética detectada en el perfil *L\_2860\_20A*, en la cual coinciden varias soluciones de Keating.

Previamente a realizar la adquisición de los datos a través del levantamiento geofísico terrestre el personal de *INGEOMIN* realizo visita a lugares de la zona donde se encontraban anomalías magnética y/o electromagnéticas con el fin de verificar que la anomalía fuera de interés y no una anomalía causada por objetos metálicos en la zona, por ejemplo la planta eléctrica en Santa Elena de Uairén o el aeropuerto, los cuales al realizar el procesamiento de los datos aerogeofísicos se observaba una anomalía justo en esa ubicación.

La etapa de adquisición de los datos geofísicos terrestre con la aplicación de los métodos radiométricos, magnéticos y electromagnéticos se llevó a cabo para los doce (12) perfiles seleccionados entre el 30/11/2009 y el 14/12/2009 realizando un total 18,1Km de distancia en el levantamiento geofísico terrestre. Todas las medidas tomadas en cada uno de los perfiles durante este periodo del levantamiento geofísico terrestre se realizaron siguiendo la dirección Sur-Norte, manteniéndonos siempre sobre la misma línea de la anomalía obtenida en el levantamiento aerogeofísico.

La metodología aplicada para el levantamiento geofísico terrestre a lo largo de los doce (12) perfiles se fue aplicando primero el método radiométrico, seguido del método magnético y finalizando con el método electromagnético. En el apéndice se puede observar las libretas de campo con el registro los datos electromagnéticos, magnéticos y radiométricos.

### ***4.3 Equipos utilizados y características.***

#### ***4.3.1 Radiómetro (GRS-101).***

Los datos radiométricos fueron tomados haciendo uso del *PORTABLE GAMMA RAY SCINTILLOMETER modelo GRS-101 de EXPLORANIUM*, división de GEOMETRICS Ltd. de fabricación canadiense del año de 1976.

El Scintilómetro de conteo total modelo *GRS-101* es un sistema de campo completo diseñado para aplicaciones que requieren precisión y determinación exacta de la intensidad de los rayos gamma por los elementos radioactivos: Potasio ( $K^{40}$ ), Uranio (como  $Bi^{214}$ ),

y Torio (como  $Tl^{208}$ ). La simplicidad inherente del *GRS-101* permite obtener medidas rápidas y precisas por un instrumento de campo compacto. Este es un instrumento preciso, sin embargo hay que tener mucho cuidado con la manipulación, el estado de la batería y los cambios bruscos de temperatura (Geometrics, 1975).

El *GRS-101* (Figura N° 4.4) es un instrumento que transforma la radiación incidente de rayos gamma en una lectura visual de la intensidad radiactiva con el fin de presentar la radioactividad natural presente en las rocas de la zona. Un cristal de yoduro de sodio (NaI) convierte los rayos gamma en tenues destellos de luz cuyo brillo es proporcional a la radiación gamma medida. Estos destellos de luz son detectados por una alta ganancia de un tubo foto multiplicador, amplificados y alimentando circuitos que solo aceptan que estén por encima de cierta energía. Las señales aceptadas se promedian en un circuito contador en cuentas por segundo y mostradas en el panel frontal del instrumento (Geometrics, 1975).

Este equipo posee las siguientes características:

- Energía de respuesta: conteo total (todas la energías por encima de 0.05 MeV).
- Cristal detector: 31,75x25, 4mm. Estándar.
- Peso: 1,1 Kg.
- Cubierta: Aluminio.
- Rango de muestreo: hasta 10000 C.P.S. (cuentas por segundo).



Figura N° 4.4 Radiómetro utilizado en el levantamiento geofísico terrestre.

### 4.3.2 Magnetómetro (G-856).

Las medidas del método magnético fueron tomadas mediante el uso del magnetómetro de precesión protónica *GEOMETRICS G-856* Ltd. de fabricación norteamericana, medidor de la componente total del campo geomagnético terrestre cuya precisión de fabricación es de 1nT (nanotesla) pero que actualmente puede variar entre 5-15nT.

Un magnetómetro es un instrumento para medir la intensidad del campo magnético de la Tierra. La mayoría de las rocas contienen magnetita, el mineral magnético más común, y de ahí que se produzca una alteración en el campo magnético local (Geometrics, 1994). Este magnetómetro posee un panel frontal como se muestra en la Figura N° 4.5 y un sensor tal como el de la Figura N° 4.6.



Figura N° 4.5 Panel frontal del magnetómetro G-856 utilizado en el levantamiento magnético terrestre (Tomada de Geometrics, 1994).

Este equipo posee los siguientes comandos en el panel frontal:

*AUTO*: Inicia y detiene el modo de almacenamiento automático de lecturas.

*ERASE*: Borra una lectura, el último grupo de lecturas, o toda la memoria. (Se debe oprimir dos veces).

*RECALL*: Acceso a la memoria.

*STORE*: Almacena lecturas en la memoria.

*READ*: Toma una medición del campo magnético.

*FIELD/TIME*: Despliega el campo magnético o la hora.

*STATION/DAY*: Despliega el número de estación, también el día Juliano, o el número de línea. También despliega la intensidad de señal, sintonía y voltaje de la batería.



Figura N° 4.6 Sensor del magnetómetro de precesión protónica (Tomada de Geometrics, 1994).

El sensor del magnetómetro de precesión protónica (Figura N° 4.6) de forma cilíndrica el cual contiene un liquido abundante en átomos de hidrogeno (agua, aceite o alcohol) y está rodeado por una bobina inductora (Figura N° 4.7a). El sensor se encuentra conectado mediante un cable a una pequeña unidad de energía y con la electrónica necesaria para la medición de la frecuencia de la señal. Al aplicar la energía a la bobina se crea un campo magnético  $B_p$  paralelo al eje de la bobina. Los núcleos de hidrogeno (protones), los cuales se comportan como pequeños *Spines Dipolares* están orientados a lo largo de la dirección de este campo magnético (Figura N° 4.7c).

Cuando la energía es removida los núcleos de hidrogeno realizan un movimiento de precesión alrededor del campo magnético total terrestre (figura N° 4.7d), la frecuencia de esta precesión es dada por:

$$f = \frac{\gamma_p B_e}{2\pi}$$

donde  $\gamma_p$  es el radio giromagnético del protón y  $f$  la frecuencia de precesión de Larmor. Debido a que la frecuencia de precesión es proporcional al campo magnético total, este puede ser procesado con mucha precisión. La frecuencia  $f$  se determina mediante la medición del voltaje alterno de la misma frecuencia inducida en la bobina por la precesión de los protones.

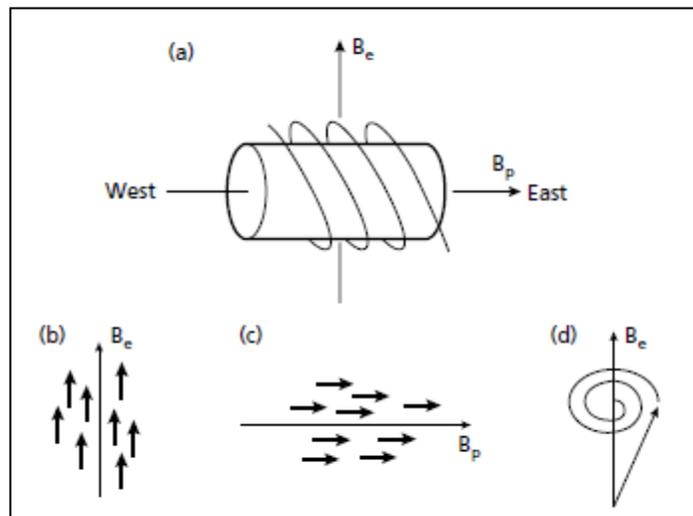


Figura N° 4.7 Principio físico del magnetómetro de precesión protónica (Tomada de Kearey, 1991).

El sensor no requiere estar orientado en alguna dirección en particular, sin embargo la mayor amplitud de la señal se obtiene si este es orientado en la dirección del campo magnético terrestre.

### 4.3.3 *Equipo Electromagnético (FDEM-8).*

Para la adquisición de los datos electromagnéticos se utilizó el equipo *FDEM-8* el cual es un equipo de medidas electromagnéticas en el dominio de la frecuencia, el cual consta de un transmisor, un receptor y dos bobinas, una transmisora y una receptora las cuales pueden estar separadas entre 1m y 50m. El equipo posee ocho (8) frecuencias de medición, el receptor controla el transmisor y toma las medidas de las ocho (8) frecuencias en cada una de las estaciones al mismo tiempo, estos datos son guardados en la memoria del receptor para luego ser descargados a la computadora. El equipo tiene las características siguientes:

#### *a) Bobinas*

- Dos bobinas (Figura N° 4.8): una transmisora y una receptora las cuales son conectadas al transmisor y al receptor mediante un cable.
- Un diámetro aproximado de 1m y peso de 2.5Kg.
- La bobina receptora consta de 400 vueltas y la transmisora de 50 vueltas.



Figura N° 4.8 Bobinas del equipo FDEM-8 (tomada de [www.geoafrica.co.za](http://www.geoafrica.co.za)).

#### *b) Transmisor*

- Tiene las siguientes dimensiones 220x75x225mm y un peso de 6kg (Figura N° 4.9).

- Tiene una batería recargable de ácido de plomo sellada, con indicadores LED los cuales indican cuando la batería está baja, cuando la batería está descargada y cuando se está cargando la batería.
- La batería se carga con una fuente de poder externa, esta opera con 220V.
- Posee un conector “TRIG” para el cable de sincronización con el receptor, un interruptor ON/OFF en el panel frontal.
- La batería posee un fusible de protección de 2 Ampere.
- En la tabla N° 4.3 se observan las características de salida del transmisor:

| Frecuencia (Hz) | Corriente de Salida (mA) | Potencia (Watt) |
|-----------------|--------------------------|-----------------|
| 4800            | 143                      | 3,24            |
| 2400            | 223                      | 5,06            |
| 1200            | 413                      | 9,37            |
| 600             | 752                      | 8,91            |
| 300             | 1203                     | 27,29           |
| 150             | 1529                     | 34,68           |
| 75              | 1639                     | 37,18           |
| 37              | 1577                     | 35,77           |

Tabla N° 4.3 Características de salida del transmisor del equipo FDEM-8 (tomada del manual de FDEM-8).



Figura N° 4.9 Transmisor del equipo FDEM-8 (tomada de [www.geoafrica.co.za](http://www.geoafrica.co.za)).

c) **Receptor**

- Tiene las siguientes dimensiones 260x170x200mm y un peso de 5.5Kg. (ver la Figura N° 4.10).
- Cuenta con 8 frecuencias de medición: 37, 75, 150, 300, 600, 1200, 2400, 4800, todas en Hertz (Hz).
- Cuenta con un teclado numérico de 16 botones para el manejo del operador.
- Posee una pantalla gráfica alfanumérica con un área de visión de 132x38mm y resolución de 240x64 puntos, los contrastes de pantalla son ajustados con el teclado numérico.
- Posee un Menú en el cual se introducen los parámetros de medida.
- Lecturas de amplitud y fase de la señal recibida son guardadas en la memoria RAM, una lectura tarda aproximadamente 30seg en realizarse.
- Tiene un límite de 135 estaciones para una línea o perfil, puede guardar hasta 600 medidas en la memoria guardadas en diferentes líneas.
- En el panel frontal posee un conjunto de LED los cuales son los indicadores de la batería.
- La batería carga con una fuente de poder externa la cual opera con 220V AC.
- La batería posee un fusil de 1 Ampere de protección.

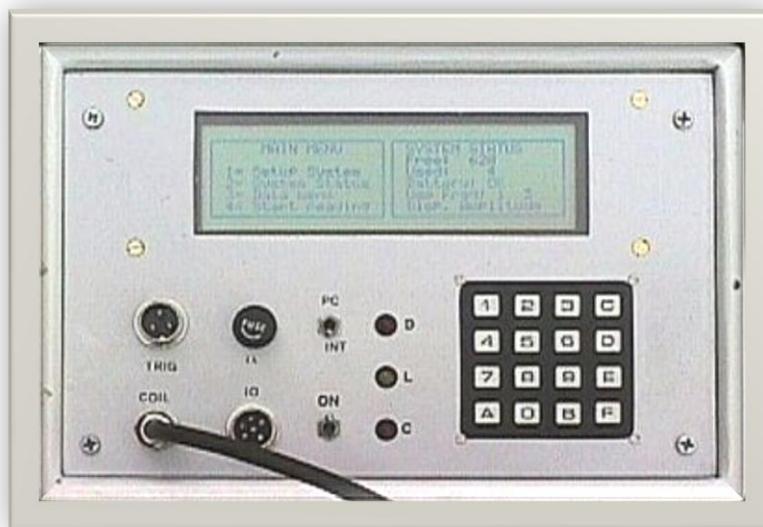


Figura N° 4.10 Receptor del equipo FDEM-8 (tomada de [www.geoafrica.co.za](http://www.geoafrica.co.za)).

#### ***4.4 Logística de adquisición de datos del levantamiento geofísico terrestre.***

Para la adquisición de los datos radiométricos se realizaron medidas en cada una de las estaciones ubicadas a lo largo de los perfiles, las cuales estaban separadas 25m una de la otra, tal como se observa en la Figura N° 4.12. Se removía la capa vegetal del suelo en cada una de las estaciones de manera que el radiómetro se mantenga en mayor contacto con el suelo (figura N° 4.11), se espera un tiempo aproximadamente de 60seg. de manera que la aguja de medición se estabilice, seguidamente se anota el valor de la medida en la libreta de campo debido a que el equipo es analógico y no posee memoria interna para almacenar los datos medidos en las estaciones.

Si el valor de la medida es mucho mayor que la escala en la cual se encuentra el radiómetro al momento de realizar la medida, este emitirá un sonido el cual nos indicara que debemos cambiar el radiómetro a una escala de medición mayor para realizar dicha medida. Luego colocar nuevamente el radiómetro en el suelo y esperar que se estabilice la aguja de medición para poder tomar el valor de la lectura en la estación.

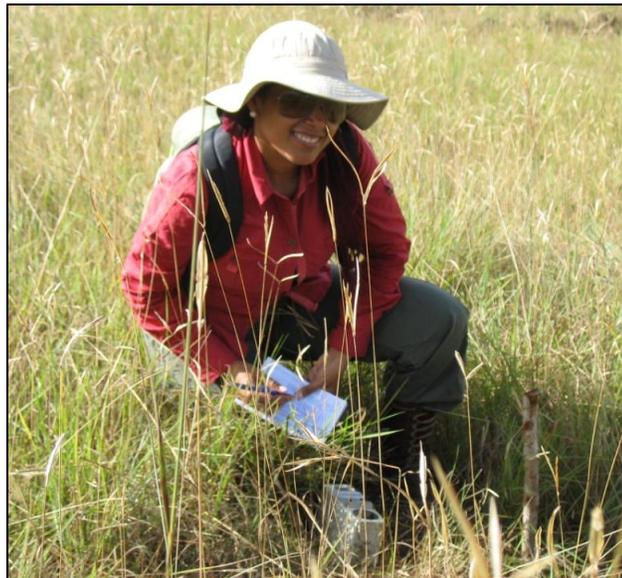


Figura N° 4.11 Adquisición de los datos radiométricos.

Para la adquisición de datos magnéticos se utilizaron dos magnetómetros de precesión protónica, uno como estación base y el otro se utilizó como magnetómetro móvil para realizar las medidas a lo largo de cada perfil. El magnetómetro utilizado como estación base fue colocado al inicio de cada perfil, con el sensor apuntando en la dirección del Norte magnético y alejado suficientemente de fuentes disturbantes (cercas metálicas, alambres, líneas de corriente, entre otros) el mismo se programó para que realizara medidas cada 180seg durante el tiempo de adquisición de los datos en cada perfil.

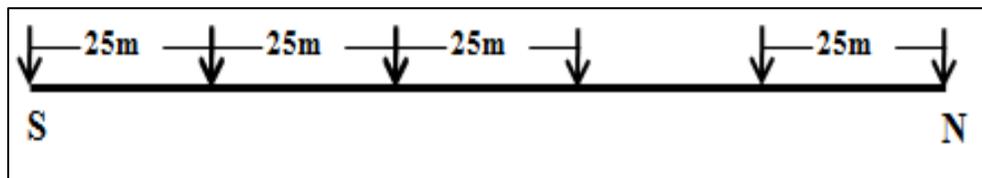


Figura N° 4.12 Esquema de adquisición de los datos magnéticos y radiométricos.

Con el magnetómetro de medición de campo se realizaron medidas en cada una de las estaciones de cada perfil las cuales estaban separadas 25m una de la otra (como se puede observar en la Figura N° 4.12), colocando el sensor apuntando en la dirección Norte magnético para realizar las medidas así como se muestra en la figura N° 4.13.

En cada una de las estaciones se realizaron tres (3) medidas de manera de obtener un promedio del campo magnético para cada estación, dichas medidas se fueron guardando en el magnetómetro de manera inmediata ya que si no se guarda de manera inmediata la medida no se guardara en el equipo, así como también fueron anotadas en una libreta de campo de manera de corroborar que los valores anotados sean los mismos que las medidas guardadas en la memoria del equipo.

Para la adquisición de los datos electromagnéticos se utilizo el equipo *FDEM-8* escogiendo la configuración de bobinas coplanares horizontales de manera de obtener una respuesta del suelo a mayor profundidad, así como también debido a que esta configuración es la más utilizada para detectar cuerpos conductores verticales que se encuentran en el subsuelo.



Figura N° 4.13 Adquisición de los datos magnéticos.

La separación entre las bobinas transmisora y receptora fue de 50mts para todos los perfiles de manera que el punto medio (25m) de medida coincidiera con cada una de las estaciones (ver Figura N° 4.14) colocando siempre el receptor hacia el Sur y el transmisor hacia el Norte de cada perfil respectivamente y las bobinas horizontalmente como se observa en la figura N°4.15.

Antes de comenzar a realizar las medidas a lo largo del perfil es necesario introducir en el receptor mediante su teclado alfanumérico los parámetros de adquisición tales como: separación entre bobinas, separación entre estaciones y el número de estaciones que se encuentran a lo largo del perfil.

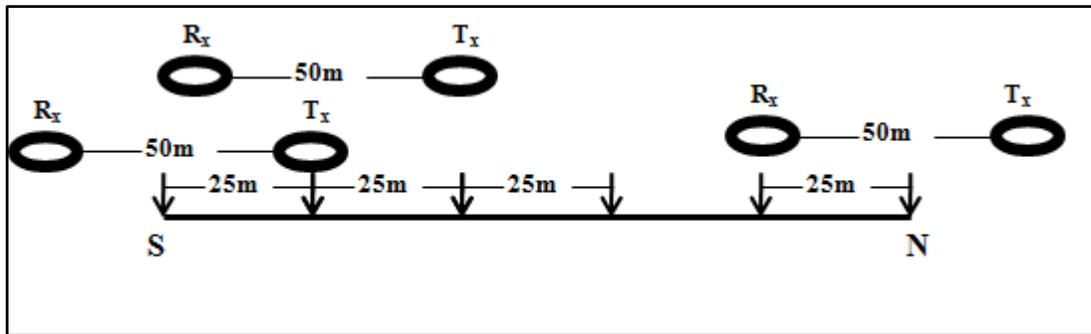


Figura N° 4.14 Metodología de adquisición de los datos electromagnéticos.

Luego de conectar transmisor y receptor con su bobina transmisora y receptora respectivamente e interconectarlos entre ellos se comenzó a medir la respuesta en el subsuelo de las ocho (8) frecuencias emitidas por el transmisor en cada una de las estaciones de cada perfil las cuales tardan un tiempo aproximado de 30seg, son mostrados los valores de amplitud de las ocho (8) frecuencias en la pantalla LCD del receptor; estos datos son guardados en la memoria del equipo FDEM-8, así como también anotados en la libreta de campo de manera de ser verificados al descargar los datos del equipo a la computadora.



Figura N° 4.15 Adquisición de los datos electromagnéticos (configuración coplanar).

## **4.5 Descarga y procesamiento de los datos adquiridos.**

### **4.5.1 Datos radiométricos**

El procesamiento realizado a los datos radiométricos es sencillo, debido a que el equipo utilizado en el levantamiento geofísico terrestre, el *GRS-101* es analógico y no posee un software específico, consistió en transferir desde la libreta de campo los datos tomados en cada una de las estaciones a la computadora en un documento con formato de Excel. Luego importaron estos datos al programa *Oasis Montaj v.7.1.0* para poder realizar gráficas del Conteo Total de Radiación (CT) medida en cada una de las estaciones en función de la distancia del perfil, seguidamente se le aplicaron filtros en el mismo programa de manera de eliminar los “spikes” o lecturas erróneas.

### **4.5.2 Datos Magnéticos.**

La descarga de los datos magnéticos del magnetómetro fue realizada para ambos magnetómetros base y móvil utilizando el programa *MAGMAP 2000* el cual es un programa de Geometrics para la manipulación de datos magnéticos y aeromagnéticos. Posteriormente en este programa se realizó la corrección de deriva al instrumento móvil del campo magnético total medido en cada perfil. Ya con los datos descargados se realizó el promedio de las tres medidas tomadas en cada una de las estaciones del perfil y luego se importaron los datos al programa *Oasis Montaj v.7.1.0*, a dicho promedio del campo magnético total se le calculó la anomalía magnética restándole el valor del *IGRF*.

El cálculo del *IGRF* se realizó en el programa *Oasis Montaj v.7.1.0* ya que este programa posee un menú para el cálculo del mismo. Al seleccionar este menú aparece una ventana (Figura N° 4.16) en la cual es necesario indicar los canales en los cuales se encuentran las coordenadas (Longitud y Latitud) y altura (Z) e indicarles los nombres de cada canal de salida, ya que este nos calcula no solo el valor del *IGRF*, sino también la inclinación y declinación magnética.

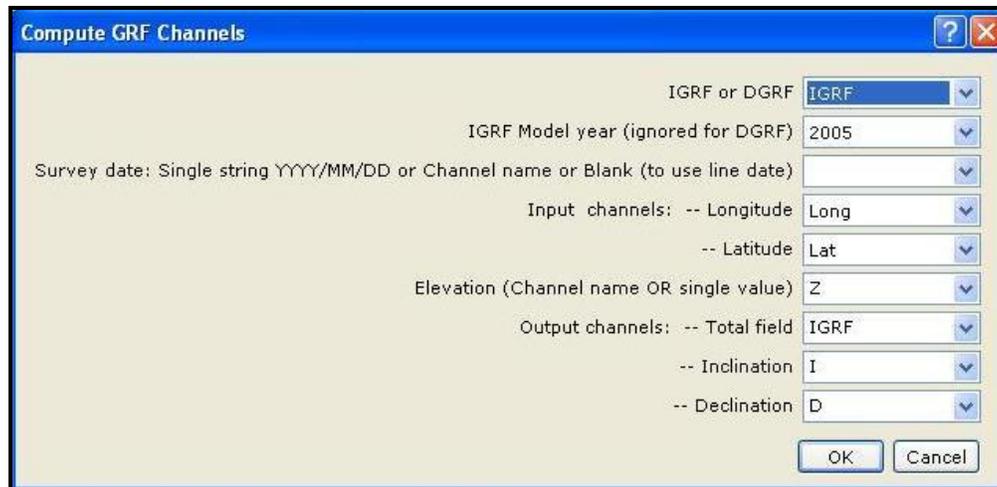


Figura N° 4.16 Parámetros para el cálculo del IGRF en el programa Oasis Montaj v.7.1.0.

Finalmente a los valores de campo magnético como a los valores de anomalía magnética obtenidos se les realizó la reducción de los datos al ecuador magnético para luego realizar perfiles de anomalía magnética para cada perfil.

Luego se calcularon las primeras derivadas horizontal y vertical, la segunda derivada vertical y la señal analítica de la anomalía magnética con la finalidad de interpretar los posibles bordes del cuerpo kimberlítico para realizar el modelado de las pipas kimberlíticas. Estos cálculos se realizaron en el programa *Oasis Montaj v.7.1.0*.

### 4.5.3 Datos electromagnéticos.

La descarga de los datos electromagnéticos adquiridos con el equipo *FDEM-8* se realizó a través del uso del programa *PCFDEM* del mismo equipo, en el cual los datos son descargados e indicándonos los valores de amplitud del voltaje en milivoltios y el desfase en grados. Los archivos son descargados en un formato *.dat* y ordenados en grupos desde la más alta hasta la más baja frecuencia como se muestra a continuación en la tabla N° 4.4:

|                                       |                     |
|---------------------------------------|---------------------|
| <b>Número de la línea</b>             |                     |
| <b>Separación de las bobinas</b>      |                     |
| <b>Separación entre estaciones</b>    |                     |
| <b>Número de estación en la línea</b> |                     |
| (Amplitud 4800 Hz)                    | (desfasaje 4800 Hz) |
| (Amplitud 2400 Hz)                    | (desfasaje 2400 Hz) |
| (Amplitud 1200 Hz)                    | (desfasaje 1200 Hz) |
| (Amplitud 600 Hz)                     | (desfasaje 600 Hz)  |
| (Amplitud 300 Hz)                     | (desfasaje 300 Hz)  |
| (Amplitud 150 Hz)                     | (desfasaje 150 Hz)  |
| (Amplitud 75 Hz)                      | (desfasaje 75 Hz)   |
| (Amplitud 37 Hz)                      | (desfasaje 37 Hz)   |
| (Amplitud 4800Hz)                     | (desfasaje 4800 Hz) |
| (Amplitud 2400Hz)                     | (desfasaje 2400 Hz) |
| (Amplitud 1200Hz)                     | (desfasaje 1200 Hz) |

Tabla N° 4.4 Formato de descarga de los datos del equipo FDEM-8 (modificada del manual de *FDEM-8*).

Luego de tener ya separados los valores de amplitud y desfasaje para cada una de las estaciones del perfil se realizó el cálculo de las componentes en fase (real) y cuadratura (imaginaria) utilizando las siguientes ecuaciones:

$A \cos(2\pi\theta)$ , para la componente real o en fase.

$A \sin(2\pi\theta)$ , para la cuadratura o componente imaginaria.

Donde  $A$  es la amplitud y  $\theta$  es el ángulo de desfasaje entre el campo primario y el campo secundario. Luego de obtener los valores de fase y cuadratura que son las componentes de interés se realizaron graficas para cada frecuencia de ambas componentes en función de la distancia del perfil en el programa *Oasis Montaj v.7.1.0*.

Utilizando la formula N° 3.23 se realizó el cálculo del *Skin depth* para determinar la profundidad que puede ser alcanzada por las frecuencias utilizadas en ambos levantamientos geofísicos (aéreo y terrestre), tomando el valor de conductividad de 0,01S/m. los valores obtenidos se muestran en la tabla N° 4.5

| <b>Frecuencia (Hz)</b> | <b>Skin depth (m)</b> |
|------------------------|-----------------------|
| <b>Aéreo</b>           |                       |
| 3400                   | 27,26                 |
| 7000                   | 60,21                 |
| 6000                   | 61,98                 |
| 980                    | 160,93                |
| 880                    | 169,83                |
| <b>Terrestre</b>       |                       |
| 4800                   | 72,71                 |
| 2400                   | 102,83                |
| 1200                   | 145,43                |
| 600                    | 205,67                |
| 300                    | 290,86                |
| 150                    | 411,35                |
| 75                     | 581,73                |
| 37                     | 828,24                |

Tabla N° 4.5 Profundidad de penetración para las frecuencias utilizadas.

Como se observa en la Tabla N° 4.5 el Skin depth aumenta cuando disminuye la frecuencia, lo cual indica que las frecuencias más pequeñas son las de mayor penetración. Se puede observar en la tabla que con las frecuencias utilizadas en el levantamiento aerogeofísico la mayor profundidad que se puede alcanzar es cercana a los 170 m. Con las frecuencias utilizadas en el levantamiento electromagnético terrestres se pueden alcanzar profundidades superiores a los 800m.

También se realizó el cálculo de la conductividad aparente para todos los doce perfiles de manera de determinar las zonas más conductoras a lo largo del mismo, este cálculo se realizó mediante la fórmula siguiente:

$$\sigma_a = \frac{4}{\omega\mu_0 S^2} \left( \frac{H_s}{H_p} \right),$$

donde  $S$  es la separación entre las bobinas transmisora y receptora,  $\omega=2\pi f$ ,  $\mu_0=4\pi*10^{-7}$  y la cuadratura dada por  $\left(\frac{H_s}{H_p}\right)$ .

#### ***4.6 Modelado de pipas kimberlitas para los perfiles seleccionados en el levantamiento geofísico.***

Para los tres (3) de perfiles seleccionados con anomalías magnéticas en el levantamiento geofísico terrestre se procede a realizar el modelado directo haciendo uso de la extensión *GM-SYS* del programa *Oasis Montaj v.7.1.0* con la finalidad de evaluar la posible existencia de pipas kimberlíticas asociadas a las anomalías.

Este modelado se realizó con los valores de anomalía magnética del levantamiento aerogeofísico de cada perfil. En la extensión *GM-SYS* se importaron los valores de anomalía magnética y los valores de topografía, luego se procedió a variar los valores de las susceptibilidades magnéticas de las rocas en el subsuelo de manera de ajustar la curva de campo magnético calculado por el programa con la curva del campo magnético medido.

En la extensión *GM-SYS* de *Oasis Montaj v.7.1.0* para comenzar a realizar el modelado luego de importar los valores de topografía y campo magnético, es necesario indicarle los valores de Inclinación y Declinación Magnética así como también el valor del campo magnético en la zona de estudio, dichos valores para la zona de estudio son los siguientes:

Campo magnético en la zona = 29869 nT.

Inclinación = 0°.

Declinación magnética = 0°.

Los valores de inclinación y declinación magnética en la zona son distintos de cero, debido a que los datos magnéticos ya se encuentran llevados al Ecuador se les colocó a

ambas componentes (inclinación y declinación magnética) el valor de cero. El campo magnético en la zona se calculó a través de la página oficial del IGRF en la cual se introdujeron las siguientes coordenadas UTM (704089.38, 509549.65, 1206), las cuales se transformaron a coordenadas geográficas ya que la pagina oficial del IGRF nos pide las coordenadas geográficas, sabiendo que nos encontramos en la zona 20N al realizar la transformación de coordenadas se obtuvo (-61.1603, 4.6075 las cuales pertenecen a longitud y latitud respectivamente.

#### ***4.7 Construcción de un modelo geológico para determinar el espesor de la Provincia Geológica de Roraima al Nor-Este de la zona de estudio.***

Para realizar el modelo geológico con la finalidad de determinar el espesor de la Provincia Geológica de Roraima al Nor-Este de la zona de estudio, se trazó un perfil (A-A') con una dirección E38°N (Figuras N° 4.17 y N° 4.18), con extensión de 16,75Km. Como se observa en las figuras N° 4.17 y N° 4.18 la respuesta de la relación Th/K y la respuesta magnética al Nor-Este del perfil es muy similar a las rocas de la provincia Cuchivero, debido a esto se dice que el espesor de Roraima es muy pequeño y la contribución a la respuesta proviene casi totalmente de las rocas de la provincia de Cuchivero.

En el trazado del perfil en el programa *Oasis Montaj v.7.1.0* se extrajeron los valores del campo magnético total y anomalía magnética y los valores de topografía.

Para la construcción de este modelo geológico 2D se utilizó la extensión *GM-SYS* del programa *Oasis Montaj v.7.1.0* en el cual se fueron ajustando los valores de susceptibilidades magnéticas de las rocas en cada una de las provincias geológicas basándonos en la información de las rocas que las constituyen.

De acuerdo con la información geológica la Provincia Geológica de Roraima está constituida por rocas sedimentarias (areniscas y areniscas conglomeraticas), mientras que la Provincia Geológica de Cuchivero está constituida por rocas ígneas (riolitas, riocitas porfídicas) y el dique el cual es una intrusión ígnea está constituido por diabasas.

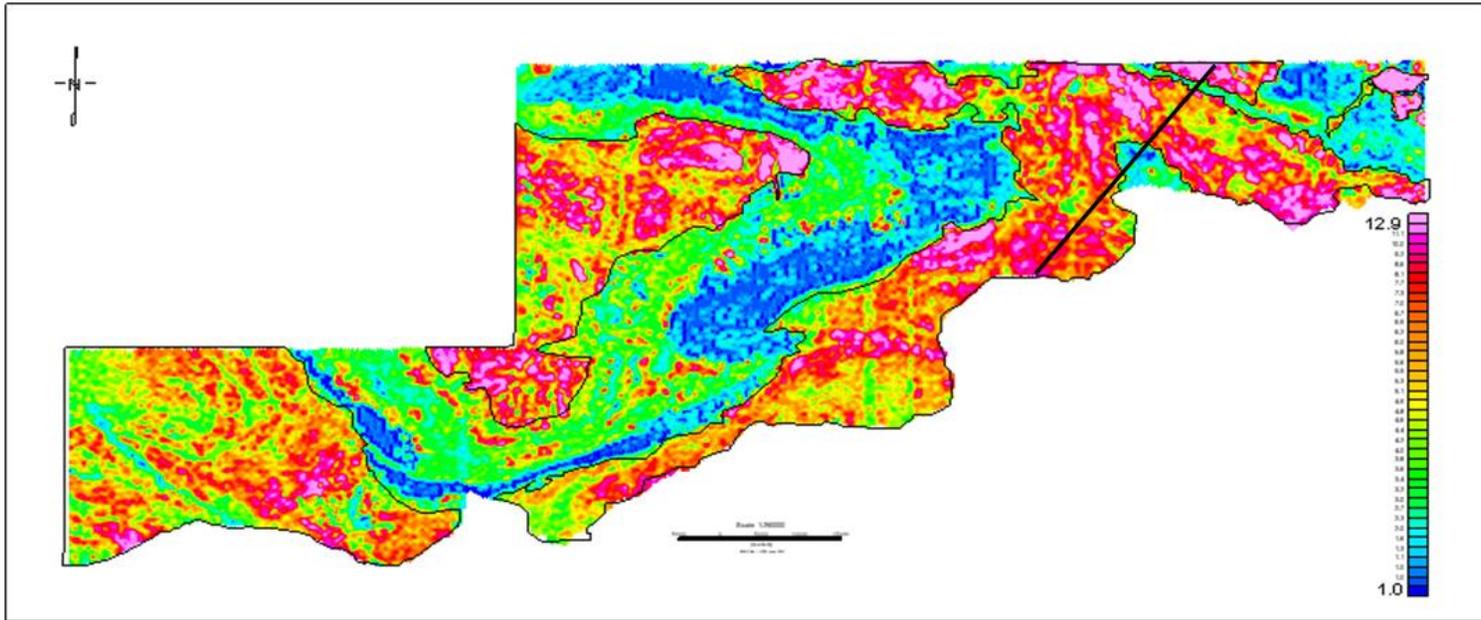


Figura N° 4.17 Mapa de la relación Th/K del levantamiento aerogeofísico (Tomada de Guevara et al, 2008).

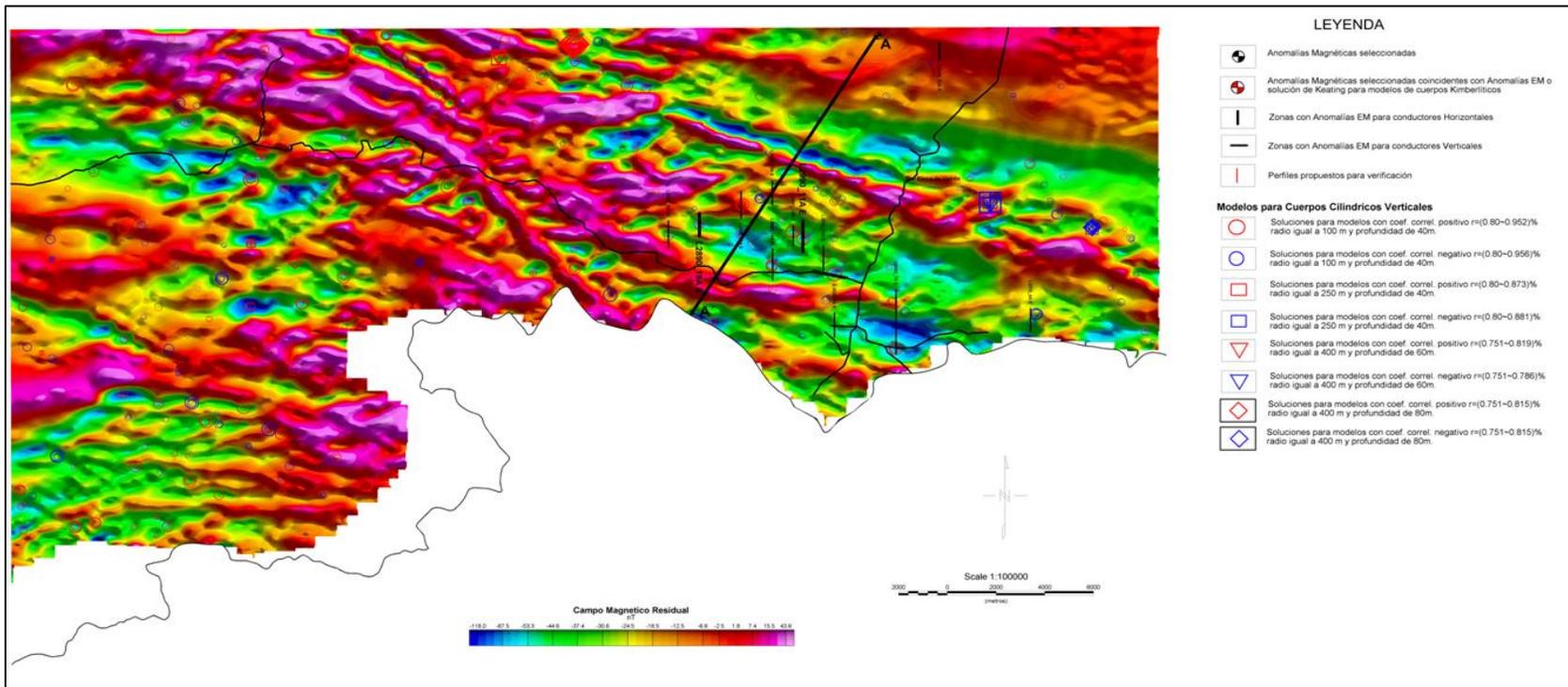


Figura N° 4.18 Mapa de anomalía magnética obtenido en el levantamiento aerogeofísico, en la cual se observan los doce perfiles y el perfil A-A' para la construcción del modelo geológico.

## **5 RESULTADOS Y ANALISIS DE LOS DATOS.**

### **5.1 Interpretación cualitativa de los perfiles.**

De los doce (12) perfiles seleccionados por *INGEOMIN*, siete (7) de ellos muestran respuestas interesantes observadas en el levantamiento geofísico terrestre los cuales describiremos a continuación. Estos perfiles son los siguientes: *L\_2990\_11A*, *L\_2960\_15A*, *L\_2960\_14A*, *L\_2860\_20A* y *L\_3120\_53A*, *L\_3210\_4A* y *el L\_2981\_12A*.

En la descripción de los datos electromagnéticos del levantamiento aerogeofísico se hace mayor enfoque para las frecuencias más pequeñas ya que con estas se detectan la mayor cantidad de anomalías, estas frecuencias son las siguientes: 880Hz, 980Hz y 6000Hz. Así como también es importante indicar que los resultados de los levantamientos electromagnéticos aéreo y terrestre se encuentran en distintas unidades de medidas, los resultados aéreo se encuentran en partes por millón (ppm) y los terrestres en milivoltios (mV), por lo cual se realizara su comparación en base a las tendencias de las curvas.

El perfil *L\_3120\_53A* se encuentra ubicado al Nor-Este de la zona de estudio (Figura N° 4.1). En la figura N° 5.1a se muestra la topografía del perfil y en la figura N° 5.1b se presenta la respuesta de anomalía magnética, en la figura N° 5.2 la respuesta electromagnética aérea (fase y cuadratura) y en la figura N° 5.4 la respuesta radiométrica del levantamiento aerogeofísico.

Este perfil fue seleccionado debido a que presentaba una anomalía electromagnética para las frecuencias de 880Hz y 980Hz (en fase y en cuadratura) ubicada aproximadamente entre los 300m y 700m de distancia como se puede ver en las figuras N° 5.2.

En la figura N° 5.1b, se observa la tendencia en línea recta de la curva del campo magnético obtenida en el levantamiento aerogeofísico en la cual se observan los mínimos valores al inicio del perfil y los máximos al final del mismo. La curva del campo magnético del levantamiento terrestre (línea verde) como se puede ver en la misma figura posee la

misma tendencia que la curva del campo magnético del levantamiento aerogeofísico (línea roja) en la cual los mínimos valores se encuentran al Sur del perfil y los máximos valores hacia el Norte. En la figura se observa una pequeña anomalía magnética positiva en la curva del levantamiento magnético terrestre la cual está ubicada entre los 500m y 600m aproximadamente. Es posible que en el levantamiento aeromagnético no se haya podido detectar la anomalía debido al cambio brusco (200m) de la topografía como se puede ver en la figura N° 5.1a ya que el helicóptero no pudo nivelar su altura, es decir que voló los primeros 500m a una altura de vuelo y al llegar al cambio de topografía se mantuvo a la altura que ya traía debido a que no pudo bajar para mantener la misma altura sobre el nivel del suelo o por efectos de la atenuación debido a la altura.

También entre los 400m y 600m se observa una anomalía electromagnética la cual fue detectada por el levantamiento aerogeofísico como se observa en la figura N° 5.2a y 5.2b, fase y cuadratura respectivamente. Esta anomalía electromagnética entre 400m y 600m también fue detectada por el levantamiento electromagnético terrestre (Figuras N° 5.3). Se puede observar como aumenta la amplitud de las señales en fase (Figura N° 5.3a) y cuadratura (Figura N° 5.3b) justo al llegar a los 400m lo que puede estar indicando una zona con mayor conductividad como se puede notar en la figura N° 5.4a obtenida a partir de la ecuación 3.26 Capítulo III. También se puede observar una pequeña anomalía electromagnética al comienzo del perfil detectada en el levantamiento electromagnético terrestre (Figuras N° 5.3) la cual no fue detectada en el levantamiento aerogeofísico.

Los cuerpos conductores en base a las frecuencias que poseen mayores amplitudes (300Hz y 600Hz) se encuentran a profundidades entre 200m y 300m en base al Skin depth (Tabla N° 4.5).

En cuanto a la radiación del levantamiento geofísico terrestre a lo largo del perfil se puede observar grandes valores de radiación de conteo total (Figura N° 5.4b) aunque no se puede saber a qué elemento pertenecen, se podría inferir que existen grandes valores de potasio debido a la disminución de la relación de Th/K del levantamiento aerogeofísico que se muestra en la misma figura.

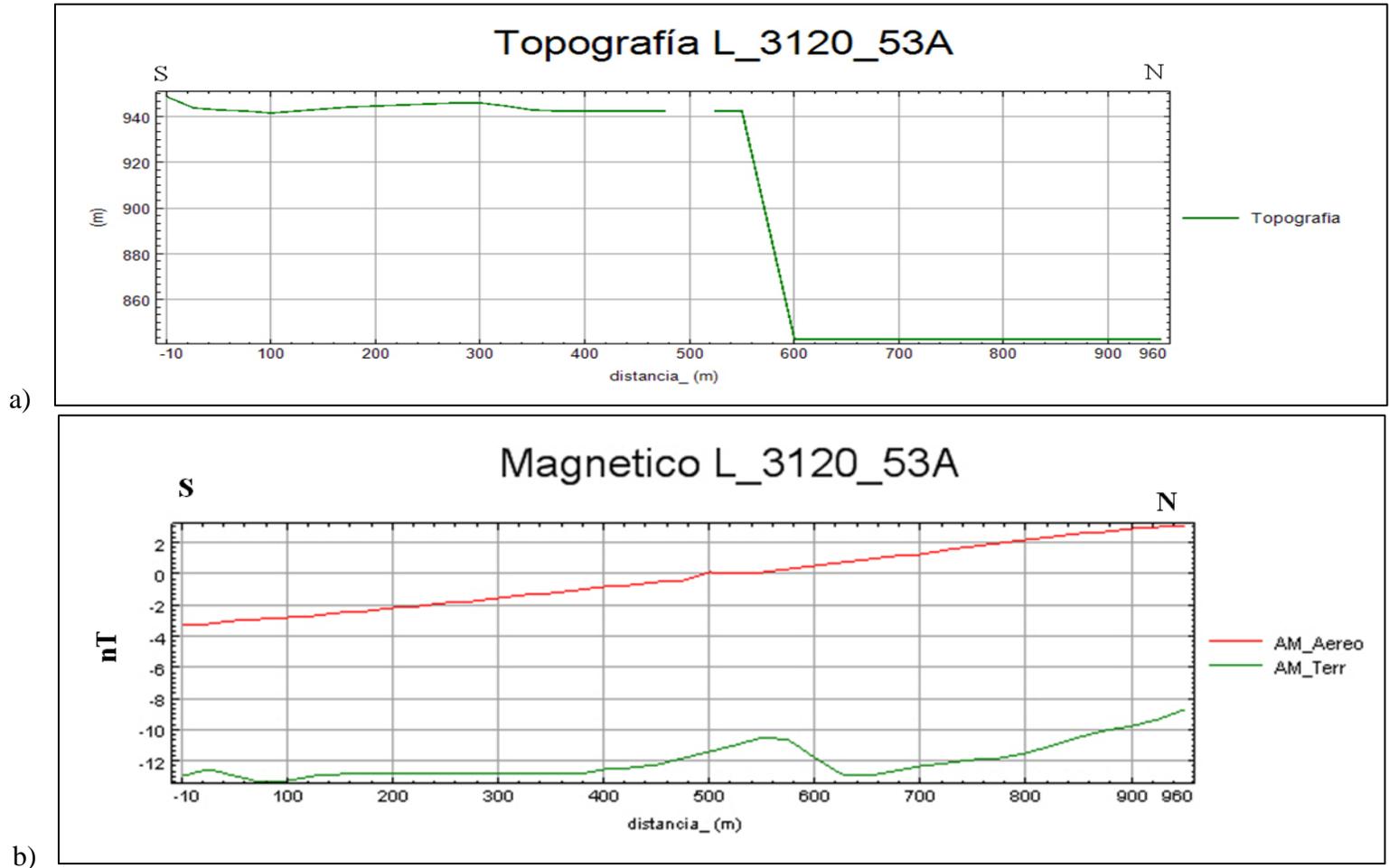
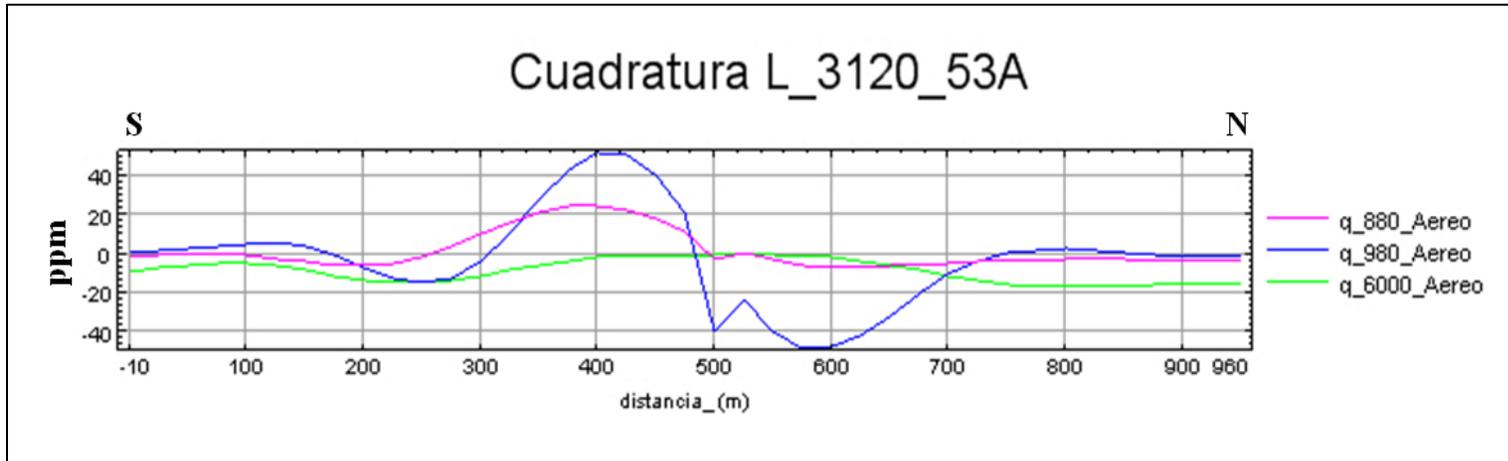
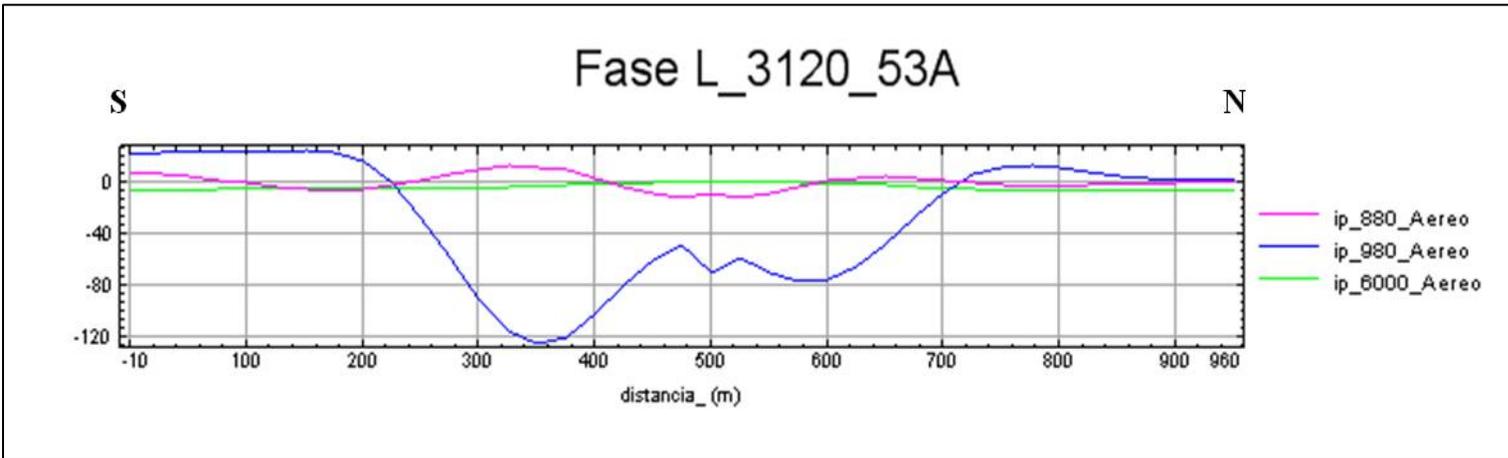


Figura N° 5.1 a) Topografía del perfil b) Respuesta magnética del levantamiento aerogeofísico y geofísico terrestre.



a)



b)

Figura N° 5.2 Respuesta electromagnética del levantamiento aerogeofísico del perfil L\_3120\_53A: a) Cuadratura, b) Fase.

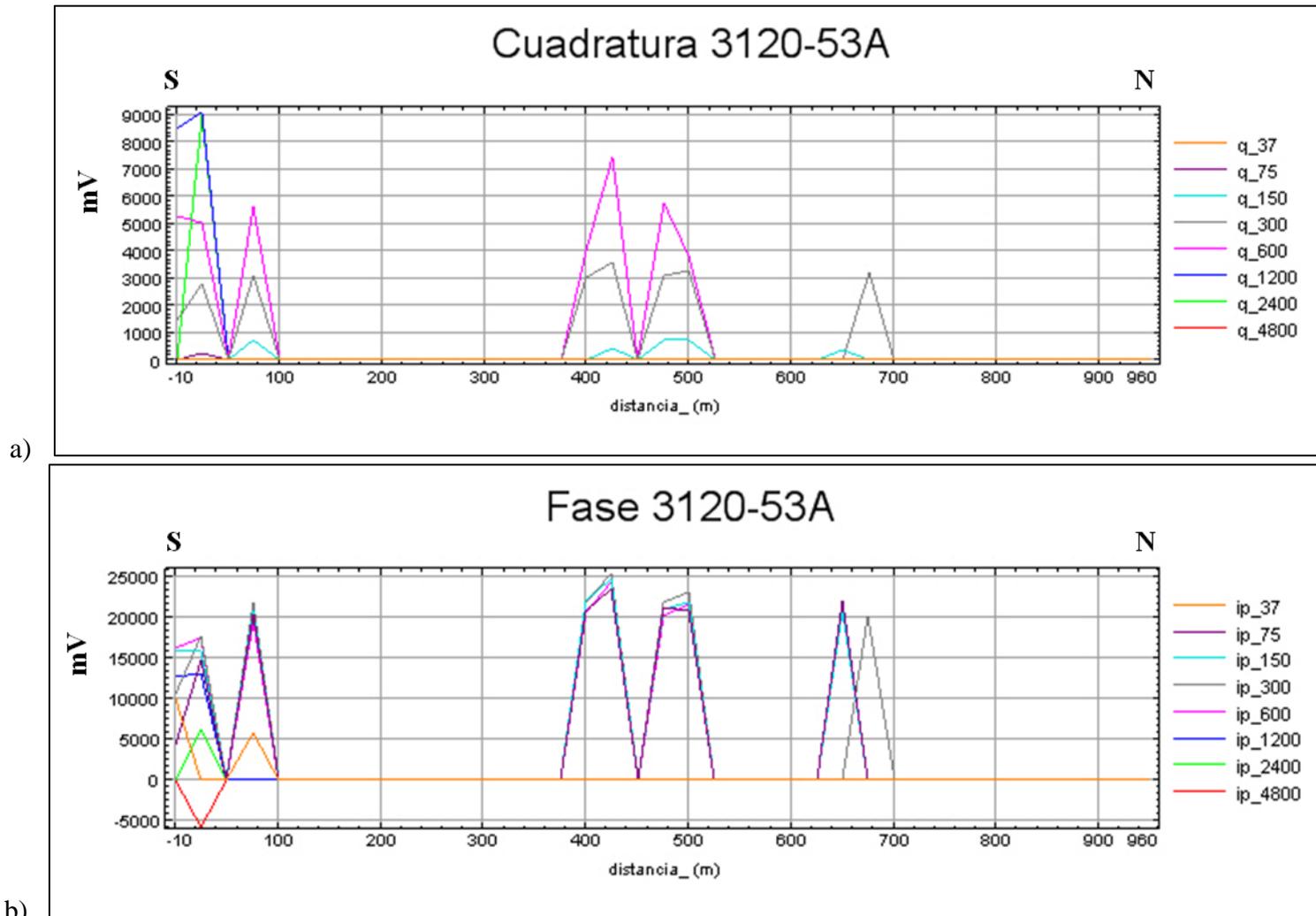


Figura N° 5.3 Respuesta electromagnética del levantamiento electromagnético terrestre del perfil L\_3120\_53A: a) Cuadratura, b) Fase.

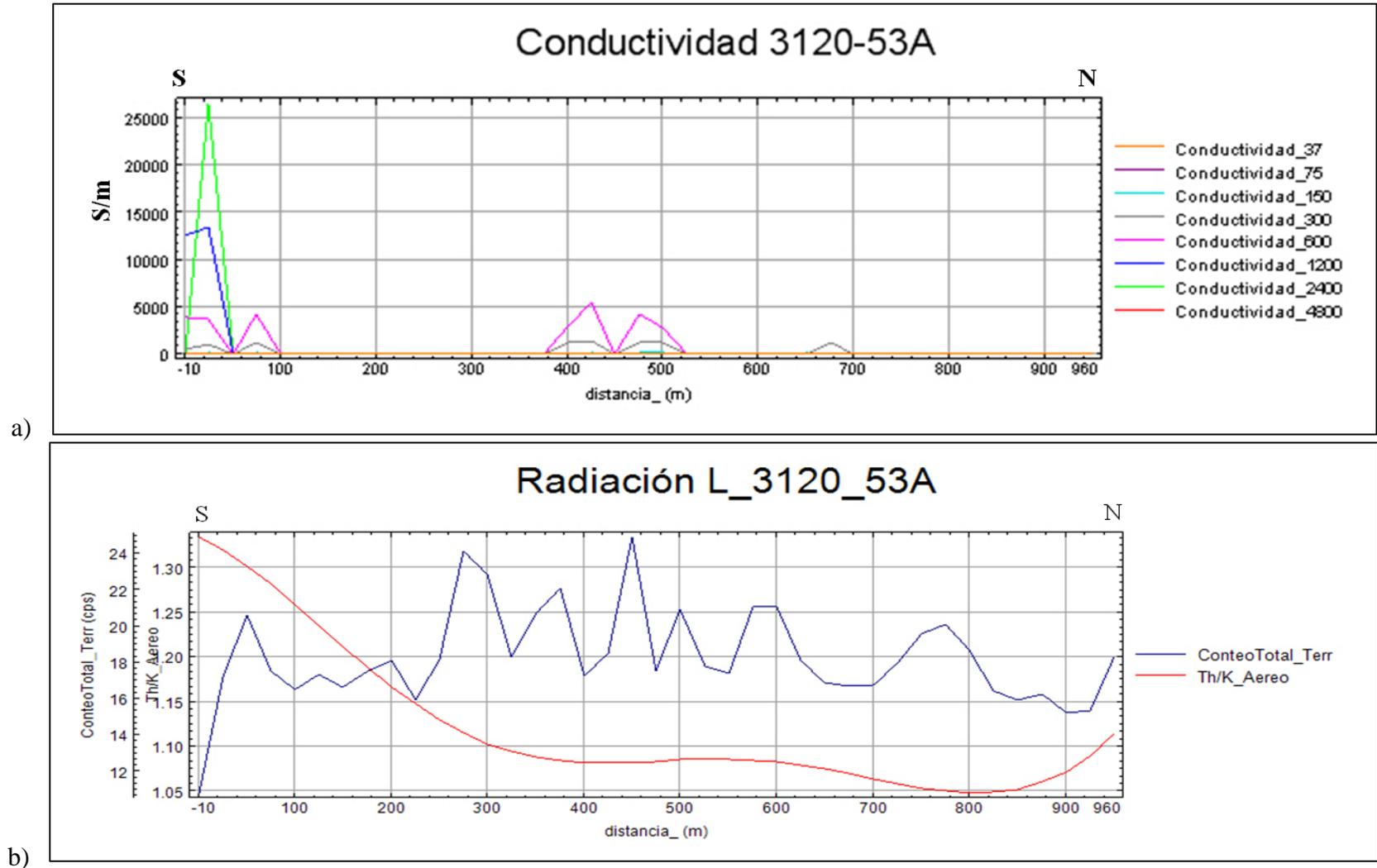


Figura N° 5.4 a) Conductividad, b) Radiación del perfil L\_3120\_53A.

Este perfil L\_3120\_53A se encuentra ubicado en una zona donde afloran rocas de la Provincia Geológica de Roraima. Al inicio del perfil se observan afloramientos bien expuestos de areniscas cuarcíticas de color rosado (esta coloración puede estar asociada a la presencia de Feldespato potásico), compactas, de escogimiento moderado, mal estratificadas. Entre las estaciones 12 (300m) y 14 (350m) se observan areniscas cuarzosas, de color gris claro, friable, ocasionalmente con fragmentos de Cuarzo blanco soportados en una matriz arenosa.

Al final del perfil se observan en la base de la secuencia conglomerados (Figura N° 5.5) mal estratificados de fragmentos heterométricos, generalmente constituidos por Cuarzo blanco de formas sub-redondeados a sub-angulosos, en una matriz arenosa, así como la presencia de óxido de hierro. A lo largo de este perfil no se observan cambios de litología.



Figura N° 5.5 Afloramiento de conglomerados en el perfil L3120\_53A.

En las cercanías del final del perfil L\_3120\_53A, al Nor-Este existe la explotación de una minería ilegal por lo cual este perfil resulta de gran interés para la búsqueda de pipas kimberlitas.

En conclusión para este perfil la anomalía magnética obtenida en el levantamiento magnético terrestre ubicada entre los 500m y 600m podría estar relacionada con la anomalía electromagnética obtenida en ambos levantamientos. Este perfil no fue seleccionado para realizarle un modelado debido a que la anomalía de mayor interés es la electromagnética obtenida en los levantamientos aéreo y terrestre.

El perfil *L\_2860\_20A*, caracterizado por pendientes de topografía relativamente fuertes con cambios de topografía de hasta 150m (Figura N° 5.6a) se encuentra ubicado al Oeste de la zona de estudio como se puede ver en la figura N° 4.1.

Este perfil fue seleccionado por INGEOMIN debido a la presencia de una anomalía magnética negativa ubicada aproximadamente entre 550m y 850m, así como también por poseer una anomalía electromagnética para la frecuencia de 880Hz para las componentes en fase y cuadratura ubicada entre 400m y 600m.

En la figura N° 5.6b se observa una anomalía magnética negativa obtenida mediante el levantamiento aeromagnético la cual se encuentra aproximadamente entre 550m y 850m, en la figura se puede ver que los máximos valores al inicio del perfil los cuales disminuyen hacia el centro del mismo y alcanzando máximos valores nuevamente hacia el final. Esta anomalía se encuentra sobre una loma de una altura máxima de 160m con respecto al origen del perfil como se muestra en la figura N° 5.6a. En el levantamiento magnético terrestre se puede notar la misma tendencia de la curva en la cual son valores máximos al inicio decreciendo hacia el centro del perfil y nuevamente aumentando hacia el final (Figura N° 5.6b). Sin embargo se puede notar claramente que los datos magnéticos terrestres poseen mayor frecuencia que los datos aeromagnéticos.

Entre los 600m y 800m también se puede observar una anomalía electromagnética obtenida en el levantamiento aerogeofísico (Figuras N° 5.7). Tanto en fase y en cuadratura se puede ver una anomalía electromagnética la cual puede estar asociada a un cuerpo que se encuentra ubicado a profundidades cercanas a los 60m según el Skin depth (Tabla N° 4.5) ya que dicha anomalía es principalmente detectada por la frecuencia de 6000Hz.

En el levantamiento electromagnético terrestre se observan los mínimos valores de amplitud para las respuestas en fase (Figura N° 5.8a) y cuadratura (Figura N° 5.8b) entre los 600m y 800m creando una anomalía. Se puede ver que ambas componentes presentan mayores amplitudes para los primeros 600m del perfil así como también a partir de los 800m hasta el final. En la figura N° 5.8a se observa una pequeña respuesta para la componente en cuadratura entre 600m y 800m para las frecuencias de 300Hz, 600Hz y 1200Hz. En la figura N° 5.8b no se evidencia respuesta electromagnética para la componente en fase entre los 600m y 800m.

En la figura 5.9a se muestra la conductividad a lo largo del perfil, en la cual se observan tres zonas conductoras ubicadas entre 0 y 250m, la segunda zona entre 400m y 600m y la última zona se encuentra a partir de 800m. Según el Skin depth estas zonas se encuentran ubicadas a profundidades entre los 100m y 300m ya que como se observa en la figura son las frecuencias entre 300Hz y 2400Hz las que poseen mayor respuesta electromagnética a lo largo del perfil.

En la relación de Th/K del levantamiento aerogeofísico se observan los máximos valores al inicio del perfil, dichos valores van disminuyendo hasta aproximadamente 500m. A partir de 500m aumenta nuevamente la curva hasta los 900m y a partir de dicho valor comienza a disminuir nuevamente hasta alcanzar sus mínimos valores al final del perfil (Figura N° 5.9a). En cuanto a los valores de radiación de conteo total obtenidos en el levantamiento geofísico terrestre no se observa ninguna anomalía ya que los valores a lo largo de todo el perfil son muy constantes, solo se observa una pequeña variación entre las estaciones 9 (225m) y 11 (275m) como se puede ver en la figura N° 5.9a.

Al Sur del perfil *L2860\_20A* se observaron afloramientos de lavas ácidas a intermedias de color verde intenso manteniéndose esta litología a lo largo del perfil, entre 500m y 625m se observan grandes bloques de cuarzo disperso, justo sobre la ubicación de la anomalía.

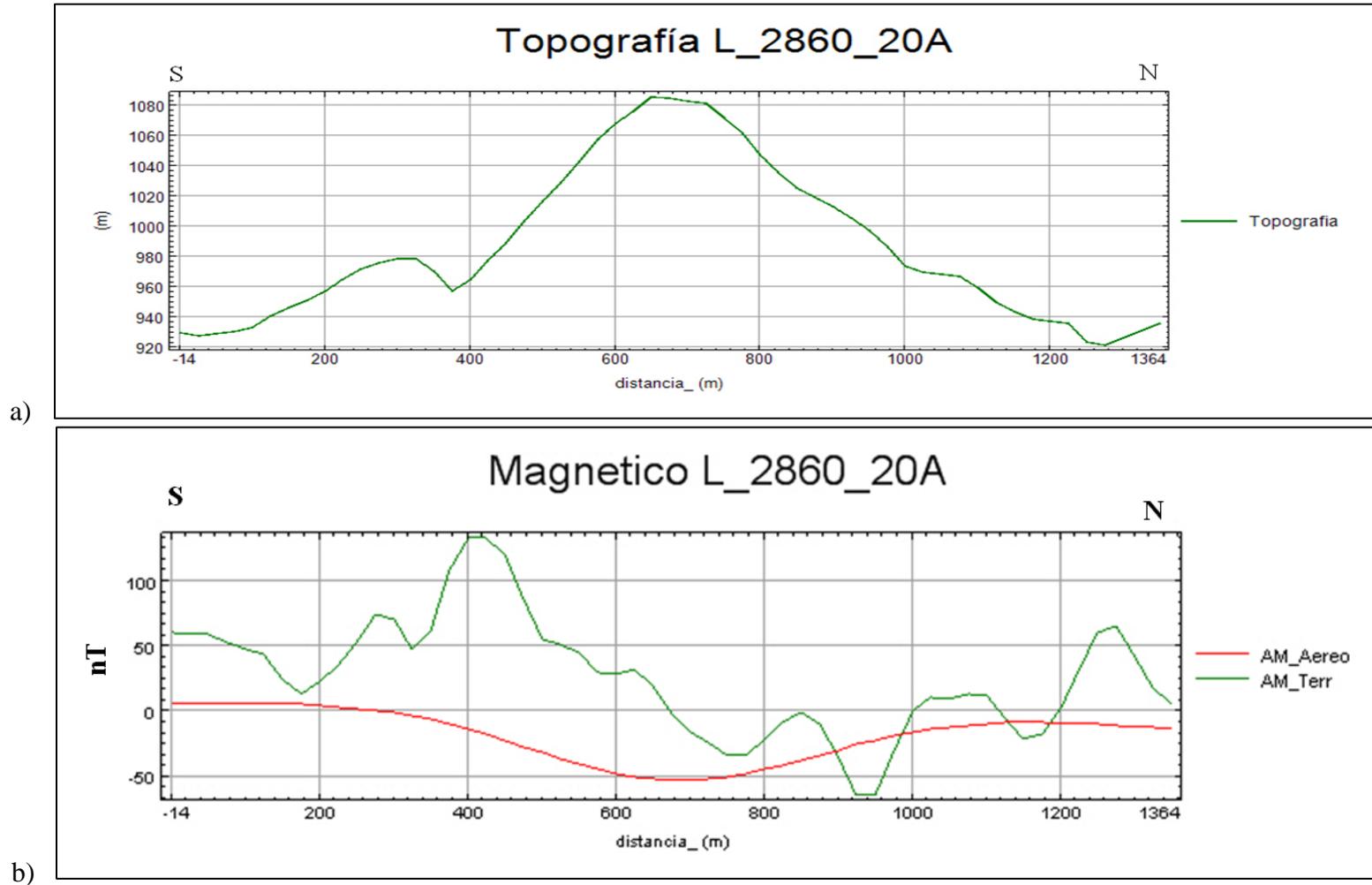
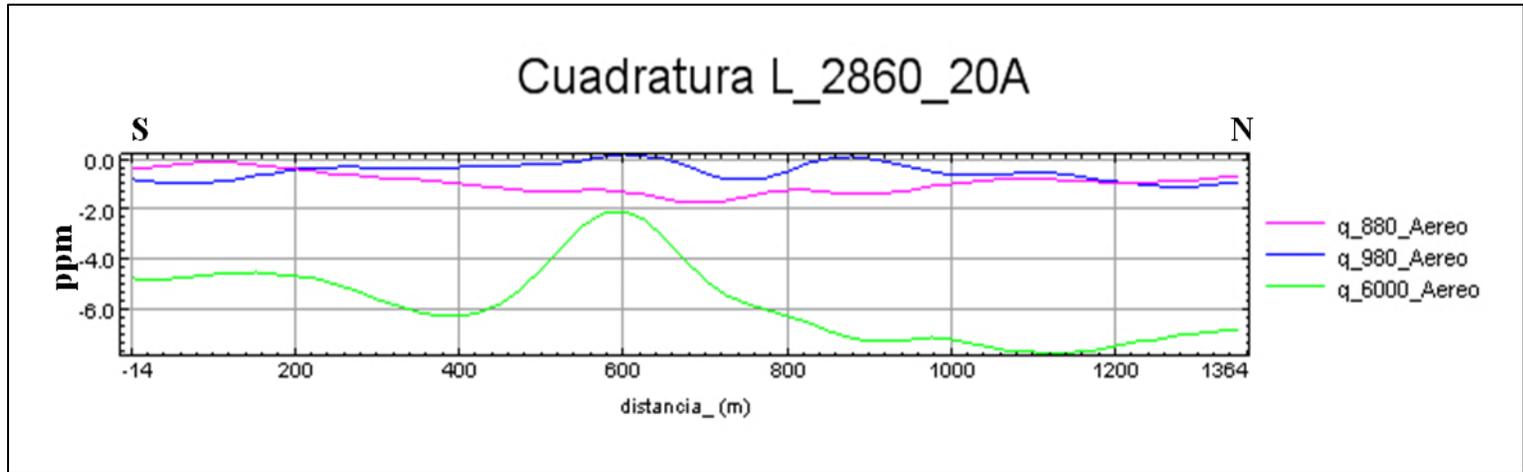
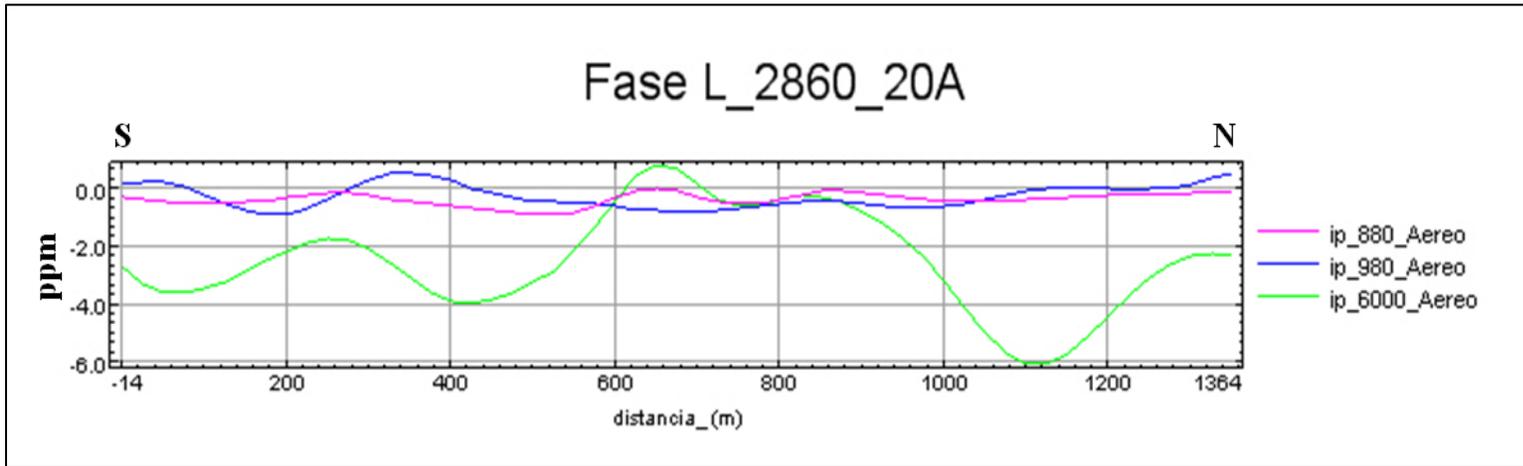


Figura N° 5.6 a) Topografía del perfil b) Respuesta magnética de levantamiento aerogeofísico y geofísico terrestre.



a)



b)

Figura N° 5.7 Respuesta electromagnética del levantamiento aerogeofísico del perfil L\_2860\_20A: a) Cuadratura, b) Fase.

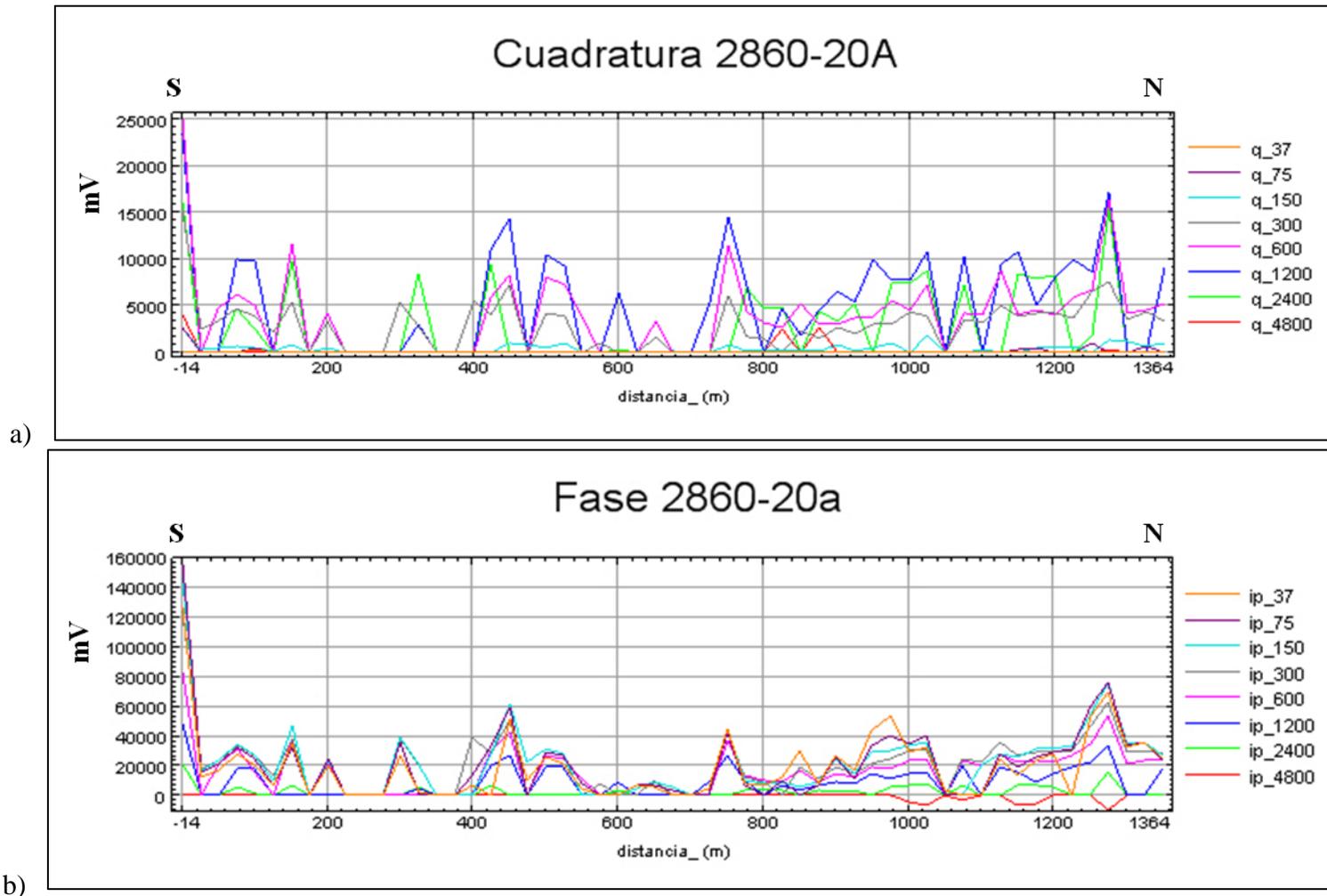
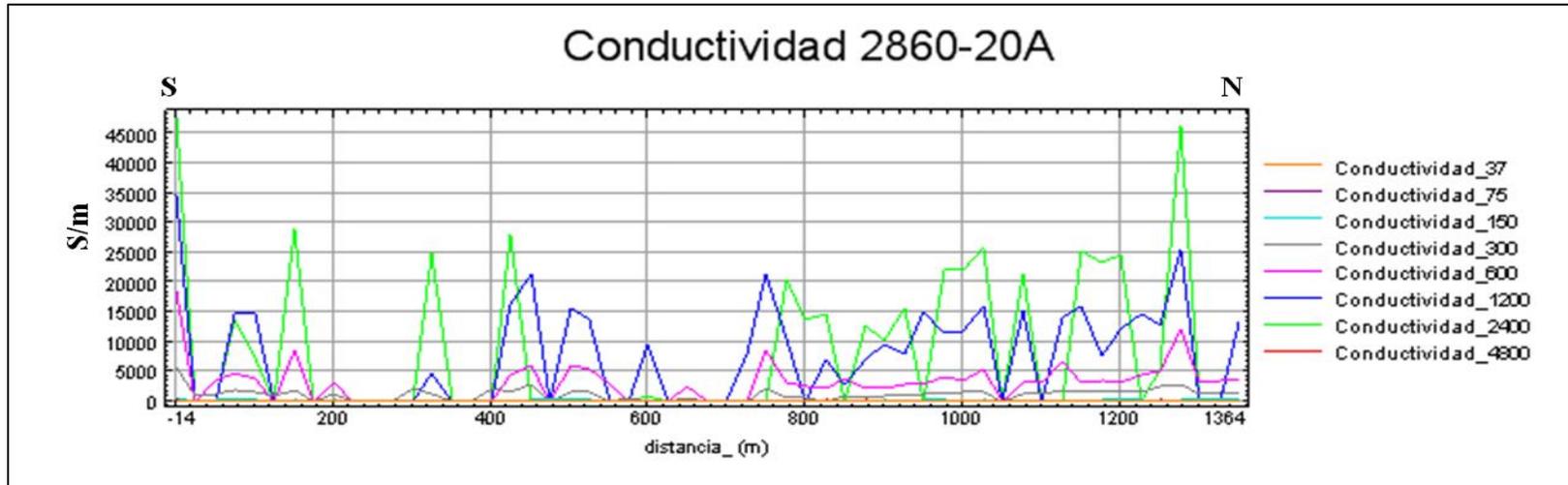
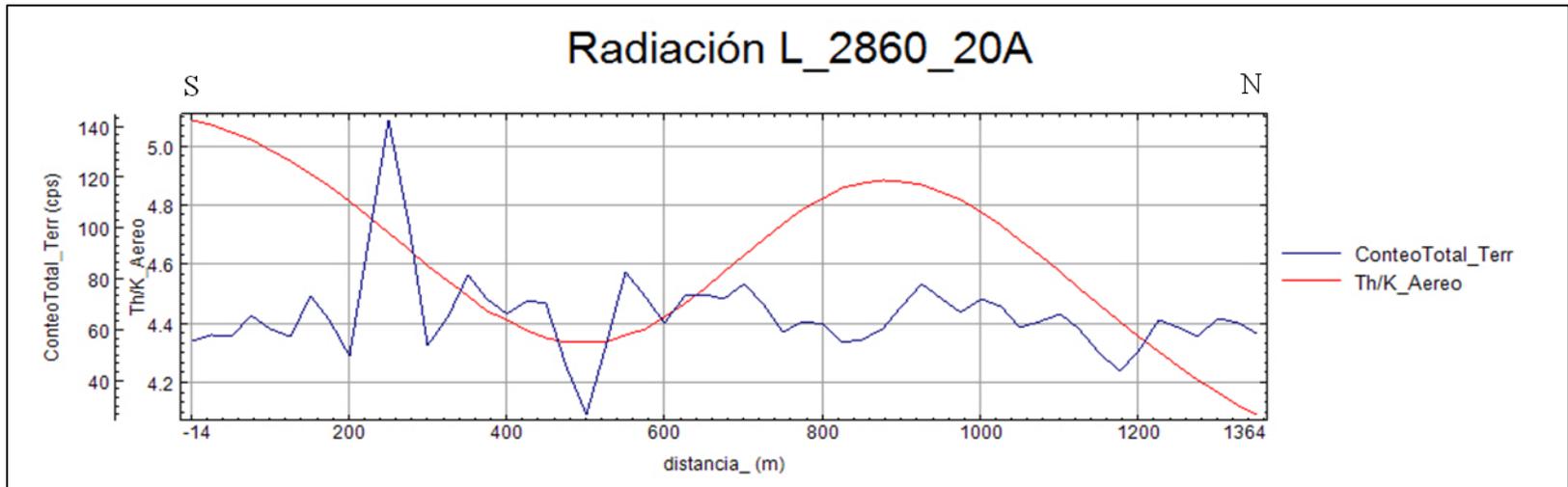


Figura N° 5.8 Respuesta electromagnética del levantamiento geofísico terrestre del perfil L\_2860\_20A: a) Cuadratura, b) Fase.



a)



b)

Figura N° 5.9 a) Conductividad, b) Radiación del perfil L\_2860\_20A.

Al final del perfil se pudo observar afloramientos de una roca tipo lava, densa, con fragmentos de mineral de color oscuro en la matriz (posiblemente piroxeno), la cual se muestra en la figura N° 5.10.



Figura N° 5.10 Afloramiento de lavas densas.

La anomalía magnética negativa obtenida para este perfil L\_2860\_20A obtenida en los levantamientos magnéticos aéreo y terrestre corresponde con la misma ubicación de la anomalía electromagnética. Las evidencias en superficie de cuarzo coinciden con la zona poco conductora obtenida en el levantamiento electromagnético terrestre y la anomalía magnética negativa respectivamente.

En este perfil se puede evidenciar en las figuras N° 5.7 y 5.8 que la anomalía electromagnética obtenida en el levantamiento terrestre no corresponde con la anomalía del levantamiento aerogeofísico. En el levantamiento aéreo la anomalía es positiva (corresponde a una zona conductora), mientras que en el levantamiento terrestre la anomalía es negativa (zona poca conductora).

Sin embargo y a pesar que existe una incongruencia en los resultados de la anomalía electromagnética aérea y terrestre, por la presencia de anomalía magnética negativa este

perfil fue seleccionado para realizar un modelado y evaluar su potencialidad como zona de interés diamantífero.

El perfil L\_2960\_14A se encuentra ubicado en el centro de la zona de estudio, como se puede ver en la figura N° 4.1. Este perfil fue seleccionado en el levantamiento aerogeofísico por poseer una anomalía magnética negativa ubicada aproximadamente entre 650m y 950m, así como también por poseer el valor máximo de la relación Th/K a los 650m del perfil, coincidiendo con la ubicación de la anomalía magnética.

En el perfil L\_2960\_14A (Figura N°5.12a) se observa una anomalía magnética negativa obtenida en el levantamiento aeromagnético (Figura N° 5.12b). En el levantamiento geofísico terrestre la tendencia de la curva con los máximos valores al inicio del perfil, estos decrecen entre 600m y 1000m y aumentan nuevamente hacia el final del perfil. La curva de los datos magnéticos terrestres (Figura N° 5.12b) presentan la misma tendencia de los datos del levantamiento aeromagnético, sin embargo se puede observar su mayor contenido de frecuencia.

La respuesta electromagnética aérea de este perfil para las componentes en fase (Figuras N° 5.13b) y cuadratura (Figuras N° 5.13a) aumentan su amplitud a partir de los 1000m, principalmente para la frecuencia de 6000Hz; la cual alcanza profundidades de 60m aproximadamente en base al Skin depth (Tabla N° 4.5).

En las figuras N° 5.14 de la respuesta electromagnética del levantamiento terrestre no se observan correspondencia entre las componentes en fase (Figura N° 5.14b) y en cuadratura (Figuras N° 5.14a) ya que ambas respuestas son muy diferentes. Para la componente en cuadratura se observa mayor repuesta en los primeros 400m del perfil así como también entre 1000m y 1200m, y a partir de los 1400m hasta el final. Mientras que en la componente en fase no presenta respuesta a lo largo del perfil exceptuando la respuesta entre 300m y 450m aproximadamente.

En la figura N° 5.15a se puede observar que las zonas mas conductoras de este perfil se encuentran ubicadas a profundidades entre 100m y 200m según el Skin depth (Tabla N°

4.5) ya que las frecuencias que poseen mayor respuestas son las de 600Hz, 1200Hz y 2400Hz.

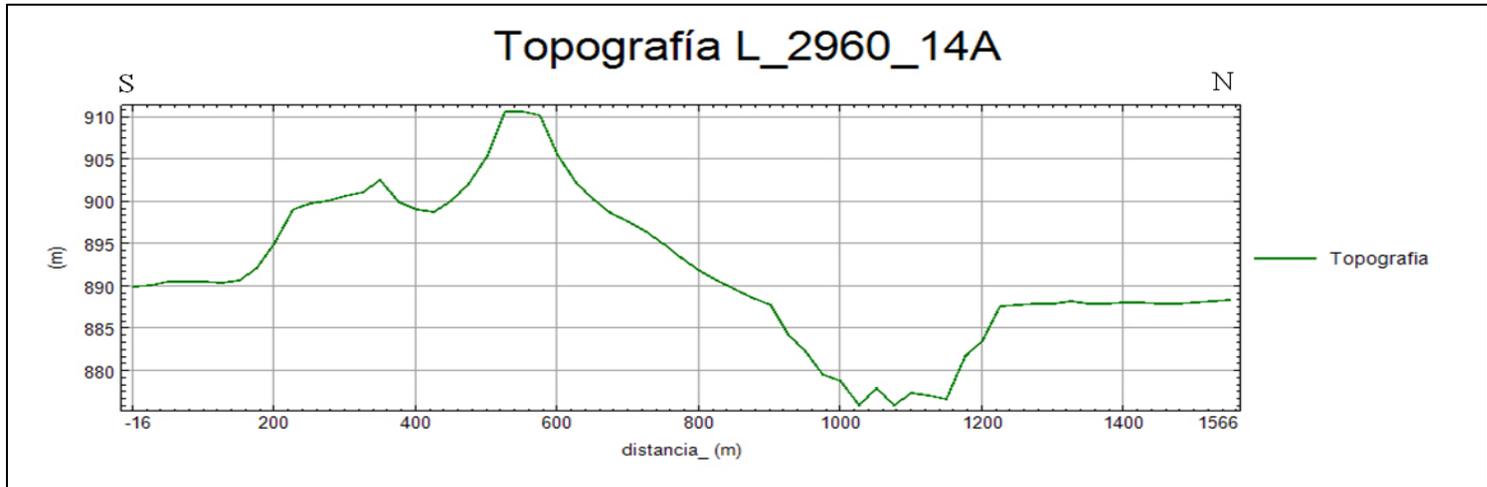
La respuesta radiométrica de conteo total del levantamiento terrestre, así como la relación de Th/K del levantamiento aerogeofísico van aumentando hacia el centro del perfil donde ambos alcanzan sus máximos valores entre 600m y 800m (figura N° 5.15b) para luego ir decayendo nuevamente los valores de conteo total y relación Th/K hacia el final del perfil.

Entre 450m y 525m, se observaron rocas ígneas acidas a intermedias (Figura N° 5.11), estos afloramientos se encuentran de forma aislada, encontrándose generalmente roca alterada con presencia de hidróxidos (posiblemente limonita o gohetita) y minerales arcillosos que meteorizan a colores pardo claro a rojo ladrillo.

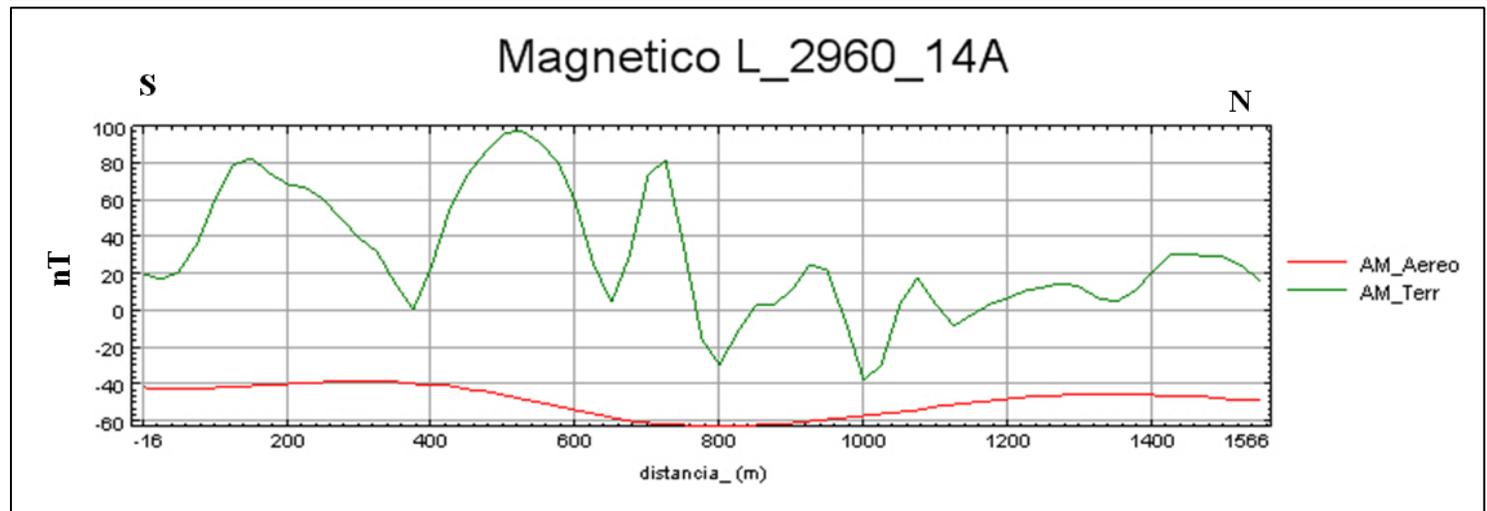


Figura N° 5.11 Afloramientos de rocas de composición acida a intermedia

En este perfil la anomalía magnética negativa obtenida en los levantamientos aéreo y terrestre coincide con la misma ubicación en la cual se encuentran los valores máximos de la relación Th/K así como también los valores de conteo total de radiación.

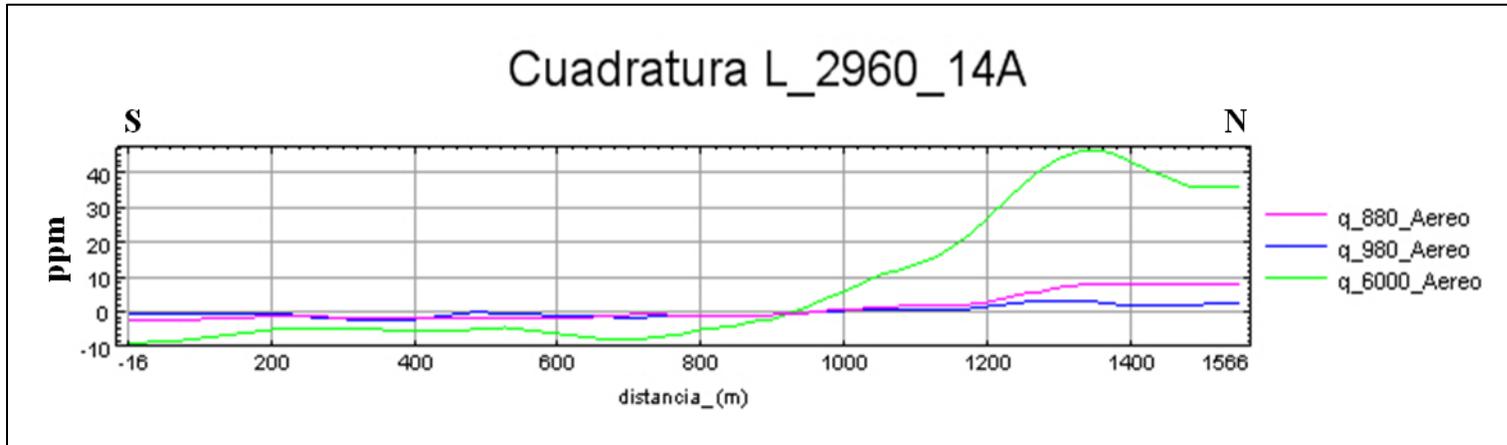


a)

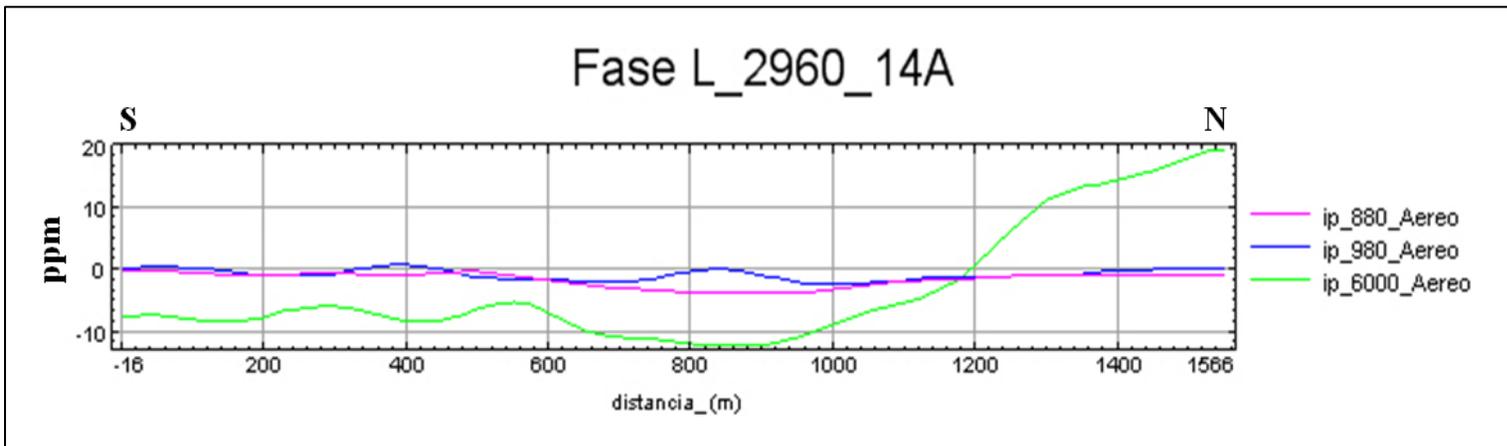


b)

Figura N° 5.12 a) Topografía del perfil b) Respuesta magnética del levantamiento aerogeofísico y geofísico terrestre.



a)



b)

Figura N° 5.13 Respuesta electromagnética del levantamiento aerogeofísico del perfil L\_2960\_14A: a) Cuadratura, b) Fase.

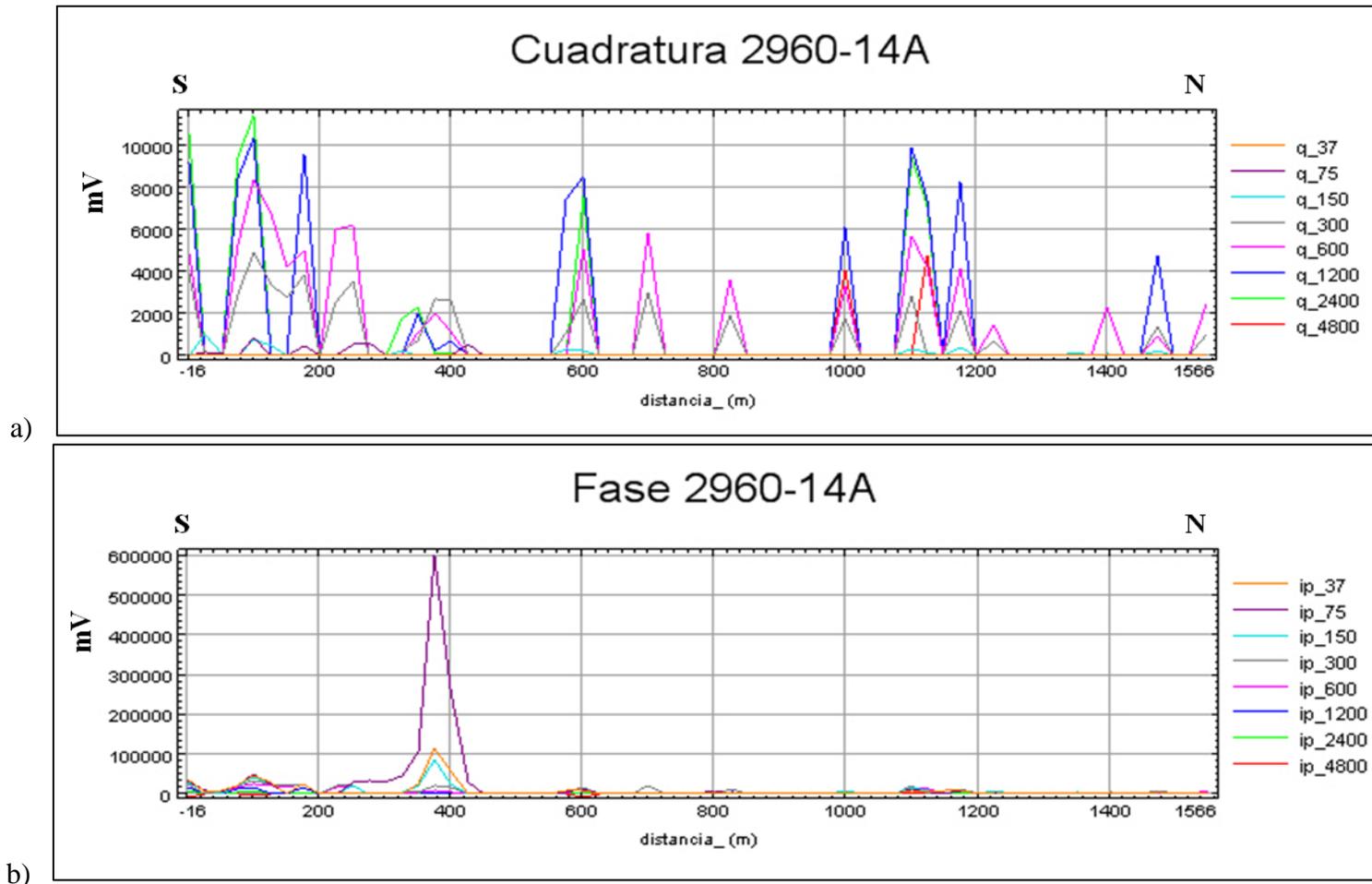
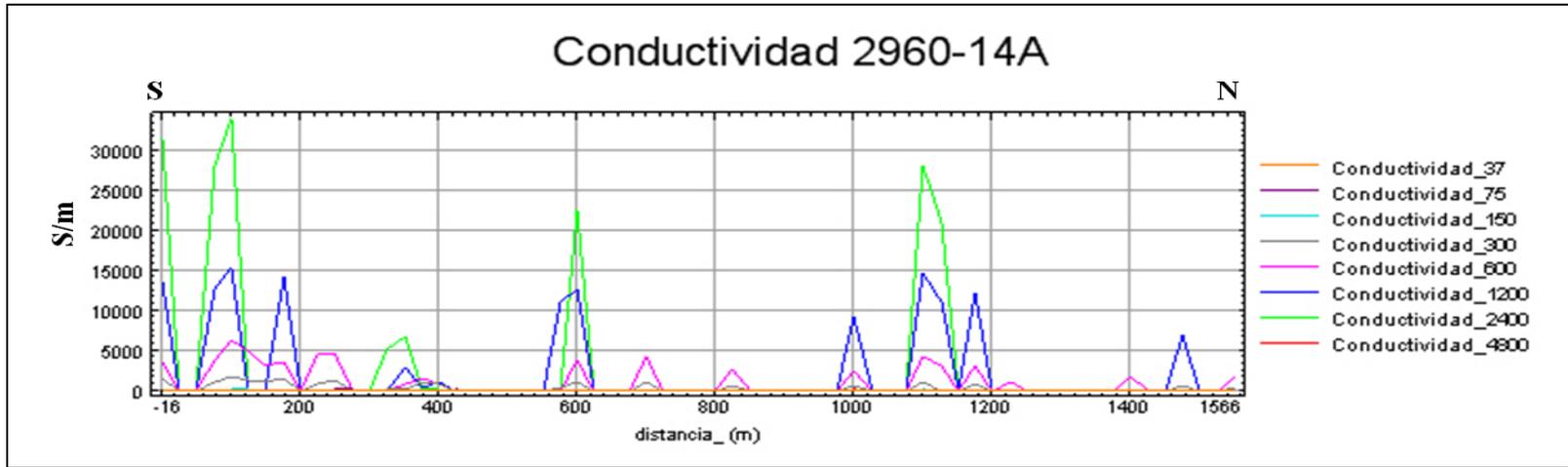
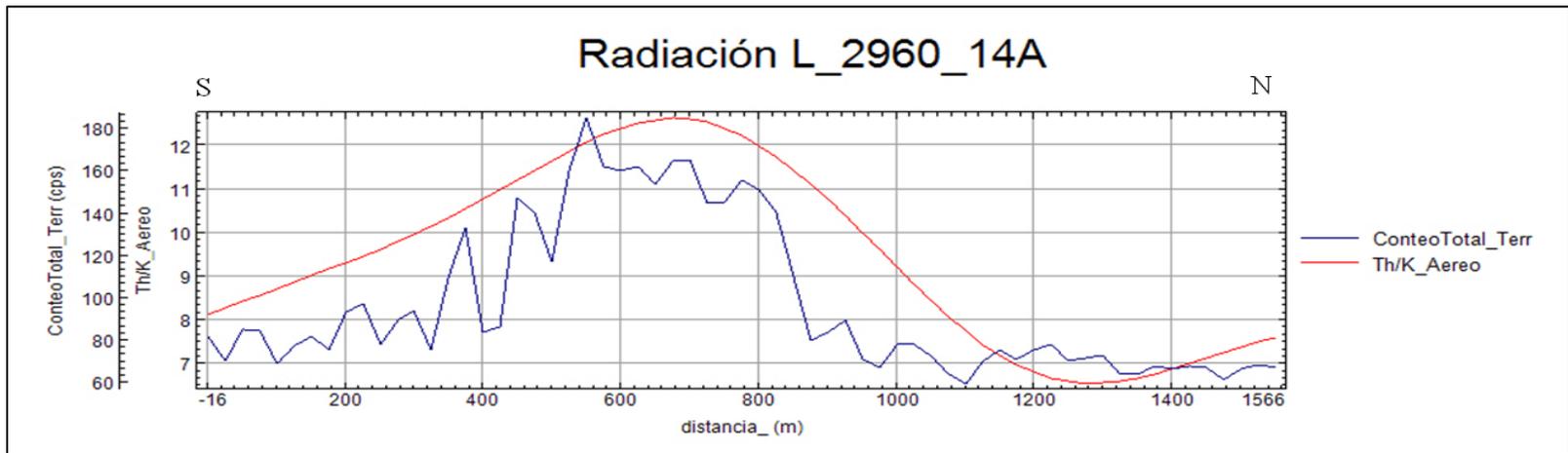


Figura N° 5.14 Respuesta electromagnética del levantamiento geofísico terrestre del perfil 2960\_14A: a) Cuadratura, b) Fase.



a)



b)

Figura N° 5.15 a) Conductividad, b) Radiación del perfil L\_2960\_14A.

El perfil L\_2960\_14A fue seleccionado para realizarle un modelado de pipa kimberlítica debido a la presencia de una anomalía magnética negativa la cual coincide con la misma ubicación de los máximos valores de la relación Th/K y de conteo total de radiación.

El perfil L\_2990\_11A el cual se encuentra ubicado en la parte central del área de estudio como se muestra en la figura N° 4.1. inicialmente este perfil fue seleccionado debido a la presencia de una anomalía magnética negativa detectada mediante el levantamiento aerogeofísico la cual se encuentra ubicada aproximadamente entre 550m y 850m, así como también por poseer una anomalía electromagnética ubicada entre 400m y 700m, dicha anomalía fue detectada principalmente por la frecuencia de 980Hz.

Para el perfil L\_2990\_11A (Figura N° 5.17a) se observó una anomalía magnética negativa en el levantamiento aerogeofísico la cual se encuentra ubicada entre 550m y 850m (Figura N° 5.17b) en la cual se puede ver la tendencia de la curva con los máximos valores en los primeros 400m del perfil, y a partir de este punto comienza a decrecer formando la anomalía negativa para luego de 1000m nuevamente alcanzar los valores máximos. En el levantamiento magnético terrestre se detecto la anomalía magnética negativa ubicada entre 500m y 950m, estos datos poseen la misma tendencia que los datos aeromagnéticos como se puede ver en la figura N° 5.16b.

En la respuesta electromagnética del levantamiento aéreo se detecto una anomalía ubicada entre 400m y 650m. Para la componente en cuadratura (figuras N° 5.18a) dicha anomalía es detectada por las frecuencias de 980Hz y 6000Hz, mientras que para la componente en fase (Figura N° 5.18b) es principalmente detectada por la frecuencia de 980Hz, aunque se detecta también mediante las frecuencias de 880Hz y 6000Hz.

Las respuestas electromagnéticas del levantamiento terrestres se observan dos zonas con gran respuesta para las componentes en fase (Figura N° 5.19b) y en cuadratura (Figura N° 5.19a) estas zonas se encuentran entre los 250m y 700m aproximadamente y entre 900m y 1100m. En dichas figuras se puede observar que la respuesta electromagnética en esta zona para la componente en cuadratura posee respuestas para las frecuencias entre 150Hz y

2400Hz, mientras que para la componente en fase la respuesta se obtiene para las frecuencias entre 37Hz y 1200Hz.

En la figura N° 5.20a se puede ver qué las zona más conductoras del perfil se encuentra entre los 250m y 700m así como también entre 900m y 1100m, estas zonas conductoras se encuentran a profundidades según el Skin depth entre 100m y 300m ya que las frecuencias que obtienen mayor amplitud en la respuesta son las de 300Hz, 600Hz y 1200Hz.

La relación de Th/K en este perfil posee una tendencia variable (Figura N° 5.20b) ya que en los primeros 400m se observa una disminución en dicha curva, la cual aumenta nuevamente a partir de esta distancia hasta los 900m comenzando a decrecer hasta aproximadamente 1100m, donde comienzan a aumentar los valores de la relación hasta el final del perfil. La radiación de conteo total a lo largo del perfil para el levantamiento geofísico terrestre (Figura N° 5.20b) mantiene la misma tendencia que la relación Th/K obtenida mediante el levantamiento aerogeofísico.

Al Sur del perfil *L\_2990\_11A* se observan afloramientos de lavas acidas a intermedias con cristales de Feldespato (Figura N° 5.16) bien desarrollados en forma de pórfidos y posiblemente Pirita y/o Calcopirita generalmente concentrada en los fenocristales de Feldespato.



Figura N° 5.16 Lavas acidas con fenocristales de Feldespato.

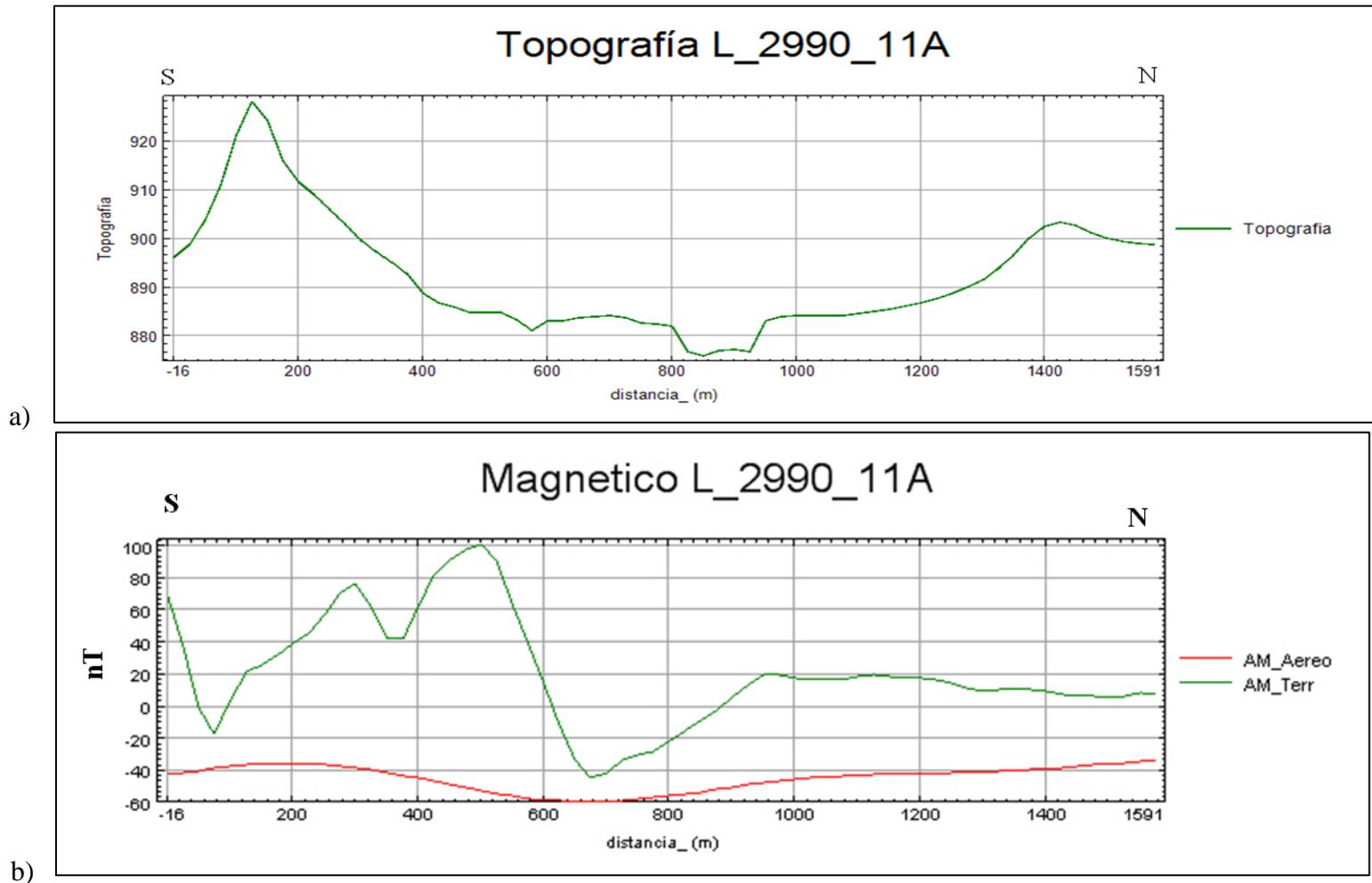


Figura N° 5.17 a) Topografía del perfil b) Respuesta magnética de levantamiento aerogeofísico y geofísico terrestre.

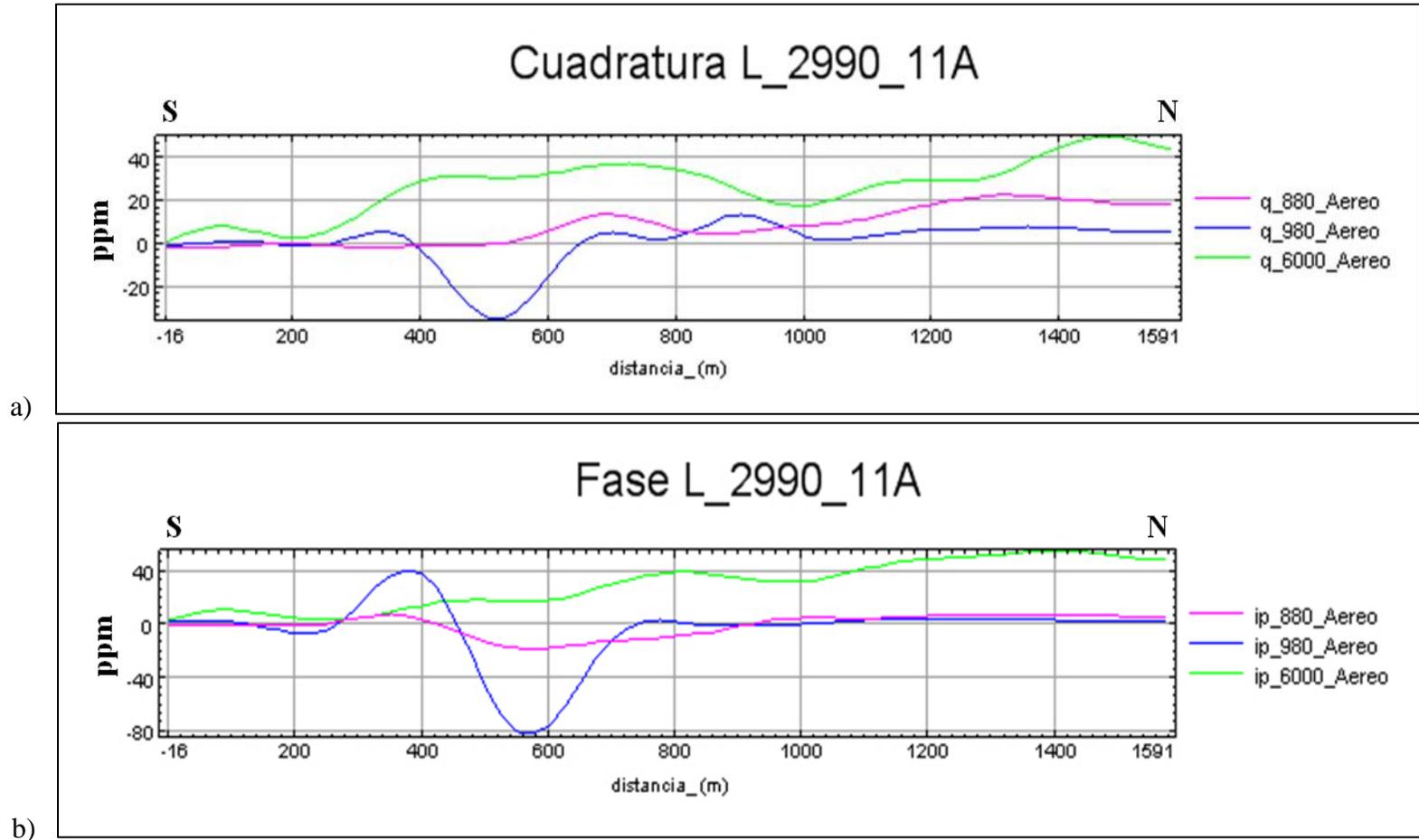
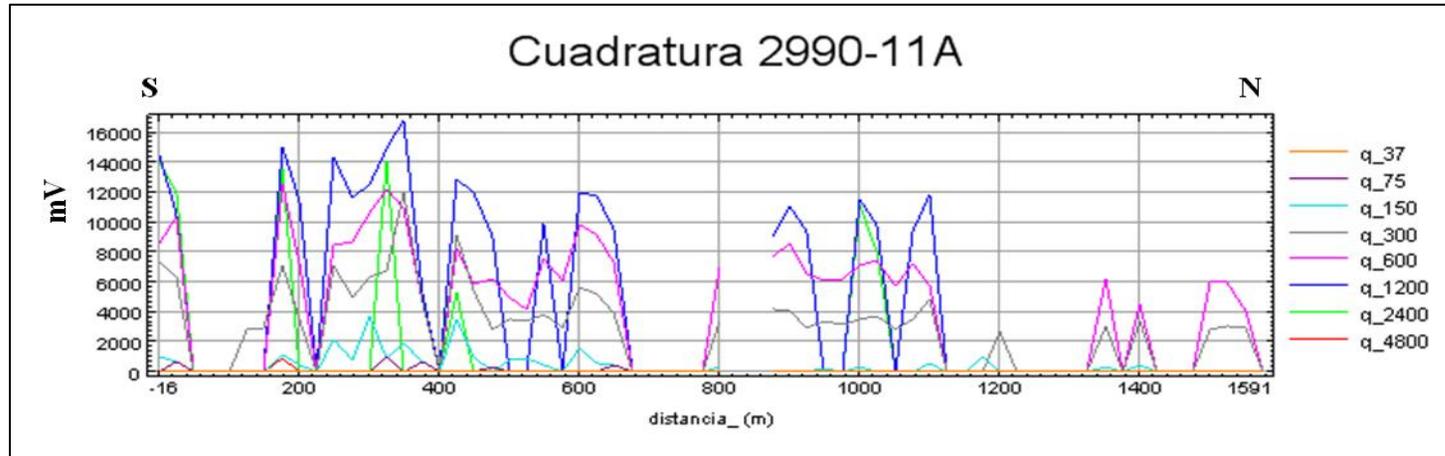
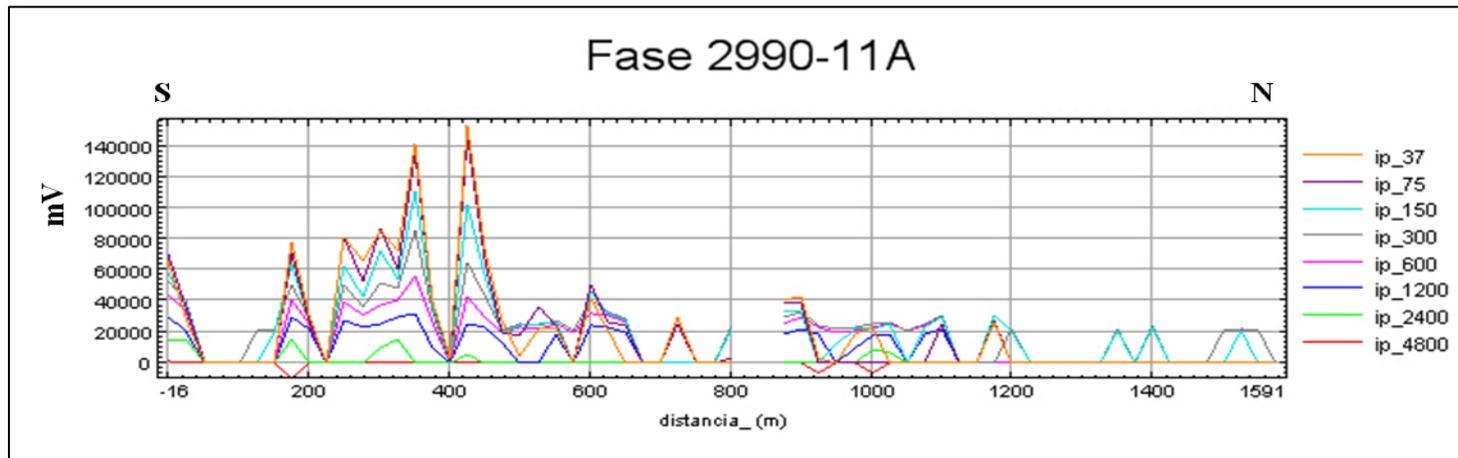


Figura N° 5.18 Respuesta electromagnética del levantamiento aerogeofísico del perfil L\_2990\_11A: a) Cuadratura, b) Fase.

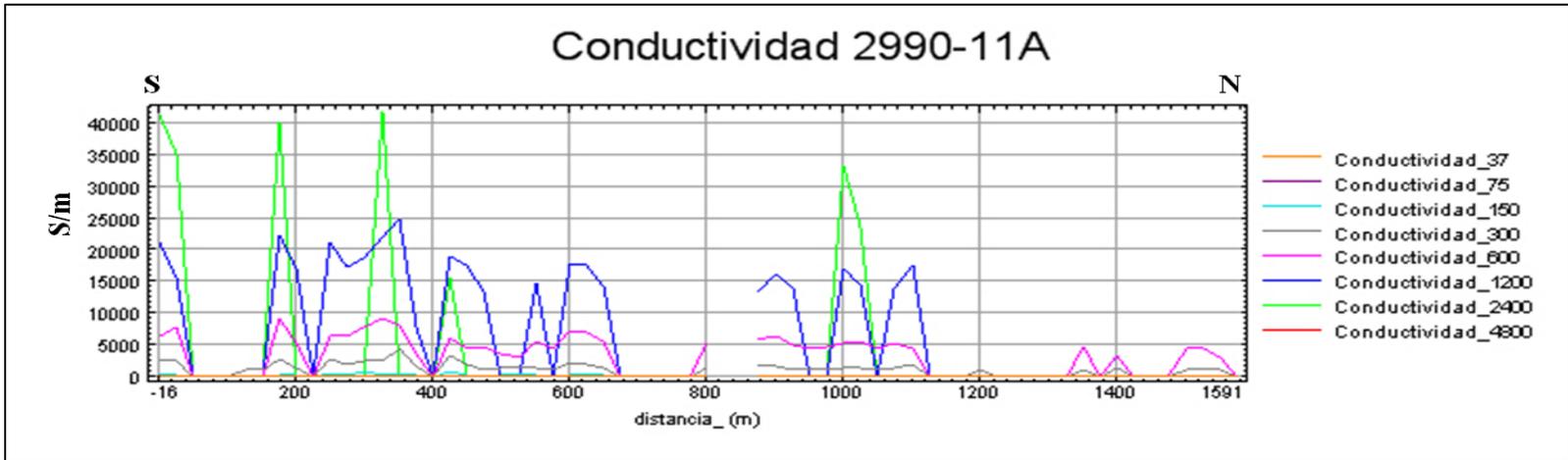


a)

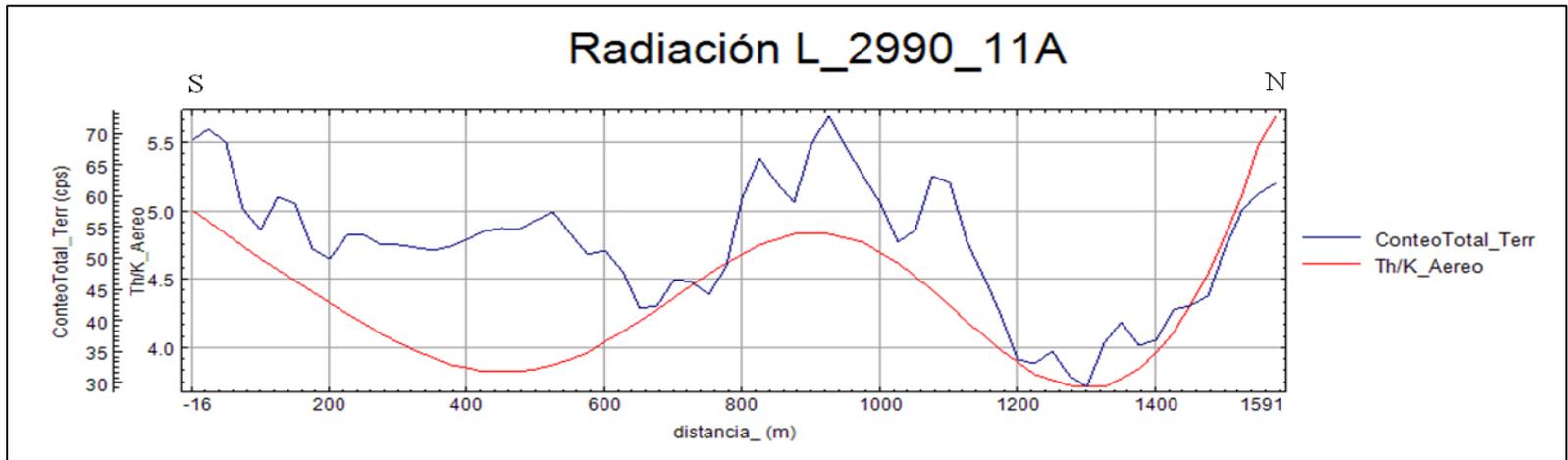


b)

Figura N° 5.19 Respuesta electromagnética del levantamiento geofísico terrestre del perfil L\_2990\_11A: a) Cuadratura, b) Fase.



a)



b)

Figura N° 5.20 a) Conductividad, b) Radiación del perfil L\_2990\_11A.

Para este perfil (L\_2990\_11A) coinciden sobre la anomalía magnética negativa los máximos valores de la relación Th/K del levantamiento aerogeofísico y la radiación de conteo total del levantamiento terrestre, así como también se encuentra cercana la zona conductora obtenida en los levantamientos electromagnéticos (aéreo y terrestre). Debido a esto este perfil fue seleccionado para la realización de un modelo de pipa kimberlitca.

El perfil *L\_2960\_15A* (Figura N° 5.22a) se encuentra ubicado en la zona central del área de estudio como se muestra en la figura N° 4.1, el Norte del perfil se encuentra hacia lo que es llamado cerro Were Weré el cual está asociado al dique de diabasas que aflora en la zona de estudio. Este perfil fue seleccionado por INGEOMIN debido a la presencia de una anomalía magnética positiva obtenida en el levantamiento aerogeofísico, dicha anomalía se encuentra ubicada entre 400m y 800m aproximadamente.

La curva del campo magnético obtenida en el levantamiento aerogeofísico (Figura N° 5.22b) posee una tendencia en la cual se observan mínimos valores al inicio del perfil, los cuales aumentan a partir de 400m hasta aproximadamente 750m donde comienzan nuevamente a decrecer alcanzando nuevamente los valores mínimos de campo magnético. La tendencia de los datos magnéticos terrestres es muy similar a los datos aeromagnéticos, alcanzando los mínimos valores al inicio y al final de perfil y observándose los máximos valores entre 700m y 950m (Figura N° 5.22b).

En la respuesta electromagnética del levantamiento aerogeofísico se puede ver una un comportamiento diferente en los primeros 700m para las componentes en cuadratura (Figura N° 5.23a) y en fase (Figura N° 5.23b). Para la componente en cuadratura se observa como varía la respuesta para las frecuencias de 880Hz y 6000Hz en los primeros 700m y permaneciendo casi constante a partir de 700m con poca variación para la frecuencia de 6000Hz. En la componente en fase la variación en los primeros 700m del perfil es únicamente para la frecuencia de 6000Hz, las frecuencias de 880Hz y 980Hz no presentan variaciones a lo largo del perfil.

La respuesta electromagnética terrestre presenta una respuesta similar a la respuesta electromagnética aérea, la respuesta en cuadratura (Figura N° 5.24a) permanece casi constante a lo largo del perfil obteniendo respuestas para las frecuencias entre 300Hz y

2400Hz. La componente en fase (Figura N° 5.24b) es diferente en los primeros 850m donde se observan los máximos valores de amplitud, a partir de 850m se obtienen los mínimos valores de amplitud en el perfil, para la componente en fase se obtiene respuesta para todas las frecuencias utilizadas.

Los cuerpos conductores en esta perfil se encuentran ubicados a profundidades entre 100m y 300m según el Skin depth (Tabla N° 4.5) ya que las frecuencias que presenten respuestas son las que se encuentran entre 300Hz y 2400Hz (Figura N° 5.25a).

La relación de Th/K del levantamiento aerogeofísico aumenta a medida que avanzamos hacia el Norte del perfil, es decir que los valores mínimos se encuentran hacia el Sur y los máximos valores hacia el Norte (Figura N° 5.25b). La radiación de conteo total obtenida en el levantamiento terrestre a lo largo del perfil posee la misma tendencia que la relación Th/K (Figura N° 5.25b) en la cual se observan los mínimos valores al inicio del perfil los cuales aumentan hacia el final del mismo.

En general en este perfil se presentan rocas ácidas a intermedias, las cuales varían notablemente en tamaños. Entre las estaciones 21 (550m) y 47 (1175m) se observa la presencia de lavas ácidas (Figura N° 5.26) posiblemente riolitas, de color violeta intenso, porfídicas, las cuales meteorizan a colores blancos, pasando hacia la parte inferior a rocas de tonalidades más claras y meteorización más oscura, en la base se ubican rocas de color verde medio, con cristales de Feldespato bien desarrollados, las cuales meteorizan a colores pardo claro.

Las estructuras en el área son bastante complejas con dos sistemas de fallas, las cuales evidencian un proceso hidrotermal bien marcado, existiendo Cuarzo blanco en dos alineaciones cuyas direcciones son: a) 282° (N 78° W), y b) N 61° E.

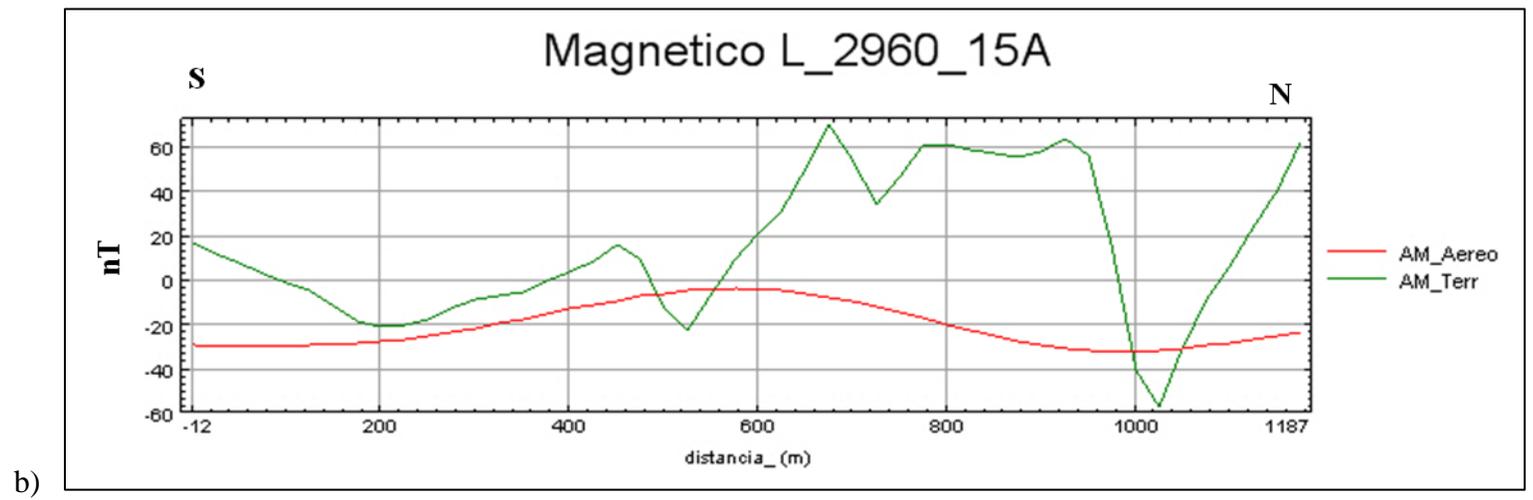
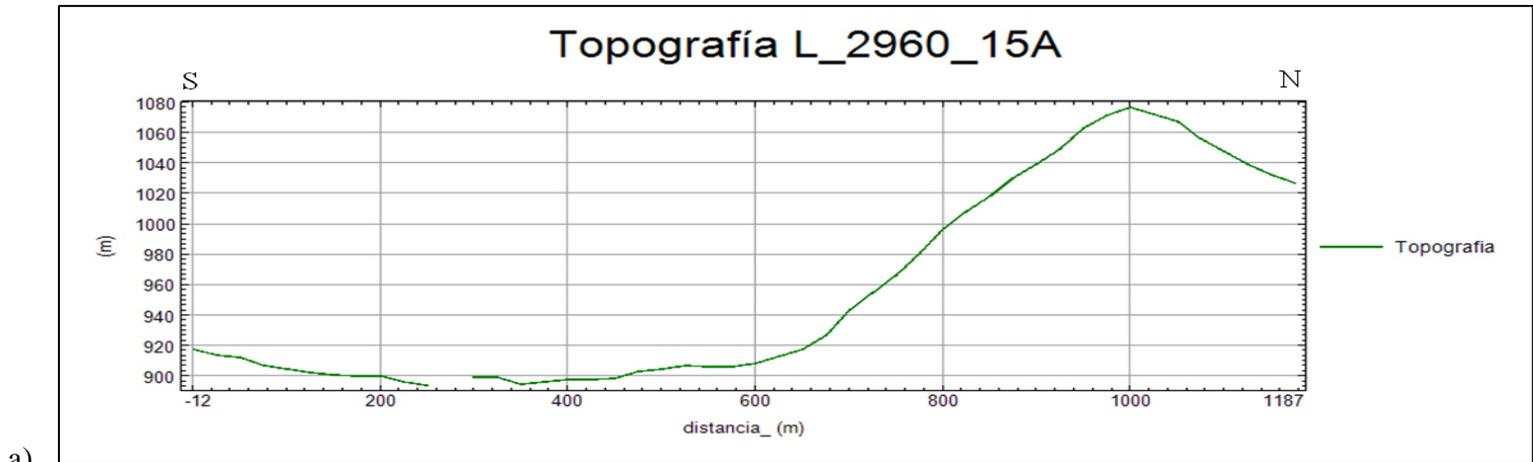
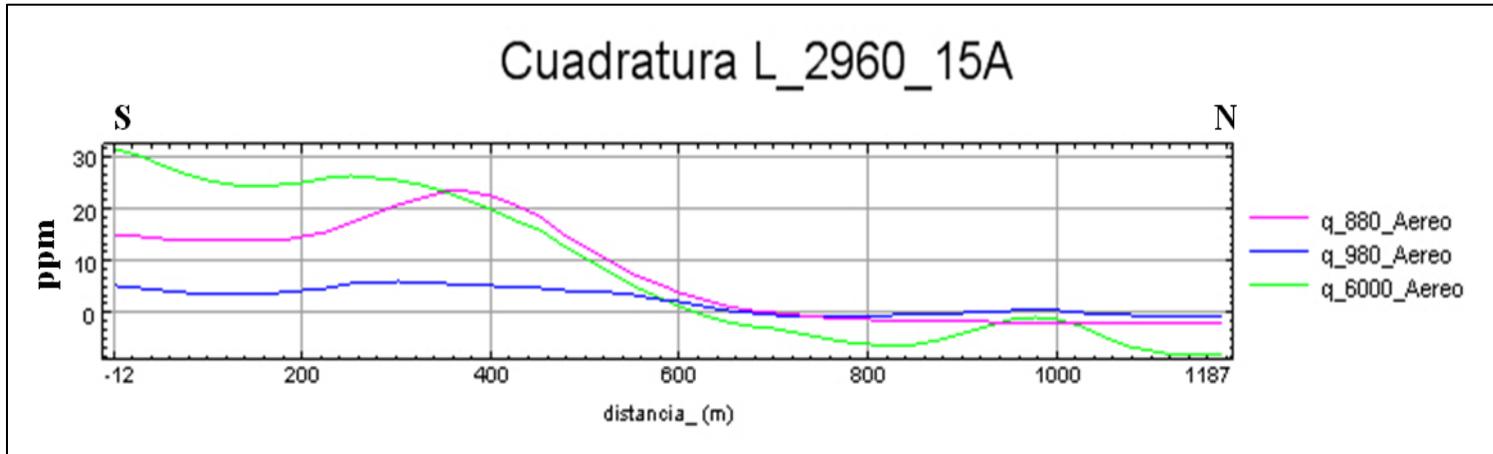
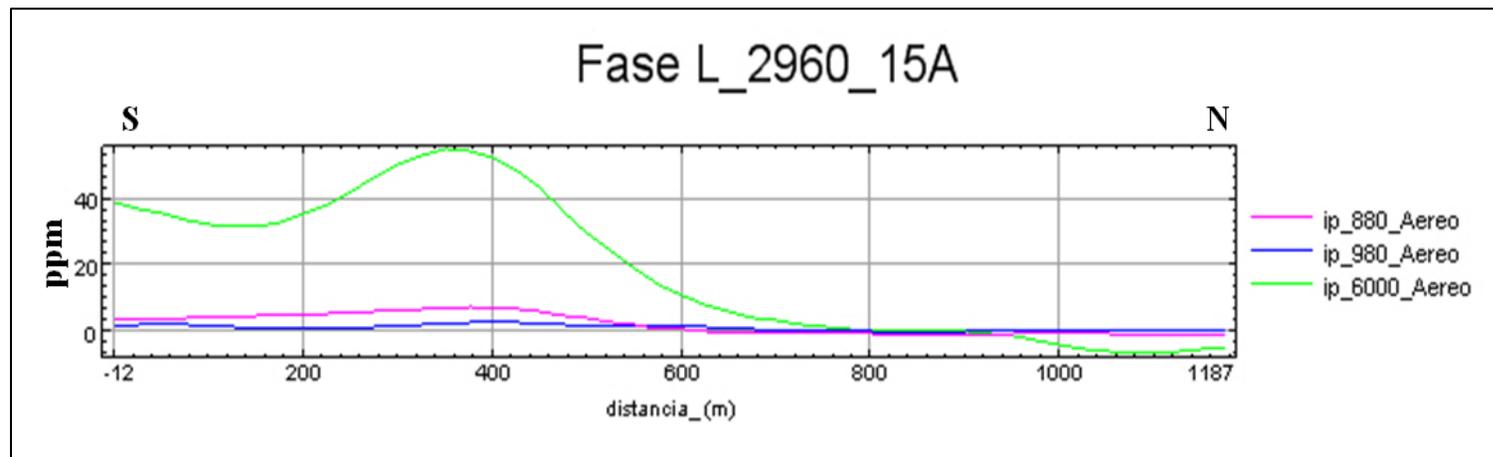


Figura N° 5.21 a) Topografía del perfil b) Respuesta magnética de levantamiento aerogeofísico y geofísico terrestre.



a)



b)

Figura N° 5.22 Respuesta electromagnética del levantamiento aerogeofísico del perfil L\_2960\_15A: a) Cuadratura, b) Fase.

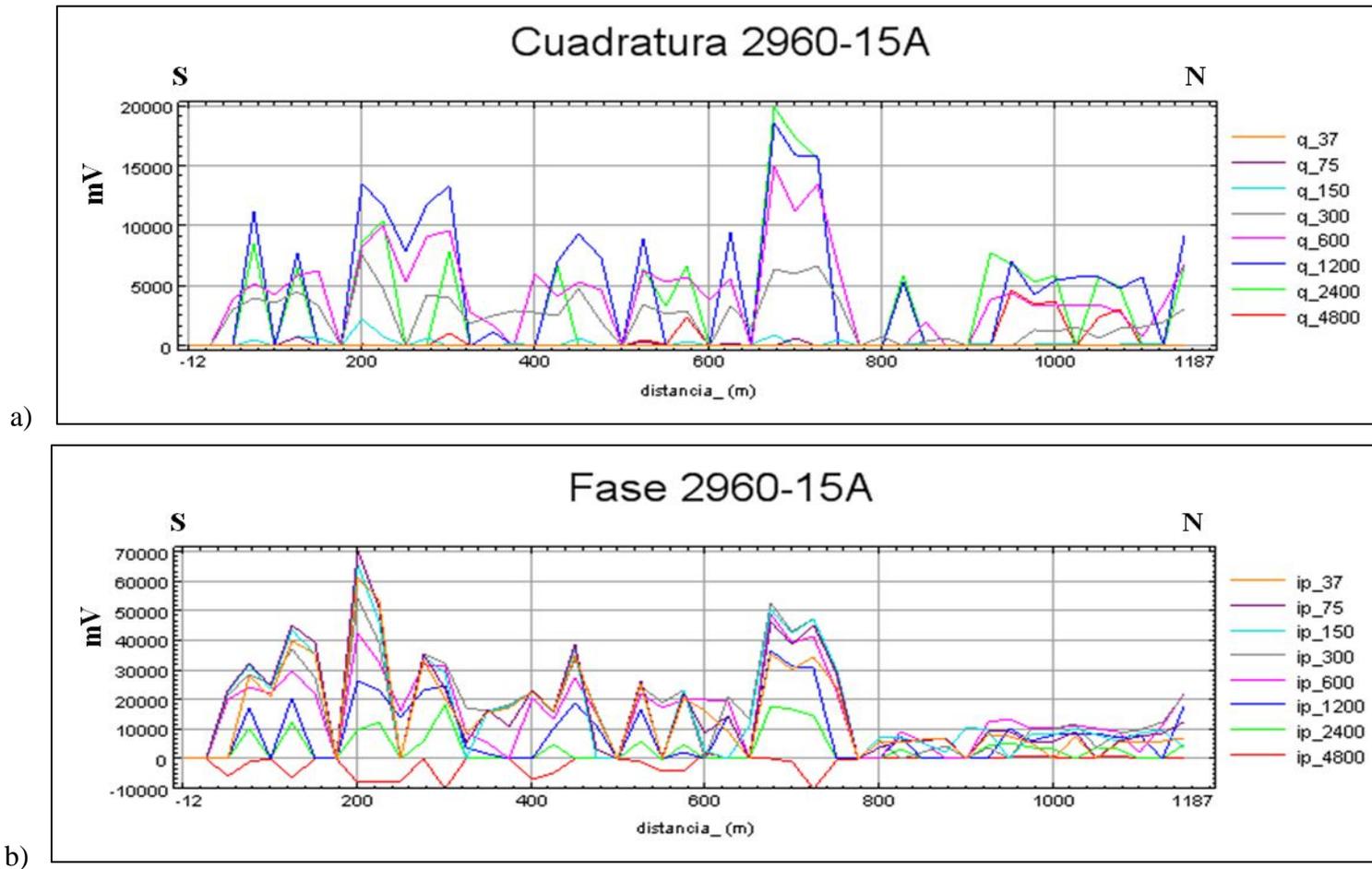
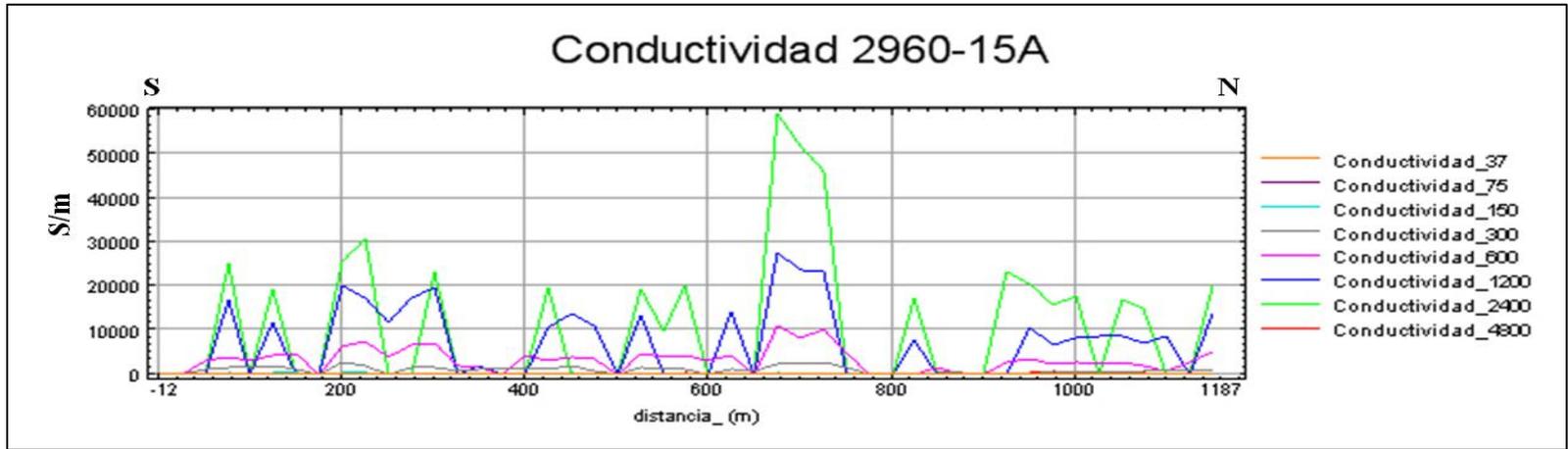
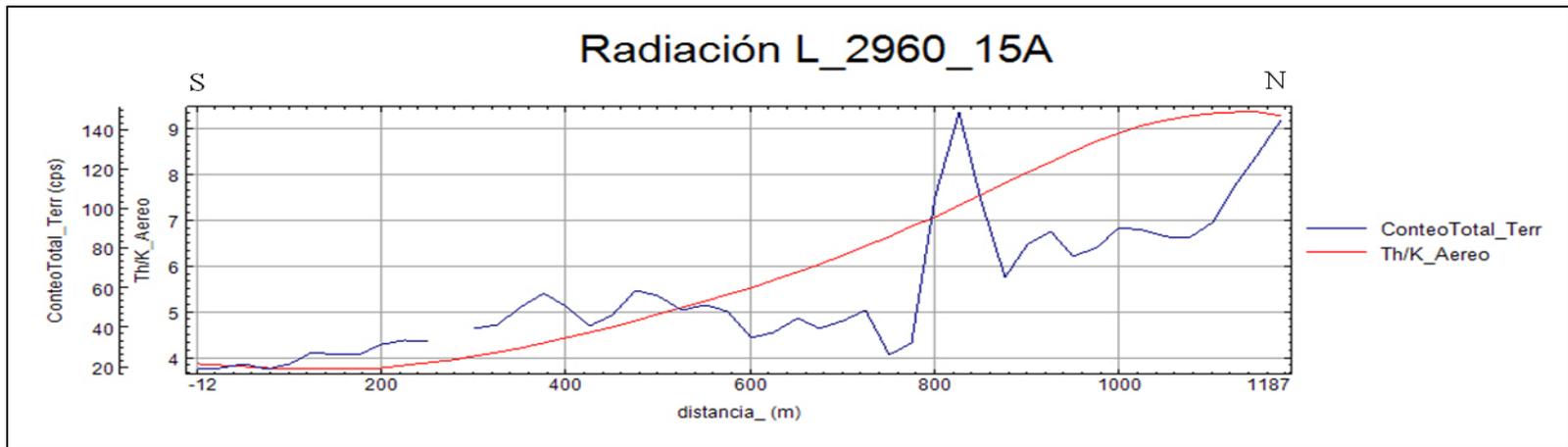


Figura N° 5.23 Respuesta electromagnética del levantamiento geofísico terrestre del perfil L\_2960\_15A: a) Cuadratura, b) Fase.



a)



b)

Figura N° 5.24 a) Conductividad, b) Radiación del perfil L\_2960\_15A.



Figura N° 5.25 Afloramientos de lavas acidas tipo riolitas en el perfil L\_2960\_15A.

Una vista del perfil *L\_2960\_15A* (Figura N° 5.27) en la cual se observan afloramientos de rocas de composición acidas en la parte superior de la imagen. Se puede notar la ausencia de vegetación en el perfil debido a la composición de las rocas acidas. Hacia el Sur se evidencia una zona con vegetación tipo selvática la cual puede estar relacionada a la presencia de un rio que se encuentra dentro de la gran cantidad de arboles.

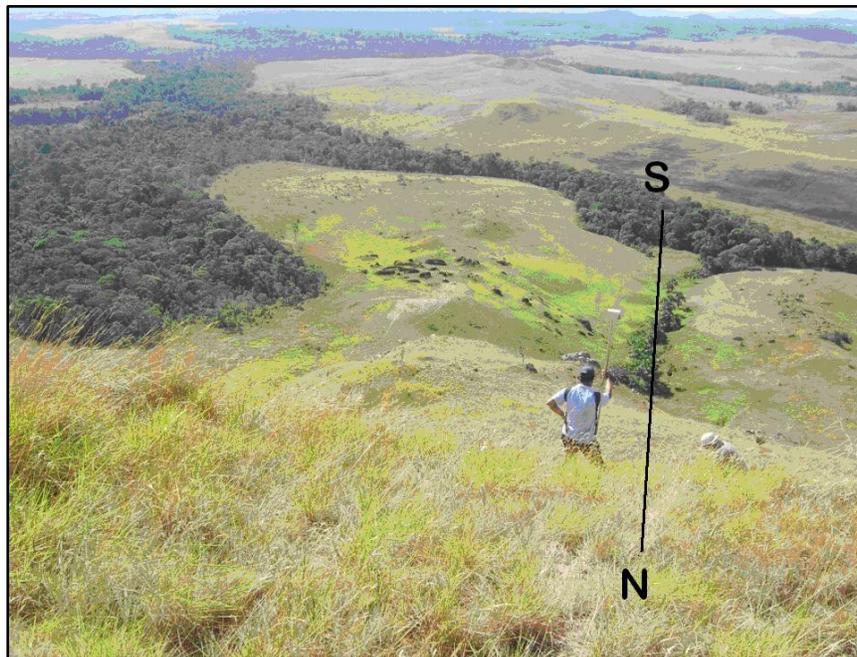


Figura N° 5.26 Vista del perfil L\_2960\_15A.

En las cercanías de este perfil se pudo observar una antigua mina ilegal la cual ya ha dejado de ser explotada la cual estaba ubicada en las cercanías del cerro Were Weré.

Luego de realizar el levantamiento geofísico terrestre y evaluación e interpretación de este perfil se encontró que la anomalía de mayor interés para la búsqueda de diamantes es la que se encuentra al Sur del perfil en la cual se puede observar una anomalía magnética negativa, así como también esta zona posee gran respuesta electromagnética en ambos levantamientos (aéreo y terrestre), por lo tanto este perfil no fue seleccionado para realizarle modelado de pipa kimberlítica.

En el perfil *L\_3210\_4A* se encuentra ubicado al Sur-Este de la zona de estudio (Figura N° 4.1). Este perfil fue seleccionado por poseer una anomalía electromagnética ubicada al inicio del perfil hasta aproximadamente 300m, así como también por poseer los altos valores de la relación Th/K en los primeros 400m. El perfil *L\_3210\_4A* (Figura N° 5.28a) el cual posee un cambio brusco de topografía al final del perfil (110m).

La tendencia de los datos aeromagnéticos en el perfil aumenta hacia el norte del perfil (Figura N° 5.28b) donde sus mínimos valores se encuentran al inicio y los máximos valores al final. Los datos magnéticos terrestres presentan escasa variación en los primeros 800m del perfil, luego aumentan los 1000m y nuevamente comienza a disminuir hasta el final (Figura N° 5.28b).

En el levantamiento electromagnético terrestre se detecto una anomalía al inicio del perfil para ambas componentes en fase y cuadratura para la frecuencia de 6000Hz. La componente en cuadratura (Figura N° 5.29a) presenta los máximos valores de amplitud para dicha frecuencia al inicio del perfil, los cuales van disminuyendo hacia el Norte del perfil hasta los 350m aproximadamente y luego se invierten las amplitudes hasta el final del perfil. Para la componente en fase (Figura N° 5.29b) los máximos valores de amplitud se obtienen en los primeros 350m, a partir de dicho punto la respuesta varia invirtiendo las amplitudes. Estas zonas se encuentran a profundidades cercanas a 65m según el Skin depth (Tabla N° 4.5).

En la respuesta electromagnética obtenida en el levantamiento terrestre se pueden apreciar dos zonas, una no conductora al inicio del perfil y una conductora a partir de 300m. La componente en cuadratura (Figura N° 5.30a) presenta respuesta electromagnética a partir de 300m, se puede observar en la figura que las frecuencias que poseen respuestas

están comprendidas entre 300Hz y 2400Hz. La componente en fase (Figura N° 5.30b) también presenta respuesta a partir de los 300m de distancia del perfil donde las mayores amplitudes se obtienen para las frecuencias entre 37Hz y 1200Hz.

Los cuerpos conductores como se puede ver en la figura N° 5.31a se encuentran en el perfil a partir de los 300m de distancia. Estos cuerpos se encuentran a profundidades entre 100m y 300m aproximadamente según el Skin depth, ya que las frecuencias que presentan respuestas se encuentran entre 300Hz y 2400Hz.

La tendencia en la curva de la relación Th/K presenta sus máximos valores al Sur del perfil, los cuales comienzan a disminuir a medida que aumenta la distancia, a partir de 500m la curva presenta poca variación (Figura N° 5.31b). La radiación de conteo total a lo largo del perfil permanece constante como se puede ver en la figura N° 5.31b, en la cual se alcanza el máximo valor al final del perfil.

En este perfil *L\_3210\_4A* se observó escasa vegetación en los primeros 600m de distancia aproximadamente, en el cual se observaron suelos secos hasta aproximadamente la estación 13 (325m) con algunos clastos de cuarzo diseminado. A partir de los 600m aumenta la vegetación encontrándose arboles de gran tamaño, dentro de la zona selvática se encontraron afloramientos de conglomerados hacia el final del perfil entre los 800 y 900m.

Este perfil se encuentra ubicado sobre un contacto entre la Formación Uairén y el Grupo Cuchivero como se muestra en la figura N° 2.1. Hacia el Sur del perfil aflora el grupo Cuchivero mientras que hacia el norte aflora la formación Uairén.

A partir de ambos levantamientos geofísicos (aéreo y terrestre) así como con la geología del terreno se puede inferir para este perfil *L\_3210\_4A* que el contacto entre la formación Uairén y el grupo Cuchivero se encuentra ubicado aproximadamente a los 350m del perfil ya que a partir de dicha distancia varían las repuestas electromagnéticas aérea y terrestre, así como también la relación Th/K.

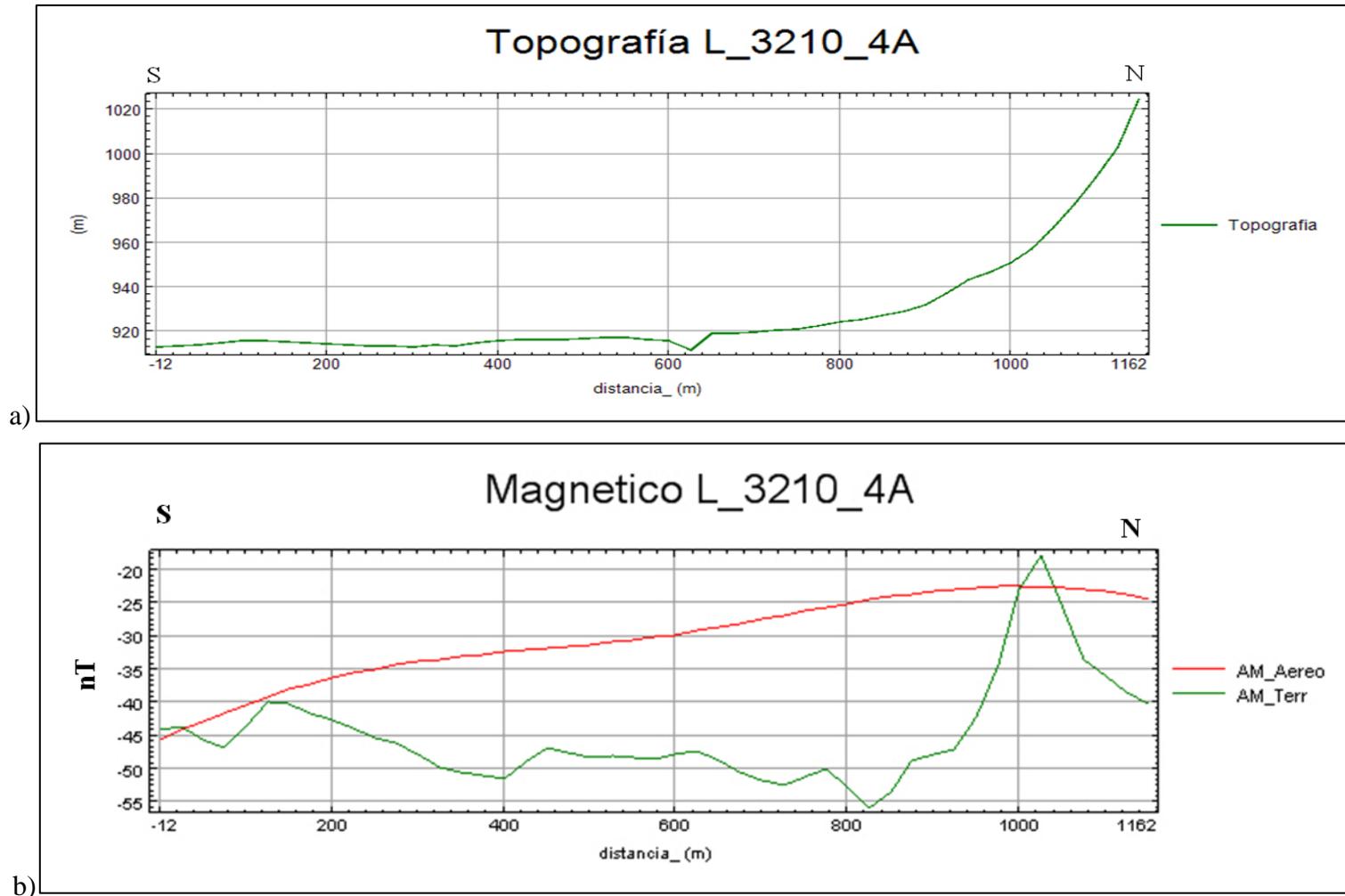


Figura N° 5.27 a) Topografía del perfil b) Respuesta magnética de levantamiento aerogeofísico y geofísico terrestre.

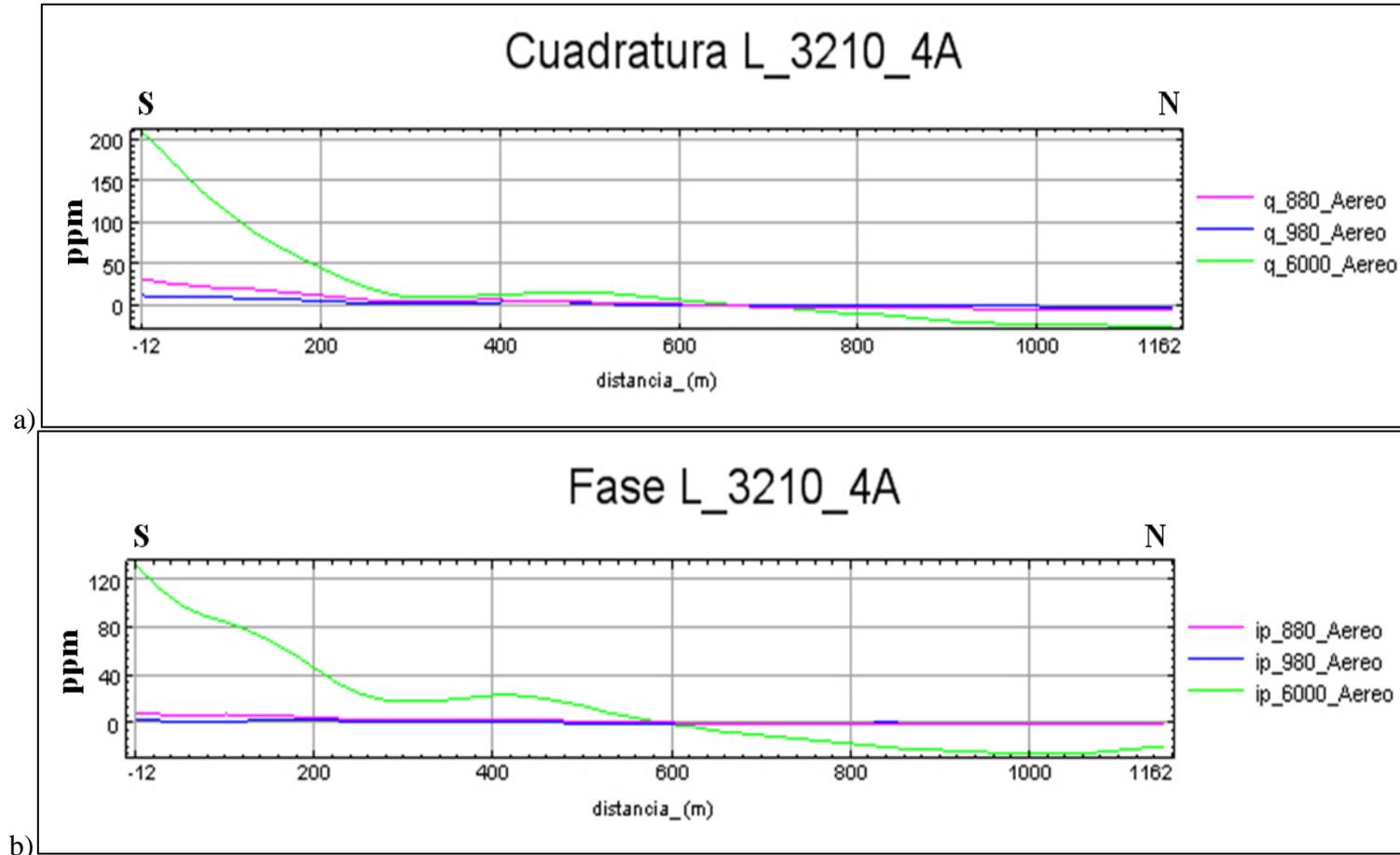


Figura N° 5.28 Respuesta electromagnética del levantamiento aerogeofísico del perfil L\_3210\_4A: a) Cuadratura, b) Fase.

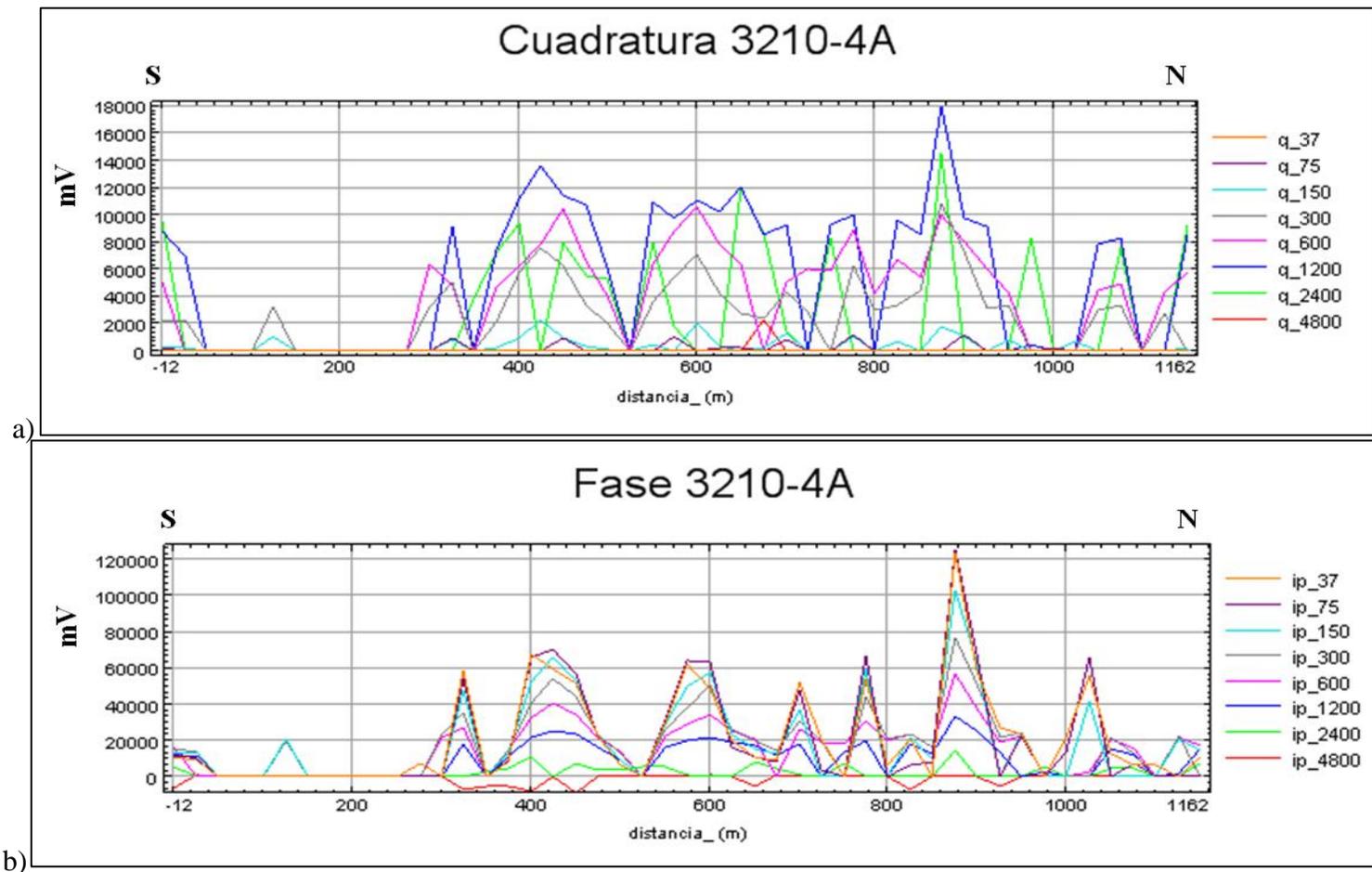
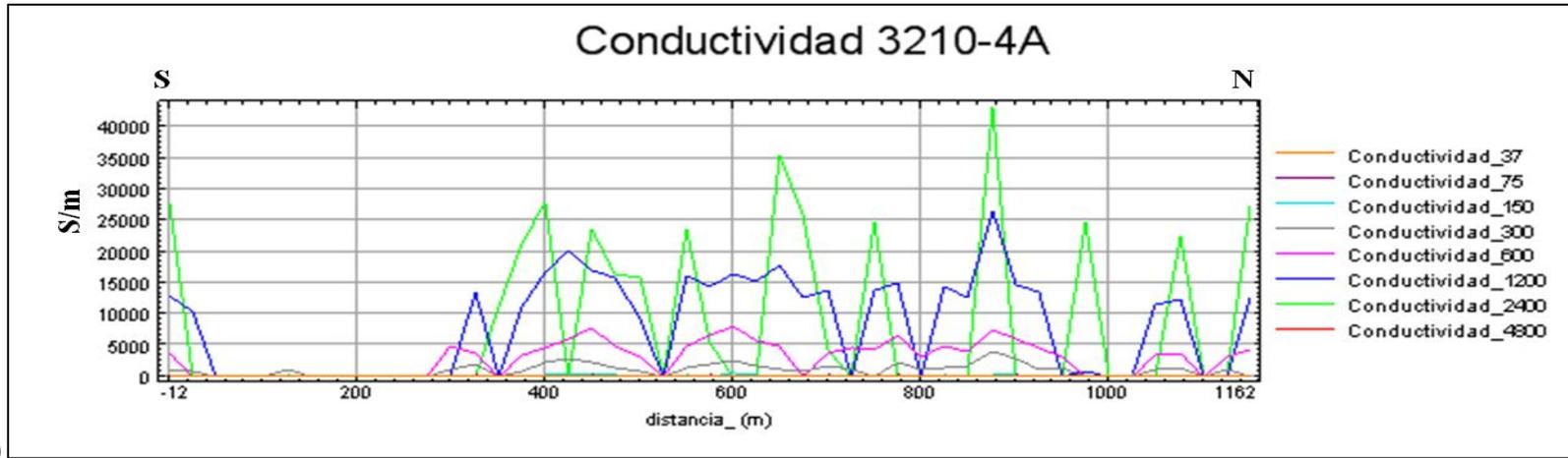
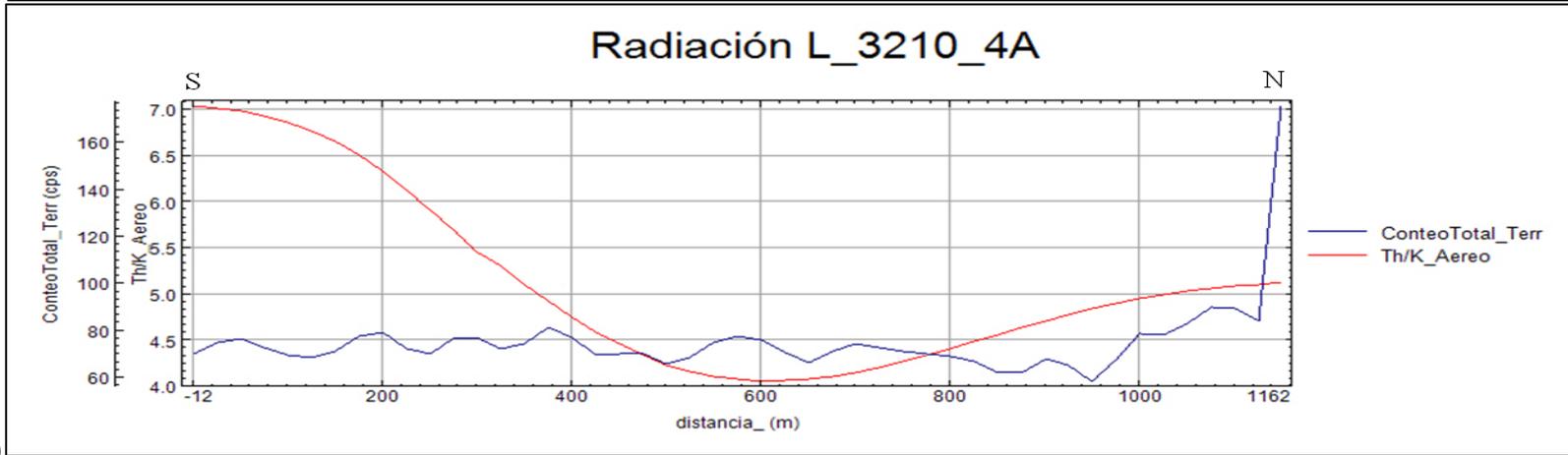


Figura N° 5.29 Respuesta electromagnética del levantamiento geofísico terrestre del perfil L\_3210\_4A: a) Cuadratura, b) Fase.



a)



b)

Figura N° 5.30 a) Conductividad, b) Radiación del perfil L\_3210\_4A

Este perfil L\_3210\_4A no fue seleccionado para la realización de modelado de pipa kimberlítica debido a que no posee anomalía magnética negativa a lo largo del perfil.

El perfil L\_2981\_12A el cual es de topografía relativamente plana (Figura N° 5.31a) se encuentra ubicado en la zona central del área de estudio como se puede ver en la Figura N° 4.1. Este perfil se seleccionó por poseer una anomalía magnética negativa ubicada al final del perfil la cual se ubica aproximadamente entre 550m y 850m, así como también por poseer una anomalía electromagnética detectada por la frecuencia de 6000Hz desde 700m al final del perfil.

En el levantamiento aeromagnético se observó una anomalía magnética negativa en el perfil la cual se encuentra ubicada entre 700m y 900m aproximadamente (Figura N° 5.31b), la curva posee una tendencia con máximos valores al inicio del perfil los cuales comienzan a disminuir a partir de 500m hasta 800m, a partir de dicho punto se alcanzan máximos valores nuevamente. En los datos magnéticos terrestres se observa una tendencia en la curva muy similar a los datos aeromagnéticos en la cual se observa una anomalía magnética negativa ubicada entre 700m y 950m aproximadamente la cual corresponde con la anomalía detectada en el levantamiento aerogeofísico.

La componente en cuadratura obtenida en el levantamiento electromagnético aéreo presenta una zona con poca respuesta ubicada en los primeros 900m del perfil (Figura N° 5.32a). A partir de esta distancia se observa una respuesta principalmente para la frecuencia de 6000Hz aunque también es detectada por las frecuencias de 880Hz y 980Hz pero con menos amplitudes a la frecuencia de 6000Hz. La componente en fase (Figura N° 5.32b) también presenta una zona de baja respuesta ubicada desde el inicio hasta 800m aproximadamente, a partir de esta distancia se observa una anomalía detectada por la frecuencia de 6000Hz.

La respuesta obtenida en el levantamiento electromagnético terrestre no corresponde con la del levantamiento electromagnético aéreo. La respuesta en cuadratura (Figura N° 5.33a) presenta una zona donde se observan grandes amplitudes para las frecuencias entre 150Hz y 2400Hz, la cual se encuentra ubicada entre 200m y 650m aproximadamente. La componente en fase (Figura N° 5.33b) presenta una respuesta similar a la obtenida para la

cuadratura, en la cual también se obtiene una zona con respuesta para todas las frecuencias ubicada entre 200m y 650m.

Los cuerpos conductores ubicados en la zona con respuesta electromagnética terrestre se encuentran a profundidades entre 100m y 300m según el Skin depth, ya que las frecuencias que presentan mayores amplitud se encuentran dentro del rango de 300Hz y 2400Hz (Figura N° 5.34a).

La relación de Th/K del levantamiento aéreo posee sus máximos valores al inicio del perfil los cuales disminuyen hacia el Norte alcanzando sus mínimos valores al final del mismo (Figura N° 5.34b). La radiación de conteo total del levantamiento terrestre varía muy poco en los primeros 800m a partir de este punto la radiación disminuye (Figura N° 5.36b).

En este perfil (*L\_2981\_12A*) el cual posee escasa vegetación se observaron afloramientos de lavas ácidas e intermedias al Sur perfil, entre las estaciones 12 (300m) y 15 (375m) se pudo notar gran cantidad de cuarzo blanco disperso como se puede ver en la figura N° 5.35.

En este perfil la anomalía electromagnética terrestre no coincide con la anomalía electromagnética aérea, sin embargo la anomalía electromagnética aérea coincide con la ubicación de la anomalía magnética detectada en los levantamientos aéreo y terrestre.

En los otros cinco (5) perfiles realizados en el levantamiento geofísico terrestre como los son *L\_3080\_7A*, *L\_3020\_9A*, *L\_3010\_10A*, *L\_2930\_17A*, *L\_2890\_19A* no se observaron respuestas de anomalía en ninguno de los tres métodos geofísicos aplicados.

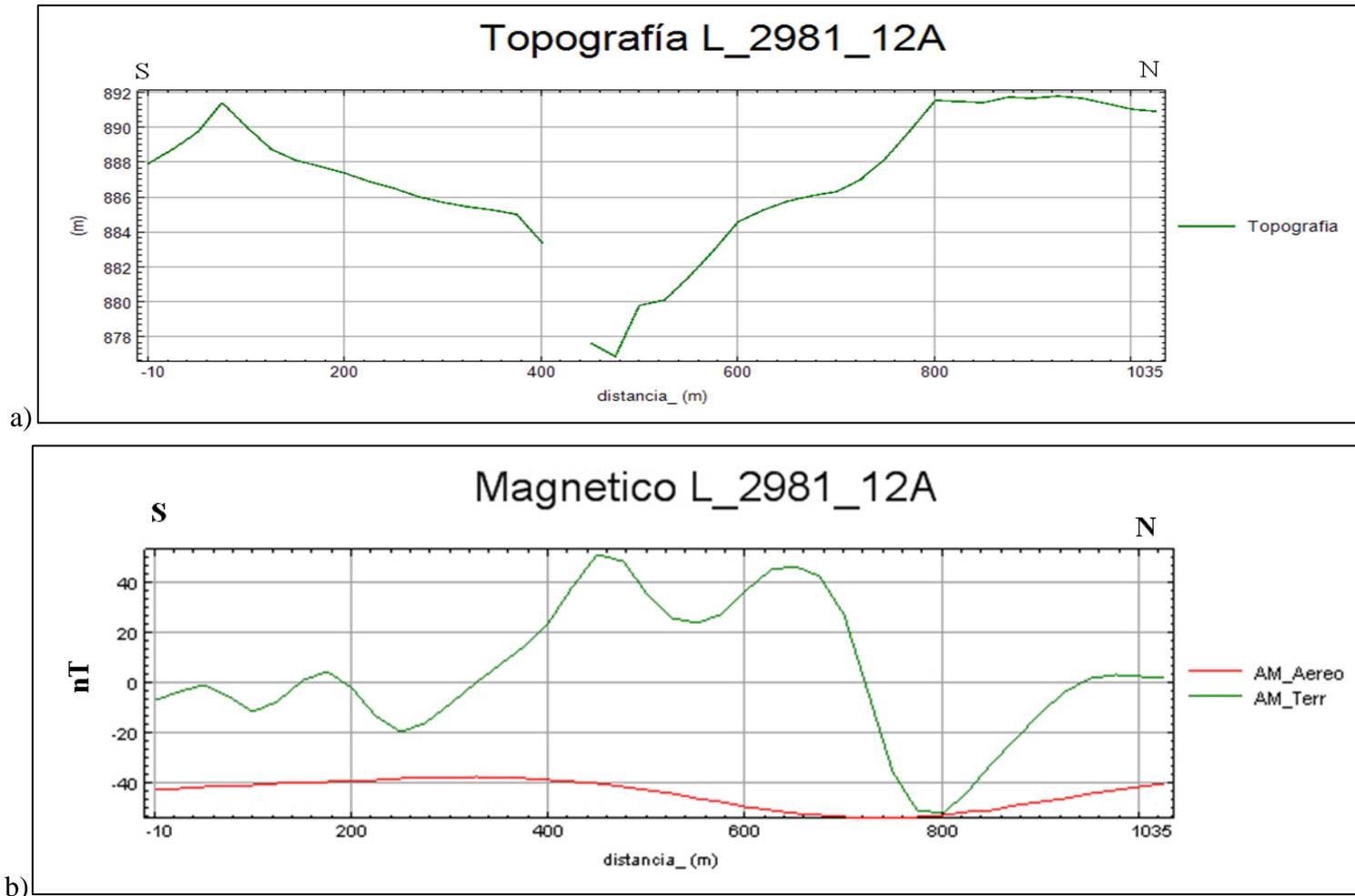


Figura N° 5.31 Topografía del perfil b) Respuesta magnética de levantamiento aerogeofísico y geofísico terrestre.

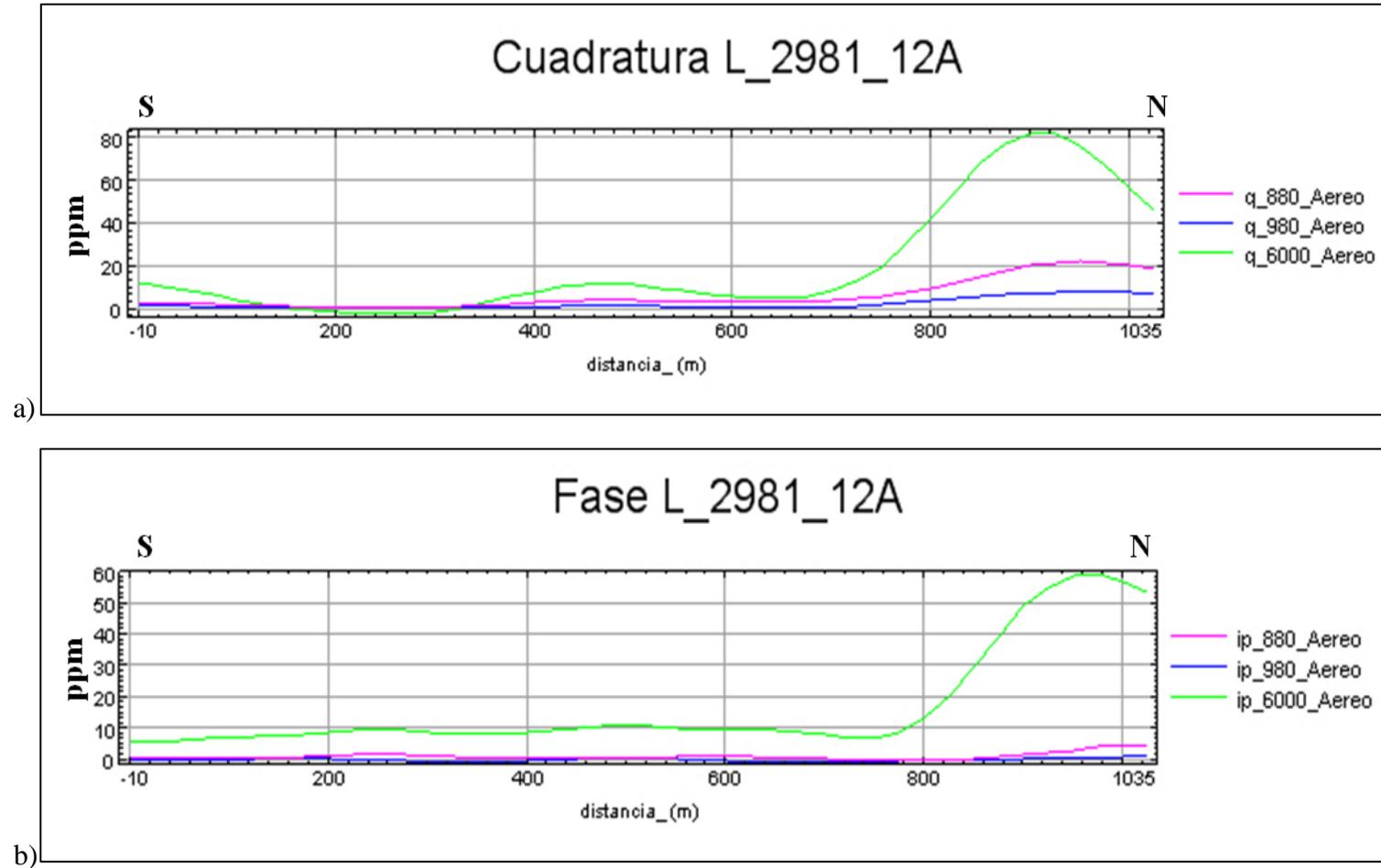


Figura N° 5.32 Respuesta electromagnética del levantamiento aerogeofísico del perfil L\_3120\_53A: a) Cuadratura, b) Fase.

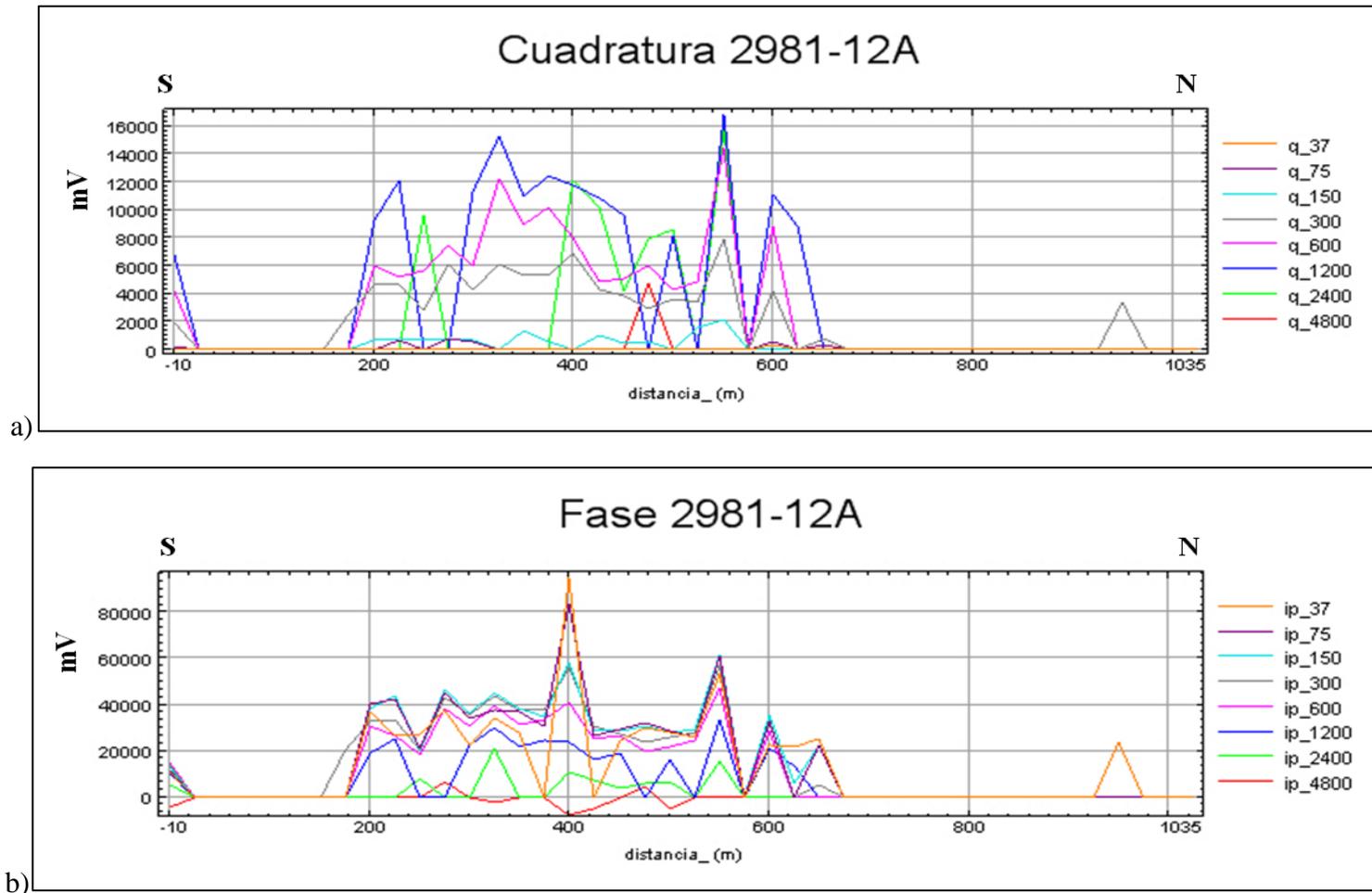
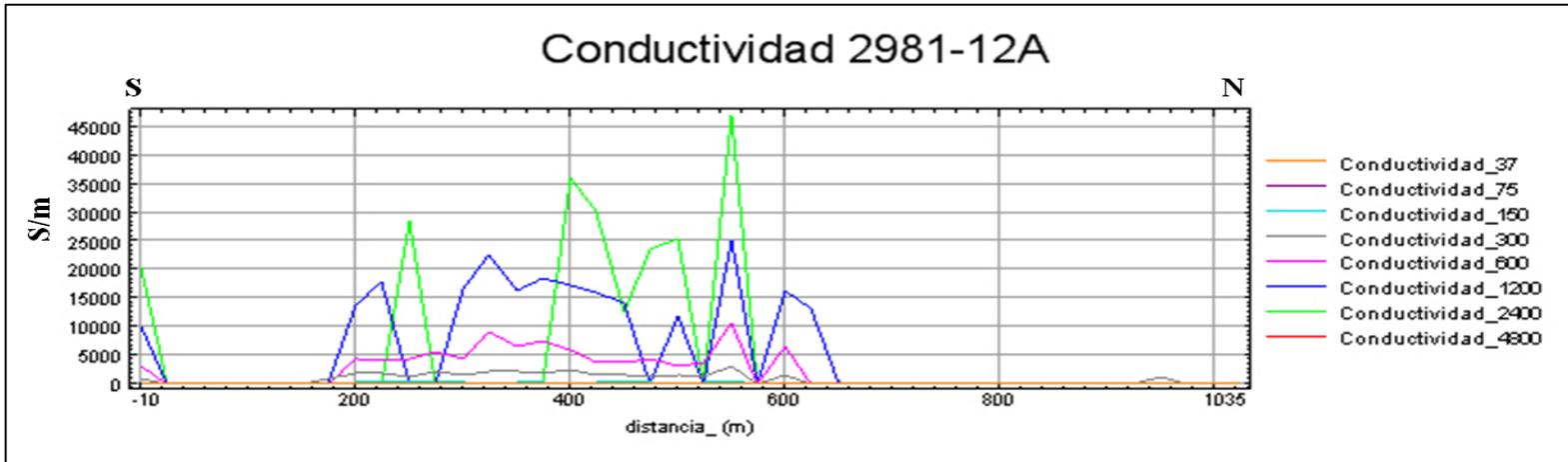
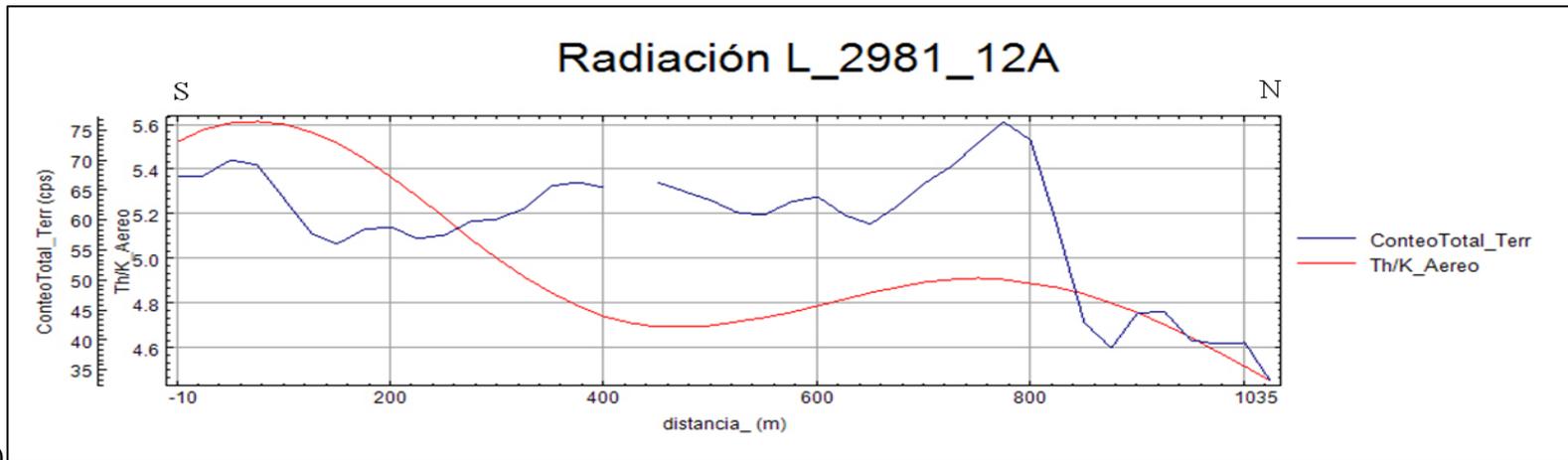


Figura N° 5.33 Respuesta electromagnética del levantamiento geofísico terrestre del perfil L\_2981\_12A: a) Cuadratura, b) Fase.



a)



b)

Figura N° 5.34 a) Conductividad, b) Radiación del perfil L\_2981\_12A.



Figura N° 5.35 Afloramientos de cuarzo blanco.

## ***5.2 Modelado de pipas kimberlitas para los perfiles seleccionados con anomalías magnéticas.***

De los doce (12) perfiles realizados se seleccionaron tres (3) perfiles para realizar el modelado de las pipas kimberlíticas los cuales poseen anomalías magnéticas de interés, estos perfiles fueron los siguientes:

1. El perfil *L\_2860\_20A* en la cual la ubicación de la anomalía magnética negativa coincide con una zona de anomalía electromagnética obtenida en ambos levantamientos geofísicos (aéreo y terrestre).
2. El perfil *L\_2960\_14A* en el cual coinciden los máximos valores de la relación Th/K obtenida en el levantamiento aerogeofísico y la radiación de conteo total obtenida en el levantamiento terrestre con la ubicación de la anomalía magnética negativa obtenida en ambos levantamientos (aéreo y terrestre)

3. El perfil *L\_2990\_11A* en el cual coincide la ubicación de la anomalía magnética negativa con una zona conductora obtenida en los levantamientos electromagnéticos aéreo y terrestre.

El valor de susceptibilidad magnética utilizado para la Provincia Geológica de Cuchivero para la elaboración de estos modelos fue de 0,0009 cgs, el cual es el valor máximo entre las susceptibilidades magnéticas conocidas de las rocas de tipo riolitas (0,0002 cgs) y riolacitas (0,0009 cgs) las cuales son características de la zona. Los valores de susceptibilidades magnéticas para las rocas kimberlitas se encuentran dentro del siguiente rango  $1$  a  $80 \times 10^{-3}$  en el SI (0,00007 – 0,0063 en cgs) como se mencionó en la sección 2.3.3.

A dichos perfiles seleccionados se les realizó el cálculo de las primeras derivadas vertical y horizontal, la segunda derivada vertical y la señal analítica a la anomalía aeromagnética para estimar la posible ubicación de los bordes del cuerpo kimberlítico y así poder tener una guía de la ubicación estimada de la pipa kimberlítica.

Para el perfil *L\_2860\_20A* se importaron a la extensión *GM-SYS* los valores de topografía y de anomalía magnética obtenidos en el levantamiento aeromagnético. A los valores de anomalía magnética se les realizó el cálculo de la primera derivada horizontal con la cual se esperan encontrar los valores máximos sobre los bordes del cuerpo. También se calculó la derivada vertical en la cual se buscan los cambios de concavidad, estos indican los posibles bordes del cuerpo. En el panel superior de la figura N° 5.36 se muestran las curvas de ambas derivadas tanto la vertical como la horizontal.

También se realizó el cálculo de la segunda derivada vertical ya que esta se hace cero sobre los contactos o posibles bordes de los cuerpos (panel central de la figura N° 5.36). Adicionalmente se realizó el cálculo de la señal analítica ya que esta alcanza sus máximos valores sobre el tope de los cuerpos y esta es mostrada en el panel inferior de la figura N° 5.36.

A través del cálculo de la derivada horizontal se obtuvo que los posibles bordes del cuerpo están ubicados a 95m y 880m, ya que en estos puntos la derivada horizontal alcanza

sus valores máximos (Figura N° 5.36). Para la primera derivada vertical se obtuvo que los bordes del cuerpo están ubicados a 460m y 900m, puntos en los cuales se observan cambios de concavidad de la curva a lo largo del perfil.

A partir de la segunda derivada vertical se obtuvo que los posibles bordes del cuerpo se encuentran ubicados a 460m y 900m (panel central de la figura N° 5.36), a pesar de resultar ruidosa se observa que coincide con los cálculos realizados en las primeras derivadas vertical y horizontal.

El valor máximo de la señal analítica se obtuvo a 675m (panel inferior de la figura N° 5.36), este valor indica aproximadamente la ubicación del centro del cuerpo.

Luego de conocer la posible ubicación de los bordes del cuerpo kimberlítico a modelar, así como también los valores de susceptibilidades magnéticas de las rocas a utilizar, se procedió a realizar el modelado de la pipa kimberlita para este perfil *L\_2860\_20A*. En la extensión *GM-SYS* se introdujo el valor de susceptibilidades magnéticas para la provincia de Cuchivero y variando los valores de susceptibilidades magnéticas para las pipas kimberlitas de manera de ir disminuyendo el porcentaje de error existente entre las curvas del campo magnético medido y la curva generada por el modelo.

El modelo obtenido para este perfil *L\_2860\_20A* fue de una posible pipa kimberlita una susceptibilidad magnética de 0,0015 cgs. Esta pipa posee un diámetro de 302m, cuyos bordes se encuentran ubicados a 551m y 853m y enterrada a una profundidad de 240m y con una longitud de 735m (Figura N° 5.37). El mínimo porcentaje de error entre las curvas del campo magnético medido y el campo magnético generado por el modelo fue de 11, 873.

Otro de los perfiles al cual se le realizó un modelaje fue el *L\_2960\_14A*, previamente de realizar el modelaje se realizó el cálculo de las distintas derivadas: primera derivada vertical y horizontal, la segunda derivada vertical y la señal analítica de manera de ubicar los posibles bordes del cuerpo kimberlítico.

A partir de la primera derivada horizontal se encontró que los posibles bordes del cuerpos están ubicados a 180m y 1120m, ya que en estos puntos la curva alcanza sus valores máximos (panel superior de la figura N° 5.38).

La primera derivada vertical indicó que los posibles bordes de este cuerpo kimberlítico a modelar se encuentran ubicados a 525m y 1040m, en estos puntos es donde se observan los cambios de concavidad en la curva (panel superior de la figura 5.38).

En este perfil la segunda derivada vertical también resulto muy ruidosa, sin embargo se obtuvo que los posibles bordes del cuerpo se encuentran ubicados a 570m y 1010m (panel central de la figura N° 5.38).

El valor máximo de la señal analítica se obtuvo a 620m del origen (panel inferior de la figura N° 5.38), este valor nos indica aproximadamente la ubicación del centro del cuerpo a modelar.

Ya conocida la distancia a la que podrían estar ubicados los posibles bordes del cuerpo kimberlítico se procedió a realizar el modelaje de la pipa kimberlita utilizando el valor de susceptibilidad magnética de 0,0009 cgs para la provincia de Cuchivero. Ajustando el modelaje al de una pipa kimberlita variando el valor de susceptibilidad magnética de manera de disminuir el porcentaje de error entre las curvas del campo magnético medido y el generado por la extensión *GM-SYS*.

En la figura N° 5.39 se observa el modelo obtenido para el perfil *L\_2960\_14A*, este arroja una pipa kimberlítica con susceptibilidad magnética de 0,0014 cgs. Dicha pipa posee las siguientes características: un diámetro de 300m cuyos bordes del cuerpo kimberlítico se encuentran ubicados a 714m y 1014m. Esta pipa se encuentra a una profundidad de 164m y con una longitud de 525m.

El mínimo porcentaje de error entre las curvas del campo magnético medido y el generado por *GM-SYS* fue de 3,301.

La ubicación de este modelo de pipa kimberlita coincide con los máximos valores de radiación de conteo total obtenidos en el levantamiento terrestre, así como también con los máximos valores de la relación de Th/K del levantamiento aerogeofísico.

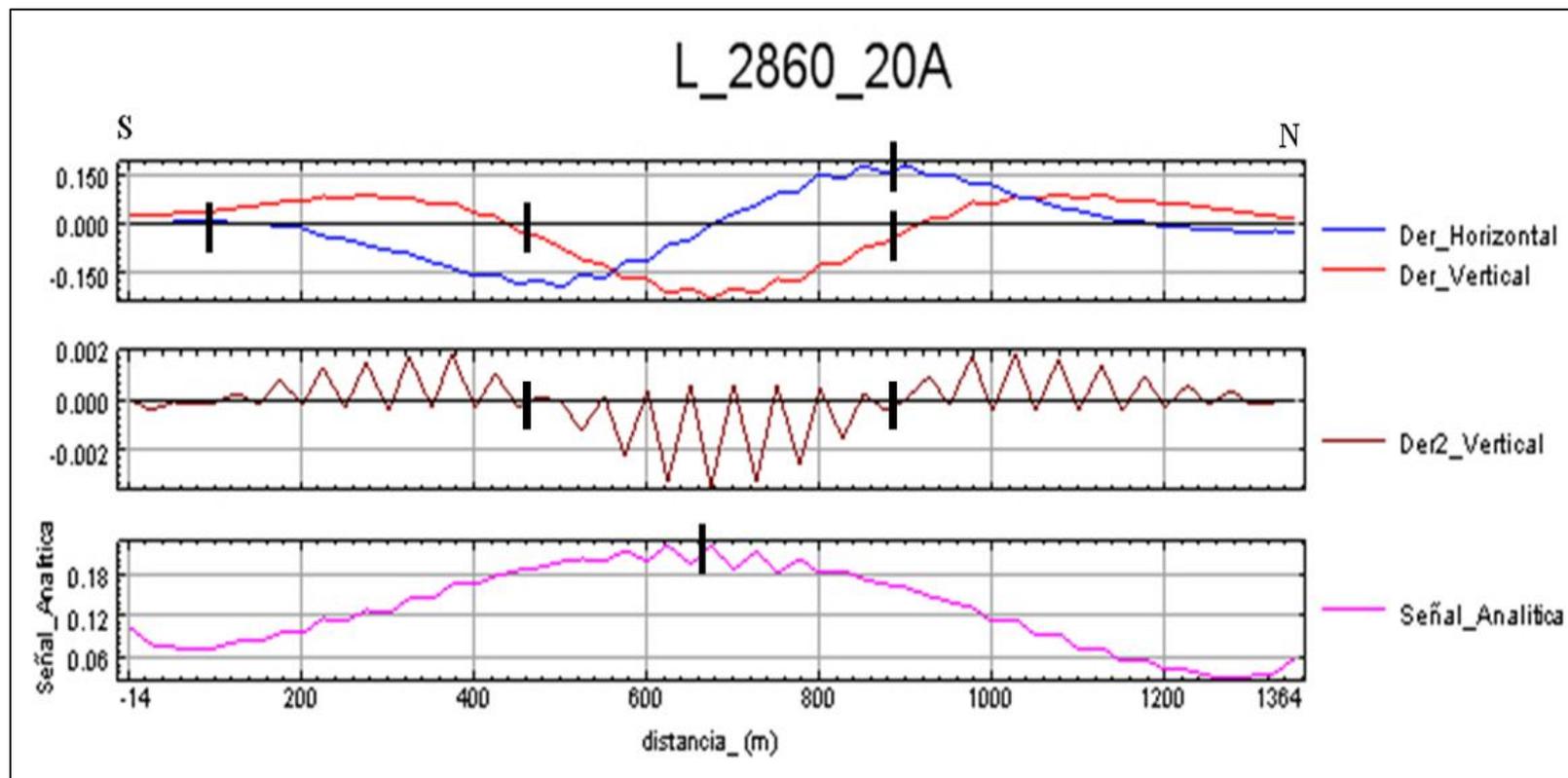


Figura N° 5.36 Derivadas y Señal Analítica obtenida para el perfil L\_2860\_20A.

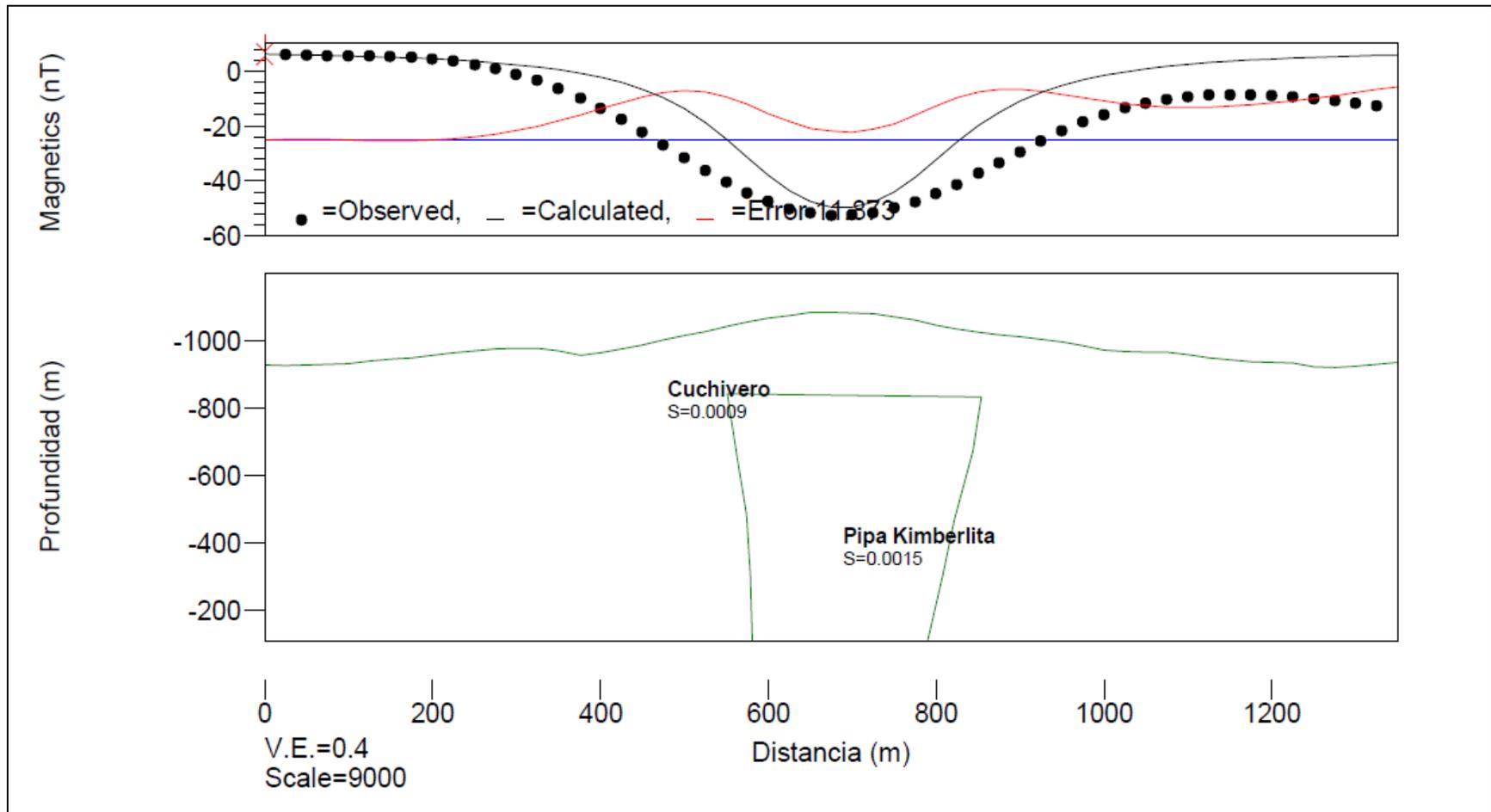


Figura N° 5.37 Modelo de pipa kimberlita obtenido para el perfil L\_2860\_20A.

El último perfil al cual se le realizó el modelado de pipa kimberlita fue el *L\_2990\_11A*. Previamente se realizó el cálculo de las primeras derivadas vertical y horizontal, la segunda derivada vertical y la señal analítica con la finalidad de identificar los bordes del cuerpo a modelar.

A través del cálculo de la primera derivada horizontal se obtuvo que los posibles bordes del cuerpo se encuentran ubicados a 55m y 860m ya que en este punto la curva alcanza sus valores máximos (panel superior de la figura N° 5.40).

Mediante la primera derivada vertical se obtuvo que los bordes del cuerpo kimberlítico se encuentran ubicados a 415m y 900m, ya que en estos puntos se observan cambios de concavidad en la curva (panel superior de la figura N° 5.40).

A partir de la segunda derivada vertical a pesar de resultar ruidos se obtuvo la ubicación de los posibles bordes del cuerpo, estos valores fueron 430m y 900m (Panel central de la figura N° 5.40).

El valor máximo de la señal analítica se encuentra a 625m (panel inferior de la figura N° 5.40), en dicha ubicación aproximadamente se encuentra el centro del cuerpo.

Al realizar el modelado con la extensión *GM-SYS* se obtuvo una pipa kimberlítica cuyo valor de susceptibilidad magnética resultó de 0,0014 cgs. Esta pipa posee un diámetro de 282m, cuya ubicación de los bordes se encuentran a 565m y 847m, dicha pipa se encuentra a una profundidad de 130m y posee una longitud de 473m (Figura N° 5.41).

El mínimo porcentaje de error obtenido entre las curvas del campo magnético medido y el generado por la extensión *GM-SYS* para este modelo fue de 4,272 (Figura N° 5.41).

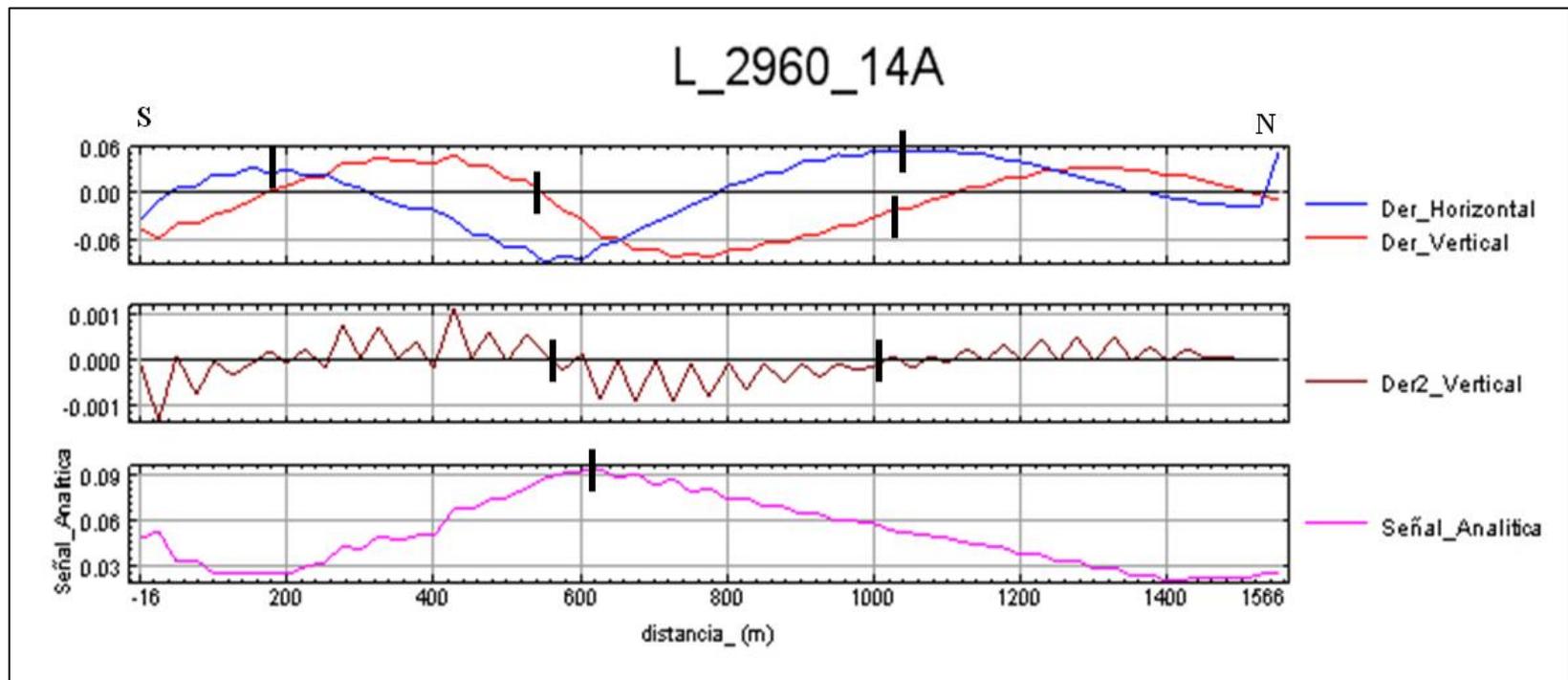


Figura N° 5.38 Derivadas y Señal Analítica obtenida para el perfil L\_2960\_14A.

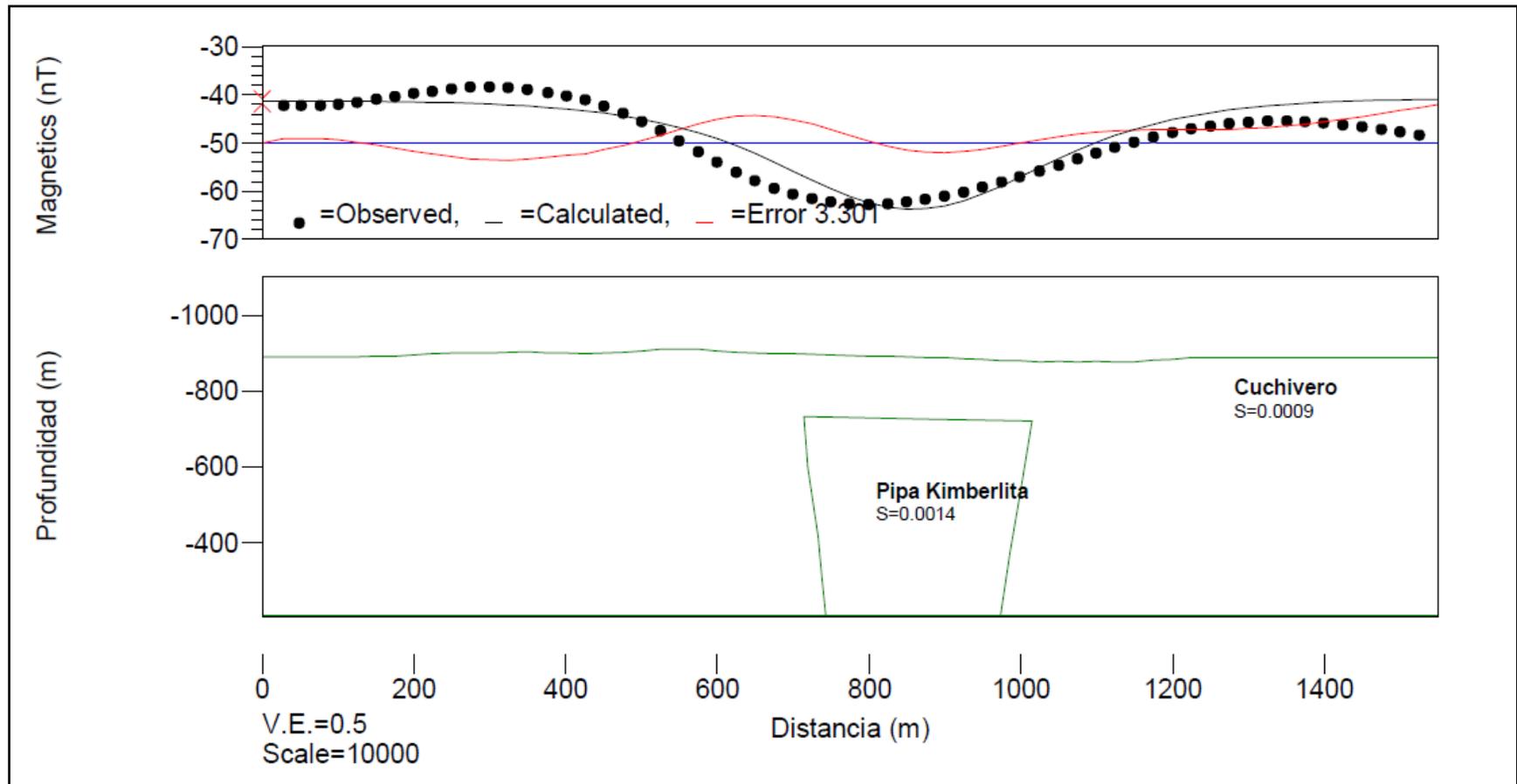


Figura N° 5.39 Modelo de pipa kimberlita obtenido para el perfil L\_2960\_14A

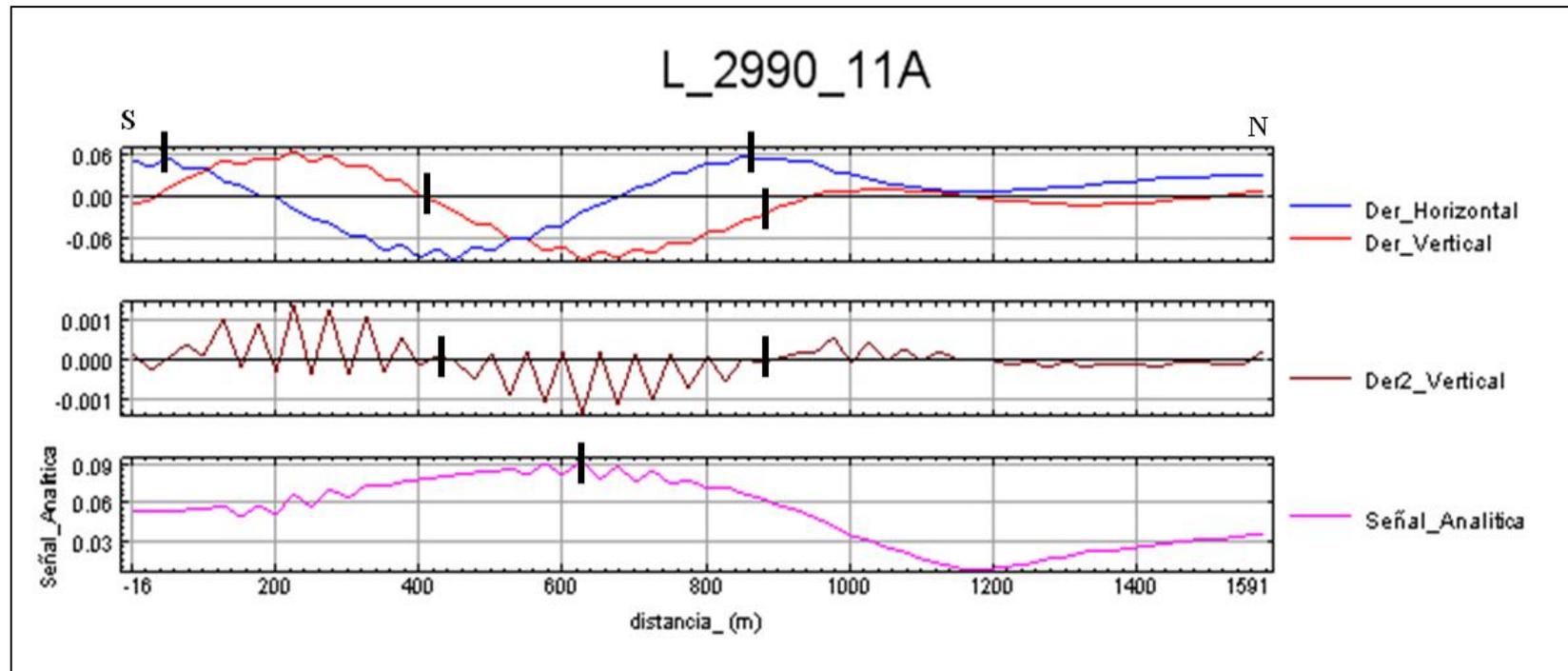


Figura N° 5.40 Derivadas y Señal Analítica obtenida para el perfil L\_2990\_11A.

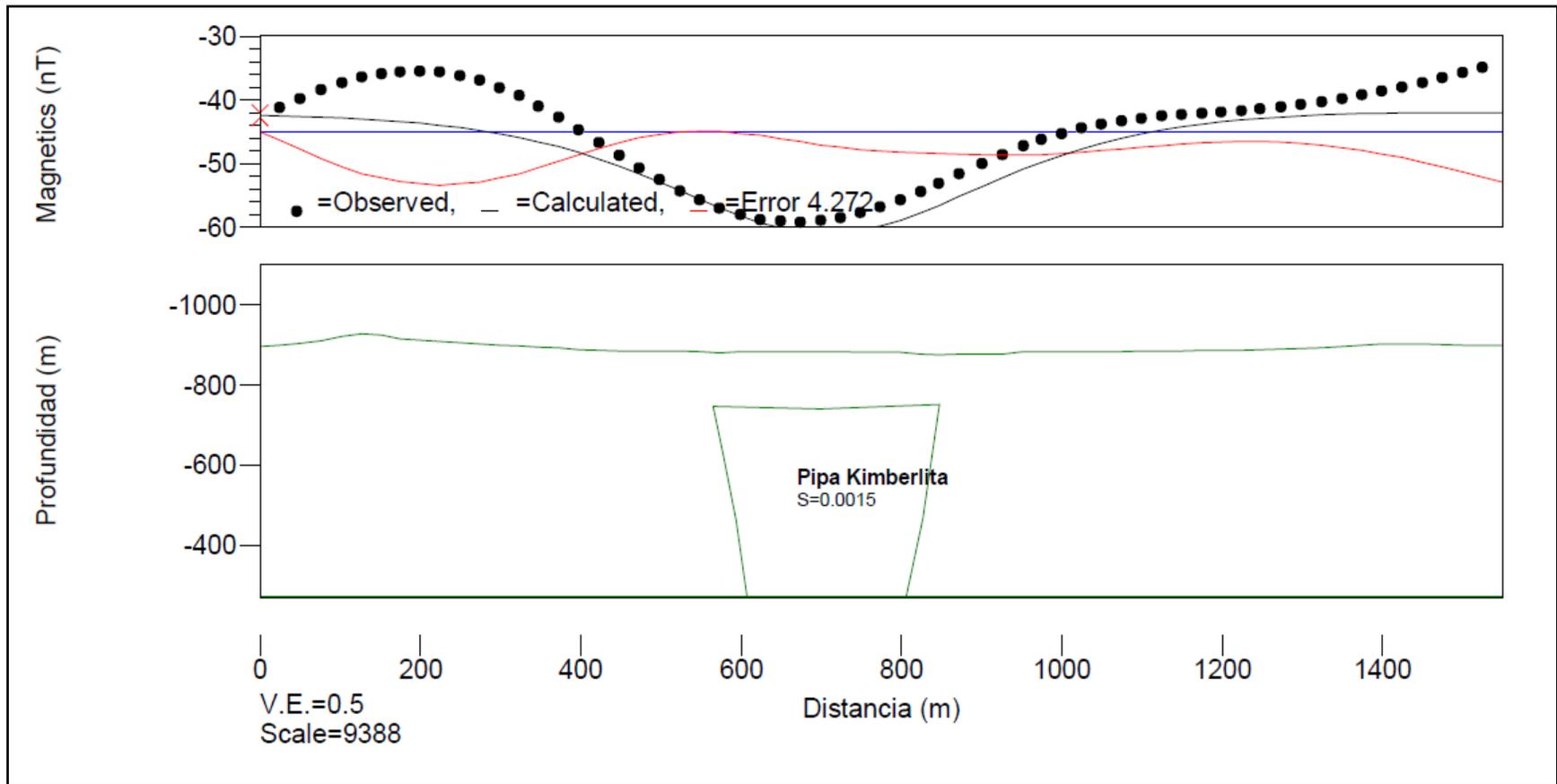


Figura N° 5.41 Modelo de pipa kimberlita obtenido para el perfil L\_2990\_11A.

### 5.3 *Modelo geológico para determinar el espesor de la Provincia Geológica de Roraima.*

Para realizar el modelo geológico a fin de determinar el espesor de la provincia geológica de Roraima en la extensión *GM-SYS*, se realizó el cálculo de las primeras derivadas horizontal y vertical, la segunda derivada vertical y señal analítica para ubicar posibles contactos entre cuerpos que se encuentren en el perfil.

A partir de la curva de la derivada horizontal se observaron los puntos donde se alcanzan máximos de manera de ubicar posibles contactos entre los cuerpos en el subsuelo la curva se muestra en el panel superior de la figura N° 5.42. En la tabla N° 5.1 se observan algunos puntos en los cuales la curva de la derivada horizontal alcanza valores máximos.

| <b>Distancia (m)</b> |
|----------------------|
| <b>5700</b>          |
| <b>7250</b>          |
| <b>8250</b>          |
| <b>9100</b>          |
| <b>14000</b>         |
| <b>14950</b>         |

Tabla N° 5.1 Máximos obtenidos mediante el cálculo de la derivada horizontal.

A partir de la curva de la derivada vertical se ubicaron los puntos en los cuales existen cambios de concavidad (panel superior de la figura N° 5.42). En la tabla N° 5.2 se muestran algunos de los puntos en los cuales se observan cambios de concavidad en la curva.

| <b>Distancia (m)</b> |
|----------------------|
| <b>6750</b>          |
| <b>7280</b>          |
| <b>7710</b>          |
| <b>8260</b>          |
| <b>8650</b>          |
| <b>9700</b>          |
| <b>10650</b>         |
| <b>14010</b>         |

Tabla N° 5.2 Algunos puntos donde se observan cambios de concavidad en la curva de la derivada vertical.

Utilizando la segunda derivada vertical (panel central de la figura N° 5.42) se ubicaron los puntos en los cuales la curva se hace cero para identificar los posibles contactos entre los cuerpos. En la tabla N° 5.3 son mostrados algunos de los puntos en los cuales la curva se hace cero.

| <b>Distancia (m)</b> |
|----------------------|
| <b>7250</b>          |
| <b>7700</b>          |
| <b>8225</b>          |
| <b>8700</b>          |
| <b>9050</b>          |
| <b>9430</b>          |
| <b>13930</b>         |
| <b>14470</b>         |

Tabla N° 5.3 Algunos puntos donde la segunda derivada vertical se hace cero.

En la señal analítica se observaron varios puntos en los cuales se alcanzan máximos, los cuales son indicativos de contactos entre cuerpos que se encuentran en el subsuelo, en el panel inferior de la figura N° 5.44 se muestra la curva de la señal analítica para el perfil y en la tabla N° 5.4 se observan algunos valores donde se alcanzan máximos.

| <b>Distancia (m)</b> |
|----------------------|
| <b>7600</b>          |
| <b>9250</b>          |
| <b>10645</b>         |
| <b>11800</b>         |
| <b>14100</b>         |
| <b>15150</b>         |

Tabla N° 5.4 Algunos máximos de la señal analítica.

Los puntos seleccionados a partir del cálculo de las primeras derivadas horizontal y vertical, así como de la segunda derivada vertical y señal analítica, fueron considerados basándonos en aquellos que poseen frecuencias muy grandes las cuales están asociadas a cuerpos de gran escala.

A partir de estos valores se realizó un modelo para poder determinar el espesor de la Provincia Geológica de Roraima al Nor-Este de la zona de estudio. La susceptibilidad magnética utilizada fue de 0,0009 cgs para la Provincia de Cuchivero y 0,0001 cgs para la provincia de Roraima. Al realizar el modelo se obtuvo un espesor máximo de 277m en el Nor-Este del perfil el cual se encuentra disminuyendo en forma de cuña hasta llegar a desaparecer completamente justo al llegar al borde del dique de diabasas en la cual está ubicado a 6767m como se puede observar en la figura N° 5.43.

El porcentaje de error obtenido entre las curvas del campo magnético medido y el generado por el modelo fue de 18,855 %, este es el modelo con menor error obtenido.

El dique de diabasas que aflora en la zona de estudio, el cual se encuentra fragmentado posee un rango de susceptibilidades magnéticas entre 0,0006 cgs a 0,0018 cgs (Figura N° 5.43). Los bordes de este dique se encuentran ubicados a 6767m y a 8459m, en la figura también se observa cómo cambia la respuesta magnética al llegar al dique.

El modelo sugiere la presencia de un dique posiblemente de diabasas el cual fue detectado a través de los datos magnéticos y que coincide con el modelo. Este dique posee una susceptibilidad magnética de 0,0018 cgs se encuentra ubicado a 11700m, posee un espesor de 812m y se encuentra a una profundidad de 247m de la superficie.

En dicho perfil se observa un pequeño afloramiento de rocas sedimentarias de la Provincia Geológica de Roraima ubicado a 14550m (Figura N° 5.43).

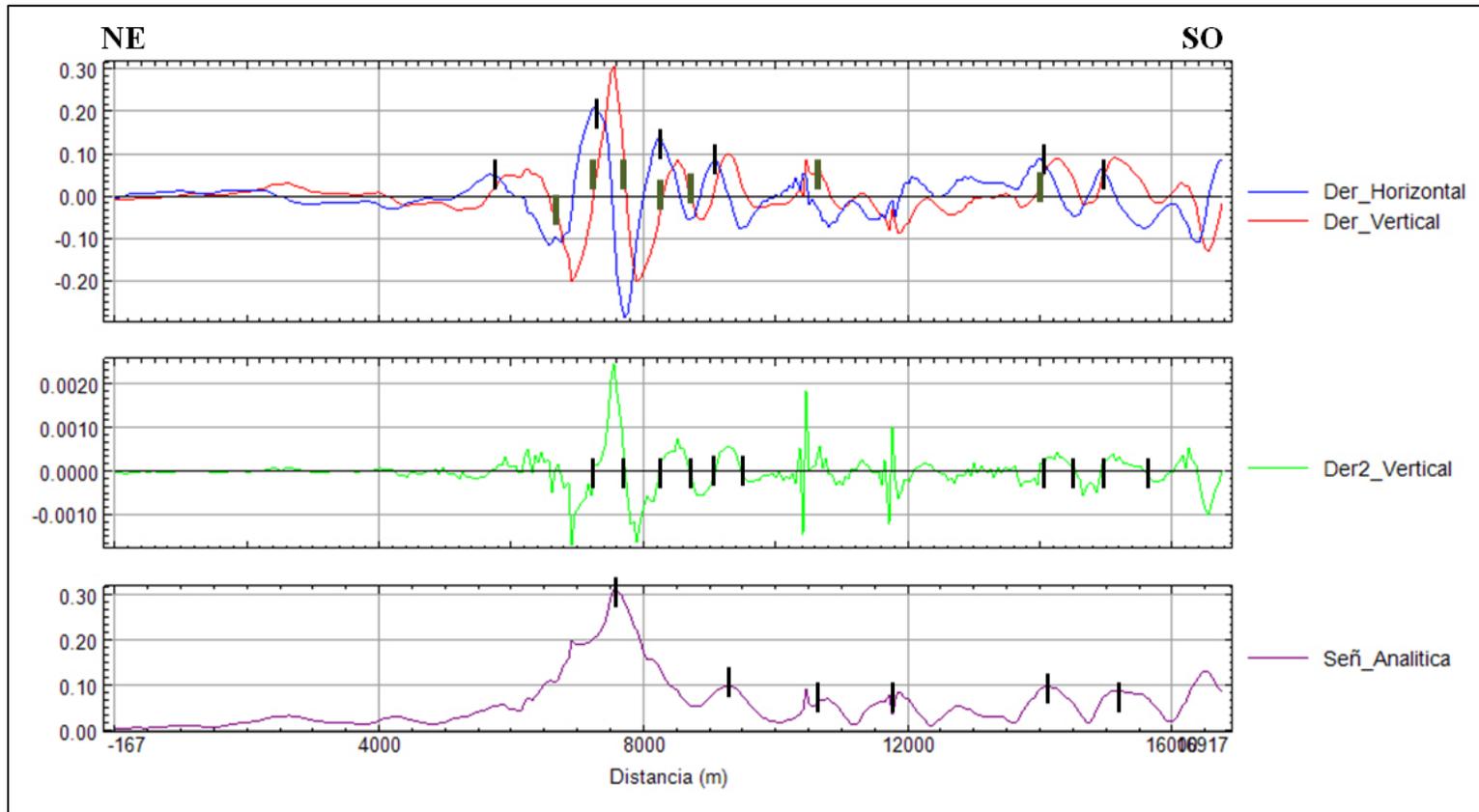


Figura N° 5.42 Derivadas y Señal analítica calculadas para realizar el modelado del perfil geológico.

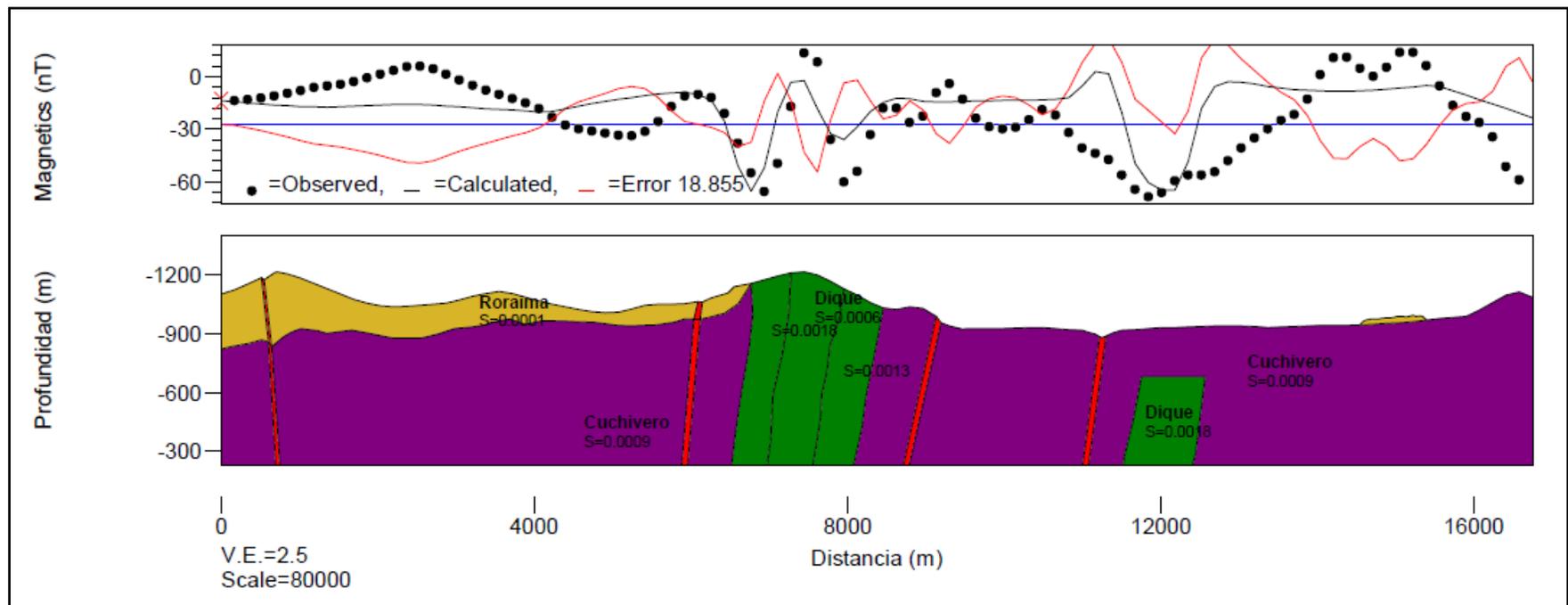


Figura N° 5.43 Modelo geológico para determinar el espesor de la provincia geológica de Roraima.

## 6 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### CONCLUSIONES

- ✓ De los doce perfiles se observó alguna respuesta magnética, electromagnética y/o radiométrica en el levantamiento geofísico terrestre en siete (7) de ellos: *L\_2990\_11A*, *L\_2960\_15A*, *L\_2960\_14A*, *L\_2860\_20A* y *L\_3120\_53A*, *L\_3210\_4A* y *L\_2981\_12A*.
- ✓ Los perfiles *L\_2990\_11A*, *L\_2960\_14A* y *L\_2860\_20A* poseen anomalías magnéticas negativas que a partir de las dimensiones y forma podrían relacionarse con la presencia de pipas kimberlíticas y las cuales presentan anomalías electromagnéticas y/o radiométricas.
- ✓ El perfil *L\_3120\_53A* presenta una anomalía electromagnética obtenida en ambos levantamientos (aéreo y terrestre) la cual coincide con la ubicación de una anomalía magnética detectada mediante el levantamiento geofísico terrestre, resultando de gran interés para la exploración diamantífera.
- ✓ En el perfil *L\_2960\_15A* se observó una zona conductora ubicada al Sur, esta coincide con la anomalía magnética negativa, la cual resulta de mayor interés que la anomalía magnética positiva por la cual este fue seleccionado previamente por INGEOMIN.
- ✓ En el perfil *L\_3210\_4A* se ubicó la zona de contacto entre las formaciones Uairén y la provincia geológica de Cuchivero la cual se encuentra aproximadamente a 350m, ya que en dicho punto varían las respuestas electromagnéticas (aéreas y terrestres), así como también la relación de Th/K.

- ✓ El perfil *L\_2981\_12A* presenta anomalías magnéticas y electromagnéticas las cuales se encuentran desfasadas, lo cual puede estar relacionado a una posible zona que no se ha meteorizado y erosionado sobre la anomalía magnética.
- ✓ El modelo de pipa kimberlita obtenida para el perfil *L\_2960\_14A* arrojó una pipa con un diámetro de 300m la cual se encuentra enterrada a una profundidad de 164m y con una longitud de 525m, con un mínimo porcentaje de error de 3,301%.
- ✓ En el modelado de pipa kimberlita para el perfil *L\_2990\_11A* se obtuvo una pipa cuyo diámetro es de 282m y se encuentra a una profundidad de 130m, con una longitud de 473 y con un porcentaje de error de 4,272%.
- ✓ El modelado para el perfil *L\_2860\_20A* arrojó una pipa kimberlítica con un diámetro de 302m, la cual se encuentra a una profundidad de 240m y posee una longitud de 735m cuyo mínimo porcentaje de error es de 11,873%.
- ✓ El espesor máximo obtenido en el modelo geológico para la Provincia Geológica de Roraima al Nor-Este de la zona del levantamiento aerogeofísico es de 277m cuyo modelo posee un mínimo porcentaje de error de 18,855%, este espesor disminuye en forma de cuña hacia Sur-Oeste.
- ✓ El espesor del dique de diabasas el cual aflora en la zona de estudio y el cual se puede ver en el mapa geológico es aproximadamente de 1700m.

## ***RECOMENDACIONES***

- ✓ Realizar perfiles cruzados o paralelos a los perfiles: *L2990\_11A*, *L2960\_14A*, *L2960\_15A*, *L2860\_20A*, *L3120\_53A* y *L\_2981\_12A*, de manera de verificar las anomalías obtenidas: magnéticas, electromagnéticas y/o radiométricas en los alrededores de cada perfil.
- ✓ Realizar muestreos de geoquímica en cada uno de los perfiles seleccionados.
- ✓ Realizar conjuntamente los perfiles paralelos o cruzados a los nuevos perfiles a verificar en levantamientos geofísicos terrestres posteriores.
- ✓ Realizar medidas de susceptibilidad magnética a las rocas que se encuentran a lo largo de cada perfil.
- ✓ Utilizar un espectrómetro para levantamientos geofísicos terrestres posteriores a fin de poder asociar las radiaciones a los diferentes tipos de elementos como Uranio, Torio o Potasio.
- ✓ Extender el perfil *L\_2960\_15A* hacia el Sur de manera de verificar la anomalía magnética negativa que se encuentra al inicio del perfil y que coincide con una zona de anomalía electromagnética.
- ✓ Realizar una inversión de los datos electromagnéticos a fin de poder determinar la profundidad a la cual se encuentra la zona conductora de la pipa kimberlítica (Yellow Ground).

## 7 REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

Allen, D. (2007). *Geophysics for the irrigation industry*. Australia: Sustainable Irrigation.

Backé, G., Baines, G., Giles, D., Preiss, W., & Alesci, A. (2010). Basin geometry and salt diapirs in the Flinders Ranges, South Australia: Insights gained from geologically-constrained modelling of potential field data. *Marine and Petroleum Geology*, 650-665.

Bortolotti, A. (2009). *Estudio geofísico usando métodos electromagnéticos en un medio fracturado afectado por lixiviados*. Mexico: Tesis de Maestría: Instituto Politécnico Nacional.

Cassiraga, E. F. (1999). *Incorporación de información blanda para la cuantificación de la incertidumbre: aplicación a la hidrogeología*. Valencia, España: Tesis Doctoral, Universidad Politécnica de Valencia.

Chirinos, Z., Guevara, M., Rodríguez, B., & Chocrón, N. (2008). Gammaespectrometría aérea para ubicar las zonas de mayores anomalías radioactivas en Icabarú, estado Bolívar, República Bolivariana de Venezuela. *XIV Congreso Venezolano de Geofísica*.

Costa Dutra, A. (2006). *ESTUDO DE ANOMALIAS GRAVIMÉTRICAS E AEROMAGNÉTICAS DA ALCALINAS MORRO DE ENGENHO E A2, SUDOESTE DE GOIÁS*. Sao Paulo: Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas Universidade de Sao Paulo.

Costa, A. (2006). *Estudo de Anomalias gravimétricas e aeromagnéticas das alcalinas Morro de Engenho E A2, Sudoeste de Goiás*. Sao Paulo: Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas Universidade de Sao Paulo.

Eisberg, R., & Resnick, R. (2006). *Física Cuántica*. México: LIMUSA, S.A.

Fairhead, D. (2000). *Gravity and Magnetic in today's oil industry*. Inglaterra: MSc Course notes.

Geometrics. (1975). *Manual Operation Portable Gamma Ray Scintillometer*.

- Geometrics, I. (1994). *Operation Manual G856 Proton Precession Magnetometer*.
- Geosoft. (2007). GM-SYS Profile Modeling Gravity & Magnetic Modeling Software.
- Gomes, F., & Sandoval, R. (2008). *Estudio geofísico integrado en la zona de Yumare-Aroa, estados Yaracuy y Falcón*. Trabajo Especial de Grado: Universidad Central de Venezuela.
- González, J., & Martínez, F. (2008). *Estudio Geofísico integrado en la región de Siquisique, Norte del Estado Lara*. Caracas: Universidad Central de Venezuela.
- Guevara, M., Chirinos, Z., Rodríguez, B., & Chocrón, N. (2008). Respuesta aero gammaespectrométrica de las Provincias Geológica de Roraima y Cuchivero en el sector Icabarú, del estado Bolívar, Venezuela. *XIV Congreso Venezolano de Geofísica* .
- Jaques, A. L. (1998). Kimberlite and lamproite diamond pipes. *Jornal of Australian Geology & Geophysics* , Vol. 17 (4), Pag. 153-162.
- Kaminsky, F., Sablukov, S., Sablukova, L., & Channer, D. (2004). Neoproterozoic 'anomalous' kimberlites of Guaniamo, Venezuela: mica kimberlites of 'isotopic transitional' type. *Lithos* 76 , 565-590.
- Kearey, P., & Brooks, M. (1991). *An Introduction to Geophysical Exploration* (2 ed.). Inglaterra: Blackwell Science.
- Lane, R. (2002). Ground and airborne electromagnetic methods. *CRCLEME* , Vol. 144, Pag. 53-79.
- Lexico estratigrafico de Venezuela.* (s.f.). Obtenido de <http://www.pdvsa.com/lexico/r45w.htm>
- Macnae, J. C. (1979). Kimberlites and exploration geophysics. *GEOPHYSICS* , Vol. 44 (8), Pag. 1395-1416.
- Mendoza, V. (2000). *Evolución Geotectónica y Recursos Minerales del Escudo de Guayana en Venezuela (Y Su Relación con el Escudo Sudamericano)*. Venezuela: Minera Hecla Venezolana, C.A.

Menezes, P. T., & García, M. D. (2007). Kimberlite exploration at Serra da Canastra province, Brazil. *GEOPHYSICS* , Vol. 72 (3), Pag. M1-M5.

Pérez Caro, A. S. (2006). *INTEGRACIÓN DE DATOS AEROMAGNÉTICOS CON REGISTROS DE SUSCEPTIBILIDAD MAGNÉTICA (EN MUESTRAS SOMERAS DE POZOS) EN EL CAMPO LA VICTORIA*. Caracas: Universidad Simón Bolívar.

Reynold, J. (1998). *An introduction to applied and Enviromental Geophysics*. USA: Willey Editorial.

Sheriff, R. E. (2002). *Encyclopedic Dictionary of Exploration Geophysics*. Estados Unidos: Society of Exploration Geophysicists.

Smith, R., Annan, P., Lemieux, J., & Pedersen, R. (1996). Application of a modified GEOTEM system to reconnaissance exploration for kimberlites in the Point Lake area, NWT, Canada. *GEOPHYSICS* , 82–92.

Somoza, J. (2005). *Estudio geológico y de ocurrencia de rocas kimberlíticas en el sector minero Guaniamo, Estado Bolivar, a escala 1:100.000*. Ciudad Bolivar, Venezuela: Universidad de Oriente.

Telford, W. M., Geldart, L., & Sheriff, R. (1990). *Applied Geophisycs*. Cambridge: University Press.



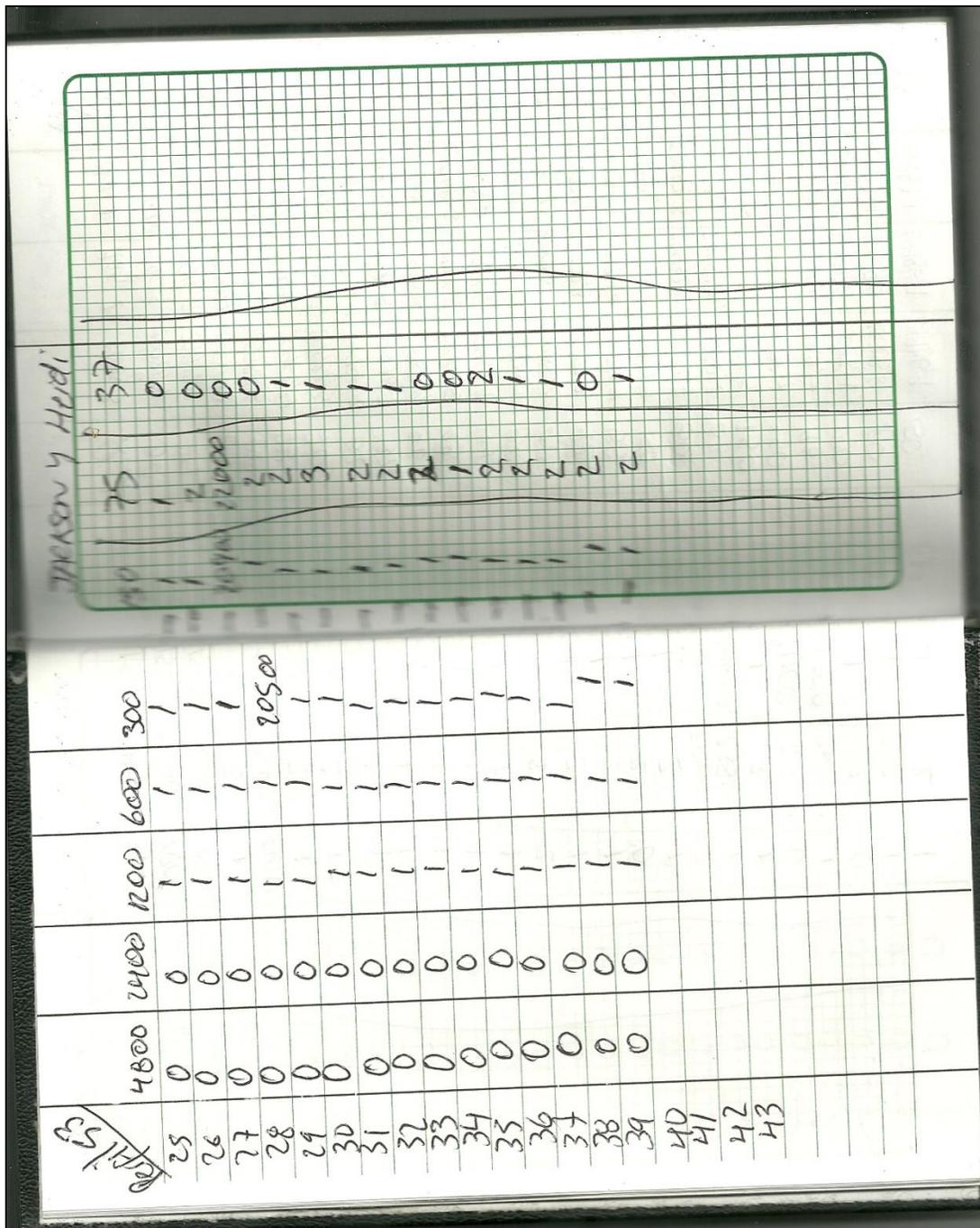


Figura N° 8.2 Hoja de anotación de los datos electromagnéticos (II).

| Hil / Prol | Mag: Monica |        |        | Rad: Jackson |        |        |        |     |
|------------|-------------|--------|--------|--------------|--------|--------|--------|-----|
|            | Mag 1       | Mag 2  | Mag 3  | Rad          | Mag 1  | Mag 2  | Mag 3  | Rad |
| 0          | 299215      | 299215 | 299214 | 90           | 299645 | 299647 | 299646 | 180 |
| 1          | 299168      | 299169 | 299172 | 74           | 299326 | 299326 | 299326 | 150 |
| 2          | 299204      | 299204 | 299202 | 84           | 299076 | 299074 | 299075 | 150 |
| 3          | 299386      | 299385 | 299386 | 80           | 299103 | 299118 | 299149 | 180 |
| 4          | 299593      | 299595 | 299594 | 78           | 299754 | 299755 | 299754 | 150 |
| 5          | 299812      | 299813 | 299813 | 70           | 299754 | 299752 | 299753 | 150 |
| 6          | 299844      | 299844 | 299842 | 82           | 299383 | 299383 | 299384 | 150 |
| 7          | 299916      | 299916 | 299916 | 82           | 299774 | 299774 | 299775 | 150 |
| 8          | 299637      | 299638 | 299639 | 86           | 299329 | 299327 | 299328 | 150 |
| 9          | 299686      | 299685 | 299685 | 93           | 299091 | 299091 | 299091 | 150 |
| 10         | 299636      | 299636 | 299639 | 84           | 299091 | 299091 | 299091 | 150 |
| 11         | 29960       | 299602 | 299600 | 84           | 299092 | 299092 | 299092 | 98  |
| 12         | 299362      | 299360 | 299362 | 90           | 299109 | 299109 | 299109 | 86  |
| 13         | 299329      | 299323 | 299323 | 92           | 299109 | 299109 | 299107 | 86  |
| 14         | 299249      | 299248 | 299249 | 88           | 299103 | 299103 | 299103 | 84  |
| 15         | 298947      | 298946 | 299014 | 150          | 299103 | 299103 | 299103 | 74  |
| 16         | 299328      | 299329 | 299327 | 80           | 299103 | 299103 | 299103 | 70  |
| 17         | 299591      | 299592 | 299592 | 81           | 299103 | 299103 | 299103 | 70  |
| 18         | 299786      | 299786 | 299785 | 150          | 299103 | 299103 | 299103 | 72  |
| 19         | 299924      | 299925 | 299927 | 150          | 299103 | 299103 | 299103 | 72  |
| 20         | 300316      | 300311 | 300315 | 96           | 299103 | 299103 | 299103 | 72  |
| 21         | 300044      | 300040 | 300054 | 180          | 299103 | 299103 | 299103 | 72  |
| 22         | 300074      | 300086 | 300086 | 180          | 299103 | 299103 | 299103 | 72  |
| 23         | 299971      | 299986 | 299986 | 150          | 299103 | 299103 | 299103 | 72  |

Figura N° 8.3 Hoja de anotación de los datos magnéticos y radiométricos (I).

|    | Mag: Monica; |         | Rad: Jackson |     |
|----|--------------|---------|--------------|-----|
|    | Mag 1        | Mag 2   | Mag 3        | Rad |
| 44 | 29908,5      | 29908   | 29908        | 66  |
| 45 | 29899,3      | 29899,1 | 29899,7      | 66  |
| 46 | 29892,6      | 29892,6 | 29892,6      | 78  |
| 47 | 29918,9      | 29918,9 | 29918,9      | 68  |
| 48 | 29898,9      | 29899,3 | 29899,2      | 80  |
| 49 | 29924,5      | 29921,2 | 29921,2      | 74  |
| 50 | 29924,1      | 29922,5 | 29922,4      | 72  |
| 51 | 29949,1      | 29953,4 | 29951,2      | 74  |
| 52 | 29924,1      | 29925,6 | 29923,8      | 68  |
| 53 | 29916        | 29916,3 | 29916,2      | 68  |
| 54 | 29914,2      | 29913,9 | 29913,9      | 62  |
| 55 | 29924,2      | 29921,8 | 29921,5      | 68  |
| 56 | 29929,7      | 29924,8 | 29924,9      | 66  |
| 57 | 29940,9      | 29941,1 | 29941        | 70  |
| 58 | 29940,4      | 29940,4 | 29940,3      | 64  |
| 59 | 29939,3      | 29938,9 | 29938,7      | 64  |
| 60 | 29934,6      | 29934,6 | 29934,5      | 66  |
| 61 | 29933,5      | 29933,5 | 29933,8      | 68  |
| 62 | 29925,5      | 29926,0 | 29925,9      | 68  |

Figura N° 8.4 Hoja de anotación de los datos magnéticos y radiométricos (II)