



# UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

---

**FACULTAD DE INGENIERÍA**  
División de Ingeniería en Ciencias de la Tierra.

## **APLICACIÓN DEL MÉTODO DE DECONVOLUCIÓN DE EULER SOBRE DATOS AEROMAGNÉTICOS**

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

**INGENIERO GEOFÍSICO**

PRESENTA:

**OMAR ROMÁN PACHECO GÓMEZ**

DIRECTOR DE TESIS:

**DR. RENÉ EFRAÍN CHÁVEZ SEGURA**



CIUDAD UNIVERSITARIA, MÉXICO DF 2008



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

# **El método de deconvolución de Euler en la interpretación aeromagnética.**

Omar Román Pacheco Gómez

## **DEDICATORIA.**

A mis Padres que con tanto esfuerzo lograron que recibiera una educación universitaria. Por que siempre mantuvieron la confianza en mí y por su constante e incondicional apoyo a lo largo de tantos años. Sin ayuda de ustedes el camino hubiera sido muchísimo mas difícil.

A mi esposa por la paciencia mostrada y por los años de compañía en los cuales hemos vivido grandes y terribles momentos, pero siempre juntos.

A mi hijo por ser la enorme inspiración para un continuo desarrollo personal y profesional. Gracias por ser el milagrito que cambió mi vida por completo y gracias por ser el corazón de mi familia.

A mis hermanos que de alguna manera tuvieron que ver con mi desarrollo académico.

A todos mis amigos que en su momento me brindaron todo el apoyo y comprensión que necesité. Muy especialmente a Alejandro, Pechan, César, Víctor, Lino, Iván, Panther, Augusto, Ricardo super, Berna, Geovanny, Leonel, Pocho, Confucio, Jorge, Giuliano, Miguel, Leslie, Minerva, Edgardo, Manuel, Janet, Eloisa y Pahola. Gracias por ser ese grupo tan selecto que no confunde la camaradería con la verdadera amistad.

## **AGRADECIMIENTOS.**

Al Ing. Víctor de la Garza Noriega, Subdirector de exploración internacional, por las facilidades y el apoyo mostrado a lo largo de la elaboración de este trabajo.

Al Dr. René Chávez por la paciente dirección de este trabajo escrito. Por ayudarme a madurar en el área profesional con las observaciones hechas para corregir mis métodos de trabajo.

Al Ing. Catarino Zepeda por la gran aportación a este trabajo, por la confianza otorgada, por la paciencia mostrada y por la frecuente ayuda a pesar de la lejanía de lugares de trabajo.

Al Ing. Eulalio Rodríguez por el apoyo y las facilidades otorgadas durante el desarrollo de la tesis.

A mis sinodales, por el interés mostrado y su aporte en el tema, además de los jalones de orejas: Gerardo Cifuentes, Claudia Arango, Esteban Hernández y Andrés tejero.

Al departamento de exploración de Zacatecas, por las facilidades para trabajar con los datos disponibles en el tema.

# **“APLICACIÓN DEL MÉTODO DE DECONVOLUCIÓN DE EULER SOBRE DATOS AEROMAGNÉTICOS”**

## **RESUMEN**

La técnica de deconvolución de Euler es un método auxiliar en la interpretación de datos magnéticos que ha adquirido importancia a partir de que puede ser utilizada a bajas latitudes y en presencia de magnetismo remanente por su supuesta independencia con la dirección del campo magnético de la tierra. Su funcionalidad se basa en la solución de la ecuación de homogeneidad de Euler para localizar fuentes y estimar su profundidad, además de identificar el tipo de estructura geológica al que se asocian las anomalías presentes en un mapa mediante el manejo de un Índice Estructural correspondiente a un tipo de estructura en particular.

Esta técnica fue aplicada a datos aeromagnéticos del prospecto Cerro Blanco en Zacatecas. El objetivo fue identificar depósitos mineros polimetálicos asociados a vulcanismo submarino. La estimación de la profundidad de los cuerpos de interés fue uno de los productos obtenidos de la deconvolución de Euler.

Se realizaron y describieron los procesos a los cuales fueron sometidos los datos para llegar a los productos finales: Reducción al Polo y señal analítica. La gran mayoría de datos aeromagnéticos reciben el tipo de tratamiento que se explica en esta tesis, desde la depuración de datos, aplicación de algoritmos para corregir los efectos presentes en las mediciones debido a factores ajenos a efectos geológicos, hasta el procesamiento para obtener productos (mapas) con diferentes significados.

Se analiza a fondo el algoritmo de la deconvolución de Euler y se aplica con el software “Oasis Montaj” de Geosoft. El algoritmo fue aplicado después de la identificación de algunas anomalías interesantes en los mapas de Reducción al Polo y Señal Analítica.

Mediante la deconvolución de Euler se encontraron 3 zonas de especial interés minero y se descartaron las demás anomalías mediante el significado del índice estructural, además se delinearon y se estimó la profundidad de cada uno de los cuerpos. Se presume que se trata de depósitos polimetálicos con contenidos de plata plomo y zinc. Para la confirmación de la existencia y mejor delimitación de estos depósitos se propone un plan de trabajo de geofísica complementario, a partir de la propiedad de baja resistividad eléctrica que muestran este tipo de cuerpos.

ÍNDICE

**RESUMEN**

<b>I. INTRODUCCIÓN.</b>	1
1.1 Generalidades del área.	3
1.2 Características fisiográficas.	3
1.3 Objetivos.	6
<b>II. GEOLOGÍA.</b>	7
2.1 Historia geológica	7
Triásico superior.	7
Jurásico.	8
Cretácico.	9
Cenozoico.	9
2.2 Importancia minera del área.	11
<b>III. ESTUDIO AEROMAGNÉTICO.</b>	16
3.1 Equipo utilizado.	16
Base magnética.	16
Sistema de adquisición de datos.	17
Sensor magnético.	17
Sistema de navegación.	17
Aeronave	18
3.2 Detalles del levantamiento.	19
3.3 Metodología.	21
Ordenamiento y depuración de datos.	21
Análisis y proceso de datos.	22
Deconvolución de Euler.	23
Identificación de zonas de interés minero.	23
3.4 Correcciones.	24
Corrección por variación diurna.	25
Corrección por rezago, “lag correction”.	29
Corrección por IGRF.	32
Levelling.	34
Microlevelling.	37

<b>IV. PROCESAMIENTO DE DATOS.</b>	41
3.1 Análisis del espectro de potencias.	41
3.2 Reducción al polo.	44
3.3 Señal analítica.	49
<b>V. DECONVOLUCIÓN DE EULER.</b>	53
5.1 Teoría del método de deconvolución de Euler.	53
5.2 Aplicación del método en 3D.	60
5.3 Aplicación del método en 2D y modelado directo.	73
<b>VI. CONCLUSIONES.</b>	82
6.1 Estudios geofísicos posteriores.	86
<b>REFERENCIAS.</b>	87



## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla 1.</b> Estructuras geológicas que representan cada índice estructural.	55
<b>Tabla 2.</b> Índices estructurales de las recomendaciones de interpretación por “Northwest Geophysical Associates”, Ángeles Cordero (2007)	56
<b>Tabla 3.</b> Resultados de la interpretación de las soluciones de Euler para las anomalías planteadas a partir de Reducción al Polo y Señal analítica. El tipo de estructura se obtuvo con la ayuda del índice estructural que mejor representa a la anomalía.	70

## **I. INTRODUCCIÓN.**

En los últimos años, la exploración de depósitos de sulfuros masivos volcanogénicos (VMS, Volcanogenic Massive Sulphide), ha tomado mayor importancia en México a partir del reconocimiento del Terreno Guerrero como zona encajonante de grandes depósitos minerales, aunado al descubrimiento de dos grandes depósitos VMS (San Nicolás y Francisco I. Madero, ambos localizados en Zacatecas), que confirman el potencial que tiene la parte central del país para encajonar grandes depósitos de sulfuros masivos.

Los depósitos VMS se han caracterizado por ser fuentes potenciales de Cu, Pb y Zn y algunos pueden contener importantes cantidades de Au y Ag. Los minerales presentes son en gran porcentaje pirita masiva y/o pirrotita con cantidades variables de calcopirita, esfalerita y galena. La bornita y la calcocita están presentes en algunos tipos de estos depósitos y también puede haber cantidades menores de arsenopirita, magnetita y tenantita-tetrahedrita.

A nivel mundial son depósitos pequeños y aproximadamente el 40 % contiene menos de un millón de toneladas de mineral. En algunos casos pueden contener grandes cantidades de mineral y pueden ser rentables, sobre todo cuando hay varios depósitos dentro de un mismo distrito (*Maksaev 2001*).

Para su localización se utilizan métodos geofísicos de exploración, entre otros el método magnético, capaz de detectar cuerpos con susceptibilidad magnética importante, íntimamente relacionada a la naturaleza ferromagnética de algunos de los minerales que están presentes en los

depósitos VMS. Un levantamiento de magnetometría aérea es indispensable para la exploración de este tipo de depósitos porque pueden cubrirse grandes áreas en poco tiempo y la resolución de los datos obtenidos es mucho mayor con los equipos actuales.

Peñoles tiene contemplado el prospecto Cerro Blanco, presumiblemente un depósito de origen volcánico, el cual puede contener importantes cantidades de minerales metálicos debido a que los procesos geológicos que se desarrollaron en el lugar corresponden a una zona distensiva la cual liberó cantidades importantes de sulfuros, comprobado ya por la presencia del yacimiento mineral de San Nicolás dentro del mismo distrito minero. El prospecto se encuentra dentro del denominado "Terreno Guerrero" y actualmente está en fase de exploración.

Como parte de este proceso, en 1998 el Departamento de Exploración de Peñoles, realizó un vuelo de reconocimiento en Cerro Blanco para identificar zonas de interés minero. Se cubrieron poco menos de 162 km cuadrados, en lo que posiblemente se trate de un depósito tipo VMS ubicado en la porción oriental del estado de Zacatecas y poniente del estado de San Luis Potosí. En esta tesis se identificaron esas áreas de interés, para lo cual se ordenaron, se procesaron y se interpretaron los datos adquiridos en dicho vuelo aeromagnético.

Varias técnicas para auxiliar en la interpretación de los datos magnéticos se han desarrollado por distintos autores, Naudy (Naudy, 1971), Werner (Ku y Sharp, 1983), Euler (Thompson, 1982) y Nabighian (1972), entre otros. Una de ellas, de especial interés por no requerir un modelo geológico en principio, es la Deconvolución de Euler, presentada por Thompson en 1982, llamada así por que se basa en la resolución de la ecuación de Euler para determinar la localización de las fuentes magnéticas y su profundidad, asociada a un índice que determina sus características dimensionales. Este parámetro ayuda en la determinación del tipo de estructura geológica de la fuente, incluyendo fallas, contactos magnéticos, diques y cuerpos extrusivos (Reid 1990).

El propósito principal de esta tesis es mostrar la utilidad de la aeromagnetometría en la exploración minera, con el apoyo de la técnica de Deconvolución de Euler como método de interpretación. Se muestran los diferentes procesos que se llevan a cabo en la corrección e interpretación de los datos aeromagnéticos. Se eliminan, en primera instancia, los efectos

presentes en los datos, debido al levantamiento aeromagnético mediante formulas simples. En segundo lugar se aplican procesos por medio de filtraje en el dominio de las frecuencias para eliminar efectos indeseados como ruido en la señal o resaltar aspectos de interés como variaciones laterales y verticales importantes dentro de los mapas de susceptibilidad magnética, para esto, se hace un análisis espectral previo con el objetivo de identificar las frecuencias de corte y los filtros adecuados para la separación del ruido que se genera en el levantamiento mismo. Se muestra una interpretación mediante el método de la deconvolución Euler en 3D para localizar y determinar profundidades de las fuentes que generan las anomalías magnética y por ultimo una interpretación con la deconvolución de Euler en 2D de perfiles situados en las anomalías magnéticas de interés. Se proponen modelos de los cuerpos causativos que permitirán la planeación del trabajo geofísico complementario.

### **1.1 Generalidades del área.**

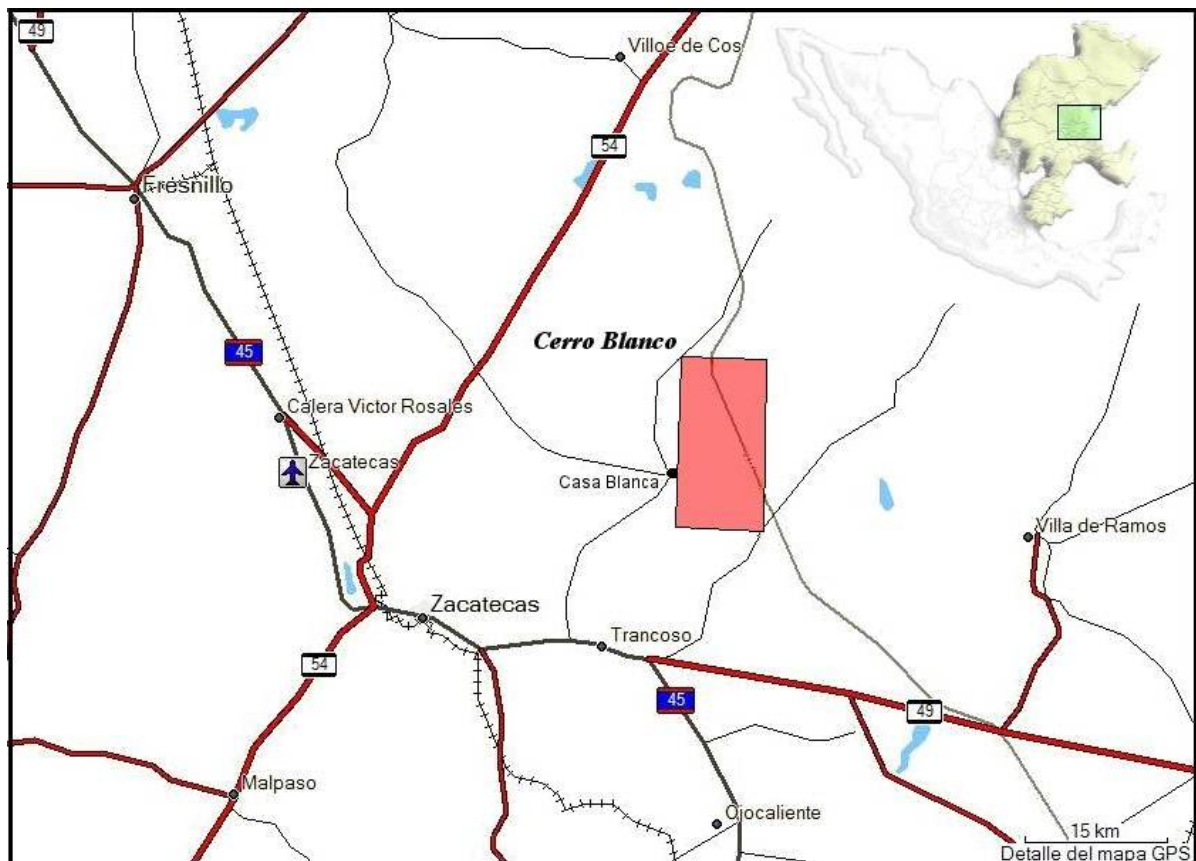
Cerro Blanco es un Prospecto que se encuentra en su mayor parte en el municipio de Guadalupe en el estado de Zacatecas y una parte menor en el estado de San Luís Potosí.

La comunidad más cercana es la de Casa Blanca, Zacatecas, con 1400 habitantes que se dedican principalmente a la actividad agropecuaria. La zona de estudio abarca una superficie de 161 kilómetros cuadrados y se encuentra entre las carreteras 45 y 54 que van hacia Aguascalientes y hacia Saltillo respectivamente (*Figura 1*). El recorrido desde la ciudad de Zacatecas es de 45 minutos aproximadamente y a 1 hora con 15 minutos desde el aeropuerto de Zacatecas en Calera Víctor Rosales.

La zona se caracteriza por ser árida, con precipitaciones anuales de 400 a 500 milímetros. Existe una gran variación de vegetación como el mezquite, nopal, maguey, pirules, pastos y cactus. En cuanto a la fauna encontramos especies como Liebre, coyotes, mapaches, cuervos, zopilotes, conejos, codorniz escamosa, paloma güilota, paloma ala blanca, grulla gris, gusano, pato, ganso frente blanca, zorrillos, tlacoaches.

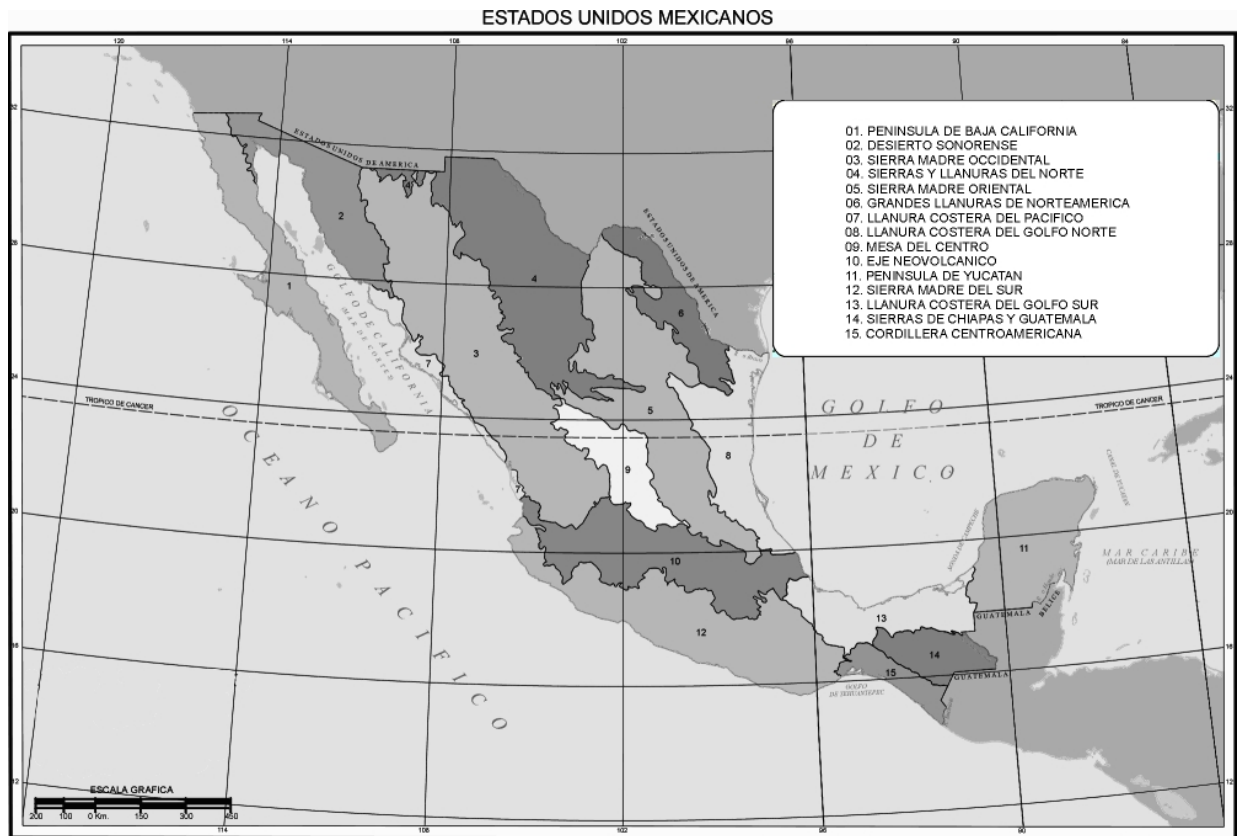
## 1.2 Características fisiográficas.

La zona de Cerro Blanco se localiza dentro de la provincia fisiográfica Mesa Central (*Figura 2*). Esta provincia tiene la característica de ser una región elevada, generalmente arriba de los 2000 metros sobre el nivel del mar, que se encuentra rodeada por terrenos más irregulares y con pendientes pronunciadas. La Mesa Central se divide en dos regiones, siendo la región norte la que nos ocupa. Esta región es más amplia que la del sur, se encuentran grandes cuencas que están rellenas de depósitos aluviales y lacustres, además ha sido afectada mayormente por la erosión.



*Figura 1. Localización del área de estudio, Cerro Blanco. Mapsource.*

La Mesa del Centro está limitada al norte y al este por la Sierra Madre Oriental, al oeste por la Sierra Madre Occidental y al sur por la depresión “El Bajío”. Se ha interpretado que el espesor de la corteza terrestre de esta provincia fisiográfica es menor que las de las Sierras Madre Oriental y Occidental, siendo de 32, 37 y 40 km aproximadamente (Nieto-Samaniego 2005).



**Figura 2. Regiones Fisiográficas de los Estados Unidos mexicanos. Página Web INEGI.**

Esta provincia fisiográfica está caracterizada por contener gran variedad de depósitos minerales, los cuales están íntimamente relacionados con la historia geológica regional. Algunos de estos depósitos son de los más ricos en México y pueden nombrarse a los depósitos de tipo VMS y Sedex (Sedimentario-exhalactivos), como los más antiguos con importancia económica (Nieto Samaniego, 2005).

Además de los VMS, están presentes yacimientos minerales del tipo *skarn*, depósitos epitermales, depósitos de hierro del tipo IOCG (óxidos de hierro, cobre y oro) y de reemplazamiento en carbonatos, como los de Francisco I. Madero, El Salvador-San Nicolás, Concepción del Oro, Velardeña, Real de Catorce, etcétera, localizados en los estados de Zacatecas (las tres primeras), Durango y San Luis Potosí, respectivamente.

### **1.3 Objetivos.**

El objetivo principal de la tesis es mostrar la aplicación de la Deconvolución de Euler para la localización de depósitos mineros, tratando de ofrecer una alternativa de proceso en la interpretación de datos magnéticos. Los resultados de la aplicación de la deconvolución se auxilian de los de reducción al polo y señal analítica, dos procesos sumamente utilizados e imprescindibles en la interpretación magnética actual.

Apoyados en los resultados del primer objetivo, y como segundo objetivo, se localizarán y delimitarán las zonas importantes dentro de Cerro Blanco, en donde pueden encontrarse depósitos minerales del tipo VMS, además de proponer los estudios geofísicos que confirmen y delimiten con mayor detalle las zonas mineras potenciales.

Por otro lado, definiendo los objetivos personales, con el desarrollo de esta tesis, el autor pretende iniciarse en el mundo de la interpretación magnética, una herramienta geofísica ampliamente utilizada y de resultados comprobados a lo largo de la historia y con una gran cantidad de aplicaciones. Dentro del mismo se inicia la búsqueda del método adecuado para cada tipo de aplicación de la magnetometría, en este caso el método de la deconvolución de Euler.

---

## **II. GEOLOGÍA.**

El punto de partida de todo proyecto de exploración minera es el reconocimiento geológico del área. Cuando se estudia la geología regional de alguna zona y se encuentra que en algún momento hubo las condiciones necesarias para la generación de algún depósito mineral, se realiza un estudio a detalle; a partir de ahí se determina qué estudio geofísico es el apropiado para apoyar la etapa de exploración. La geología regional que corresponde a Cerro Blanco indica que esta zona estuvo sometida a procesos de distensión que favorecieron la emisión de fluidos hidrotermales capaces de dar origen a depósitos metálicos importantes, es similar la historia geológica de la del centro de México, específicamente la de la mesa central y se describe a continuación.

### **2.1 Historia Geológica.**

El proceso evolutivo de la Mesa Central comienza prácticamente en el Mesozoico, no se puede hablar del Paleozoico dentro de la región central, puesto que no se han encontrado indicios contundentes de que existan afloramientos de rocas paleozoicas (*Nieto-Samaniego 2005*). Varios autores como Burckhardt y Scalia (1906) han considerado presente esta edad con pruebas que posteriormente han sido cuestionadas con argumentos sedimentológicos y estratigráficos que indican otras edades. Así pues, se comienza la descripción de la historia geológica a partir del triásico superior dentro del Mesozoico.

#### **Triásico Superior**

En Zacatecas las rocas triásicas son principalmente rocas clásticas con bajos grados de metamorfismo. En la base de la columna se encuentran rocas como esquistos y filitas con intercalaciones de areniscas y conglomerados. Estas rocas se ponen en contacto con otras secuencias de areniscas y mármol. Se cree que la relación entre estas dos secuencias es discordante, aunque esto no está totalmente resuelto. En contacto con las rocas anteriores

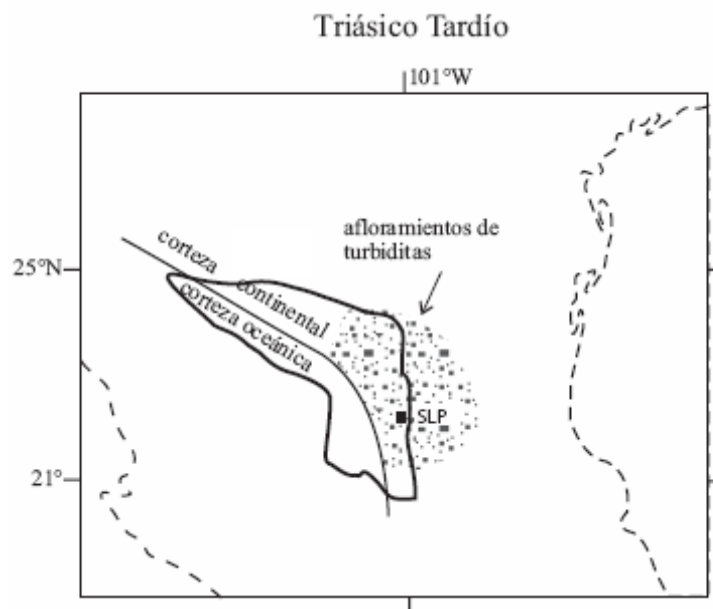


## II. GEOLOGÍA

---

se encuentran rocas ígneas intrusivas de composición básica que aparentemente son de Cretácico.

En la Sierra de Salinas, Charcas y Sierra de Catorce se han encontrado secuencias turbidíticas que hacen pensar en que hubo un ambiente de transición en la zona. Se cree que un margen continental estuvo configurado como lo muestra la figura 3. Debido a estas condiciones termina el Triásico con una secuencia de rocas continentales que sobreyacen a las ya descritas en forma discordante (Nieto-Samaniego 2005). Estas rocas continentales se extienden ampliamente en la mesa central y localidades fuera así como en la Sierra Madre Oriental.



*Figura 3. Representación de margen continental del triásico tardío. Cerro Blanco se encontraría dentro del océano. Centeno-García y Silva-Romo (1997)*

### **Jurásico**

Cuando las tierras de la Mesa Central emergieron comenzó a haber un depósito de rocas clásticas con conglomerados y areniscas, además de haber intercalaciones de rocas volcánicas. Estas rocas pertenecen ya al Jurásico temprano. Después la formación de estas rocas viene la presencia de un conjunto de depósitos marinos, principalmente calizas y calizas dolomitizadas (Formación Zuloaga). Sobreyacen a estas capas limolitas calcáreas que contienen pedernal (Formación la Caja). Este ambiente creado por la transición que

## II. GEOLOGÍA

---

llevó el mar por toda la Mesa Central perduró por unos 90 millones de años (Nieto-Samaniego 2005).

### **Cretácico**

En el Cretácico perduran aún las condiciones marinas que se generaron en el Jurásico. (Nieto-Samaniego 2005). Se distinguen tres ambientes marinos en esta etapa. En el primer ambiente se cita la presencia de evaporitas y calizas, formando espesores de 4000 metros. Estas estarían localizadas en la parte oriental y nororiental de la Mesa Central.

El segundo ambiente comprendería casi la totalidad de la Mesa Central, y estaría compuesto por rocas depositadas en mar abierto. Carrillo-Bravo (1971) le llama a esta la Cuenca Mesozoica del Centro de México. Las rocas que se presentan en este ambiente son calizas arcillosas y en seguida lutitas calcáreas indicando la transición hacia un ambiente continental nuevamente, esto viene a ser totalmente demostrado por la presencia de areniscas contenedoras de clastos de rocas volcánicas (Formación Caracol). En esta etapa podemos encontrar espesores de alrededor de 6000 metros.

El último ambiente esta comprendido en la parte occidente de la Mesa Central. Se trata de rocas volcanosedimentarias marinas, derrames, basaltos almohadillados y cuerpos intrusivos de diabasa intercalados con tobas, pizarra, pedernal y radiolarita. Están presentes también lutitas, areniscas y calizas y esquisto verde que afectaron a los componentes volcánicos.

Quintero-Legorreta (1992) menciona una discordancia que se encuentra sobre las rocas volcanosedimentarias que se encuentran al occidente de la Mesa Central, probablemente esta discordancia no se extienda mas allá del límite con las rocas calcáreas de la Cuenca Mesozoica del Centro de México. Debido a la presencia de rocas metamórficas de la zona oeste de la Mesa Central y debido a que no hay presencia de este tipo de rocas en la Cuenca del Centro de México, algunos autores piensan en una fase orogénica.

### **Cenozoico.**

En el Cenozoico se encuentran rocas continentales sedimentarias y volcánicas creadas en un ambiente que perdura hasta la actualidad, en esta etapa se dio un hiatus durante la

## II. GEOLOGÍA

---

orogenia laramídica, su presencia esta evidenciada por una discordancia que aparentemente tuvo lugar desde el Cretácico superior hasta el Paleoceno en la parte occidental de la Mesa Central, donde se encuentra la zona de Cerro Blanco. Esta discordancia esta presente en una gran porción del territorio mexicano (*Nieto-Samaniego 2005*) y en la parte oriental de la Mesa Central parece haber perdurado a partir del Maastrichtiano al Paleoceno.

El cambio del Paleoceno a Eoceno medio está representado en la zona por rocas clásticas principalmente, en el norte y noroeste de la Mesa Central se presentan aflorando conglomerados y areniscas principalmente, además de rocas volcánicas de composición máfica en menor medida. El depósito se hizo en zonas con pendientes fuertes, prueba de esto es la variación en el espesor que muestran las capas rocosas de la región a lo largo de distancias cortas.

A partir del Eoceno medio aparecen rocas volcánicas principalmente máficas que formaron un cinturón volcánico discontinuo, presente de sur a norte de la Mesa Central. Estos eventos son interrumpidos por una nueva discordancia angular que marca un hiatus que coincide con el cambio de composición en los magmas (*Nieto-Samaniego 2005*), puesto que pasan de ser andesíticos y riolíticos en el Eoceno superior a predominantemente riolíticos en el Oligoceno.

Es precisamente en el Oligoceno donde pertenecen las rocas riolíticas características de la zona de estudio, están presentes preferencialmente en la zona meridional de la Mesa Central, y sufren variaciones en cuanto a su composición a latitas y dacitas. En la parte sur se encuentran derrames volcánicos y domos que presentan espesores arriba de los 400 metros y sobre estas se emplazan rocas de actividad volcánica explosiva como ignimbritas y rocas piroclásticas de composición riolítica de no más de 250 metros de espesor, que están muy presentes en la zona occidental de la Mesa.

En el Mioceno sigue la presencia de rocas volcánicas, solo que estas sobreyacen a las oligocénicas mediante una discordancia, además son de composición máfica y su ocurrencia es eventual en el centro, sur y occidente de la Mesa Central. En esta misma etapa surgen rocas basálticas de olivino y andesíticas con xenolitos de peridotita y gneis (formación Metates).

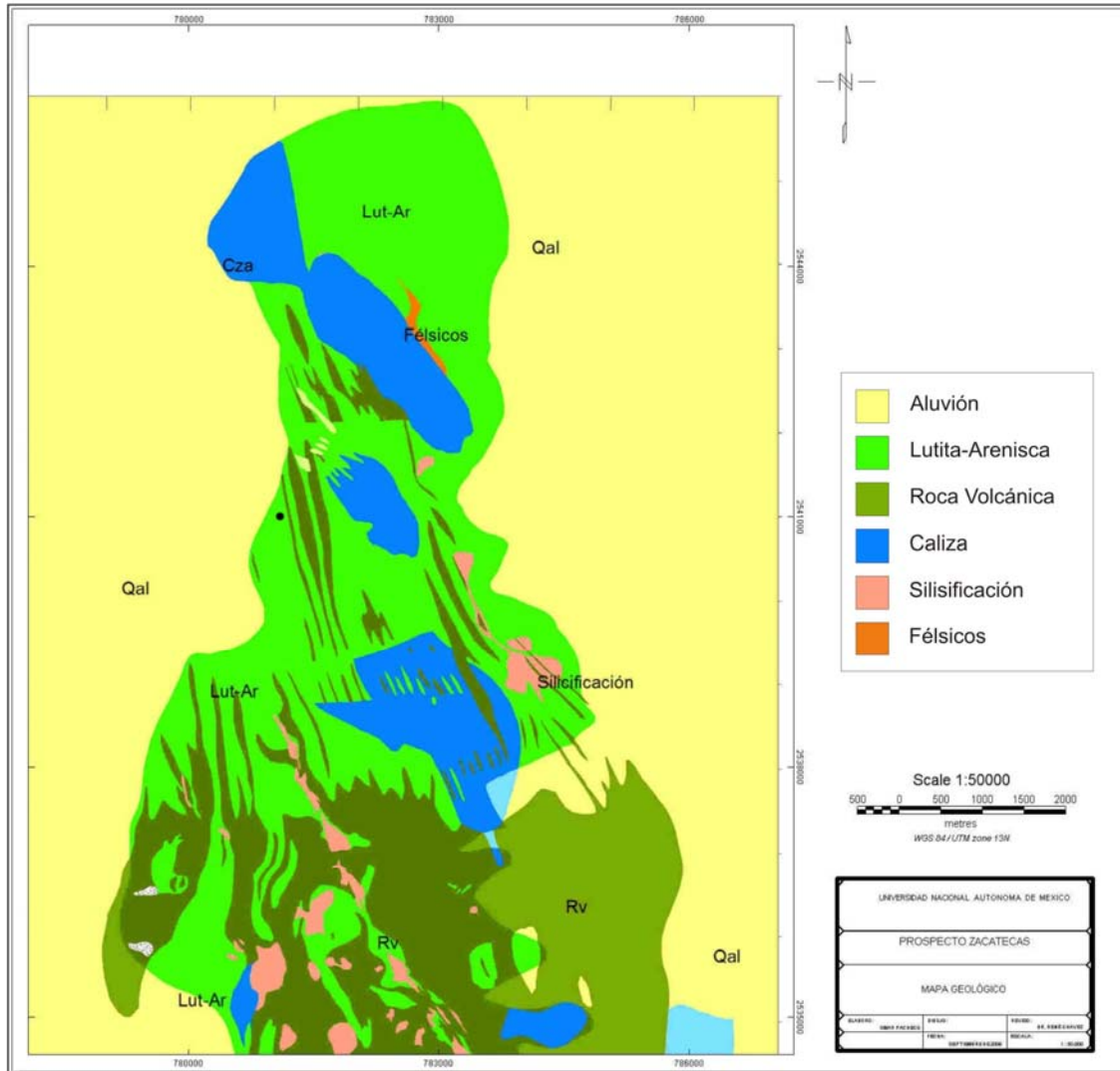
Siguiendo con la línea de rocas ígneas llega el Plioceno y Cuaternario con rocas volcánicas, generalmente presentes en forma de conos cineríticos y maares que comúnmente son contenedoras de xenolitos de lertzolita y granulita por lo que se infiere que la lava que dio origen a estas rocas fue de composición alcalina. Por otro lado, las rocas sedimentarias de estas etapas están representadas por depósitos aluviales y lacustres que en algunas regiones de la Mesa Central están intercaladas con rocas volcánicas félsicas y máficas del Oligoceno o Mioceno medio (*Nieto-Samaniego 2005*).

Específicamente en la zona de Cerro Blanco afloran secuencias de roca volcanosedimentaria del cretácico inferior (descrito anteriormente) rocas ígneas que varían en composición de máficas a félsicas (*figura 4*), lo cual puede generar depósitos del tipo de sulfuros masivos volcanogénicos (VMS). También se presentan vetas epitermales de cuarzo-calcita con espesores de hasta 4 metros las cuales presentan valores anómalos de Au y As. Esto hace pensar en un programa de exploración para determinar si existe un depósito con cantidades minerales suficientes para iniciar un programa de explotación.

### **2.2 Importancia minera del área.**

Dentro del territorio mexicano, Zacatecas es reconocido por su actividad minera, por su variedad y cantidad de yacimientos minerales y por ciudades que han crecido rápida y ampliamente debido a la presencia de una mina. En este estado se encuentran algunos de los depósitos más ricos y más productores de México.

Debido a la Geología y los procesos que han tenido a lugar dentro de la Mesa Central se han podido desarrollar una variedad amplia de yacimientos (*Figura 5*), algunos de estos ya están siendo explotados en la actualidad y algunos más están siendo explorados con la posibilidad de hallar alguno con cantidades importantes de mineral que permitan su explotación.



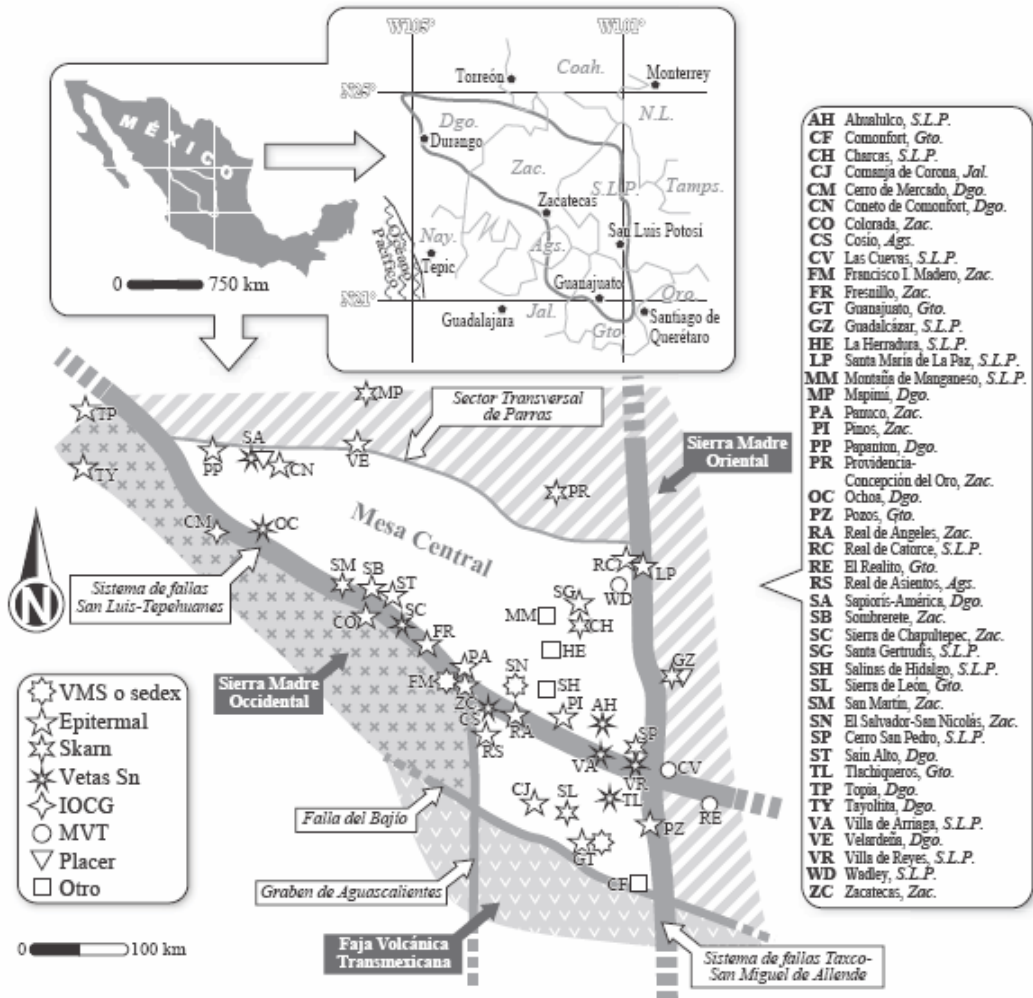
*Figura 4. Mapa geol3gico del 3rea de Cerro Blanco elaborado por Pe3oles.*

En la Mesa Central se han desarrollado dep3sitos minerales de importancia econ3mica del tipo Sulfuros Masivos Vulcanog3nicos (VMS), tal es el caso de San Nicol3s, un yacimiento polimet3lico con cantidades importantes de Zn, Cu, Ag y Au, y de tipo Sedimentario-Exhalativos (Sedex) como Francisco I. Madero mineralizado en Zn, Pb, Ag y Cu.

Presumiblemente el dep3sito de Cerro Blanco es del tipo VMS debido a las condiciones y procesos que tuvieron lugar ah3. Estos dep3sitos son cuerpos estratiformes que se originan en el fondo oce3nico en unidades volc3nicas o interfases Vulcano-sedimentarias (condiciones presentes en el cret3cico inferior) que generalmente se forman por la

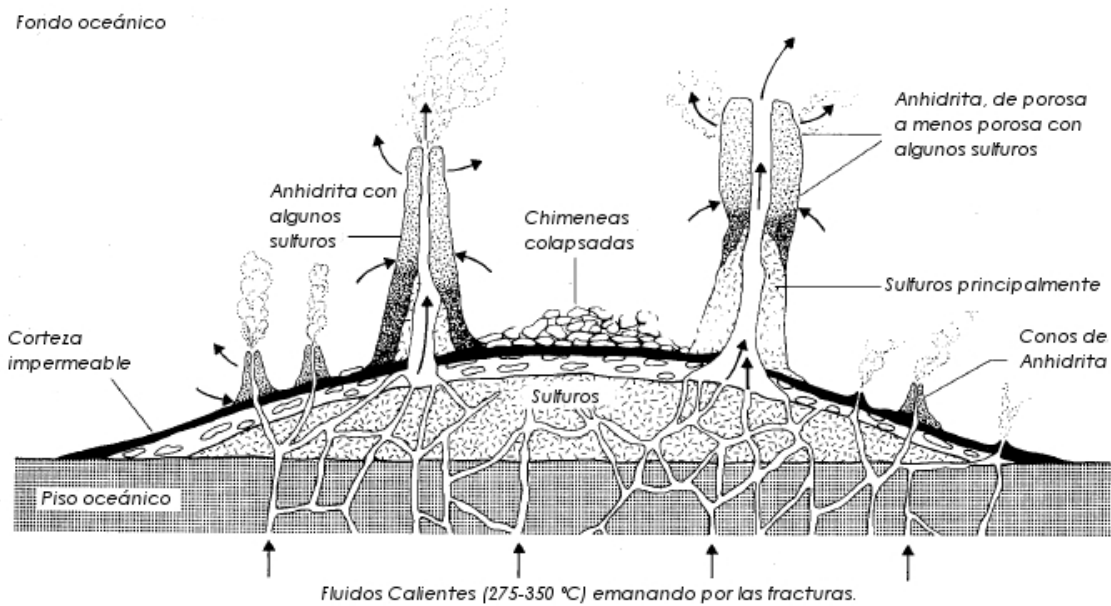
## II. GEOLOGÍA

acumulación de sulfuros en el fondo marino (*figura 6*) y son yacimientos donde se genera pirita en grandes porcentajes con cantidades variables de Pb, Zn, Cu, Ba, Au y Ag.



**Figura 5. Principales depósitos localizados en la Mesa Central. Nieto-Samaniego 2005.**

El origen de este tipo de depósito es volcánico exhalativo, se forman por emanaciones de fluidos hidrotermales asociados a vulcanismo marino y son depósitos que se generan al mismo tiempo de la actividad volcánica. El depósito ocurre cuando hay circulación de agua marina en celdas convectivas activadas por el calor del magmatismo que atraviesan los horizontes volcánicos submarinos y emergen de nueva cuenta en forma de fluidos hidrotermales a través de fracturas a temperaturas de 250 a 380 grados centígrados, sobre todo en zonas de distensión como las dorsales marinas, “black smokers”.



**Figura 6. Origen y estructura de los depósitos del tipo Sulfuros Masivos Volcanogénicos. Modificado de Maksaev (2001).**

Hay tres maneras en las que ocurre el depósito de los sulfuros en este tipo de depósitos (figura 6).

- El primero es por la precipitación directa en el fondo marino de los sulfuros acarreados por los fluidos hidrotermales. El material sale y simplemente se acomoda en los bordes de las fracturas por las cuales encontraron camino.
- El segundo es por un reemplazo metasomático desde abajo por los fluidos hidrotermales. En este proceso no es necesario que los fluidos salgan a la superficie, si no que al entrar en contacto desde abajo con el piso oceánico se da un reemplazamiento el cual da como resultado la acumulación de los sulfuros.
- El tercer proceso es el del colapso de las chimeneas. Cuando el material emerge del piso oceánico crea a su paso cuerpos de anhidrita y algunos sulfuros que con el tiempo llegan a caerse dispersando el material del cual estaban formados en los alrededores de las vías por las que surgen los fluidos.

La mineralogía de estos depósitos es simple y corresponde a una mezcla de sulfuros metálicos dominados por pirita y/o pirrotita con cantidades variables de calcopirita, esfalerita y galena. En algunas ocasiones pueden estar presentes como constituyentes importantes la bornita y la calcocina y también pueden estar en cantidades menores la

## II. GEOLOGÍA

---

arsenopirita, magnetita y tenantita-tetrahedrita. La ganga es principalmente cuarzo y baritina y ocasionalmente carbonato, clorita y sericita. Es común encontrar zonación en este tipo de depósitos donde la esfalerita y galena están en la parte superior y la calcopirita en la parte inferior.

El proceso que da origen a estos sulfuros masivos tiene un marco evolutivo que Maksaev (2001) enlista textualmente de la siguiente manera:

- Precipitación de esfalerita, galena, pirita, tetrahedrita, baritina con cantidades menores de calcopirita por mezcla de fluido a 200°C con agua de mar.
- Recristalización y aumento del tamaño del grano de minerales por efecto de circulación de fluido a 250°C, continúa la depositación de esfalerita, galena, etc.
- Influjos de soluciones ricas en Cu a 300°C, produciendo el reemplazo de la porción inferior (mena amarilla) y redepositación de minerales reemplazados más arriba.
- Circulación de fluidos calientes sub-saturados en Cu disolución de calcopirita y reemplazo por pirita en la base del depósito.
- Depositación de exhalitas de chert-hematita en torno al depósito (esto también ocurre en las etapas previas), mucho SiO<sub>2</sub> se deposita en el stockwork subyacente.
- Preservación por cubierta de lavas o sedimentos. Los depósitos que quedan expuestos a la acción marina se oxidan y se destruyen por acción de meteorización submarina transformándose en capas de "ocre" constituidas por cuarzo, goethita, illita, jarosita. Solo si los depósitos son cubiertos se evita la meteorización submarina y los depósitos pueden preservarse.

No es difícil pensar que se logre encontrar un yacimiento importante puesto que a los alrededores de Cerro Blanco se encuentran variedad de depósitos como los depósitos metalíferos de skarn, presentes principalmente en los límites de la Mesa Central, generalmente productores de Ag, Au, Pb, Zn, Cu, Sn, Hg, As, Sn, Bi y fluorita. Dentro de los principales de este tipo podemos nombrar los de Concepción del oro, mapimí y Charcas. También podemos nombrar depósitos como Velardeña, Real de Catorce, Fresnillo, Zacatecas o Comanda de Corona, que son del tipo epitermales, de donde se pueden obtener Ag, Au, Bi, Se, Zn, Pb, Cu, Hg, As y Sb.



---

### III. ESTUDIO AEROMAGNÉTICO.

La planeación del trabajo de campo y el equipo que se utiliza en un levantamiento aeromagnético son los principales responsables de la calidad de los datos y aún del proceso de estos. Es importante pues, conocer las especificaciones y condición de los equipos que se usan en el aire, además en todos los reportes geofísicos deben especificarse las condiciones generales bajo las cuales se lleva a cabo el levantamiento. El éxito del trabajo de campo radica en una buena planeación de las líneas de vuelo, densidad de muestreo, etcétera. Se describe a continuación el equipo que se utilizó para el levantamiento en Cerro Blanco.

#### 3.1 Equipo utilizado.

##### Base magnética.



*Figura 7. Base magnética.*

Para corregir el efecto de la variación diurna en un levantamiento magnético,

suele utilizarse un magnetómetro fijo “*Base magnética*” el cual registrará los cambios de intensidad del campo magnético terrestre a lo largo de un día, las variaciones observadas son eliminadas en los datos del levantamiento mediante su sustracción. Se utilizó un magnetómetro Gem Systems GSM-19 V. 5.0, como estación base (*Figura 7*), de resolución de 0.01 nT y una precisión de 0.02 nT dentro de su rango de temperatura de operación. Tiene una capacidad de almacenamiento de 4 Mbytes y puede ser ampliado a 32 Mbytes alcanzando las 699,050 lecturas

aproximadamente cuando se utiliza en modo Base. Las lecturas obtenidas son exportadas a una computadora con extensión .txt mediante el software GEMLink y el archivo generado contiene los datos ordenados en dos columnas “Time” y “Field”

#### **Sistema de adquisición de datos.**

El Pdas-1000 es un sistema computarizado y es el corazón del sistema de adquisición digital de datos. Todos los datos adquiridos durante el vuelo se almacenan en su disco duro para que posteriormente sean transferidos a una computadora con un formato propio conteniendo un archivo como encabezado y varios archivos binarios en los cuales residen los datos. El software Oasis Montaj de Geosoft, es capaz de decodificar esos datos y representarlos en una base de datos para su fácil manipulación.

Este sistema cuenta con entradas que permiten conectar los diferentes dispositivos en cualquier levantamiento aéreo, ya sean de posicionamiento, uno o varios magnetómetros, dispositivos de radar, y más.

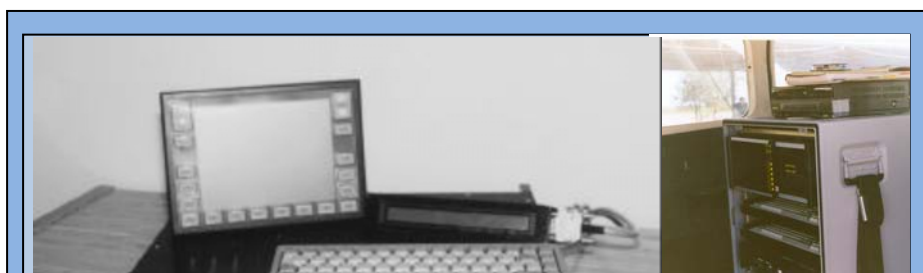
#### **Sensor magnético.**

Las lecturas de campo magnético total del levantamiento fueron realizadas utilizando un magnetómetro de vapor de cesio SC-2 de Scintrex. El sensor tiene las siguientes especificaciones:

- Modelo Scintrex Cesium Vapor CS-2 Magnetometer
- Grado de muestreo 0.1 segundos (10 hz)
- Resolución 0.001 nT
- Rango de operación 15,000 nT a 1000,000 nT
- Rango de temperatura -20°C a +50°C

#### **Sistema de navegación.**

El Pnav de Picodas es una computadora de navegación en tiempo real para uso en helicópteros o aviones diseñado para operaciones geofísicas. El sistema Pnav fue conectado al sistema de adquisición de datos Pdas-1000, también de Picodas, desde donde se controla su operación, (*figura 8*).



*Figura 8. Sistema PNAV (izquierda) y sistema PDAS montado en la aeronave (derecha).*

#### **Aeronave.**

La aeronave que se utilizó en el levantamiento fue un helicóptero “Eurocopter Dauphin” fabricado por Eurocopter (*Figura 9*). Esta nave es ampliamente utilizada alrededor del mundo con propósitos militares, médicos, policíacos y de rescate. Cuenta con las siguientes características:

- Tripulación: 1 o 2 pilotos.
- Capacidad: 4-12 pasajeros.
- Longitud: 13.73 m.
- Diámetro del rotor: 11.94 m.
- Altura: 4.05 m.
- Peso cuando está vacío: 2389 kg.
- Peso máximo de despegue: 4300 kg.
- Velocidad máxima: 306 km/h.
- Índice de subida: 8.9 m/s.



*Figura 9. Helicóptero Dauphin y pájaro (Dispositivo que contiene al sensor magnético) utilizados en el levantamiento aeromagnético de Cerro Blanco.*

#### **3.2 Detalles del levantamiento.**

En la zona de estudio se han hecho algunos otros trabajos de geofísica, sin embargo, no se presentarán en esta tesis debido a políticas de privacidad de “*Exploraciones mineras Parreña S.A.*” por lo tanto esta tesis se apega solamente a los datos magnéticos y se presentarán recomendaciones vertidas en esta tesis para posteriores trabajos de geofísica.

El área de estudio es un rectángulo irregular de 17.9 km de Norte a Sur y 9 km de Este a Oeste. Se realizaron 179 líneas de cubrimiento con dirección E-W y 8 líneas de amarre con dirección N-S a una altura promedio de 100 metros. (*Figura 10*). La separación entre líneas de cubrimiento es de 100 m y entre líneas de amarre es de 1000 m. Fueron necesarios 5 días de levantamiento. Durante el primer día se levantaron las 8 líneas de amarre y los siguientes se cubrieron cuatro bloques que en suma abarcan toda el área.

Los mapas presentados y el proceso en general fueron elaborados con ayuda de la herramienta “*Oasis Montaj*” de Geosoft que cuenta con las extensiones: “Mapping and processing system”, “Geophysics”, “Geophysics Levelling”, “MAGMAP filtering” y “Euler3D”. Estos mapas tienen una escala de 1:25,000 y están referenciados en coordenadas UTM zona 13 norte usando el datum WGS84.

### III. ESTUDIO AEROMAGNÉTICO

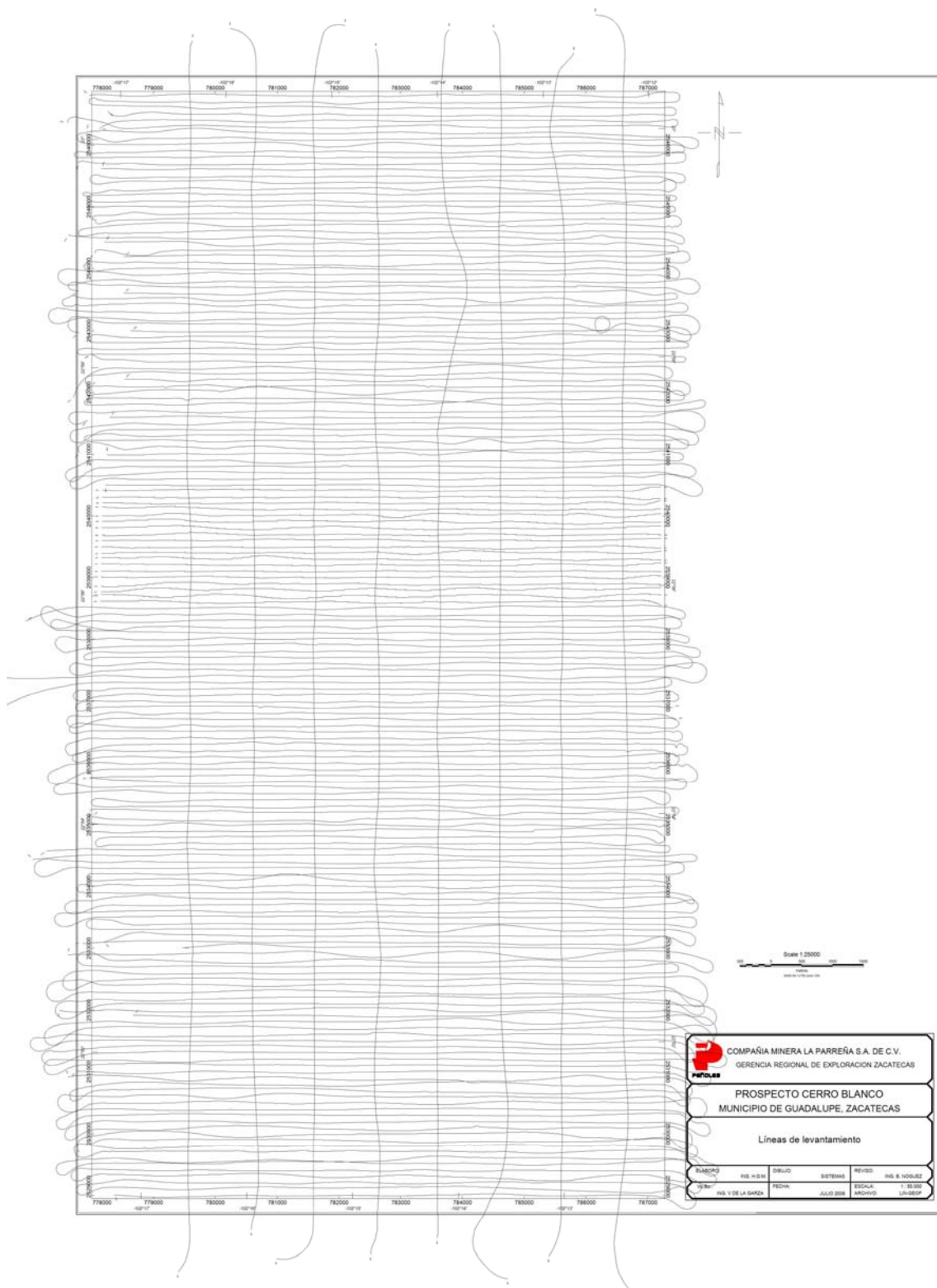


Figura 10. Líneas de amarre (N-S) y cubrimiento (E-W) del vuelo aeromagnético en Cerro Blanco.

#### **3.3 Metodología.**

El presente trabajo consta de cinco bloques principalmente:

- Ordenamiento y depuración de los datos aeromagnéticos levantados en 1998 en Cerro Blanco.
- Análisis y corrección de efectos presentes por el levantamiento de los datos magnéticos.
- Análisis y Proceso de los datos para la obtención de Reducción al polo y Señal analítica.
- Aplicación del método de deconvolución de Euler.
- Identificación de zonas de interés minero.

#### **Ordenamiento y depuración de los datos.**

Frecuentemente los equipos utilizados en prospección geofísica, particularmente los electrónicos, tienen fallas que arrojan datos inesperados o lecturas fuera de rango, comparándolas con las lecturas del levantamiento completo. Estos datos no son de interés y deben extraerse de la base de datos para evitar alterar los procesos numéricos y afectar a los datos contiguos mostrando resultados incorrectos. Este proceso de limpieza de datos es llamado depuración y es sumamente necesario llevarlo a cabo ordenando los archivos generados por el equipo electrónico durante el levantamiento y revisando las lecturas que se tomarán en cuenta para el proceso en general.

La metodología con la que se hace el levantamiento también puede producir datos que no deben ser contemplados durante el proceso de tratamiento de datos, como por ejemplo los extremos de las líneas levantadas, donde la aeronave da un giro para conseguir entrar en la siguiente línea (*figura 10*). Esas lecturas deben ser cortadas de la base de datos final. La manera de hacerlo es identificando cada dato que tenga valor muy por encima de la media, por ejemplo, es común que el valor de intensidad magnética se salga del rango esperado y obtengamos valores como 99999 o 0, los cuales son fácilmente identificados en la base de datos mediante una inspección visual, o mejor aún, si graficamos la intensidad de campo magnético contra el tiempo en que fueron tomados, observaremos con gran facilidad los valores muy por debajo o por encima de lo normal, este segundo método es mas rápido y

más fácil de realizar que el primero. De la misma manera pueden realizarse las gráficas y limpiarse cada uno de los campos que se midieron en el levantamiento, como las coordenadas, la altura y en general cualquier variable medida. Este es un proceso fácil pero tedioso y necesariamente obligatorio. Una vez eliminados cada uno de los valores que no interesan, se dice que la base de datos está depurada.

#### **Análisis y corrección de efectos presentes por el levantamiento.**

Una vez depurados los datos es necesario hacer un análisis exhaustivo de los efectos por rezago, cabeceo de la aeronave, desniveles en las líneas de cubrimiento, entre otros. Es necesario aplicar un tipo de corrección para cada situación, y será tratado a fondo en el trabajo.

Se presentan los mapas correspondientes resultantes de la aplicación de cada tratamiento, puesto que sirven de guía durante todo el proceso de corrección mediante un análisis visual exhaustivo.

#### **Análisis y proceso de datos.**

El proceso de los datos es la parte donde se modifica la señal original, buscando obtener una señal de salida con características interesantes para el intérprete, es decir, que la señal de salida puede resultar mas reveladora que la original, en cuanto a interpretación magnética se refiere. Esto es posible mediante la aplicación de filtros digitales, generalmente en el dominio de la frecuencia. Mediante estos algoritmos es posible eliminar ruidos o partes de la señal que no son de interés u obtener resultados como Reducción al Polo y Señal analítica que tienen un gran valor dentro de la interpretación magnética, el primero por llevar las anomalías magnéticas de un mapa a su posición sobre la fuente que las produce y el segundo por resaltar las variaciones mas grandes de la intensidad del campo magnético en las tres direcciones de los ejes coordenadas facilitando observar los límites de los cuerpos que producen las anomalías magnéticas. En la actualidad es difícil imaginar que algún intérprete no use este tipo de procesos, dada la ventaja que representan cada uno de los productos que se pueden obtener y más aún la interrelación entre estos.

Es necesario modificar y manipular los datos de tal manera que se puedan apreciar desde una perspectiva adecuada que permita encontrar características que indiquen si el

área es un depósito mineral potencial. Será pues necesario aplicar los procesos de reducción al polo y señal analítica.

En esta parte del trabajo se hace uso en gran medida del software Oasis Montaj de Geosoft para aplicar todos y cada uno de los procesos necesarios y generar los mapas correspondientes. El método de interpolación de los mapas puede ser seleccionado de entre el método de mínima curvatura, Kriging, Tinning o bidireccional.

#### **Deconvolución de Euler.**

La Deconvolución de Euler es una herramienta de apoyo para la interpretación de mapas magnéticos y gravimétricos que se basa principalmente en la solución de la ecuación de homogeneidad de Euler para la estimación de profundidades de las fuentes magnéticas o gravimétricas además de su posición dentro del perfil o el mapa de entrada. Debido a los resultados que ha mostrado esta técnica, y su fácil utilización, es cada vez mayor la aceptación que tiene con los intérpretes actuales.

En esta parte del trabajo se utiliza esta herramienta para la estimación de profundidades y la localización de las anomalías presentes en el mapa de intensidad magnética total. De igual manera se hace uso de Oasis Montaj para aplicar el método para 7 distintos índices estructurales representativos de las estructuras más usuales y la presentación de los resultados en mapas comparativos con procesos anteriores también resultado del tratamiento de este trabajo.

#### **Identificación de zonas de interés minero.**

Por último y atendiendo a los objetivos, se analizarán los resultados y se identificarán zonas en las que es probable se encuentren depósitos metálicos importantes. Será con base a las anomalías que se observen en la zona y a la geología local que se puedan descartar aquellas anomalías originadas por cuerpos que no tienen interés minero.

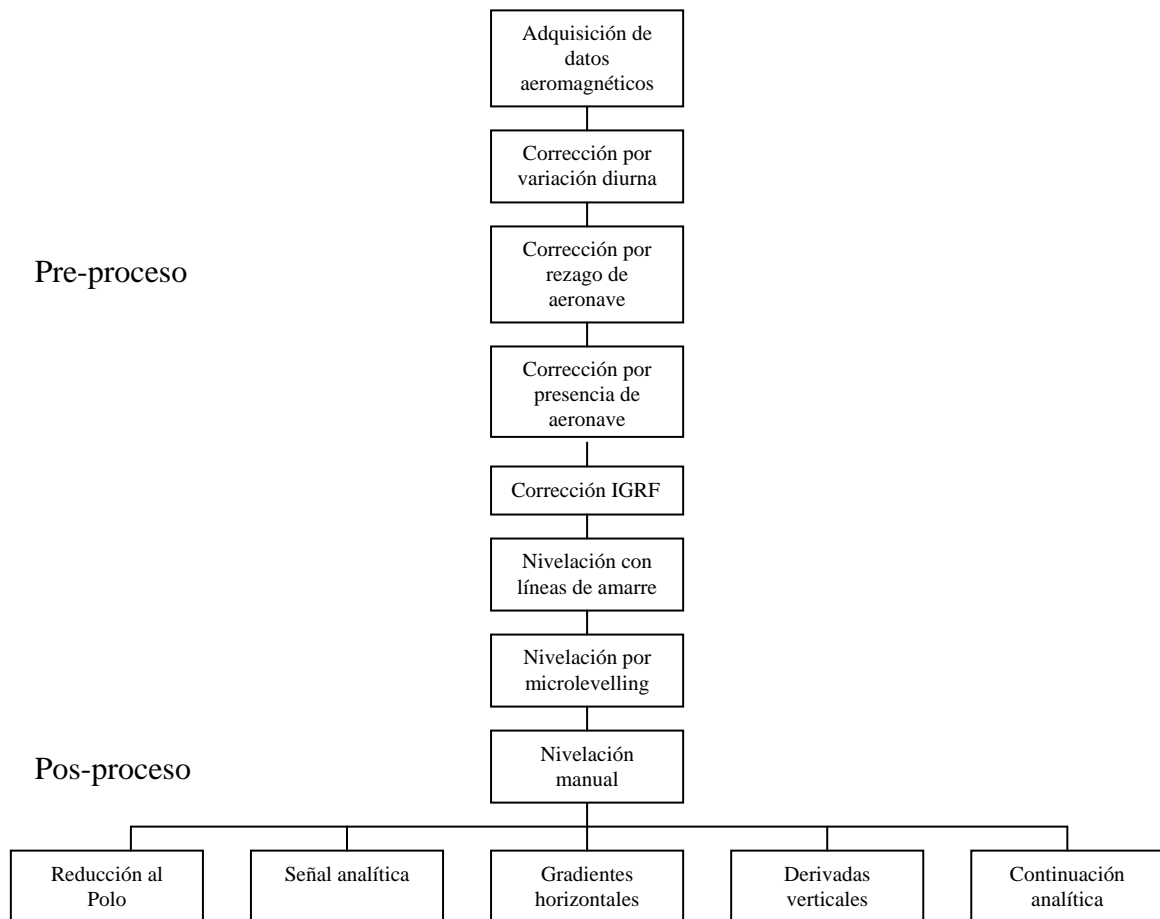
Debe recordarse que el trabajo aeromagnético es generalmente de reconocimiento preliminar y tal vez será necesario aplicar otros métodos geofísicos para tener la certeza de que las anomalías de interés seleccionadas tengan un potencial mineral de importancia. Por



lo tanto se presentarán recomendaciones acerca de los posibles trabajos geofísicos que necesiten hacerse en alguna etapa posterior.

#### 3.4 Correcciones.

Durante el levantamiento de datos aeromagnéticos existen diversas condiciones que pueden alterar los valores de campo magnético. Estos son errores fácilmente identificables en el mapa de intensidad magnética total, debido a que generalmente se presentan en forma de patrones singulares aparentando que unas líneas tienen valores más altos o bajos, que sus contiguas (efecto de línea) por ejemplo.



**Figura 11. Diagrama de flujo del tratado de datos aeromagnéticos. El pre-proceso contempla las correcciones que deben hacerse para eliminar efectos ajenos a la geología. El pos-proceso contempla los productos que pueden obtenerse del tratado de los datos y está en función de los objetivos del proyecto. El diagrama solo muestra los productos más comunes.**

Las fuentes de estos errores son bien conocidas y afortunadamente los efectos pueden medirse, por lo que se han desarrollado expresiones matemáticas simples que los eliminan casi en su totalidad. Puede considerarse esta etapa de correcciones como un pre-proceso en el tratado de datos aeromagnéticos (*figura 11*). El pos-proceso estaría representado por cada uno de los productos que pueden obtenerse de un levantamiento aeromagnéticos y estaría determinado por lo objetivos de cada proyecto en particular.

#### **Corrección por variación diurna.**

A lo largo del día se observan variaciones en la intensidad del campo magnético de la tierra que, debido a su intensidad, deben tomarse en cuenta cuando se realice cualquier trabajo de exploración magnética. Estas variaciones están presentes y afectan cualquier lectura que se tome, por lo tanto es necesario sustraer este efecto de los datos magnéticos del levantamiento.

La variación diurna del campo magnético terrestre es ocasionada por la perturbación de las corrientes eléctricas de la capa superior de la atmósfera (Ionósfera) debido a la interacción con partículas eléctricamente cargadas emitidas por el sol (actividad solar), lo que resulta en variaciones de la intensidad del campo magnético terrestre a lo largo de un día.

Estas variaciones pueden alcanzar el orden de 100 nT entre el valor más bajo y el más alto de intensidad del campo magnético terrestre a lo largo de un día, resultando en una diferencia de aproximadamente el mismo orden entre los valores del levantamiento debido exclusivamente a este efecto, es decir, que no corresponden a causas geológicas y por lo tanto se debe corregir. Hay distintas maneras de lograrlo, una de ellas es tomar un punto geográfico de referencia en el cual se toman algunas lecturas antes de comenzar el levantamiento. Después de transcurrido cierto tiempo, por ejemplo dos horas, es necesario regresar al punto de referencia para obtener otro valor de intensidad magnética, la diferencia entre el segundo valor y el primero es la variación que ha habido en la intensidad de campo magnético terrestre a lo largo de dos horas, esta variación es la que habrá que compensar en las lecturas levantadas entre las dos mediciones hechas en el punto de referencia. Es la misma técnica aplicada para levantamientos de gravimetría. El

### III. ESTUDIO AEROMAGNÉTICO

---

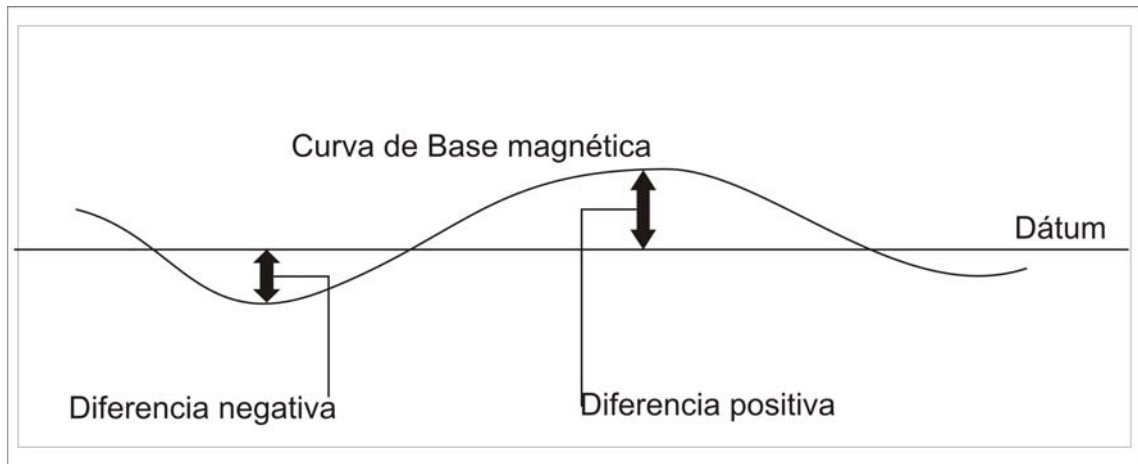
inconveniente de este método es que es necesario regresar al sitio de referencia cada cierto tiempo, a demás de que el intervalo de muestreo de la variación del campo magnético terrestre es grande y pueden no registrarse eventos importantes que afecten las lecturas de campo.

Otra manera de eliminar el efecto de variación diurna es mediante el uso de gradiómetros, en donde se tiene la posibilidad de medir la intensidad del campo magnético total con dos sensores separados por una distancia de 50 cm aproximadamente alineados verticalmente. Si se calcula la diferencia entre las lecturas de los sensores y se divide entre su separación se obtiene un gradiente vertical, generando un mapa al que se le pueden aplicar los procesos de filtraje que se usan convencionalmente con un mapa de intensidad magnética total. La eliminación del efecto de variación diurna se obtiene cuando se calcula la diferencia entre las mediciones de los dos sensores, cada uno de ellos mide la componente del campo primario (Intensidad de campo magnético terrestre) y una componente secundaria o campo magnético secundario que se genera por la interacción del campo magnético primario con un cuerpo magnéticamente susceptible. Puesto que la componente correspondiente al campo magnético primario es la misma para cada sensor, la diferencia de las lecturas entre los dos sensores elimina por completo esta componente con todo y las variaciones debidas a la actividad solar (variación diurna), quedando solamente la diferencia de los dos campos magnéticos secundarios.

Una forma más de eliminar este efecto diurna es colocando un magnetómetro fijo (magnetómetro o estación base) que registre las variaciones del campo magnético terrestre a lo largo del día o durante el levantamiento. El magnetómetro base es colocado en un sitio estratégico, donde las variaciones de campo magnético no se vean afectadas de manera importante por la susceptibilidad de las rocas sobre las que se encuentra, generalmente se busca una zona de rocas sedimentarias y por lo menos a 200 metros de distancia de cualquier cuerpo que pueda ser fuente de ruido (vehículos, carreteras, torres y líneas de alta tensión, por ejemplo), la distancia con respecto a la zona de estudio no suele ser un factor decisivo para la colocación del magnetómetro, podrán ser decenas o centenas de metros, incluso kilómetros. Debe tomarse una lectura a un intervalo de tiempo determinado, por ejemplo 20 segundos, de esta manera puede registrar las variaciones del campo magnético terrestre a lo largo del día. Este intervalo de muestreo es mayor que el que se utilizó para el levantamiento en sí. No necesariamente deben ser similares.

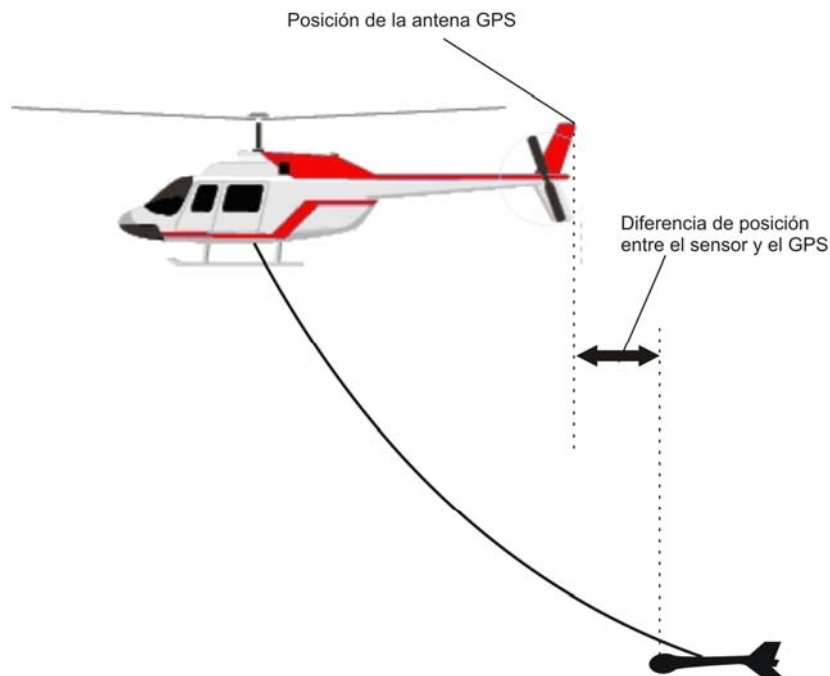
Una vez que se cuente con el registro de la variación del campo magnético terrestre a lo largo del día, es necesario obtener el dátum, que es el valor de intensidad magnética propia del lugar. En otras palabras, es el valor prácticamente constante de intensidad magnética que obtendríamos de una estación magnética base si no existiera una variación diurna, este valor es diferente para cada localidad y esta en función de su posición en el globo terrestre. El dátum es bien representado por el promedio de los datos registrados en la base magnética a lo largo del día. Otra manera de obtenerlo es mediante el uso de las cartas del campo geomagnético de referencia internacional (IGRF por sus siglas en inglés). Una vez obtenido el dátum, es necesario restarlo de la curva generada con los datos de la estación base, obteniendo de esta forma valores positivos y negativos, que representan la variación pura del campo magnético en nT de la zona de estudio. Esta variación es la que se debe sustraer de los datos magnéticos del levantamiento, ya que no obedece a contrastes geológicos del terreno.

Los valores negativos de la curva de variación resultan de aquellos datos de la base magnética que se encuentran por debajo del dátum *figura (12)*, lo que significa que en ese lapso de tiempo hubo una baja en los valores de intensidad magnética total. Es necesario compensar esta baja, y la manera de hacerlo es sumando a los datos levantados en campo, la cantidad que indica la curva de variación obtenida después de restar el dátum. Para los valores positivos se procede de forma inversa, en vez de sumar deberá restarse la cantidad que indica la curva de variación para compensar el efecto de alza en los valores de intensidad magnética total. Después de hacer esta compensación se obtiene como resultado datos corregidos por variación diurna.



*Figura 12. Relación de la Base magnética con el dátum. Las diferencias positivas se restan de los datos de campo y las diferencias negativas se suman.*

La figura 14 muestra el mapa corregido por variación diurna, servirá para identificar las correcciones que habrá de realizar para eliminar otros errores causados por el levantamiento en sí.



*Figura 13. Causa del efecto de rezago. La posición del GPS no es la misma que la posición del sensor magnético, a lo largo del vuelo la diferencia se hace muy variable y esta en función de la velocidad de la aeronave principalmente.*

Debe tenerse en cuenta el caso particular de una tormenta magnética durante el levantamiento donde las variaciones del campo magnético principal son de gran intensidad y de forma errática. El registro que hace una estación magnética base resulta insuficiente para corregir los datos del levantamiento y debería posponerse el levantamiento. Un operador de campo experimentado podría darse cuenta de este fenómeno por la incongruencia de los datos.

#### **Corrección por rezago, “lag correction”.**

El error por rezago resulta de una diferencia de algunos metros entre la posición del equipo de sistema de posicionamiento GPS y el sensor magnético, frecuentemente debida a la configuración del ‘pájaro’ donde se localiza el sensor magnético (*figura 13*). Esto significa que la lectura tomada por el GPS no corresponde en realidad a la posición del sensor magnético para un tiempo determinado. Esta diferencia en posición es altamente influenciada por la longitud del cable del que cuelga el sensor y la velocidad de la aeronave, entre mayor sea la longitud del cable y la velocidad de la aeronave mayor es el rezago del sensor magnético. Una corrección por rezago simplemente ajusta el tiempo de las lecturas magnéticas a la posición de los datos de posicionamiento.

El efecto es mas importante cuando algunas líneas son levantadas en un sentido y las líneas adyacentes son levantadas en el sentido opuesto. En los levantamientos aeromagnéticos sucede con mucha frecuencia que una línea se tome en un sentido y la siguiente línea se tome en sentido opuesto, aprovechando así la posición que adquirió la aeronave al terminar de levantar la línea anterior (*Figura 10*).

Una corrección por rezago es requerida para compensar el desfase que hay entre los datos del sensor y los datos GPS. No es complicado apreciar cuando se requiere este tipo de corrección, generalmente se observan patrones de “zigzag” en las curvas de nivel de los mapas magnéticos, y es aún más visible en los mapas que usan colores para separar distintos niveles de intensidad magnética. Para su corrección es necesario calcular el rezago que existe en fiduciales (Unidad de distancia, marcas de referencia en una base de datos generalmente números enteros consecutivos para indicar el orden en que las lecturas fueron tomadas o muestreadas), identificando dos puntos con misma intensidad magnética de dos líneas contiguas, se encuentran fácilmente en el borde de alguna anomalía o sobre una curva de nivel, y determinar cuantos fiduciales los separan. Así, este rezago se compensará

con el desplazamiento de las líneas levantadas en un sentido con respecto a las líneas levantadas en sentido contrario con la mitad de los fiduciales calculados para cada una de las líneas.

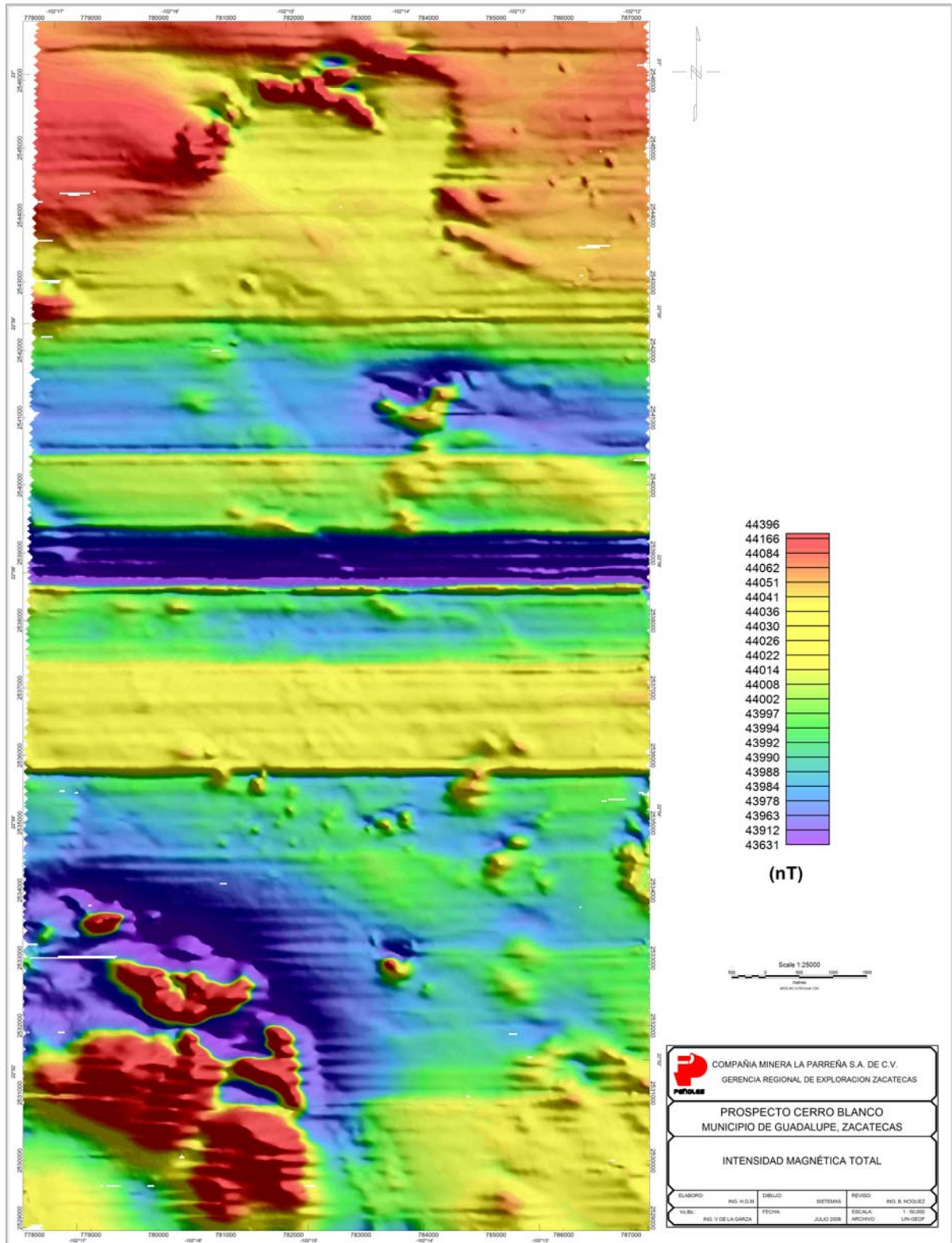
Observando con atención el mapa después de aplicar la corrección por variación diurna (*Figura 14*), se nota que la porción sur es la que necesita una corrección por rezago. En la porción norte no parece estar presente este efecto de manera pronunciada, así que quedará intacta y se aplicará la corrección solo a la parte sur del levantamiento.

El alto magnético del suroeste nos permite averiguar que son 12 fiduciales (posiciones) los que separan a puntos equivalentes entre dos líneas contiguas levantadas en sentidos opuestos. El software selecciona aquellas líneas levantadas en un sentido y aplica un desplazamiento de 6 unidades sobre el mapa en sentido contrario en que fueron levantadas después selecciona las líneas levantadas en el sentido opuesto de las primeras y aplica la misma compensación, de esta manera se alcanza la compensación de 12 unidades o fiduciales (*Figura 15*). Después de la corrección el patrón de *zigzag* desapareció en forma considerable con respecto al mapa anterior.

Se debe después llevar a cabo otra corrección debido a la influencia de la aeronave, por la configuración que se le da a la posición del sensor magnético con respecto a la nave. Se le nombra a este “Efecto por presencia de la aeronave”.

Casi siempre se procura medir este efecto volando en los cuatro sentidos del proyecto sobre una porción dentro del área de interés, el cual no tenga un gradiente horizontal considerable y con condiciones diurnas estables. A partir de estas mediciones, se obtiene un promedio en cada una de las direcciones y también un promedio de todas las lecturas en todas las direcciones (lectura principal), así se obtiene una diferencia entre el valor de cada uno de los cuatro sentidos y la lectura principal. Este valor final es el que se utiliza para corregir todas las líneas del vuelo según el sentido en el que se hayan volado.

### III. ESTUDIO AEROMAGNÉTICO



*Figura 14. Mapa de Intensidad Magnética Total corregido por variación diurna.*



No se pudo realizar esta corrección en este levantamiento puesto que no se realizaron estos vuelos de prueba. El efecto es parecido al producido por el rezago de sensor con respecto al sistema de posicionamiento.

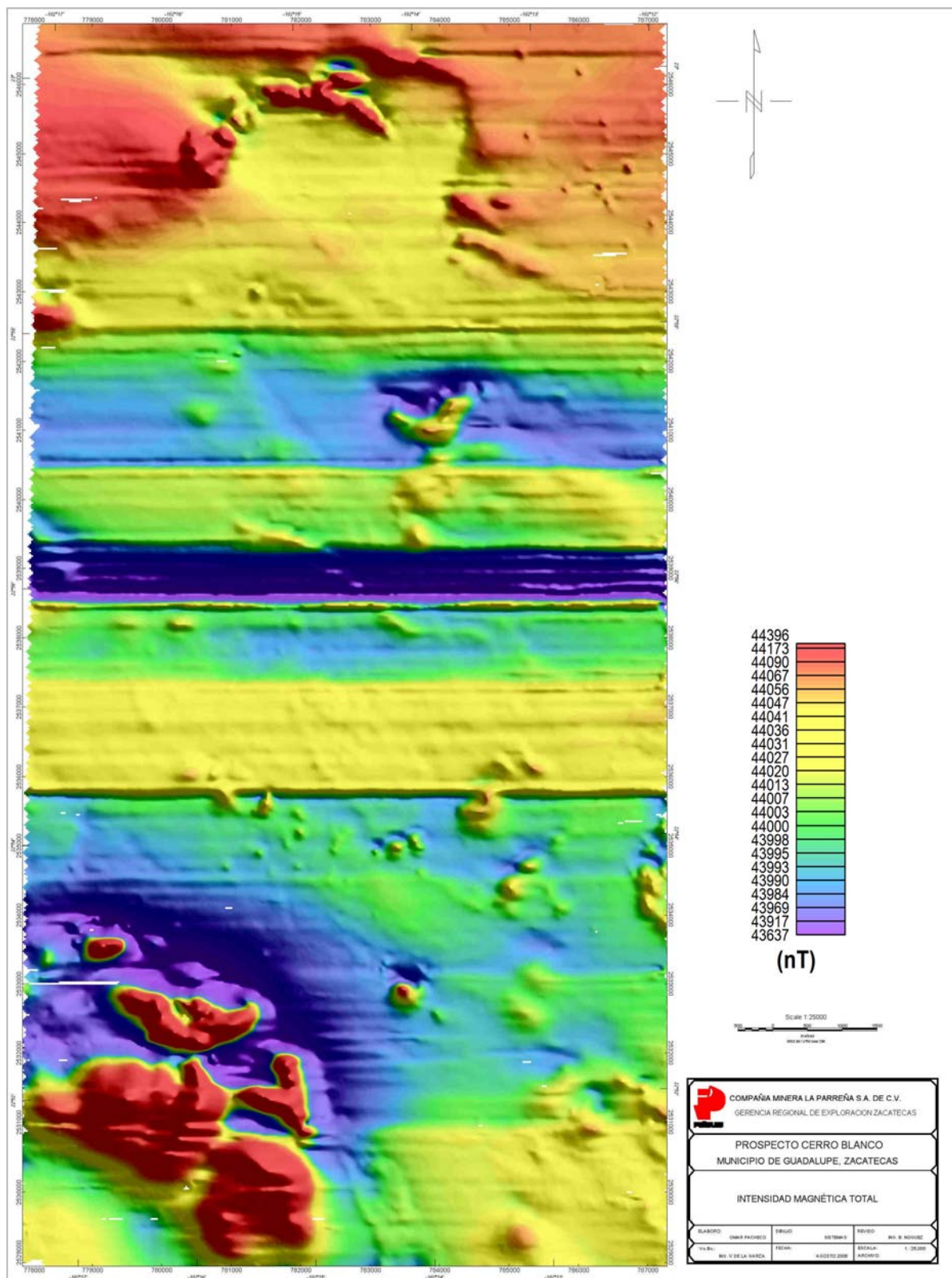
#### **Corrección por IGRF.**

La intensidad magnética del campo primario no es constante a lo largo y ancho del globo terrestres, como se mencionó ya en esta tesis, varía principalmente en función de la latitud. En un levantamiento magnético esta variación está presente y entre mas grande sea el área de estudio mayor será el efecto en los datos. La forma en que afecta a los datos es creando una diferencia de intensidad magnética entre los datos mas al norte y los datos mas al sur de un área de estudio, debido que la intensidad de campo primario es mayor en un extremo que en el otro, por la variación natural del campo magnético primario debida a la latitud. Para la corrección se hace uso de un modelo que se aproxima matemáticamente al campo magnético de la tierra, observado en toda la superficie terrestre en un momento específico llamado IGRF (International Geomagnetic Reference Field) que se corrige cada 5 años

El valor regional de IGRF para la corrección en este trabajo fue obtenido del modelo del año 2000 (*IAGA 2000*) y una altura calculada por el GPS montado en la aeronave. Se generó un canal “*IGRF*” dentro de la base de datos del cual se obtuvo un valor promedio y se le sustrajo al mismo canal “*IGRF*”. Los valores finales contenidos en este canal se le sustrajeron a los valores de intensidad magnética total, corregidos ya por variación diurna y rezago (*Figura 16*).

Aunque el propósito principal de esta corrección es sustraer la variación del campo magnético principal de la Tierra a lo largo del área de estudio, con este procedimiento también podemos corregir el efecto en los datos por variaciones en la altura de la aeronave dentro el campo primario de la Tierra, puesto que no siempre es posible volar el área de prospección a la misma altura, debido a la presencia de obstáculos tales como cerros.

### III. ESTUDIO AEROMAGNÉTICO



*Figura 15. Mapa de Intensidad Magnética Total corregido por rezago. Desaparece en gran medida la forma de Zigzag en la porción sur del mapa.*

#### **Levelling.**

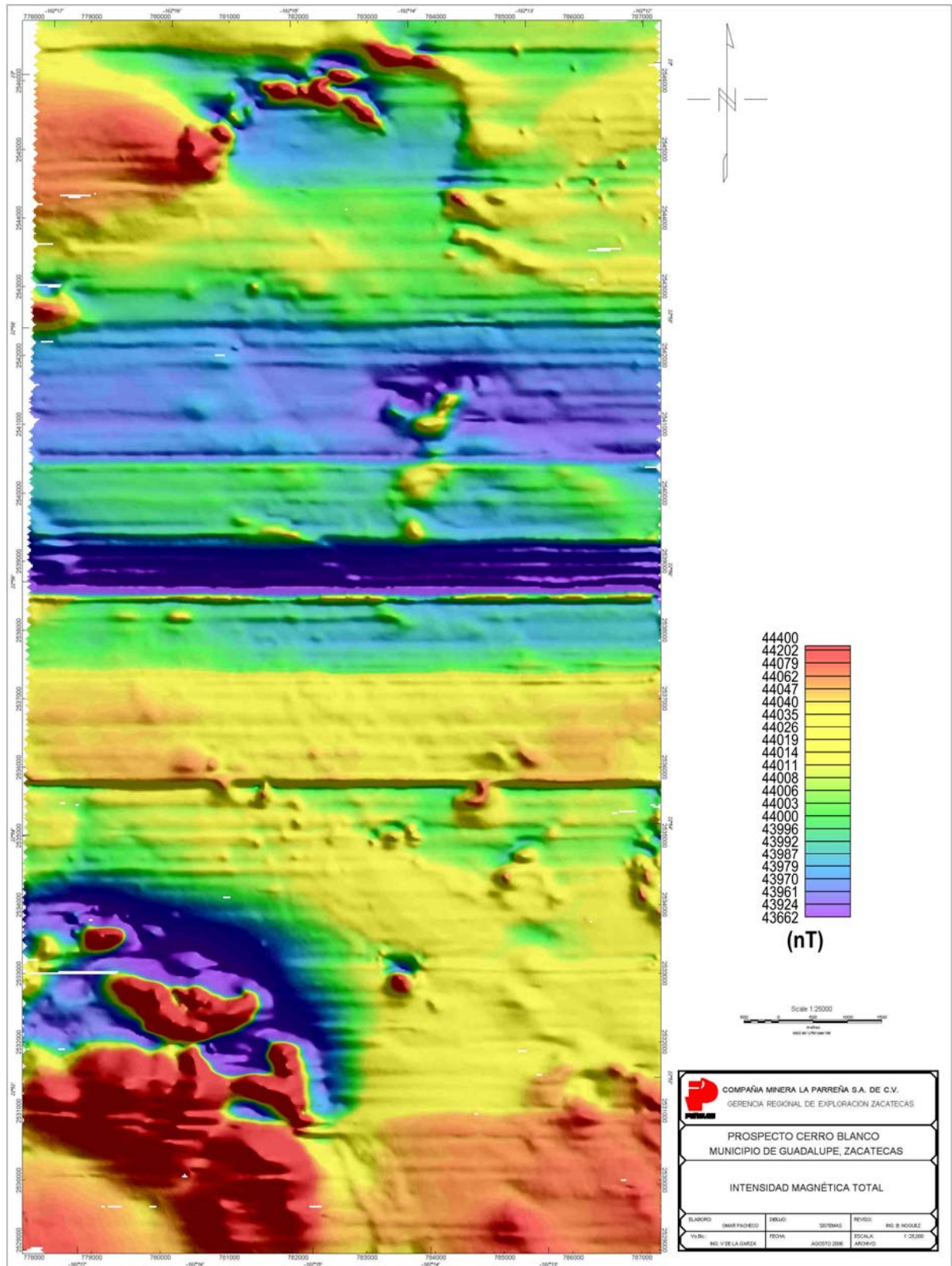
Como se cito al principio del capítulo, los procedimientos anteriores eliminan los errores generados durante el vuelo casi en su totalidad, sin embargo, a veces permanecen rasgos o desniveles dentro del mapa después de aplicados estos procedimientos. Todavía se pueden apreciar algunos de estos rasgos en el mapa, por eso se aplica un procedimiento con el cual se espera tener un nuevo mapa parcialmente nivelado; se trata de la nivelación mediante líneas de amarre.

Hasta ahora sólo se han tomado en cuenta las líneas de cubrimiento con dirección E-W y entre ellas existen aún desniveles que se tratarán de eliminar con ayuda de las líneas de amarre con dirección N-S. Se asume que la diferencia que existe entre las líneas de cubrimiento y las de amarre en los puntos de intersección se debe a errores diurnos remanentes a lo largo de las líneas de amarre, entonces será necesario nivelar primero las líneas de amarre. Se hace de esta manera por que hay muchas líneas de cubrimiento que se cruzan con las de amarre y es posible que alguna de las primeras esté fuera de nivel pero el promedio de todas ellas arrojaría una línea de amarre correcta.

Se crea una tabla de intersecciones de líneas de amarre con líneas de cubrimiento, y se ajustan las primeras compensando la diferencia que hay entre estas y las de cubrimiento. Ahora que las líneas de amarre están niveladas, se toman como referencia para nivelar las líneas del levantamiento en sí. Este procedimiento es exactamente el mismo que cuando se nivelan las líneas de amarre.

Una manera de ver como trabaja este procedimiento es ponerlo de la siguiente manera. Suponiendo que las líneas de amarre son confiables (previa nivelación), se llevan todas las líneas de cubrimiento al mismo nivel que el de las primeras, cada una en su correspondiente posición. Puesto que las líneas de amarre presentan curvas suaves en la mayoría de sus secciones, en las líneas de cubrimiento se eliminarán casi en su totalidad los cambios laterales bruscos entre línea y línea. Esto se hace en todas la líneas de cubrimiento para cada línea de amarre, de tal manera que tampoco se encontrarán cambios bruscos que no correspondan con anomalías a lo largo de las líneas de cubrimiento, esto es a su vez posible por que no hay cambios considerablemente bruscos entre línea y línea de amarre.

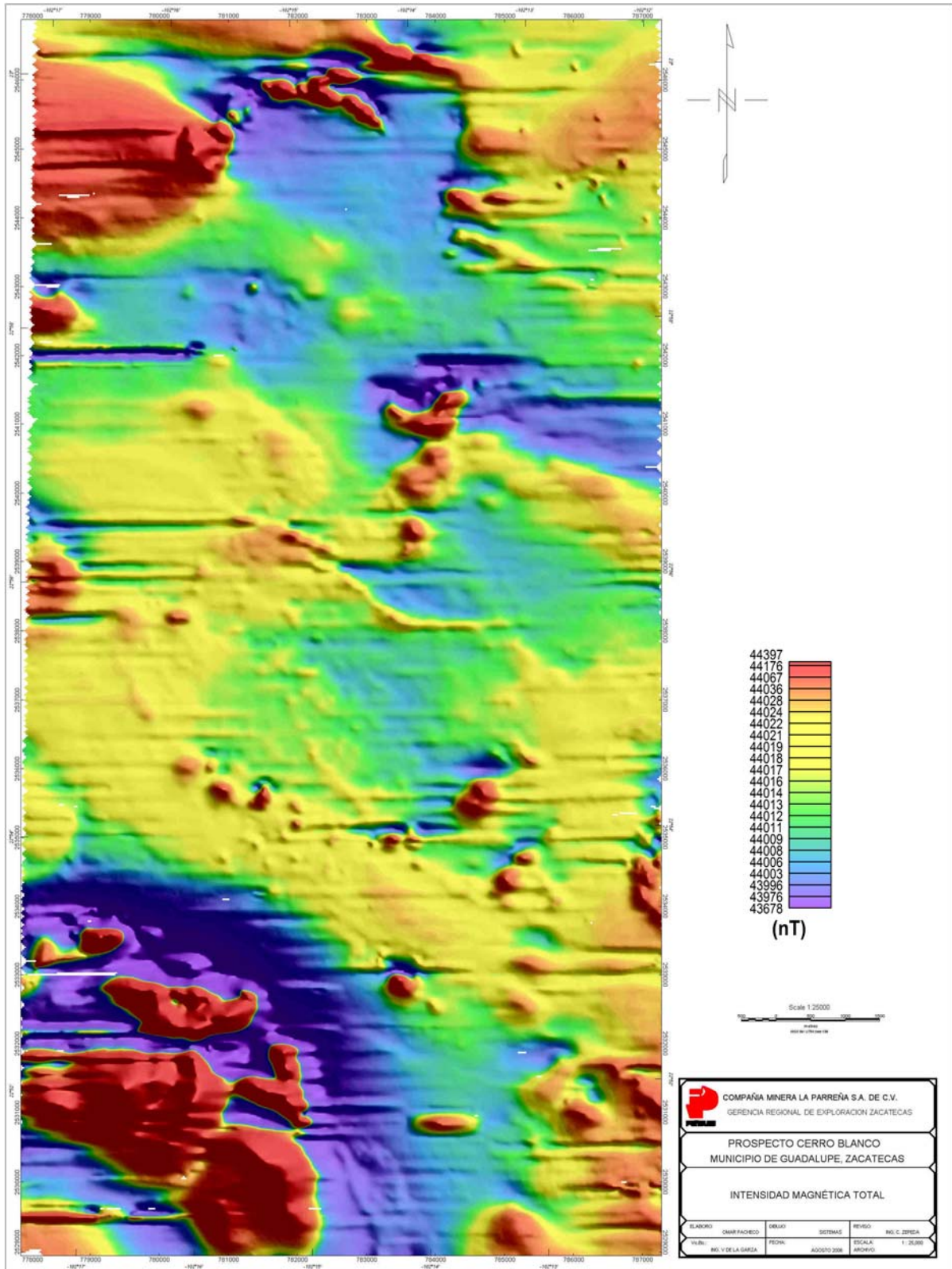
### III. ESTUDIO AEROMAGNÉTICO



**Figura 16.** Mapa de Intensidad Magnética Total corregido por IGRF. La porción norte se torna amarilla por la compensación negativa de la Intensidad magnética, caso contrario a la de la porción sur.

### III. ESTUDIO AEROMAGNÉTICO

En el mapa resultante (*Figura 17*) se aprecia que no todos los problemas se han resuelto. Es necesario aplicar un procedimiento más de corrección llamado microlevelling.



*Figura 17. Mapa de Intensidad Magnética Total nivelado con líneas de amarre. Los grandes desniveles desaparecen, sin embargo se generan fragmentos de línea que habrá que nivelar a mano.*

#### **Microlevelling.**

Microlevelling es un procedimiento utilizado con datos aeromagnéticos para eliminar los desniveles que permanecen después de aplicar la nivelación mediante líneas de amarre. Se trata de un proceso en el cual se elimina el efecto causado por el ruido de longitudes de onda larga a lo largo de las líneas de cubrimiento.

Este procedimiento es aplicado siempre después de la corrección por rezago y solo en caso de que sea necesario, esto por que el procedimiento implica la aplicación de filtros en el dominio de Fourier. Las correcciones anteriores, por el contrario, deben de hacerse casi forzosamente.

Primeramente se extrae el ruido que provoca el efecto de desnivel con un filtro Butterworth pasa altas con una longitud de onda de corte igual a 4 veces la separación de las líneas de cubrimiento ( $100*4$ ) y de orden 8, de tal manera que

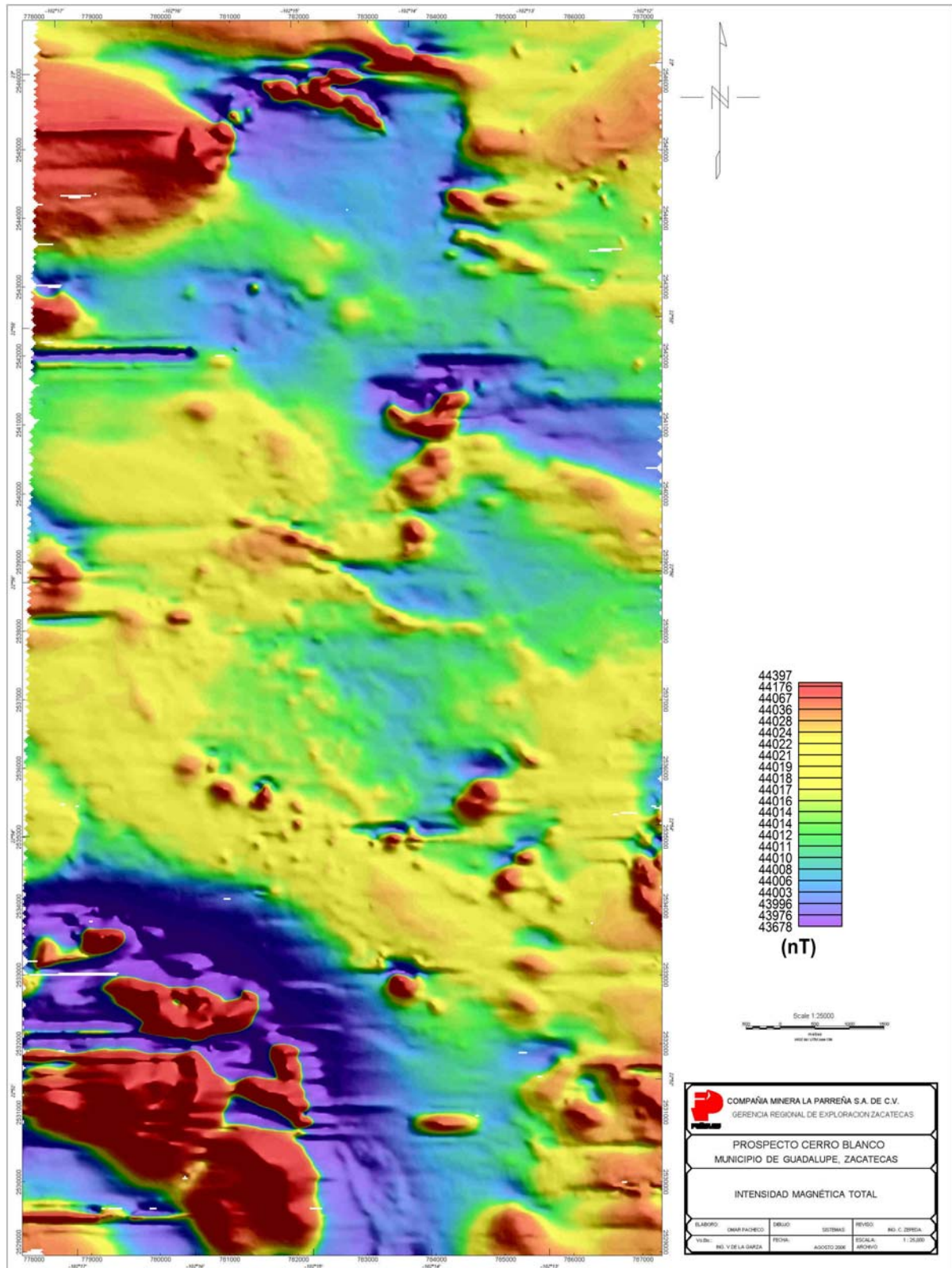
$$L\left(\frac{1}{\lambda}\right) = \frac{1}{1 + \left[\left(\frac{400}{\lambda}\right)^8\right]} \quad \lambda = \text{longitud de onda} \quad (1)$$

De esta forma se obtuvo, como resultado, una función con longitudes de onda menores a 400 m, pero además se aplicó un filtro coseno direccional el cual dejó pasar las longitudes de onda solamente en la dirección de las líneas de cubrimiento de tal forma que

$$L(\theta) = 1 - \left| \cos^{0.5}\left(90 - \theta + \frac{\pi}{2}\right) \right| \quad \theta = \text{dirección en grados} \quad (2)$$

Para que no resultara muy agresivo el filtro se convino que el grado de la función coseno  $n$  fuera igual a 0.5 y la dirección del filtro fuera igual a  $90^\circ$  azimut que es la dirección de las líneas de cubrimiento. De esta manera ya se obtuvo un mapa el cual contiene la señal que está provocando el efecto de desnivel. Queda simplemente sustraerlo del mapa original (del cual se obtuvo el mapa de error). El resultado es un mapa mejor nivelado (*Figura 18*) aunque aún con rasgos importantes que necesitan ser resueltos.

### III. ESTUDIO AEROMAGNÉTICO



**Figura 18. Mapa de Intensidad Magnética Total nivelado por Microlevelling. Las rizaduras del mapa anterior ya no están presentes, se muestra un mapa mas uniforme.**

Estos patrones se observan desde que se aplicó la corrección por líneas de amarre, algunos ya se presentaban desde antes, pero fue en esa parte del procedimiento donde se acentuaron. Los rasgos que aparecieron pueden deberse a que la nivelación de las líneas de amarre no se nivelaron adecuadamente, algunas veces se soluciona con no tomar en cuenta ciertas líneas de cubrimiento y realizar nuevamente la nivelación a las líneas de amarre y luego a las de cubrimiento, sin embargo gran cantidad de veces se llega al procedimiento que se describe como siguiente.

El método de corregir estos patrones es simple. Observando el rasgo horizontal que se encuentra en la parte oeste del área de estudio (*Figura 18*) se ve claramente una porción de línea desnivelada. Separando esta sección de línea de la completa original, con el propósito de hacerla independiente, se le suman unidades en [nT] para alcanzar el nivel que tienen las líneas sur y norte que la avecinan y así, sin perder la forma original de la señal, desaparece el efecto de desnivel.

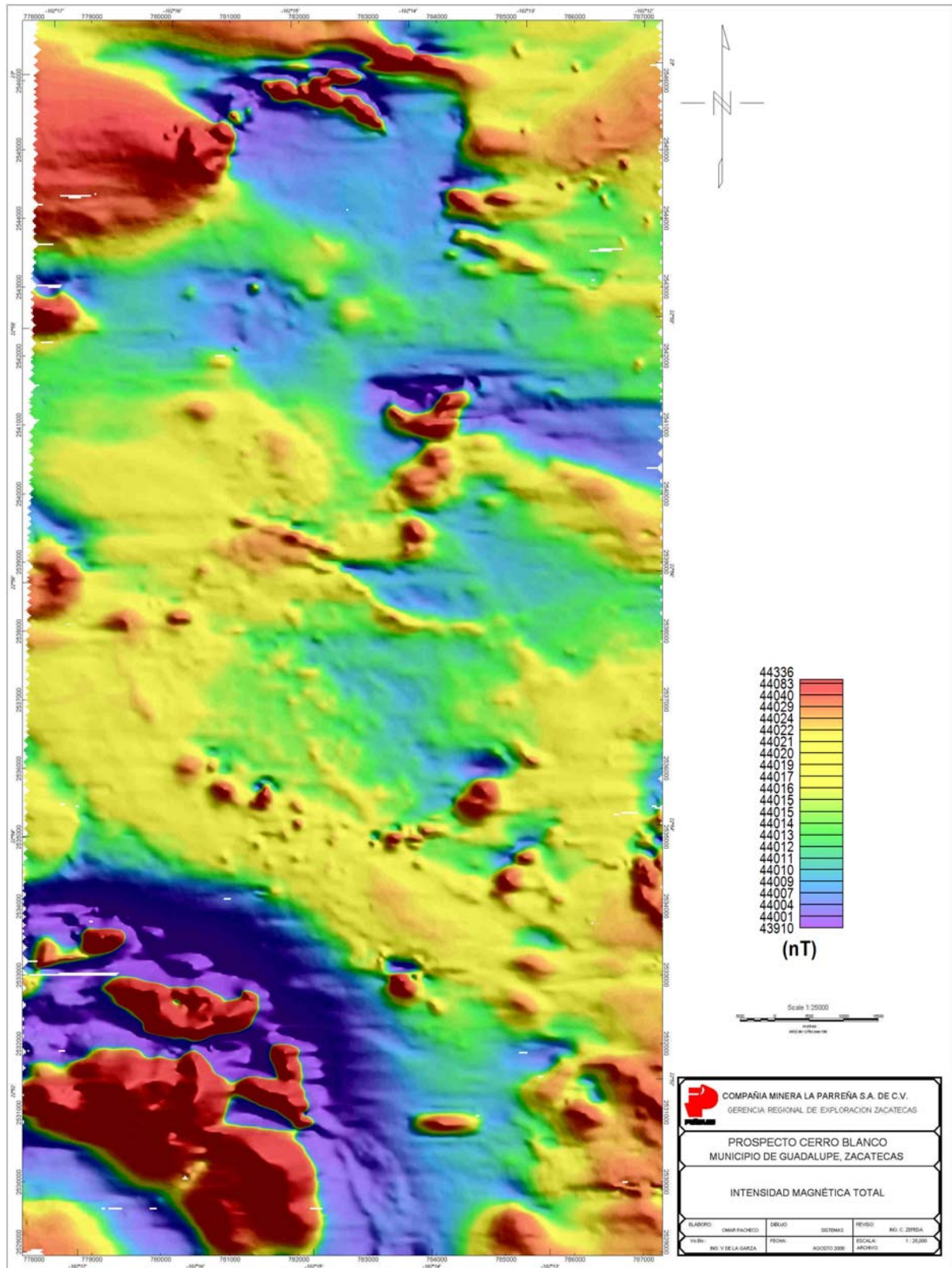
Para cada rasgo encontrado en el mapa se procedió de la misma manera. Cabe resaltar que en la anomalía del suroeste, donde hay mayores contrastes, hay mayor cantidad de secciones de líneas desniveladas y en la parte central de la zona prácticamente no existen estos patrones.

Después de haber hecho estas correcciones se está en posición de iniciar la parte del proceso para lo cual se utilizan los datos del último mapa (*figura 19*) como el de intensidad magnética total (IMT). Se asume que este último mapa no tiene errores que correspondan al levantamiento aéreo y que es tiempo de manipularlo a conveniencia.

En la figura 19 se observa que los valores más altos y los más bajos de intensidad magnética corresponden a la anomalía localizada en el suroeste del bloque. Esta anomalía requiere un rango de colores altos para que pueda ser distinguida, pero esto puede resultar contraproducente por que entre más grande sea el rango de colores, es más difícil observar los contrastes pequeños que puedan estar presentes en el bloque. Se pudo comprobar mediante datos geológicos que esa anomalía corresponde a un Gabro y que no tiene interés minero. Por estas dos razones la parte baja del bloque no será tomada en cuenta en lo siguiente. Debido al recorte del bloque los mapas obtenidos en los capítulos siguientes serán mejor representados con una escala de 1:50,000.



### III. ESTUDIO AEROMAGNÉTICO



*Figura 19. Mapa de Intensidad Magnética Total nivelado manualmente. Se han eliminado los desniveles de los pequeños fragmentos de línea. Este mapa lleva el nombre de Mapa de Intensidad Magnética total.*

---

## **IV. PROCESAMIENTO DE DATOS.**

Una vez que los datos han sido corregidos por los efectos anteriormente descritos, es posible procesarlos (i.e. aplicación de filtros) con el objetivo de atenuar o realzar algunas partes de la señal que permitan identificar rasgos de interés a partir del mapa de Intensidad Magnética Total. En este capítulo se discuten los filtros que generalmente se usan en cada levantamiento aeromagnético, empezando con una atenuación de ruido para dar paso a transformaciones como Reducción al Polo y Señal Analítica.

### **4.1 Análisis del espectro de potencias.**

Es necesario hacer un análisis espectral de las señales contenidas en los datos, por lo que se calculó el espectro promediado radialmente para tener una visión clara de las frecuencias que se encuentran dentro de la información geofísica y así determinar los números de onda de corte, de esta forma, los filtros numéricos se determinarán dentro del rango de números de onda que se desean realzar o atenuar, dependiendo de su posición en el espectro (Spector y Grant, 1970). Todos los procesos se realizaron en el dominio de las frecuencias mediante el algoritmo desarrollado por Winograd (1976) para aplicar la transformada de Fourier rápida FFT (“Fast Fourier Transform” por sus siglas en inglés).

No es el propósito de esta tesis explicar el funcionamiento del algoritmo de Winograd, sin embargo es necesario presentar el formato que requieren los datos para poder aplicarlo y así obtener la transformada de Fourier.

- El mapa debe ser cuadrado.
- El mapa debe tener dimensiones adecuadas para Winograd FFT.
- El mapa no debe contener campos sin un valor asignado.

Debe suponerse que el grid corresponde a un ciclo de una señal periódica, por lo tanto deberá haber continuidad en los límites de sus dos componentes espaciales “x” y “y”, es decir que en él deberá haber continuidad del límite norte con el límite sur y del límite este con el límite oeste. Esto se logra removiendo de una manera gradual la diferencia que hay entre cualquier borde límite del grid y su borde límite opuesto. Oasis Montaj logra esto mediante la aplicación de una extrapolación y guarda los coeficientes de la operación en el encabezado del archivo del mapa para usarlos en cualquier aplicación posterior, de esta manera también son incluidos en las operaciones de filtraje.

En seguida, el mapa debe ajustarse a una dimensión aceptada por el algoritmo de Winograd por medio de una expansión con elementos sin valor asignado obteniendo un mapa cuadrado. La expansión del mapa se hace a un 10 % primeramente, a partir de ahí se alcanza la dimensión más cercana, una de las siguientes: 2, 4, 6, 8, 10, 12, 14, 16, 18, 20, 24, 28, 30, 36, 40, 42, 48, 56, 60, 70, 72, 80, 84, 90, 112, 120, 126, 140, 144, 168, 180, 210, 240, 252, 280, 315, 336, 360, 420, 504, 560, 630, 720, 840, 1008, 1260, 1280, 2520.

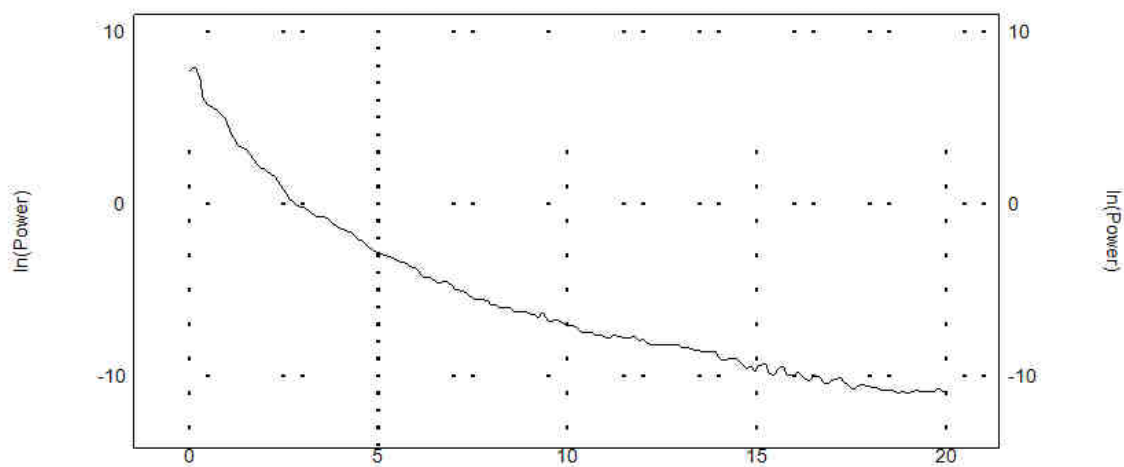
El último paso de la preparación del grid es la sustitución de los elementos sin valor por valores reales. Esta sustitución se hace por medio de una interpolación, primeramente se interpola según la tendencia de cada fila de tal manera que siga habiendo una correspondencia entre los límites opuestos del mapa, de aquí se desprende un primer valor para cada punto donde había un elemento sin valor asignado. En seguida se interpola según la tendencia de cada columna, de igual manera respetando las correspondencias en los límites, con lo que se llega a un segundo valor para cada punto del mapa. De estos dos valores se genera un promedio y se obtiene un valor real para cada punto en el mapa.

Una vez preparado el mapa, se calcula la FFT, teniendo la posibilidad ahora, de calcular el espectro de energía promediado radialmente, que no es más que una representación de la energía relativa al número de onda, promediada en todas direcciones para cada número de onda. Se ha mostrado que el espectro de un prisma, y en particular el desplazamiento de éste a lo largo del eje del número de onda, está íntimamente relacionado con la profundidad o la dimensión horizontal del cuerpo magnetizado (*Bhattacharyya 1966*) y pueden identificarse componentes de la fuente profundos, componentes someros y ruido (*Spector y Grant 1970*).

#### IV. PROCESAMIENTO DE DATOS

---

Y aplicando la función logaritmo natural se obtiene el espectro de potencias promediado radialmente (*Figura 20*). Anteriormente se hacía la suposición de que en el espectro de potencias se podían reconocer una componente de fuente profunda y una componente de fuente somera, distinguibles entre sí por el cambio de pendiente en la curva del espectro de potencias. Era raro encontrar a quien indicara la presencia de una sola fuente y más raro aún quien identificara un conjunto de tres fuentes (*Spector y Grant 1970*). Actualmente se acepta la presencia de más de dos fuentes que aportan al espectro de potencias.



*Figura 20. Espectro de potencias radialmente promediado obtenido de los datos de IMT.*

La forma del espectro de potencias está influenciada considerablemente por la profundidad promedio de sepultamiento de la fuente y un cambio sustancial en este parámetro afectara la razón de decaimiento de la curva (*Spector y Grant 1970*).

Se pueden observar cuatro pendientes dentro del espectro de potencias obtenido (figura 21), las cuales pueden representar fuentes magnéticas a distintas profundidades, siendo la más profundas la que se representa con los números de onda más pequeños. La pendiente ubicada en los valores más altos de número de onda representa ruido de alta frecuencia y es necesario eliminarlo antes de seguir con el proceso de los datos. Del mismo espectro de potencia se obtiene el número de onda central para aplicar el filtro y separar este ruido de los datos que nos interesan. Se aplicó un filtro butterworth pasa bajas, de grado 16 y un número de onda de corte de 17 [*ciclos/m*]

$$L(k) = \frac{1}{\left[1 + \left(\frac{k}{17}\right)^{16}\right]} \quad (3)$$

donde  $k$  es el número de onda en [ciclos/m].

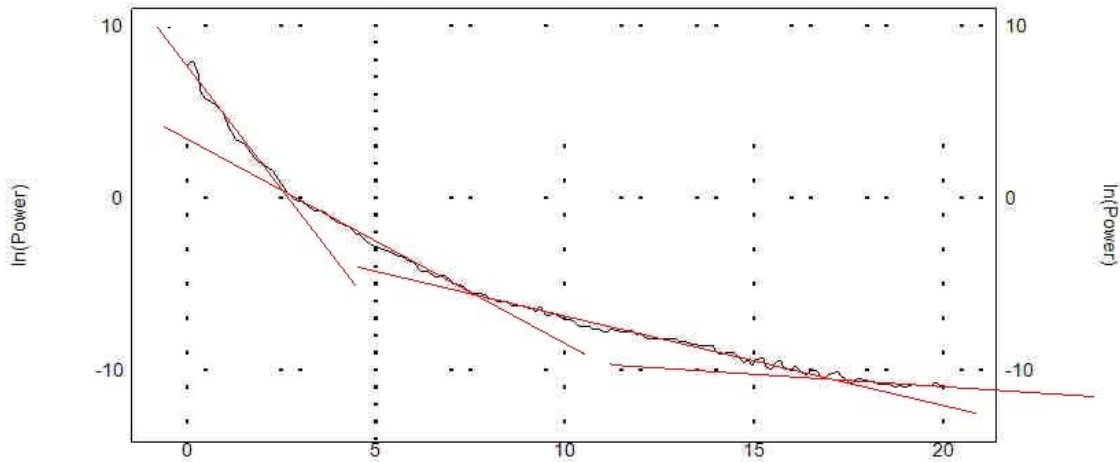


Figura 21. Análisis del espectro de potencias.

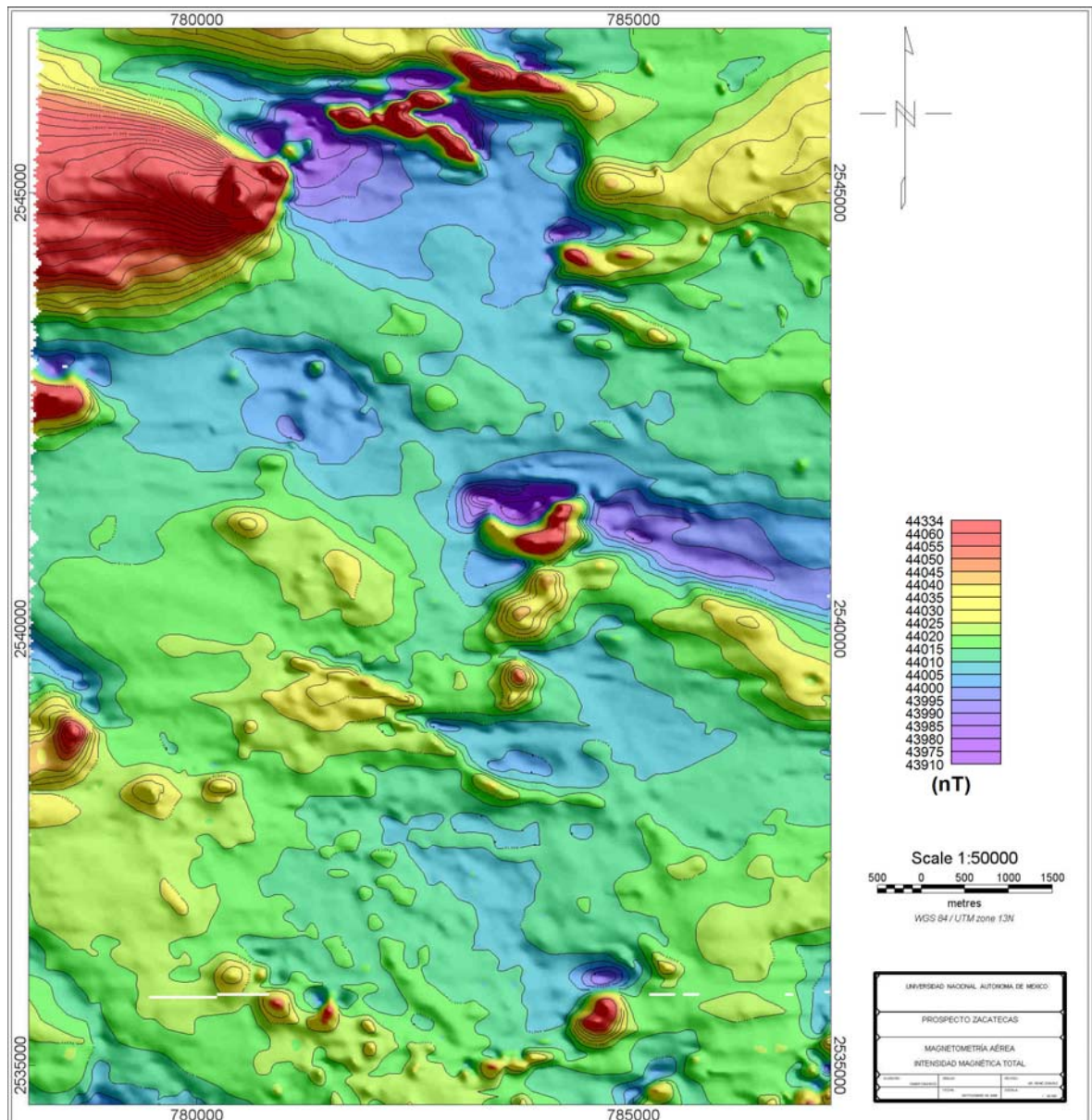
El resultado es un mapa sin ruido de alta frecuencia (Figura 22), el cual será la entrada para los demás procesos. La diferencia entre el mapa antes y después del filtrado es poco notoria a simple vista, pero en algunas zonas, sobre todo hacia el noreste, se nota el cambio en los pequeños picos que ahí están presentes.

#### 4.2 Reducción al Polo.

El método de reducción al polo tiene como objetivo facilitar la comprensión de los mapas magnéticos, Baranov (1964) ubicando las anomalías exactamente sobre las fuentes que las producen. El mapa calculado es un mapa magnético reducido al polo y es producto de un procesamiento de datos que recalcula los datos de intensidad de campo magnético total simulando que son afectados por un vector de intensidad magnética con una inclinación magnética igual a 90 grados. Este proceso transforma anomalías dipolares en

#### IV. PROCESAMIENTO DE DATOS

anomalías monopolares, centradas directamente sobre los cuerpos que las originan, simplificando la interpretación de los datos.



*Figura 22. Mapa de Intensidad magnética total sin ruido de alta frecuencia.*

Primeramente debe eliminarse el efecto de la inclinación y declinación sobre los datos, simulando que la zona es afectada por un campo magnético vertical, es decir, con una inclinación igual a  $90^\circ$  y una declinación igual a  $0^\circ$ . Debe tenerse en cuenta que el mapa de reducción al polo que se obtuvo, es solo una aproximación del que se obtendría si en verdad se tuviera un campo magnético vertical. En latitudes entre los 15 y 30 grados, estos resultados pueden ser usados junto con el mapa original de IMT para consideraciones

#### IV. PROCESAMIENTO DE DATOS

---

aceptables, a diferencia de aquellas zonas con latitudes mayores a 45 grados, donde la representación es más razonable (*Ted 2006*). Sin embargo otros autores consideran que es mejor no utilizar este proceso para latitudes menores a 20 grados afirmando que se amplifica el ruido de alta frecuencia.

Debe tenerse en cuenta que el algoritmo de reducción al polo asume que la magnetización y el campo regional son uniformes a lo largo del área de estudio, (*Blakely 1995*). Además de la suposición de que el vector de magnetización es paralelo al vector del campo magnético de la tierra. Esto solo se cumple cuando en las rocas solamente hay magnetización inducida, sin embargo la magnetización remanente no será tratada correctamente si la dirección de la remanencia es diferente al del campo magnético regional.

La operación requiere el conocimiento de los valores de la inclinación y declinación del campo magnético de la tierra de la zona donde se llevó a cabo el registro. Adicionalmente se requiere el valor de la altura a la cual se hizo el levantamiento, en este caso de 100 metros. Pueden conocerse los valores de inclinación y declinación a partir de la latitud y longitud auxiliados del modelo de IGRF.

La expresión de reducción al polo que se utilizó es la siguiente (*Grant y Dodds, 1972*):

$$L(\theta) = \frac{1}{[\sin(I) + i \cos(I) \cos(D - \theta)]^2} \quad (4)$$

donde :

$\theta$  es la dirección del número de onda

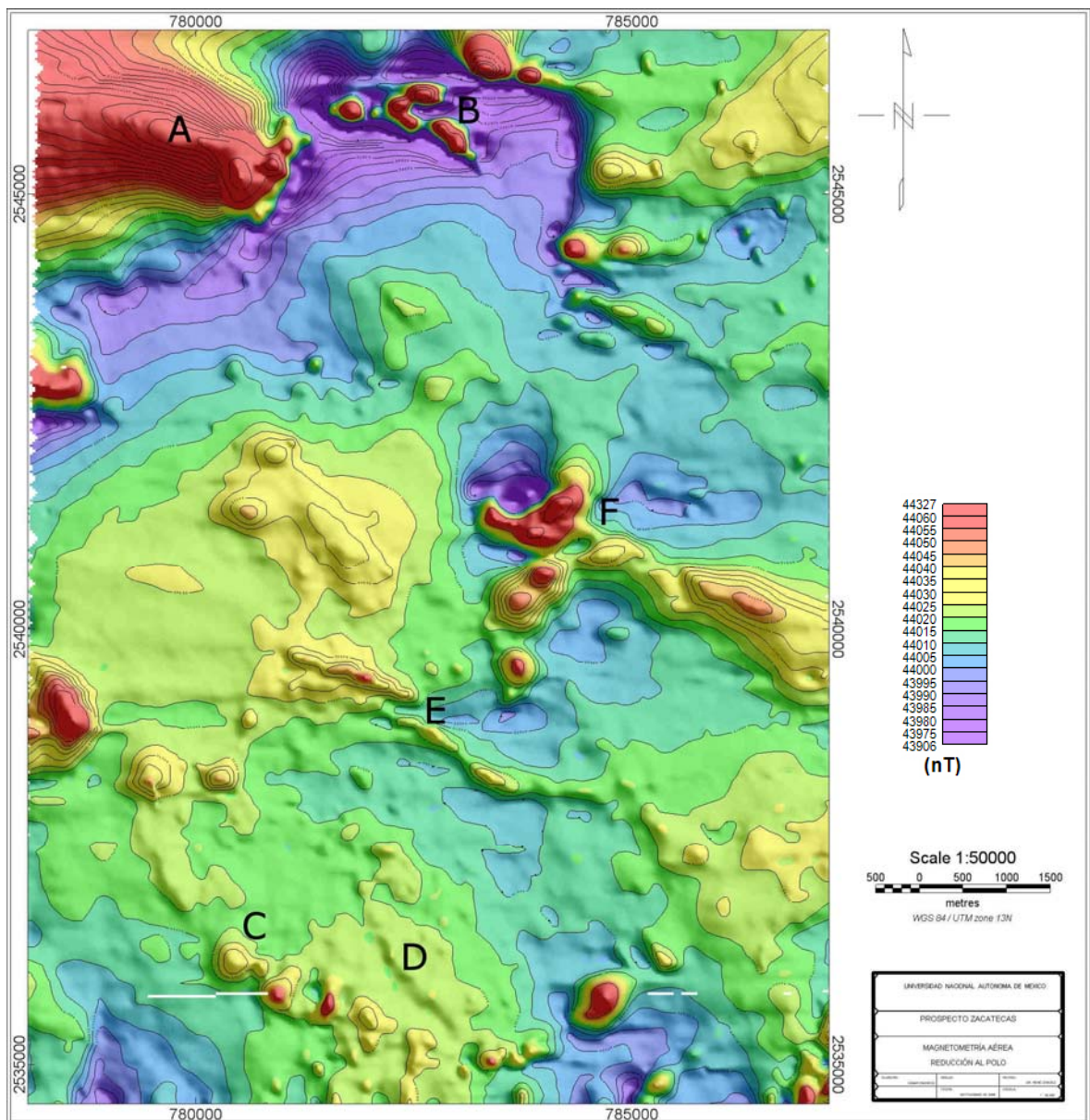
$I$  es la inclinación magnética

$D$  es la declinación magnética

Por la ubicación del área de estudio se utilizó una inclinación de 51 grados y una declinación de 7.9 grados para la reducción al polo. El mapa resultante (figura 23) estaría presentando, en teoría, las anomalías encima del cuerpo que las produce.

#### IV. PROCESAMIENTO DE DATOS

El mapa de Reducción al Polo (*RTP por sus siglas en inglés, figura 23*), muestra algunos rasgos interesantes, el primero de ellos resalta a primera vista debido a sus dimensiones. Se localiza en la esquina noroeste del bloque estudiado y por los valores elevados es parecido a la anomalía ocasionada por el cuerpo de gabro que se halla en la parte suroeste del bloque inicial. Esta anomalía no fue cubierta en su totalidad por el levantamiento magnético, por lo tanto no se puede asegurar nada en cuanto a sus límites y su tamaño, aunque si se puede notar la nueva posición que adquirió dentro del bloque después de haber efectuado la reducción al polo, a esta anomalía, presumiblemente ocasionada por un cuerpo intrusivo, será nombrada anomalía “A”.



**Figura 23. Mapa de Reducción al polo. Las anomalías cambian de posición.**



#### IV. PROCESAMIENTO DE DATOS

---

El segundo rasgo importante, anomalía “B”, se trata de un conjunto de altos magnéticos localizados en parte central norte del bloque, puede ubicarse rápidamente al este de la anomalía A y es fácilmente visible debido al alto contraste que existe entre estos altos y el área circundante con los valores magnéticos más bajos del bloque. Estos altos son, junto con la anomalía “A”, los valores magnéticos más altos dentro del área de estudio.

La anomalía “C” es una estructura en forma de arco con el interior de la curva dirigida hacia el noreste y se localiza en la parte sur del mapa de reducción al polo con una longitud de 7.5 km aproximadamente. A lo largo de este arco se encuentran algunos altos magnéticos que hacen pensar en una estructura curvada, pero también hay que considerar una estructura más pequeña que se encuentra dentro del arco, nombrada anomalía “D” y tiene una dirección N 30° W.

La anomalía “E” es un alineamiento con orientación N 60° W ubicada en el centro del mapa RTP que no muestra valores muy altos de intensidad magnética. Siguiendo la alineación de esta estructura de sureste a noroeste nos encontramos con otro alineamiento mas arriba, muy cerca con valores más intensos. A primera vista pareciera que la anomalía “E” continúa por este segundo alineamiento, sin embargo, si observamos a detalle nos percataremos de que se trata mas bien de dos estructuras paralelas, muy cercanas y de diferente intensidad magnética.

Por último, en la parte central, hacia el oriente de la zona, puede verse una serie de altos magnéticos, aparentemente alineados que se extienden hacia los lados de forma masiva, lo cual los distingue de la forma de las anomalías “D” y “E”. Se pueden distinguir dos partes de esta anomalía “F”. Primeramente, puede verse como esta anomalía inicia desde el este hacia el noroeste a lo largo de una recta con la misma dirección de la anomalía “E” para, después seguir en forma curva hacia el sur del bloque. En esta parte debe tenerse cuidado, puesto que en la parte curva la anomalía toma valores de intensidad magnética más altos que en su parte recta. De igual intensidad es otro alto magnético que se ubica hacia el norte pegado a la zona curvada, puede suceder entonces que, la última parte de la curva y el alto al que se hace referencia constituyan una anomalía de un rasgo geológico diferente al de la zona recta.

En esta anomalía “F” se nota la presencia de magnetización remanente, ya que el algoritmo de reducción al polo no logró convertirla en una anomalía monopolar, incluso podría inferirse de manera preliminar la dirección del vector de remanencia alineando el bajo magnético con el alto magnético. Esto podría ser un indicio de la existencia de los cuerpos polimetálicos que se buscan. De manera similar en el norte del mapa, puede verse la presencia de magnetismo remanente solo que con un grado mas de complejidad.

Un rasgo interesante que también es muy visible en el mapa de reducción al polo es una serie de puntos en la esquina noreste del bloque. Son de dimensiones pequeñas, sin embargo, se pueden apreciar que están alineadas y no pueden interpretarse como ruido

#### 4.3 Señal Analítica.

El proceso de señal analítica es ampliamente utilizado en la actualidad para realzar aquellas zonas dentro del mapa magnético donde los gradientes en alguna dirección son altos, como por ejemplo en los límites de las anomalías magnéticas, y es de uso común debido a los resultados que ofrece y la supuesta independencia con respecto a la dirección del campo magnético primario. Nabighian desarrollo la idea de este proceso en 1972 y Roest (1992) demostró que la amplitud de la señal analítica en 3D en una posición (x, y) puede derivarse de los tres gradientes ortogonales del campo magnético total con la siguiente expresión:

$$|A(x, y)| = \sqrt{\left(\frac{dT}{dx}\right)^2 + \left(\frac{dT}{dy}\right)^2 + \left(\frac{dT}{dz}\right)^2} \quad (5)$$

Donde

$|A(x, y)|$  es la amplitud de la señal analítica en (x, y)

T es el campo magnético observado en (x, y)

Una gran ventaja que se obtiene al aplicar el proceso de señal analítica, es que el resultado está exento de los efectos de la inclinación del campo magnético terrestre, evidenciando la localización de los límites de los cuerpos o fuentes que producen las

anomalías magnéticas. Tradicionalmente el método de señal analítica se efectúa sobre datos de intensidad magnética total, pero actualmente se cree que si se aplica sobre datos de reducción al polo se obtienen mejores resultados (*Bilim F. y Ates 2003*). Ellos demostraron que la distorsión causada por la magnetización de un cuerpo en un mapa de IMT permanece en el mapa de señal analítica, caso que no se presenta con datos reducidos al polo.

La amplitud de la señal analítica sobre un contacto magnético es una función en forma de campana simétrica, donde cada máximo aparece en los límites del cuerpo magnetizado. De donde puede derivarse una estimación de profundidad, localización y geometría.

Las derivadas en X y Y que se requieren para la ecuación (5) pueden obtenerse del mapa de datos mediante un tratamiento en el dominio de la frecuencia, y la derivada vertical puede obtenerse mediante un algoritmo que desarrollo Nabighian (1972) usando la transformada de Hilbert, de esta manera:

$$\frac{\partial T}{\partial z} = H_x \left[ \frac{\partial T}{\partial x} \right] + H_y \left[ \frac{\partial T}{\partial y} \right] \quad (6)$$

Donde  $H_x$  y  $H_y$  son las componentes x y y de la transformada de Hilbert en tres dimensiones, Shearer (2005) y son definidas en el dominio del número de onda como:

$$\tilde{H}_x = - \frac{i w_x}{\sqrt{w_x^2 + w_y^2}} \quad y \quad \tilde{H}_y = - \frac{i w_y}{\sqrt{w_x^2 + w_y^2}} \quad (7)$$

El mismo autor señala que no se han hecho estudios para determinar que tan independiente es este método 3D de la dirección del campo magnético total, a pesar de ello se utiliza ampliamente. Puede hacerse la suposición de que no hay una dependencia con la dirección de campo magnético, y si la hubiera sería mínima según Shearer. La figura 24 muestra el mapa de señal analítica, que se usará en el proceso de deconvolución de Euler y apoyará de igual manera en la interpretación final.

#### IV. PROCESAMIENTO DE DATOS

---

En el mapa de señal analítica podemos ver los límites de las fuentes, sin importar la orientación del campo magnético terrestre, recordando que el algoritmo de este proceso utiliza los gradientes en las tres direcciones (x, y, z), es fácil pensar que en el mapa de señal analítica veamos aquellas zonas dentro del bloque donde la intensidad magnética cambie de manera importante haciendo resaltar las anomalías a las que nos referimos arriba.

Las anomalías que encontramos en el mapa de reducción al polo se miran claramente en el mapa de señal analítica, sin embargo no podemos ver los límites del lado oeste de la anomalía “A” pero sí vemos la parte este de ella. Las anomalías “C”, “D” y “E” se aprecian sin cambios considerables de como aparecen en el mapa de RTP, pero la anomalía “F” parece ser diferente a lo que se planteó anteriormente, la sospecha de que su parte oeste corresponde a una anomalía independiente parece ser más razonable puesto que en el mapa de señal analítica se muestra con una dirección N-S y prácticamente se separa de su parte este.

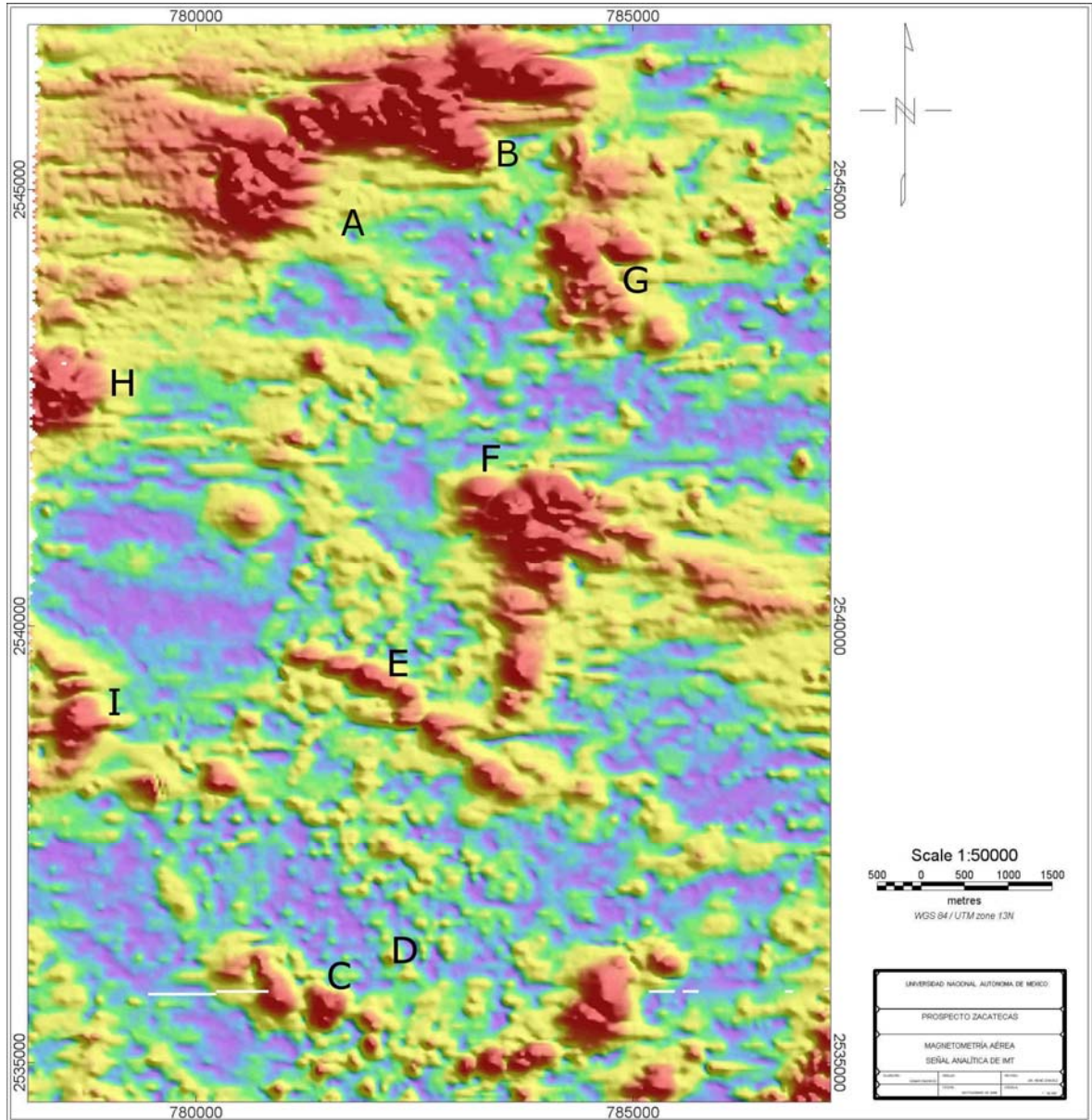
Aparece otra anomalía que en RTP no es tan fácil observar como alineación, más bien se muestran como tres altos magnéticos puntuales aislados entre sí, pero en señal analítica adquieren una apariencia masiva importante que puede ser considerada importante, por lo que será nombrada anomalía “G”.

Por último, en el límite poniente del bloque adquieren una mayor presencia dos anomalías circulares, que no están totalmente delimitadas por el bloque, pero pueden ser de interés por su intensidad magnética. La de la parte norte será la anomalía “H” y la del sur la anomalía “I” y es esta última también interesante por que se muestran claramente resaltados sus límites de una manera muy parecida a los que se muestran en los artículos de Nabighian con modelos ideales.

Parece ser muy conveniente hacer una clasificación de las anomalías importantes con los mapas de reducción a polo y señal analítica como se hizo en esta tesis, por la razón de que el proceso de deconvolución de Euler puede generar soluciones aisladas que, cuando son demasiadas pueden aglomerarse haciendo que la identificación de soluciones reales sea confusa sobre todo para interpretes que apenas se inician como en este caso. La forma más fácil de proceder es tratar de identificar las anomalías identificadas anteriormente en los

#### IV. PROCESAMIENTO DE DATOS

mapas de las soluciones de la ecuación de Euler para identificar la estructura más adecuada para cada una de ellas y obtener su profundidad.



**Figura 24. Mapa de Señal analítica. Muestra las zonas del área donde los gradientes magnéticos son más intensos.**

---

## **V. DECONVOLUCIÓN DE EULER.**

Desde hace tiempo se han venido desarrollando numerosos métodos para transformar los datos originales de un levantamiento magnético, todos con el mismo propósito, el de facilitar la comprensión de estos y llegar a una buena interpretación geológica. Por ejemplo en 1972 O'Brien desarrolló una técnica que usa la transformada de Hilbert para estimar los límites y profundidad de cuerpos prismáticos bidimensionales. Hartman (1971) y Jain (1976) trabajaron con la deconvolución de Werner utilizando la información de Campo Total y las derivadas horizontales y la vertical para estimar la profundidad, echado, posición horizontal y contraste de susceptibilidad de un cuerpo. Zein y Pous (1991) introducen un algoritmo de inversión tridimensional de donde se obtiene la susceptibilidad magnética y la intensidad y dirección de la magnetización remanente, el algoritmo necesita previa información del modelo y tiene una fuerte dependencia de un modelo inicial.

En este capítulo se presenta una técnica, la cual tiene el propósito de localizar anomalías y estimar su profundidad, además es posible identificar el tipo de estructura geológica a la que pertenece, ya sea un cuerpo dique, cuerpo lenticular o chimeneas, todo a partir del mapa de intensidad magnética total, la deconvolución de Euler. Se parte de los fundamentos teóricos del método y se aplica a los datos de Cerro Blanco con el propósito de identificar anomalías que pudieran ser generadas por cuerpos lenticulares y estratiformes característicos de las estructuras que se buscan y obtener su profundidad para propósitos de planeación minera.

### **5.1 Teoría de la Deconvolución de Euler**

Thompson (1982) desarrolló un proceso numérico denominado por este autor como EULDPH, el cuál resuelve la relación de homogeneidad de Euler (también conocida como ecuación de Euler) para estimaciones de profundidad basadas en un

índice estructural. Las soluciones calculadas se pueden utilizar para la interpretación de anomalías magnéticas sin la necesidad de tener un modelo geológico previo, tal y como se requiere en procesos no-lineales inversos (Reid, 1990).

Para comprender la técnica de la deconvolución de Euler partiremos de la definición de una función homogénea. Si  $f$  es una función de variables  $x$ ,  $y$  y  $z$ , se dice que la función es homogénea de grado  $n$  si cumple con la siguiente relación

$$f(tx, ty, tz) = t^n f(x, y, z) \quad (8)$$

y si  $f(x, y, z)$  es homogénea de grado  $n$  la siguiente ecuación se satisface:

$$x \frac{\partial f}{\partial x} + y \frac{\partial f}{\partial y} + z \frac{\partial f}{\partial z} = nf \quad (9)$$

Esta ecuación parcial es conocida como la ecuación de homogeneidad de Euler o simplemente ecuación de Euler. Si ahora consideramos una fuente magnética puntual localizada en  $(x_0, y_0, z_0)$  relativa a un plano de medición  $z$  igual a cero, la intensidad magnética total será de la forma

$$\Delta B(x, y) = f[(x - x_0), (y - y_0), z_0] \quad (10)$$

Entonces la ecuación de Euler para la función de intensidad magnética se escribe como

$$(x - x_0) \frac{\partial \Delta B}{\partial x} + (y - y_0) \frac{\partial \Delta B}{\partial y} + z_0 \frac{\partial \Delta B}{\partial z} = -N \Delta B(x, y) \quad (11)$$

Puede notarse claramente que la ecuación anterior involucra las derivadas parciales de la función de intensidad magnética en las tres direcciones cartesianas, estas pueden obtenerse directamente del tratado de los datos o en el mejor de los casos de mediciones directas de gradientes en el levantamiento. De igual manera están presentes las coordenadas del punto en donde se mide el campo magnético  $(x, y)$  con  $z$  igual a cero y como incógnitas la ubicación de la fuente  $(x_0, y_0, z_0)$ . Adicionalmente, del lado derecho de la ecuación aparece el grado de homogeneidad  $N$ , similar a  $-n$  de la ecuación (9). Este índice puede verse como un indicador del grado con el que cambia un campo

potencial según la distancia (*en este caso el campo magnético*). Se le conoce a  $N$  como índice estructural (*SI, por sus siglas en inglés*) e indica el tipo de fuente que representa mejor la anomalía.

La siguiente tabla muestra la correspondencia entre modelos geológicos simples y el índice estructural  $N$  que mejor los representa (Reid, 1990).

Índice Estructural	Modelo Geológico simple
0	Contacto
0.5	Escalón grueso
1	Sill / Dique
2	Chimenea
3	Esfera

*Tabla 1. Estructura geológica que representa cada índice estructural.*

De la tabla (1) podemos ver que el campo magnético producido por una fuente esférica decae con la distancia a razón del inverso al cubo, correspondiéndole un índice de 3. Un caso especial es el de un contacto magnético, para el cual un índice igual a 0.5 conduce a una sobreestimación de la profundidad, aún cuando se prueba con modelos ideales (Reid, 1990). Thompson sugiere usar un índice menor y se introduce un término  $A$  de compensación en la ecuación de Euler de la siguiente forma:

$$(x - x_0) \frac{\partial \Delta B}{\partial x} + (y - y_0) \frac{\partial \Delta B}{\partial y} + z_0 \frac{\partial \Delta B}{\partial z} = A \quad (12)$$

donde  $A$  involucra la amplitud, y el echado. De esta manera se puede usar un índice estructural igual a cero para un contacto magnético.

La “Northwest Geophysical Associates (NGA)”, de igual manera presenta una tabla que relaciona, los índices estructurales con las fuentes que producen el campo anómalo. Tabla 2.

Para la mejor comprensión del método se analiza en primera instancia la forma en que se aplica la deconvolución de Euler en un perfil magnético, de ahí como se aplica el mismo método para un mapa de datos magnéticos.



Índice Estructural	Modelo Geológico simple
0	Dipolos aislados. Rocas magnéticas aisladas.
0.5	Lineamientos.
1	Líneas de dipolos magnéticos, fallas, fracturas.
1.5	Líneas de dipolos finitos, contactos, fallas.
2	Estructuras bidimensionales, diques, galerías bien delimitadas.
2.5	Estructuras cuasidimensionales en 2D, cuerpos de magnetización contrastante con respecto al medio que se extiende horizontalmente.
3	Cuerpos de volumen finito.

*Tabla 2. Índices estructurales de las recomendaciones de interpretación por "Northwest Geophysical Associates", Ángeles Cordero (2007)*

Para hacer el análisis en un perfil, hacemos que la coordenada horizontal transversal se haga cero, por lo tanto el gradiente en la dirección  $Y$  también será cero

$\left(\frac{\partial \Delta B}{\partial y}\right) = 0$  y tomamos como positivos los valores hacia abajo para la coordenada  $Z$ .

Para que sea válida la suposición que acabamos de hacer, deberíamos pensar en que la anomalía que analizamos es simétrica en la dirección transversa, de esta manera el gradiente en esa dirección sería cero, esto hace más válida la suposición. Entonces la ecuación (11) queda como:

$$(x - x_0) \frac{\partial \Delta B}{\partial x} - z_0 \frac{\partial \Delta B}{\partial z} = -N \Delta B(x) \quad (13)$$

si reordenamos los términos llegamos a

$$x_0 \frac{\partial \Delta B}{\partial x} + z_0 \frac{\partial \Delta B}{\partial z} = x \frac{\partial \Delta B}{\partial x} + N \Delta B(x) \quad (14)$$

Se hace claro que las únicas incógnitas presentes son  $x_0$  y  $z_0$ , que indican la ubicación de la fuente, su posición a lo largo del perfil y su profundidad

respectivamente, puesto que los gradientes pueden ser calculados de los datos. Por otro lado esta  $N$  que es un parámetro que puede variar de acuerdo a la zona de estudio, el tipo de anomalías encontradas y la clase de estructuras esperadas a profundidad. A  $N$  se le puede asignar cada uno de los valores mostrados en la tabla (2), lo que equivale a averiguar con que tipo de estructura geológica estamos tratando.

Si evaluamos la ecuación (14) en tres puntos a lo largo del perfil, tendríamos tres incógnitas y tres ecuaciones lineales independientes y el sistema de ecuaciones resultante tendría solución, sin embargo Thompson (1982) plantea tres causas por las que el método no funciona así para datos observados y las describe textualmente como sigue:

1. La mayoría de las anomalías, aún en el polo magnético, prefieren índices estructurales altos, es decir, son más dipolares en la naturaleza. Sin embargo, los índices estructurales mas bajos son mejores estimadores de profundidad.
2. El nivel absoluto del campo anómalo  $\Delta B$  es raramente conocido. Campos regionales debido a anomalías cercanas están casi siempre presentes.
3. En datos reales, las anomalías son raramente representados exactamente por fuentes puntuales.

Cuando la ecuación (14) se resuelve para las tres incógnitas  $x_0$ ,  $z_0$ , y  $N$  se sabe que a esta última le corresponde, en la mayoría de los casos, un valor alto como solución, también se sabe también que los índices estructurales altos no son tan buenos estimadores de profundidad como los mas bajos, por eso se vuelve una problemática para el método como se describe en el punto uno. La manera de resolverlo es la siguiente. En vez de encontrar la solución de  $N$  por medio de la evaluación de la ecuación (14) en el perfil magnético, se prefiere proponer el valor de ésta asignándole valores de índices estructurales predeterminados, como los de la tabla (2) y hacer un análisis visual de las soluciones obtenidas con cada índice estructural seleccionando como bueno aquel que muestre mayor agrupación de soluciones puntuales sobre el mapa. De esta manera puede forzarse al método a trabajar con índices estructurales bajos y obtener mejores estimaciones de profundidad.

Por otro lado el valor  $\Delta B$  de la ecuación (14) se refiere al campo anómalo de la fuente magnética que se trata identificar, sin embargo, muy frecuentemente el valor que se mide en campo es una suma de este campo anómalo y campos regionales  $B_0$  debidos a otras fuentes, por esta razón para darle solución al segundo problema, Thompson (1982) propone considerar que el campo observado esté perturbado por estos dos campos de tal manera que

$$B(x) = \Delta B(x) + B_0 \quad (15)$$

donde  $B_0$  es un campo de valor constante que perturba al campo anómalo a lo largo del perfil que está siendo analizado. Incluyendo estas suposiciones en la ecuación (14) se tiene que

$$x_0 \frac{\partial B}{\partial x} + z_0 \frac{\partial B}{\partial z} + NB_0 = x \frac{\partial B}{\partial x} + NB \quad (16)$$

Por último, si la ecuación (14) fuera evaluada en tres puntos a lo largo del perfil magnético se obtendría una solución para  $x_0$ ,  $z_0$  y  $N$ , a esta solución sería a lo que Thompson se refiere como fuente puntual por ser solo una, y como lo menciona en el punto tres, las anomalías magnéticas en realidad no son bien representadas por fuentes puntuales, así que propone crear un sistema de ecuaciones sobredeterminado evaluando la ecuación en cuatro o mas puntos sobre el perfil magnético, de esta manera la solución ya no es única sino que existe mas de una valor para cada incógnita si se trata de resolver el sistema. En general los sistema sobredeterminados no tiene solución, sin embargo puede utilizarse el método de mínimos cuadrados para resolver el problema encontrando una función de ajuste que no trata de satisfacer las ecuaciones del sistema, sino mas bien de asegurar la convergencia de la solución y resolver el problema de forma global.

Ahora, para el análisis del caso en 3D, debe tomarse en cuenta el nuevo término introducido, la ecuación (11) queda como:

$$(x - x_0) \frac{\partial B}{\partial x} + (y - y_0) \frac{\partial B}{\partial y} + (z - z_0) \frac{\partial B}{\partial z} = N(B_0 - B) \quad (17)$$

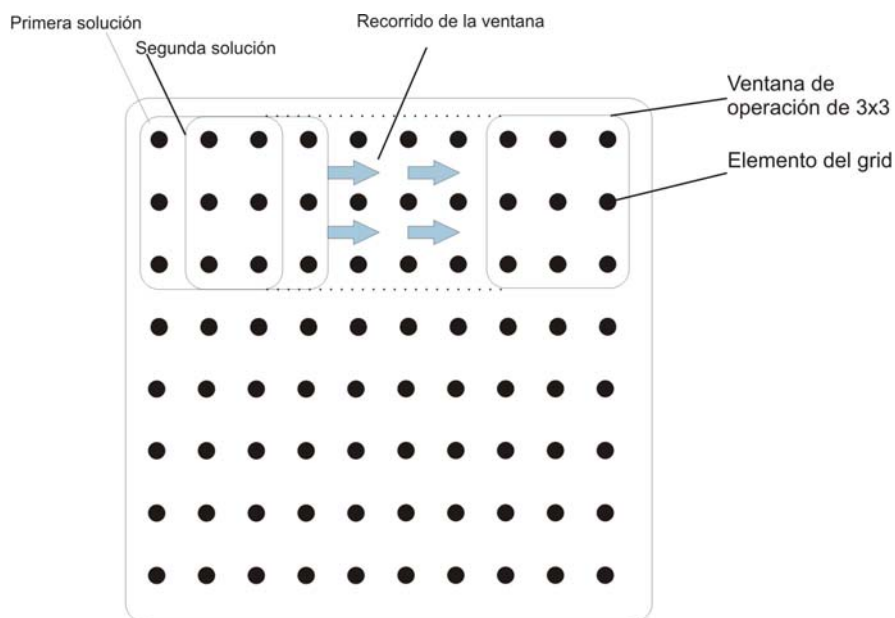
y el número de incógnitas asciende a cuatro. En este caso es necesario calcular en primer lugar las derivadas en las tres direcciones del sistema de coordenadas directamente del tratamiento de los datos levantados en campo. Enseguida seleccionar el tamaño de una ventana con la cual será evaluado el grid para obtener las soluciones esperadas.

La forma en que funciona el método es la siguiente. De la matriz principal se extrae una submatriz cuadrada (ventana de operación) de “n X n” elementos, los cuales serán evaluados cada uno en la ecuación (17). De cada ventana dentro de dicha matriz se armará un sistema de ecuaciones del cual se obtendrá una solución, debido a esta razón el tamaño de la ventana deberá ser de 3 x 3 por lo menos, así obtendremos un sistema de ecuaciones de 9 ecuaciones y 4 incógnitas, un sistema de ecuaciones sobredeterminado. Después de la evaluación, la ventana deberá moverse una celda de la matriz para obtener otro sistema de ecuaciones. Es fácil observar que en una nueva posición, la ventana presenta un traslape con respecto a la ventana en la posición anterior figura (25).

Como es de esperarse algunas de las soluciones obtenidas, después de que la ventana recorrió toda la matriz, presentan desviaciones estándar altas, de igual manera puede interpretarse como un error de estimación alto. Es necesario pues, eliminar las estimaciones con mayor incertidumbre del conjunto de soluciones resultante, toca al intérprete escoger el valor mínimo de porcentaje de error que usará para obtener resultados más confiables. Una vez separadas las soluciones no deseadas, será necesario graficar los resultados en un mapa; puede hacerse mediante algún símbolo, el cual estará ubicado en la posición  $(x_0, y_0)$ , obtenida por la deconvolución de Euler, y algún indicador del valor de la profundidad  $z_0$ , en la mayoría de los casos suele variarse el tamaño del símbolo usado junto con una escala asociando la profundidad del tamaño del símbolo con la profundidad de la fuente.

Debe de tenerse en mente dos aspectos importantes cuando se elija el tamaño de la ventana que va a ser usada. En primer lugar, el tamaño de ésta debe ser lo suficientemente pequeña como para no incluir efectos debidos a fuentes múltiples, sin embargo debe tenerse precaución ya que las anomalías de longitud de onda grande

debidas a fuentes profundas no son bien representadas por ventanas chicas. Lo mejor es probar para distintos tamaños de ventanas y quedarse con la que ofrece resultados más satisfactorios, Reid (1990) sugiere el uso de una ventana de 10x10 elementos de grid por que es relativamente rápido y ofrece buenos resultados.



*Figura 25. Ventana de operación de 3x3 unidades de matriz. Con una ventana de este tamaño el sistema de ecuaciones generado es de 9 ecuaciones, la cual genera una solución y avanza una unidad de matriz para generar otro sistema de ecuaciones, así hasta cubrir la matriz completa.*

### 4.2 Aplicación del método 3D.

A diferencia de Thompson (1982), Reid (1990) trabaja con datos que no han sido reducidos al polo, él advierte que no es necesario hacer la reducción puesto que los resultados son independientes de la dirección del campo magnético. A partir de esta afirmación, el método de deconvolución de Euler adquiere mayor importancia puesto que puede ser empleado en zonas cercanas al ecuador donde el campo geomagnético posee una dirección casi horizontal. Por otro lado también puede ser utilizado en aquellas zonas donde existe el magnetismo remanente, uno de los principales retos en el problema de inversión.

En este trabajo, se utilizó el mapa de Intensidad Magnética Total (IMT) para aplicar el método. Junto con este mapa, es necesario tener listos los mapas de las

derivadas horizontales y de la derivada vertical, además de especificar el tamaño de la ventana inicial, un índice estructural, que podemos obtener de la tabla (2), el porcentaje de tolerancia máximo para los resultados de la estimación de la profundidad y la máxima distancia que se aceptará para la ubicación de las posibles fuentes o radio de búsqueda. El siguiente diagrama, que será descrito mas abajo, muestra la manera en que fue aplicada la deconvolución.

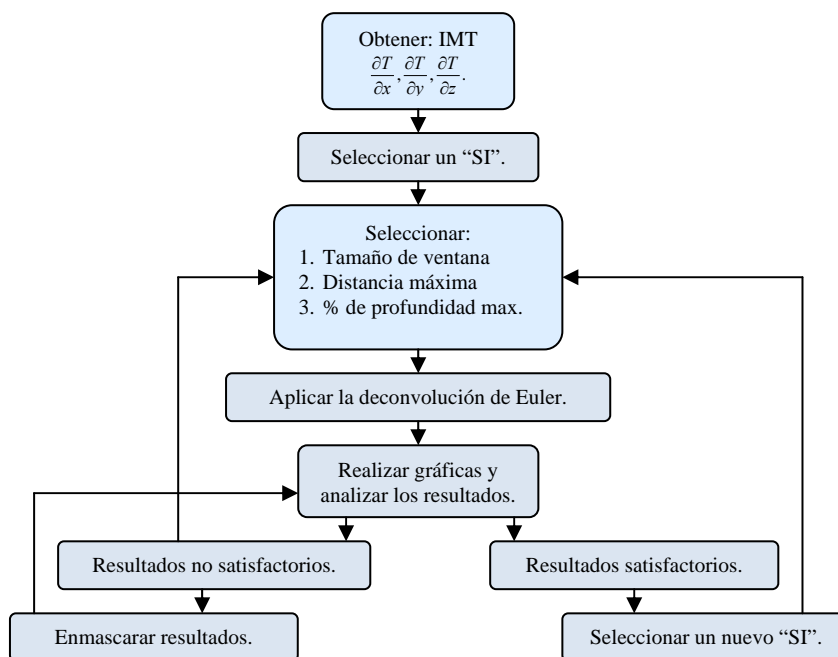


Figura 26. Diagrama de flujo que del proceso de la deconvolución de Euler en 3D.

Una vez que obtengamos el grid de IMT, y las derivadas de los datos magnéticos, podemos seleccionar el primer índice estructural. Para cada uno de ellos se podrán observar distintas estructuras que generan las anomalías magnéticas de la zona.

El tamaño de la ventana puede ser seleccionada en un principio de 10 X 10 unidades de grid, como lo recomienda Reid (1990). En este caso, la ecuación de Euler será resuelta en 100 puntos del mapa, de donde se obtendrá una solución para la posición de la fuente y su profundidad. Cuando el tamaño de la ventana es más grande, el cálculo del algoritmo se hace más lento, de cualquier manera, el tamaño de la ventana debe variarse, de tal manera que podamos analizar distintos resultados para un mismo índice estructural.

En el caso del valor de la distancia máxima de la fuente, no es muy necesario buscar un valor adecuado, queda a criterio del intérprete elegir la distancia óptima a la que esperamos encontrar la fuente, la decisión correcta depende mucho de la experiencia que se tenga en la interpretación de datos magnéticos. Debe quedar claro que esta distancia se define a partir del centro de la ventana de operación hacia fuera en el plano XY. Como se mencionó anteriormente, los depósitos VMS son chicos en general y de alta ley minera, por lo que una ventana de 400 [m] se considera suficiente como para cubrir el depósito mineral. Cerro Blanco se encuentra dentro del mismo distrito minero de San Nicolás donde el cuerpo mineral no sobrepasa las dimensiones de la ventana que se propone.

La solución del sistema sobredeterminado de ecuaciones por el método de mínimos cuadrados genera una estimación de error de la solución, el método de Euler ofrece una solución por cada ventana que se evalúa, por lo tanto una estimación de error. Este error puede ser utilizado como un parámetro discriminatorio dentro de la técnica de Euler, si el error es pequeño para una solución, ésta puede ser considerada como buena, si por el contrario, el error es grande la solución puede ser omitida. Le toca al intérprete elegir el valor de tolerancia hasta el cual pueda considerarse como pequeño el error y a partir del cual se considera grande, para este último caso, las soluciones serán omitidas. Entre mas chico sea el valor de tolerancia, menos soluciones serán tomadas como buenas dentro del proceso. Por lo tanto, puede ser conveniente iniciar con un valor no muy bajo de tolerancia de error, por ejemplo de 15 %, esto significaría el rechazo de aquellas soluciones en las que el error porcentual resultante del proceso es más grande que 15%. Siendo más estrictos puede seleccionarse un valor de 10% lo cual ofrecería una cantidad menor de soluciones, es por eso que tolerancia de error es un parámetro discriminatorio. El valor que ofreció mejores resultados en esta tesis fue de 10 %. Con este valor se observa un número adecuado de soluciones que permiten distinguir patrones de comportamiento estructural dentro del mapa, a diferencia de un valor mas alto de tolerancia de error, con lo cual se muestran demasiadas soluciones en el mapa, favoreciendo un aglutinamiento de estas y dificultando el reconocimiento de las estructuras geológicas.

Una vez que definidos los valores de los parámetros a utilizar, puede efectuarse la deconvolución de Euler. Este proceso puede ser repetitivo si es que no satisfacen los primeros resultados, como lo muestra el diagrama de la figura (26). Un paso que no se ha descrito de la parte baja del diagrama, es el enmascaramiento de resultados. Como se dijo anteriormente, hay algunos parámetros que discriminan resultados. Es muy común que después de efectuar el proceso por primera vez, haya demasiadas soluciones en el mapa, esto quiere decir que la elección de los valores de los parámetros discriminatorios no fue lo suficientemente estricta. Será necesario reducir la tolerancia considerada, para lo cual no es necesario efectuar nuevamente la deconvolución. Sino cambiar la manera en que el software despliega el mapa de soluciones. Por ejemplo, si efectuamos el algoritmo de deconvolución con los parámetros iniciales de porcentaje de porcentaje de error menor a 15% y un radio de búsqueda de 400 metros y obtuvimos un mapa no satisfactorio con demasiadas soluciones, pueden enmascarse soluciones indicándole al programa que solo muestre aquellas soluciones que tengan valores menores a 7% de porcentaje de error y 300 m de radio de búsqueda, de esta manera se obtiene un mapa con soluciones mas certeras. Si este no es el caso, puede volver a efectuarse la deconvolución con nuevos parámetros como lo indica el mismo diagrama.

Las figuras 27, 28, 29 y 30 muestran los resultados obtenidos con los parámetros antes mencionados. Dentro de los mapas, se muestra la escala gráfica de colores que indica la profundidad de cada solución que se encontró para cada índice estructural. La posición del círculo indica la posición de la solución encontrada, y su tamaño aumenta conforme lo hace la profundidad, de igual manera se representan intervalos de profundidad por medio de colores, siendo el azul el índice más profundo y el rojo el más somero.

Las anomalías seleccionadas en el capítulo anterior deben estar presentes en los mapas de las soluciones de Euler. Se procurará identificarlas al mismo tiempo que obtenemos información de su profundidad y el tipo de estructura geológica a la que se asocia.

Las soluciones de Euler para la anomalía “A” pueden apreciarse en los mapas correspondientes a los “SI” igual a 0.5, 1, 1.5 y 2, (figuras 27 28 y 29), ubicadas



siempre al este de las coordenadas (780000, 2545000). Con SI igual a 0.5 las soluciones para esta anomalía se muestran dispersas y conforme se aumenta el SI se agrupan de una forma mas cerrada. Cuando se hace el proceso para el SI igual a 2 se alcanza la agrupación mas cerrada de las soluciones. No existen soluciones para los SI de 2.5 y 3. Se concluye que las soluciones de Euler válidas para la anomalía “A” corresponden al SI igual a 2.

Según la conclusión anterior, el mapa que revela la profundidad del cuerpo de la anomalía “A”, es el de la figura 29a correspondiente al SI de 2. Los puntos que representan las soluciones tienen un color verde, que corresponden a una profundidad de 120 m según la tabla de colores. Una profundidad más exacta se puede obtener de la base de datos donde se concentran las soluciones creadas por el programa. Como se mencionó anteriormente los colores son para una referencia rápida a la hora de observar el mapa. Las profundidades obtenidas de la base de datos se resumen en la tabla 3 para cada anomalía.

La anomalía “A” es de las más interesantes por contener los valores de intensidad magnética más altos. Se tienen antecedentes de la existencia de minas dentro de la misma provincia que Cerro Blanco, con altos contenidos de pirrotita causante de los altos valores magnéticos.

Como se comentó dentro de la geología de este tipo de yacimientos, puede estar o no presente la pirrotita, en caso de que no estuviera presente, las anomalías debidas al yacimiento no serían de intensidades magnéticas tan altas, en cambio, sí lo serían en las zonas donde hay intrusivos como en el extremo suroeste del bloque completo de Cerro Blanco, donde se localiza un gabro. La escala de colores dentro del mapa debía ser tan amplia para contener los valores generados por el intrusivo, es decir, el rango de valores de intensidad magnética sería grande, favoreciendo a que los contrastes pequeños dentro

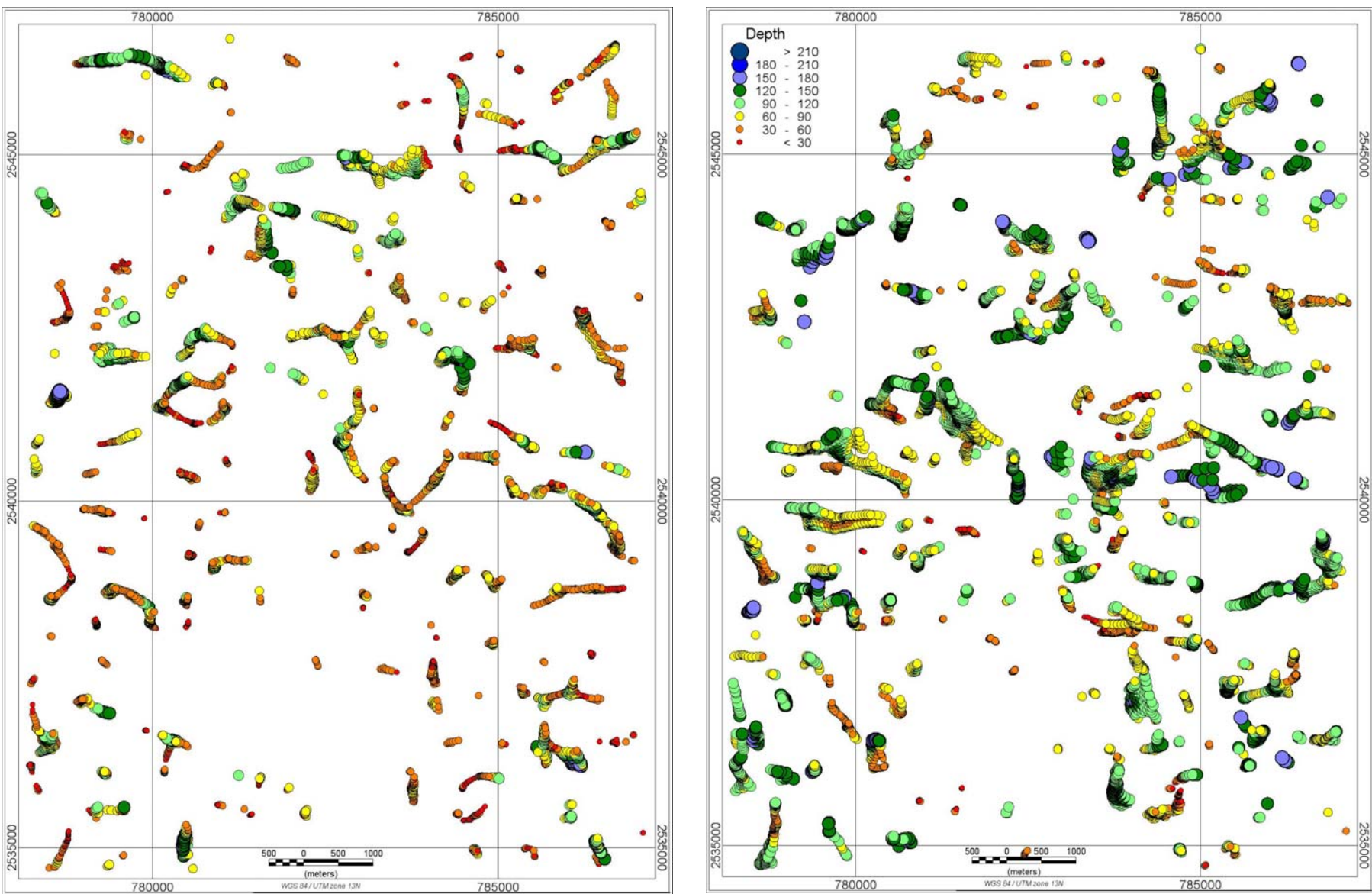


Figura 27. Mapa de las soluciones de la deconvolución de Euler (a) con "SI" igual a 0, (b) con "SI" igual a 0.5.

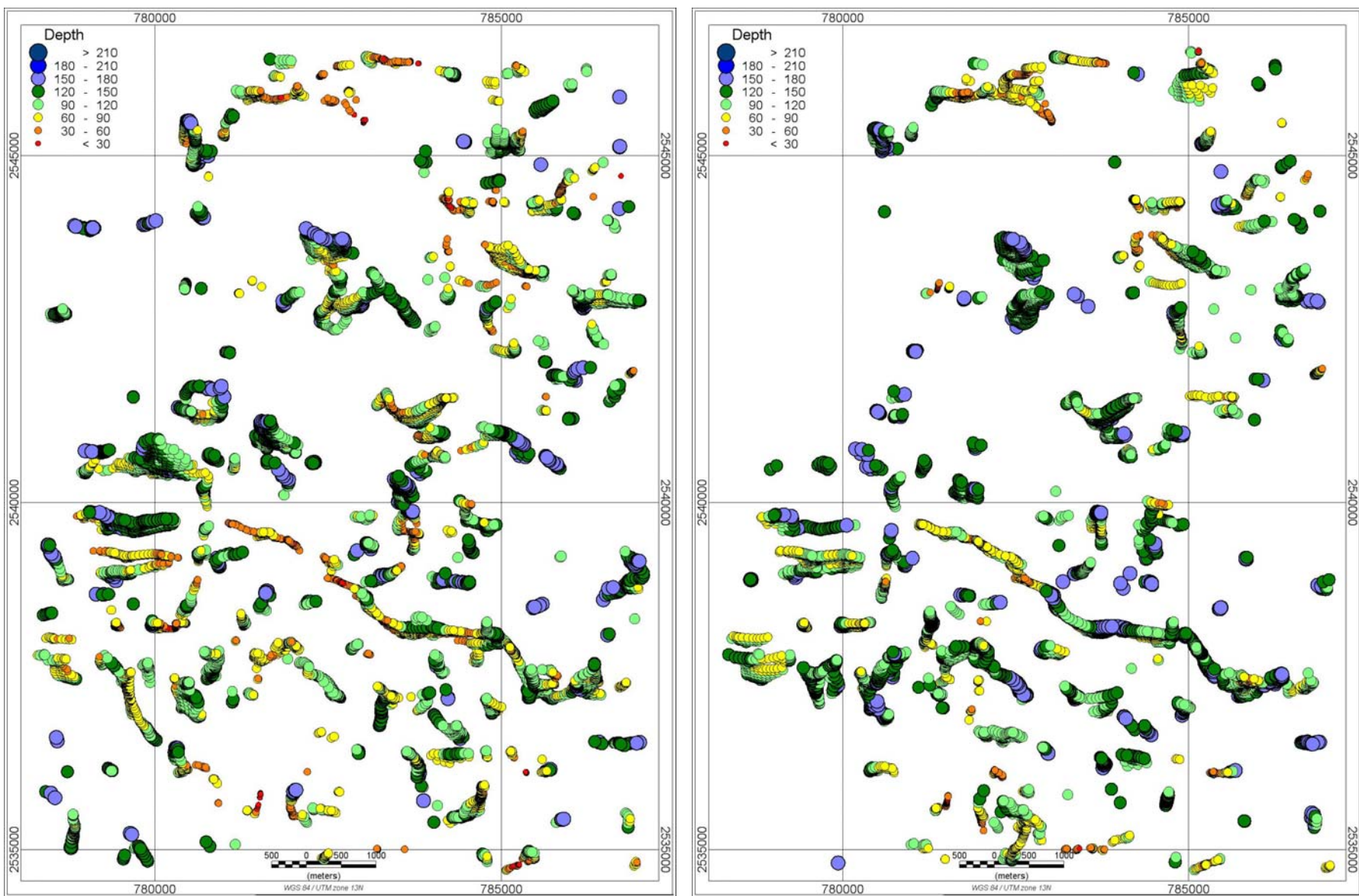


Figura 28. Mapa de las soluciones de la deconvolución de Euler (a) con "SI" igual a 1, (b) con "SI" igual a 1.5.

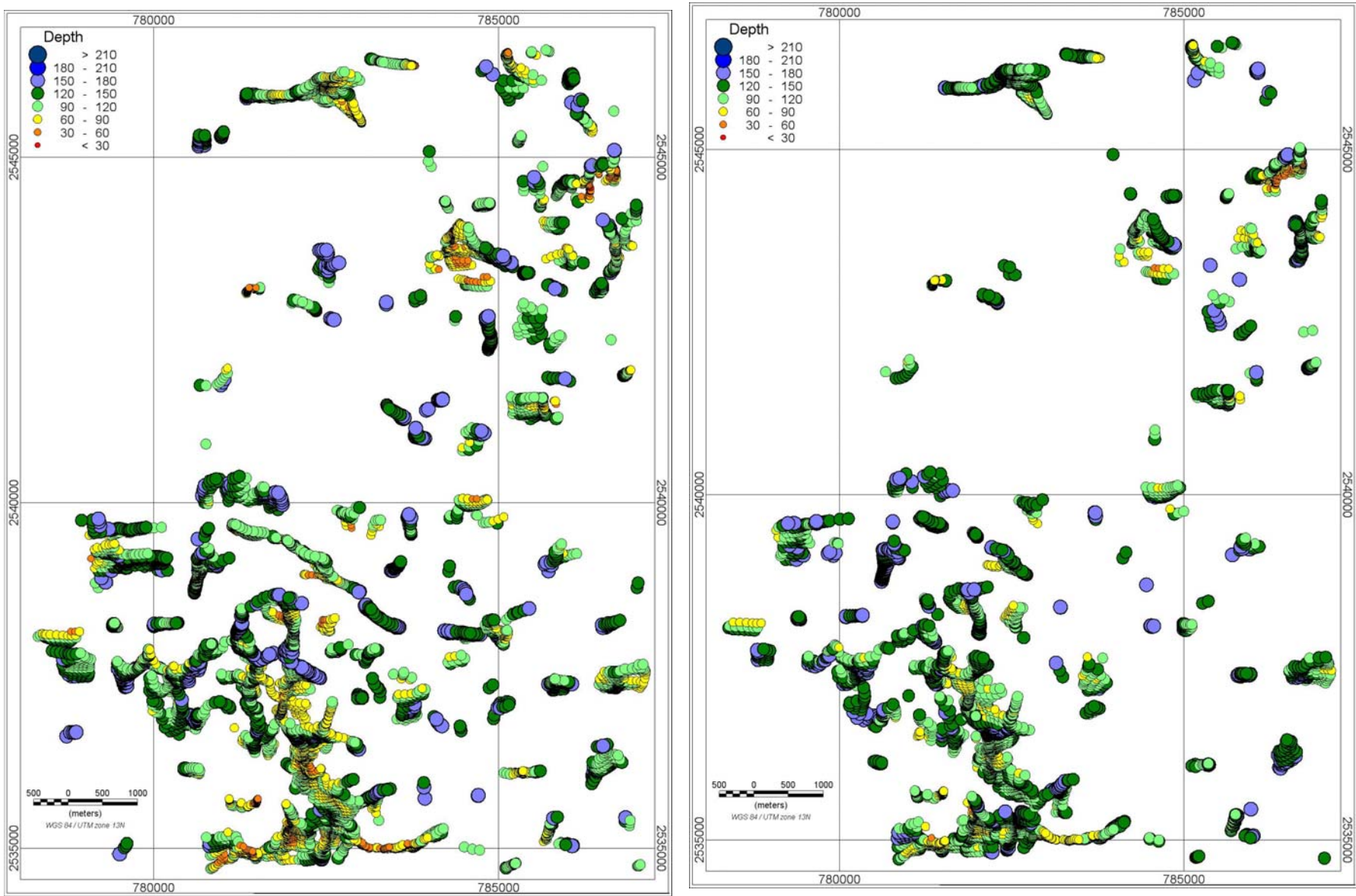


Figura 29. Mapa de las soluciones de la deconvolución de Euler (a) con "SI" igual a 2, (b) con "SI" igual a 2.5.

del mapa no se aprecien con tanta facilidad. Es este el motivo por el cual se eliminó la parte sur del mapa, para evitar enmascarar contrastes pequeños, que serían de interés si el depósito VMS no contuviera pirrotita

Sucede algo similar con la anomalía “B”, a partir del SI 0.5 se observan soluciones en los mapas. Como en el caso anterior, la dispersión de las soluciones es mayor para los índices estructurales bajos. Se observa la menor dispersión para el SI igual a 2.5. Los colores de las soluciones son más variables para aquellos SI con mayor dispersión. Como muestra la figura 29b el cuerpo tiene una orientación prácticamente este-oeste y su profundidad es de 100 m. Esta profundidad es una estimación a partir de la tabla de colores, puesto que las soluciones son algunas verde oscuro y otras verde claro, correspondientes a las profundidades de 120 y 90 m respectivamente.

Es un poco más difícil apreciar las soluciones para la anomalía “C”. Al parecer se presentan en dos partes, para la sección norte de esta anomalía las soluciones están presentes en el mapa de SI igual a 1, (figura 28a). Se observa una línea de soluciones con la misma dirección que la anomalía en el mapa de reducción al polo (figura 23). Los colores presentes en las soluciones son varios, no indican una sola profundidad.

Hay soluciones que van de 60 a 120 metros de profundidad. Podemos decir entonces que lo que se consideraba como una sola anomalía resultaron ser dos. La parte que acabamos de analizar se refiere a una fractura y es la porción norte de la anomalía original “C”. Las soluciones que revelan la posición y profundidad de la porción sur de la anomalía están presentes en la figura 29b y corresponden a un SI de 2.5. Claramente se observa que siguen la tendencia de arco en la parte sur del mapa. El agrupamiento de las soluciones no es muy cerrado pero se alcanza a ver la orientación de la anomalía “C”. La profundidad de esta estructura está estimada en 120 metros aproximadamente.

Para la anomalía “D” encontramos soluciones a partir de la figura 29a, SI de 2, 2.5 y 3. En los tres mapas se aprecia un aglutinamiento de soluciones en la zona sur central que no dejan apreciar estructuras bien delimitadas. Sin embargo se puede ver una baja tendencia de las soluciones a alinearse en dirección NW-SE. El mapa en donde se encuentran las soluciones más concentradas (figura 29b) corresponde a un SI de 2.5. La

profundidad de la estructura es de 100 m, según la escala gráfica y por el valor del índice estructural indica la presencia de un dique.

Hay un grupo de soluciones muy evidentes que revelan la presencia de una falla en el mapa correspondiente al SI igual a 1.5, y corresponden a la anomalía “E”. El mapa de soluciones revela que la estructura es más extensa de que aparenta ser en el mapa de reducción al polo y señal analítica. Según esto, la estructura tiene una longitud de 6300 metros aproximadamente y se extiende hacia el sureste. Al igual que la mayoría de las estructuras geológicas, las soluciones de esta están presentes en varios de los mapas, sin embargo es muy evidente que 1.5 es el índice estructural que le corresponde a la anomalía. Las soluciones revelan que la profundidad de la estructura varía a lo largo del mapa, siendo la parte oeste la más somera con 60 m de profundidad y la parte este la más profunda alcanzando los 120 m.

Las soluciones para la anomalía “F” se encuentran al noroeste de la intersección de las coordenadas 785000, 2540000. Cuando se hizo el análisis de esta anomalía en el mapa de reducción al polo (figura 23), se había propuesto la opción de que la parte norte (cuya intensidad magnética es más alta que los alrededores) fuera independiente de la parte sur. En este caso la parte sur formaría parte de un arco que se extiende hacia el este. Los resultados de la deconvolución de Euler apoyan esta teoría. En la figura 28b se observan las soluciones para la parte norte de la anomalía “F”, muestra una profundidad de 120m. El arco se observa mejor en el mapa 28a con un índice estructural de 1, aunque la agrupación de las soluciones no es muy cerrada. La profundidad asociada es también de 120 m. En todo caso las soluciones para esta anomalía están indicando la presencia de estructuras del tipo fallas y fracturas.

En el análisis de los resultados del proceso de señal analítica (figura 24), se identificaron tres anomalías que no se habían definido en el mapa de reducción al polo. Las soluciones mejor agrupadas para “G” están en el mapa 29b, debajo de la intersección 785000,2545000, dentro del cuadrante central. Las soluciones sugieren un tipo de estructura como la de la anomalía “A” según el SI igual a 2.5. Este tipo de estructuras son la de interés minero en el caso de esta tesis, y según la escala gráfica, la profundidad es de 120 m, al igual que para “A”.

Para “H” el grupo de soluciones están en el mapa de SI igual a 1 (figura 28a). Esta agrupación es muy cerrada en comparación con todas las que se han analizado hasta ahora. Hay presencia de soluciones para esta anomalía en el mapa de SI igual 0 (figura 27a), se muestra un arco de soluciones cuyas posiciones corresponderían con los límites del cuerpo que genera a la anomalía “H”. Debido a la mejor agrupación de las soluciones en 28a el SI que le corresponde a la estructura geológica es 1 y la profundidad estimada es de 90 m.

También es un poco difícil identificar las soluciones para “I”. El mapa 27a muestra la solución como un contacto magnético de poca profundidad. Sin embargo la mejor agrupación se encuentra en el mapa 28b son SI igual a 1.5. Lo cerrado de la agrupación hace ver como si fuera solo un punto verde aislado, aunque en realidad hay seis soluciones perfectamente una encima de otra. La profundidad que indican es de 120 m.

Anomalía	SI que ofrece mejor solución	Profundidad estimada	Estructura	Ubicar en figura
A	2	148	Lenticular	29a
B	2.5	110	Lenticular	29b
C	2.5	95	Arco Volcánico	29b
D	2.5	106	Dique	29b
E	1.5	43-135	Falla	28b
F	1	67	-----	28a
G	2.5	106	Estratiforme	29b
H	1	120	-----	28a
I	1.5	150	-----	28b

**Tabla 3. Resultados de la interpretación de las soluciones de Euler para las anomalías planteadas a partir de Reducción al Polo y Señal analítica. El tipo de estructura se obtuvo con la ayuda del índice estructural que mejor representa a la anomalía.**

Hay una gran cantidad de soluciones presentes en los mapas que no corresponden a las anomalías seleccionadas. Todas ellas corresponden a una anomalía magnética generada por un cuerpo en el subsuelo y no fueron analizadas por considerar que son tan ilustrativos como las mostradas. La figura 29b muestra las soluciones de la deconvolución de Euler sobre el mapa RTP para todos los índices estructurales. Se muestran contornos de distintos colores para distinguir entre los índices estructurales

utilizados. Esta figura muestra la estrecha relación de las soluciones con el mapa original, de donde se clasificaron las anomalías. Puede observarse que, en algunos casos, la posición de las soluciones difiere un poco de la posición de las anomalías. Además encontramos soluciones en donde el mapa de RTP no revelaba la presencia de un cuerpo. Esto último puede deberse al alto rango de la escala de colores utilizada para crear el mapa.

Con base en los resultados obtenidos, podemos citar a las anomalías “A”, “B” y “G” como de real importancia por sus altos niveles magnéticos, y por que sus índices estructurales sugieren algún tipo de cuerpo horizontal que puede asemejarse a las estructuras estratiformes o lenticulares característicos de los depósitos de sulfuros masivo volcanogénicos.

Conviene hacer un análisis del mismo método sobre tres perfiles magnéticos que cubran por completo cada una de las anomalías. Se trazaron tres perfiles sobre el mapa (figura 30b), los perfiles reciben el nombre que lleva la anomalía que cubren. Se hizo el muestreo de datos a cada 20 metros a partir del mapa de IMT y RTP. Todos tienen una dirección Norte-Sur con 2 km de extensión.



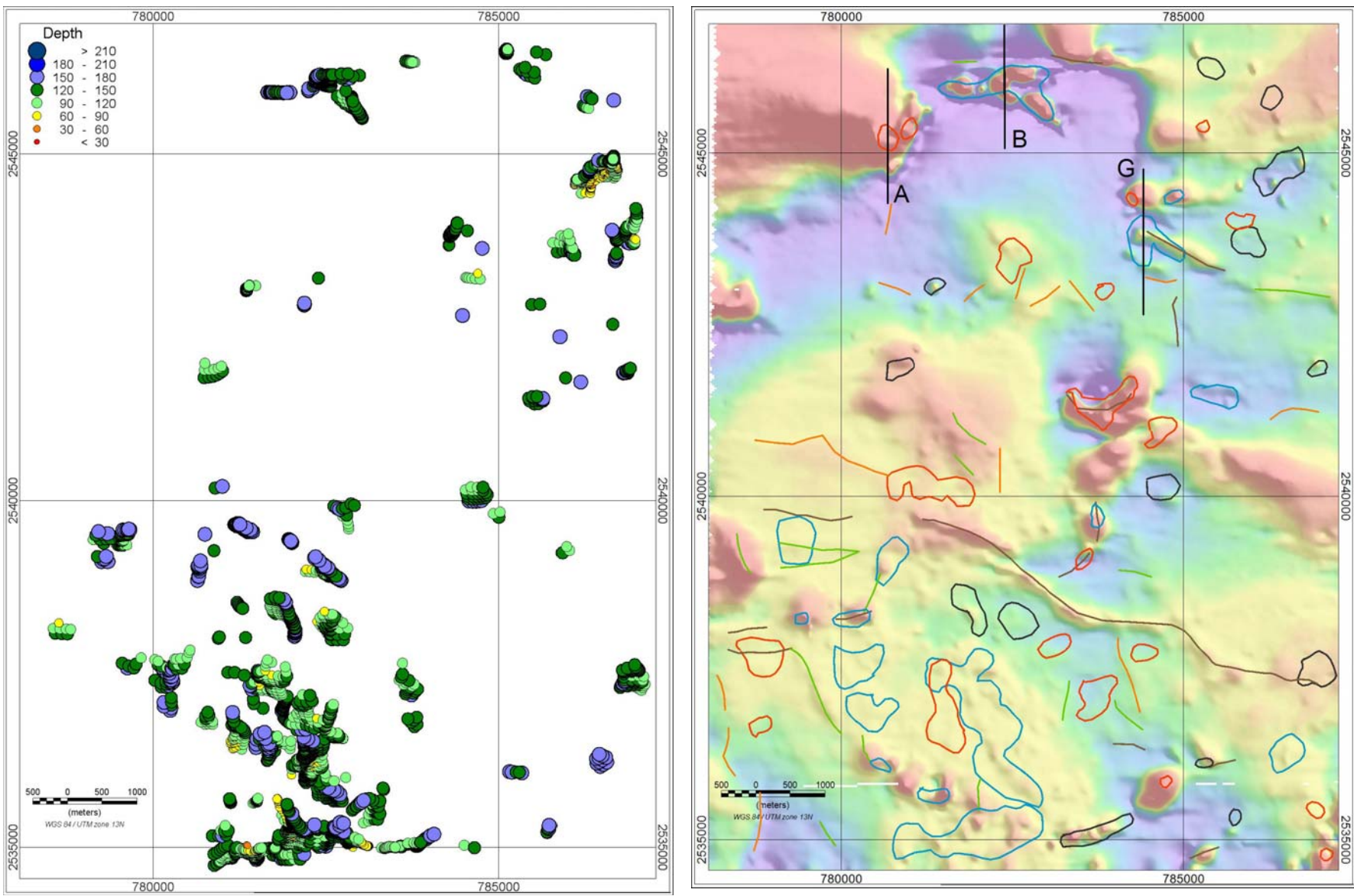


Figura 30. (a) Mapa de las soluciones de la deconvolución de Euler con "SI" igual a 3. (b) Delimitación de las soluciones de Euler sobre el mapa de Reducción al Polo.

### 5.3 Aplicación del método en 2D y modelado directo.

La técnica de deconvolución de Euler se aplicó sobre los perfiles con el software “Euldep” V. 1.15. Las figuras 31, 33 y 35 muestran los resultados. En la parte superior de cada perfil, se puede ver la curva de Intensidad Magnética Total (negro) y Reducción al Polo (rojo), en la parte central se muestran los gradientes que utiliza el software para aplicar el algoritmo, Gradiente Horizontal (negro) y Gradiente Vertical (rojo). Ahí mismo se indica, con una línea azul, la porción del perfil en donde se encontraron las soluciones de Euler con el proceso en 3D (figura 30b). En la parte inferior se hallan las ubicaciones de las soluciones de la deconvolución de Euler para los índices estructurales 0 (negro), 0.5 (rojo), 1.5 (azul), 2 (morado) y 2.5 (verde).

Una vez que se tienen las soluciones de Euler sobre un perfil se bosqueja un modelo geológico simple, como se hizo para los perfiles A, B y G (figuras 31, 33 y 35). Si estos modelos son introducidos a un software de modelado directo, debería obtenerse una curva de intensidad magnética total calculada muy similar a la curva de intensidad magnética total medida.

Con el fin de complementar los modelos basados en las soluciones de Euler, se ingresaron a un software de modelado directo: “MAGCAD”. El programa usa una adaptación del algoritmo desarrollado por I. J. Won (1987), en donde se hace el cálculo para cuerpos poligonales de hasta 33 vértices.

Las curvas calculadas a partir de los modelos ingresados se comparan con las curvas originales (figuras 32, 34 y 36). A partir del cálculo de la respuesta magnética del modelo se hace un ajuste de las dimensiones de los cuerpos, en consecuencia, la curva de respuesta magnética es recalculada por el programa. Este procedimiento se repite cuantas veces sea necesario de tal forma que se alcance el mejor ajuste posible de las curvas calculadas con la curva medida.

Los modelos obtenidos a partir de las soluciones de Euler no mostrarán aquellos cuerpos cuyas dimensiones sobrepasen el tamaño de la ventana utilizada para la

## V. DECONVOLUCIÓN DE EULER

deconvolución. Por lo tanto puede suceder que la curva calculada por MAGCAD no ajuste completamente por la falta de estos cuerpos.

En los modelos geológicos ingresados a MAGCAD se infirieron elementos de tal manera que la curva calculada tuviera el mejor ajuste. Se trató de apegarse lo mayormente posible a la realidad ya que no se cuentan con perfiles geológicos de la zona.

Para la deconvolución de Euler del perfil A (figura 31) se utilizó una ventana de 300 metros y se aceptó 1000 metros como profundidad máxima. El índice estructural que mostró mejores resultados fue 2, el mismo que en 3D. En cuatro puntos se encontraron soluciones aglutinadas que indican la presencia de dos fuentes.

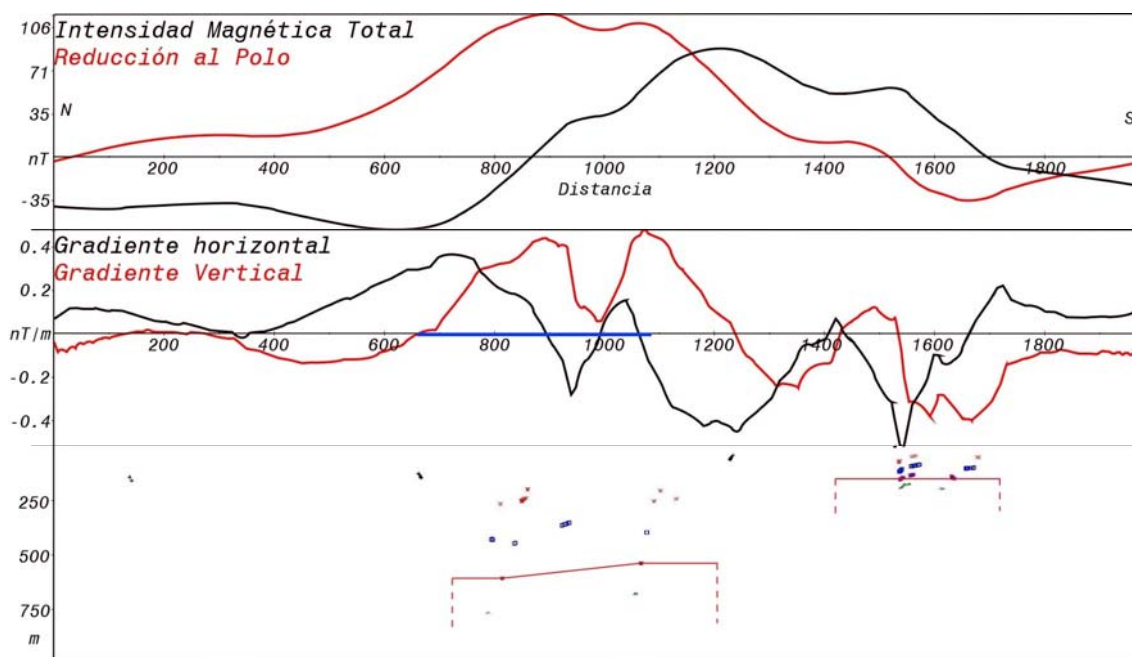


Figura 31. Resultados de la deconvolución de Euler en 2D para el perfil A.

Se logró obtener un modelo simple de la fuente (figura 31). Uno de los cuerpos corresponde en su mayor porción con la ubicación de la misma fuente en 3D (línea azul), además de mostrar una estrecha relación con la curva de Reducción al Polo. Por las dimensiones y la profundidad se podría pensar en un cuerpo intrusivo. La forma de la curva IMT (negro) no muestra una curvatura constante lo que hace pensar en la presencia de otro cuerpo cercano que no podemos visualizar por las limitaciones del método.

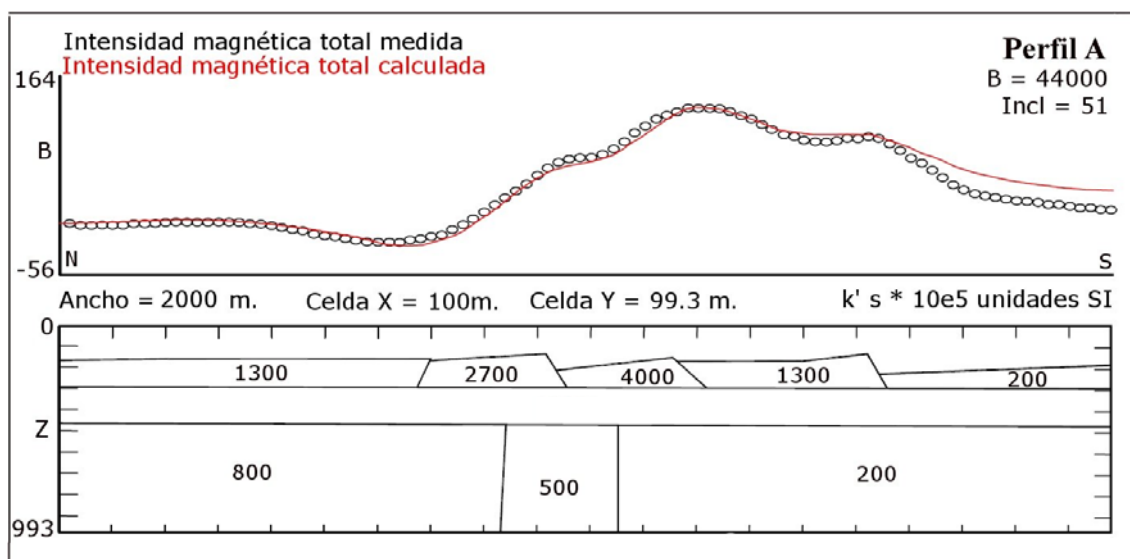


Figura 32. Modelado directo para el perfil A.

El cuerpo ubicado mas al sur esta a una profundidad de 120 metros y es un cuerpo mas pequeño. En el mapa de Reducción al Polo (figura 30) se puede ver la presencia del alto magnético en esta zona, sin embargo, el proceso en 3D no reveló la presencia de un cuerpo en este lugar. La razón puede deberse a que un tamaño de ventana de 400 metros, como el que se utilizó en 3D, puede resultar demasiado grande en algunos casos, ocasionando que dentro de la misma ventana haya mas de una fuente y el algoritmo lo tome como si fuera una sola.

La figura 32 muestra el modelo obtenido con MAGCAD. La forma en que se llegó el fue la siguiente. En primer lugar se ingresó el cuerpo mas profundo de los dos propuestos con las soluciones de Euler tomando en cuenta la profundidad y posición de las soluciones con respecto al perfil. Como no se sabe nada acerca de los cuerpos adyacentes a este, se propone la configuración mostrada. Una limitante importante en este punto es que no se conoce indicio alguno acerca del valor de susceptibilidad magnética ( $k$ ) de los cuerpos. La única forma en que puede procederse en este caso es haciendo referencia del tipo de roca esperada en el perfil y consultando en las tablas elaboradas a partir de mediciones directas a diversos tipos de rocas. En este trabajo se hizo referencia a las tablas de susceptibilidad magnética publicadas por Hunt *et al* (1995). Las susceptibilidades presentadas en cada modelo se encuentran dentro de los rangos establecidos por estas tablas.

La selección adecuada de  $k$  para estos tres primeros cuerpos debe dar un ajuste de la curva calculada (línea continua roja) aproximado a la curva medida en campo (círculos alineados en negro) sobre todo en los extremos del perfil (figura 32). La introducción de los cuerpos más someros hace que el ajuste de las dos curvas se complete.

La profundidad del cuerpo que va desde los 1200 m hasta los 1500 m sobre el perfil corresponde 120 m según la solución de Euler, a partir de esta misma profundidad se infirieron los cuerpos adyacentes. Puede notarse que la solución de Euler (figura 31) coincide con el vértice derecho del cuerpo mencionado. El espesor que se manejó para estos cuerpos fue deducido a partir del mejor ajuste de la curva y la capa que subyace a estos cuerpos fue inferida a partir del espacio que quedaba entre los cuerpos someros y el intrusivo. De igual manera la susceptibilidad de esta capa fue obtenida del mejor ajuste de la curva.

A partir de la configuración del modelo y de las susceptibilidades magnéticas de lo cuerpos puede proponerse la naturaleza de algunos de los cuerpos presentes. Aparentemente el cuerpo central es un intrusivo de composición ácida. Por la susceptibilidad de la capa que sobreyace pudiera tratarse de la riolita marina que se cree que subyace a los depósitos minerales que se buscan y la capa más somera sería la roca que los encajona de naturaleza vulcanosedimentaria.

La técnica de deconvolución de Euler no pudo revelar la presencia de los cuerpos centrales más someros. Esto se debe a una gran limitante que tiene esta técnica y que se mencionó antes. La ventana de operación con la que se hace el barrido a lo largo del perfil siempre asume la presencia de una sola fuente. Cuando la ventana de operación pasó sobre el cuerpo intrusivo tenía dos fuentes presentes: el intrusivo y el cuerpo o cuerpos someros, el algoritmo no puede distinguir esto y arroja la solución como si la anomalía fuera generada por un solo cuerpo. En este caso en específico debe tenerse mucho cuidado con los resultados obtenidos y tener presente esta limitante cuando se haga la interpretación.

Sin la presencia de los cuerpos someros centrales a los que nos hemos estado refiriendo la curva calculada no se ajusta a la curva medida en campo. Por esta razón se sabe que hay fuentes en esa parte del perfil que no son reveladas por Euler. Es mas, es muy probable que la configuración espacial que se esta proponiendo específicamente para estos cuerpos no sea la correcta, puesto que la variación lateral de la susceptibilidad magnética en esta zona deja mucho que desear, pero esta es la manera mas conservadora de darles su lugar y ajustar la curva, ya que no se cuenta con ningún dato acerca de su naturaleza, sus dimensiones, profundidad o composición mineral. Podría ser que sean más someros o que sean de un espesor muy grande... no se sabe. Las soluciones pueden ser varias en esta parte del perfil ya que muchas configuraciones de estos cuerpos pueden resultar en la misma curva de intensidad magnética calculada con un modelado directo.

En este perfil magnético no hay evidencias de la presencia de los cuerpos lenticulares que se buscan.

Para el perfil B se uso una ventana de 240 metros (figura 33). Se ven tres grupos de soluciones centrales en donde están localizados los vértices superiores del modelo logrado. Es claro que el mejor agrupamiento de soluciones corresponde al índice estructural 2 (morado) y en algunos casos 2.5 (verde). Son cinco los cuerpos inferidos a partir de las soluciones obtenidas. Las profundidades de los cuerpos son de 147, 94, 158, 117 y 123 metros de Norte a Sur. Por la profundidad a la que se presentan resulta factible la presencia de alguno de los cuerpos que se buscan, ya que coincide con la profundidad promedio esperada por los geólogos encargados de la zona.

Se hizo que los límites horizontales de los cuerpos coincidieran con los cambios de la curva de gradiente horizontal debido a que se sabe que hay una relación entre estos dos factores.

Los cuerpos propuestos no pasan de 200 metros de longitud. El cálculo de profundidad que hizo la deconvolución de Euler en 3D de la fuente (línea azul) fue de 110 metros, es decir muy aproximado al valor que se obtuvo en 2D. Puede observarse un ligero desfase de los cuerpos con respecto a la línea azul y hay dos cuerpos que no

fueron identificados en 3D además de que con el primer proceso se identificó una sola fuente y no se notó la diferenciación que este perfil muestra.

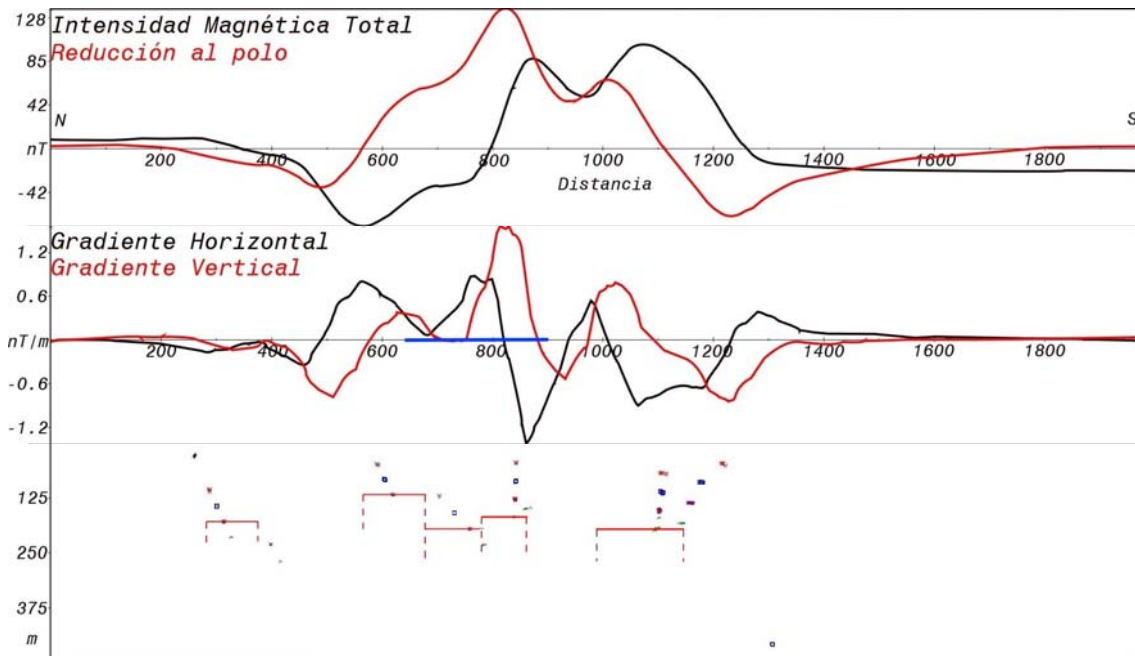


Figura 33. Resultados de la deconvolución de Euler en 2D para el perfil B.

Con los valores de profundidad para los cuerpos propuestos en la figura 33 se construyó el modelo para el perfil B (figura 34). Para la elaboración de este perfil se procedió de manera muy similar al anterior. Primero se trató de ajustar el nivel de los extremos del perfil “background” y después se ajustó la curva con los cuerpos revelados por Euler.

En este perfil es evidente la presencia de un cuerpo de susceptibilidad magnética alta con dimensiones muy favorables para ser uno de los cuerpos objetivo. Se encuentra en los 800 m del perfil de norte a sur, alojado entre dos capas de un espesor muy similar al suyo, aproximadamente 40 m. Tiene una dimensión horizontal de 80 metros. La alta susceptibilidad se debería al alto contenido de minerales metálicos y a un volumen grande de ellos. Un cuerpo muy similar a este es el que se ubica en los 100 m del perfil a una profundidad similar y de 120 m de ancho aproximadamente, pero de susceptibilidad menor. La capa rocosa que los aloja tiene una susceptibilidad magnética mucho mas baja, tal vez corresponda a la roca vulcanosedimentaria esperada.

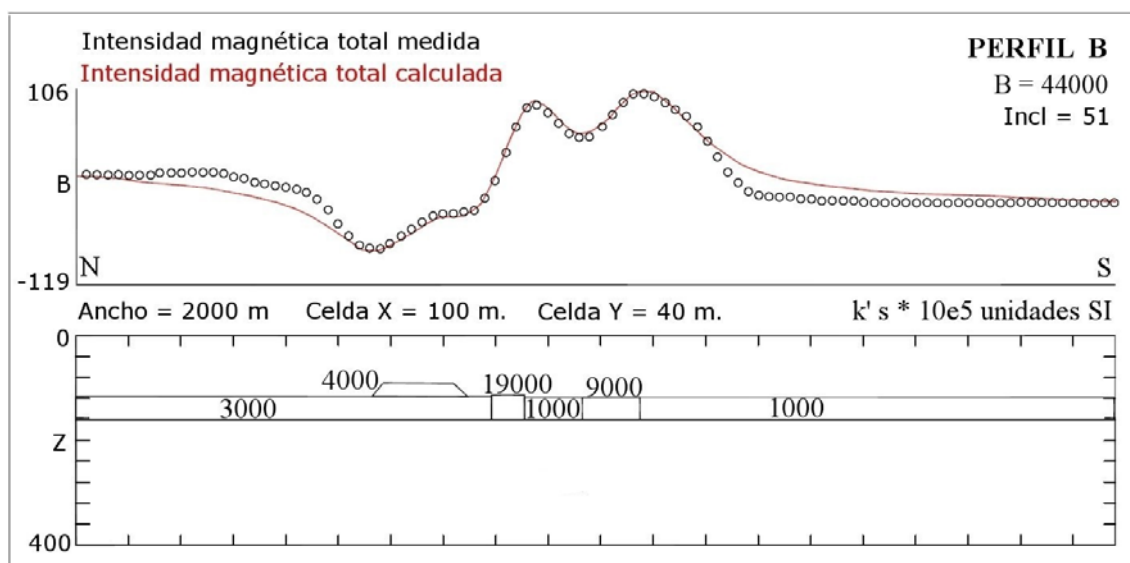


Figura 34. Modelado directo para el perfil B.

Del lado norte del perfil se nota la presencia de otra capa con una susceptibilidad magnética mas alta, podría tratarse de la misma capa volcánica marina que se mencionó en el perfil anterior. La subyace un cuerpo rocoso de mayor espesor pero de composición mineralógica similar. La única razón que hace pensar esto es la misma susceptibilidad magnética. Puede tratarse de distintos eventos de roca volcánica.

El cuerpo más somero tiene la apariencia de un domo. Podría pensarse en un principio en un domo riolítico ligado a la capa que lo subyace pero la diferencia en susceptibilidades no favorece esta idea, así que se opta por la idea de un cuerpo lenticular encajonado por un cuerpo rocoso sedimentario.

En este perfil se hace evidente la existencia de los cuerpos polimetálicos esperados. Los resultados son favorables por que la zona del perfil en la que se haya este cuerpo corresponde con un pequeño tren de anomalía magnética que corre de este a oeste y que es apreciable en el mapa de reducción al polo, (figura 30 b).

La figura 35 muestra el perfil hecho sobre la anomalía G. Se pueden notar soluciones para tres fuentes. De aquí se infieren tres cuerpos que causan los tres altos en



las curvas de IMT y RTP. El índice estructural que predomina en este perfil es 2, mismo que corresponde al tipo de cuerpos que se busca en esta tesis.

El cuerpo mas profundo está al norte del perfil a 228 metros de profundidad. Las dimensiones propuestas antes del modelado directo son de 200 metros, este es el causante del mayor alto magnético en la curva, posiblemente uno de los cuerpos objetivo de este estudio. El cuerpo central es el más somero de los tres, con una profundidad de 105. Por las dimensiones que se manejan en este primer modelo pareciera ser que no es de la misma naturaleza que el primer cuerpo, ya que no generan una anomalía de magnitudes similares. Por último esta el cuerpo del sur con una profundidad de 128 metros, también con poca presencia en la curva de IMT, tampoco parece ser de interés.

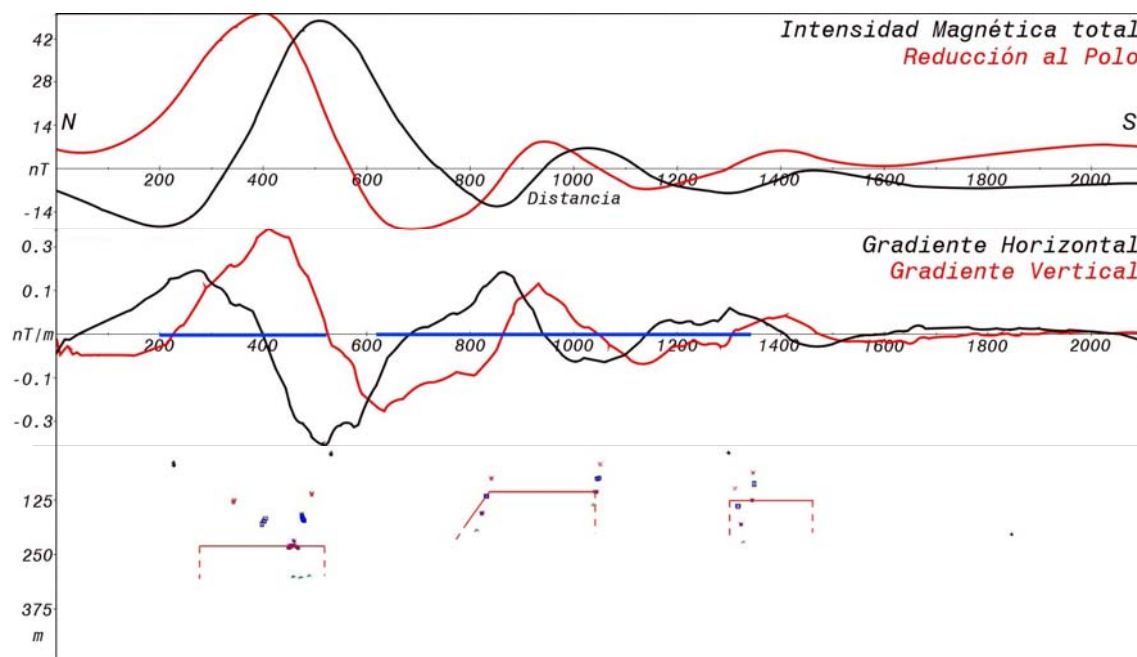


Figura 35. Resultados de la deconvolución de Euler en 2D para el perfil G.

El modelo del perfil G resulto ser un poco mas simple. De la deconvolución de Euler se obtuvieron tres profundidades de los tres cuerpos causantes de las anomalías en la curva de IMT. Estas mismas profundidades dieron origen al tercer modelo presentado (figura 36). Los tres cuerpos general los altos magnéticos en la curva.

La susceptibilidad magnética del cuerpo ubicado más al norte es la misma que la del cuerpo de interés del perfil anterior y las dimensiones son muy similares también. El

## V. DECONVOLUCIÓN DE EULER

cuerpo de este perfil tiene una dimensión lateral de 80 m aproximadamente y un espesor de 60 m. Este cuerpo es interpretado como otro depósito polimetálicos de interés.

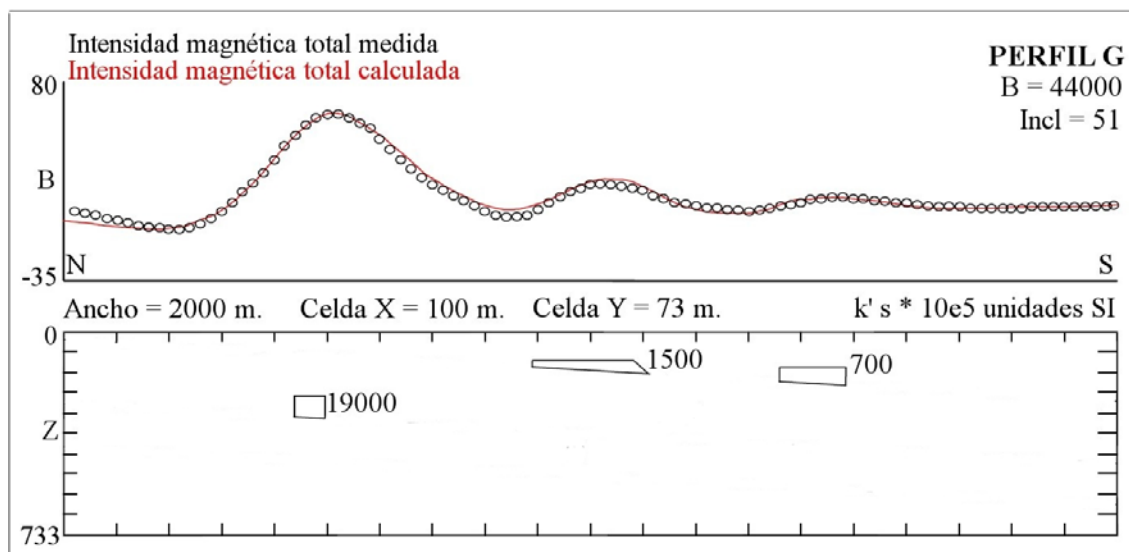


Figura 36. Modelado directo para el perfil G.

Los otros dos cuerpos presentes en este modelo no son de importancia minero, ya que se espera una susceptibilidad mayor debido al alto contenido de minerales metálicos.

De igual manera parece haber la posibilidad de hallar otro cuerpo de la misma naturaleza hacia el oeste del perfil (figura 30b). En el mapa se observa la presencia de un alto magnético similar a este.

El resultado de estos tres perfiles demuestra la existencia de cuerpos minerales localizados a una profundidad representativa de 120 m. En los perfiles B y G los cuerpos son más que evidentes. Aunque en el perfil A no se aprecia un cuerpo de las características que se buscan, no debería darse por terminada la exploración en esa zona de la región, ya que se presentó problema de enmascaramiento con la deconvolución de Euler y no podemos concluir nada en la parte central del perfil A. Los estudios geofísicos siguientes podrán aportar mayores datos acerca de los cuerpos presentes en esta zona y podrá complementarse un plan para barrenación y evaluación de los depósitos.

---

## **VI. CONCLUSIONES.**

El método de magnetometría aérea resultó ser de enorme importancia en la primera etapa de exploración de Cerro Blanco. Su primera utilidad se concentró en el reconocimiento de aquellas zonas donde hay roca compuesta de minerales magnéticos en cantidad, ligada del reconocimiento de aquellas anomalías magnéticas de interés minero mediante procesos ampliamente comprobados como Reducción al Polo y Señal Analítica. Se dio lugar a la localización y estimación de la profundidad de las fuentes magnéticas mediante la técnica de deconvolución de Euler en 2D y 3D, una de varias técnicas existentes en el apoyo de la interpretación de datos magnéticos. Por último se obtuvieron modelos simples, mediante el modelado directo de perfiles que cortan aquellas zonas identificadas como de interés minero importante.

Queda claro que el adecuado tratamiento de los datos obtenidos en campo genera valiosos productos como los mostrados en este trabajo. Se ilustró de manera detallada la manera de quitar los efectos presentes en los datos debido a factores ajenos a la geología, poniendo énfasis en los efectos provocados por la presencia de la aeronave. El mismo desarrollo que puede ser utilizado para datos magnéticos terrestres si se hace caso omiso estos últimos efectos.

Se mostró que el mapa de reducción al polo es crucial en la interpretación magnética. Gracias a este mapa se pudieron localizar las anomalías más importantes por su intensidad. Es un mapa que está presente en la gran mayoría de trabajos de magnetometría en la actualidad. Por otro lado, el mapa de señal analítica, fue el que

## VI. CONCLUSIONES

---

mostró las zonas donde la variación del campo magnético es mayor, ayudando a la identificación de las anomalías más importantes. Este mapa junto al de Reducción al Polo son productos de la prospección magnética indispensables en la etapa de interpretación.

A diferencia de los productos anteriores, la técnica de deconvolución de Euler es un proceso que está ganando aceptación aún. En este trabajo quedó demostrada su utilidad en la búsqueda de yacimientos minerales con respuesta magnética favorable. Su aporte es inmenso al resolver una de las incógnitas más grandes que trata de dar solución la prospección magnética: la profundidad a la cual se encuentra la fuente. Por lo tanto esta técnica es una de las más grandes herramientas de la que puede fiarse un intérprete actual, tanto que uno de los mayores proveedores de software para ciencias de la tierra ya lo ofrece como uno de sus productos, GEOSOFT.

Otro punto que hace atractivo a este método y también se puso a prueba en este trabajo es la posibilidad de identificar el tipo de estructura geológica de la fuente, algo que incrementa enormemente su utilidad en la interpretación magnética. Sin embargo, resulta muy necesario conocer las limitantes del método. Particularmente creo que es necesario contar con un modelo geológico previo para la adecuada interpretación de los modelos y alcanzar un mayor detalle en estos. Aquí se hizo la interpretación sin un modelo geológico previo, por esta razón no se pudieron detallar los modelos presentados. Si se hubiera contado con un modelo previo, el perfil A hubiera podido ser resuelto en su totalidad.

Gracias a esta técnica se logró la identificación y estimación de profundidades de dos cuerpos minerales dentro de la zona de Cerro Blanco y queda demostrada su utilidad dentro de la exploración minera, pero su aplicación se generaliza a áreas como

## VI. CONCLUSIONES

---

la exploración petrolera y en cualquier área en que la exploración magnética ha demostrado buenos resultados.

Los resultados de la deconvolución de Euler no dicen mucho por sí solos. Por eso fue necesario realizar modelos de los 3 perfiles estudiados, para esto los intérpretes pueden auxiliarse del modelado directo o de algún método de inversión. Debe quedar claro que para el intérprete pueden ser evidentes los resultados por sí solo, pero no para el cliente. En cambio si el intérprete muestra un perfil modelado, resulta mucho más claro para el cliente, a final de cuentas este último necesita saber dónde perforar para toparse con el cuerpo mineral.

El modelado directo hecho, redondeó los resultados y los hizo más evidentes. De igual manera pudo haberse utilizado un método de inversión. La idea principal es darles forma a los modelos simples que se obtienen de los resultados de la deconvolución. Al mismo tiempo respalda los modelos iniciales y los resultados de Euler. Creo que esta última parte del trabajo es esencial y debería formar parte del procedimiento de la aplicación de la técnica de deconvolución de Euler.

Los resultados de las técnicas aplicadas en este trabajo, evidenciaron la presencia de cuerpos con alto contenido de minerales magnéticos, las dimensiones de estos corresponden con cuerpos VMS conocidos actualmente y su profundidad corresponde con lo previamente estimado por los geólogos. Por lo tanto, la parte norte del área de Cerro Blanco tiene un potencial minero importante.

En concreto, el primer objetivo de este trabajo, referente a la demostración de la utilidad de la Deconvolución de Euler para la localización de depósitos mineros, queda satisfecho al obtener como producto final los perfiles de tres zonas de importancia

## VI. CONCLUSIONES

---

minera. Identificando la ubicación y la profundidad de dos cuerpos minerales importantes. Todo esto con base a los resultados de la Deconvolución.

En respuesta al segundo objetivo se identificaron tres zonas de importancia minera identificadas como anomalía “A”, “B” y “G”. Todas ellas mostraron una respuesta favorable en los procesos de Reducción al Polo, Señal Analítica y Deconvolución de Euler. Estas zonas serán aquellas sobre las cuales se desarrollará la siguiente etapa de exploración geofísica.

El objetivo global de mostrar la utilidad de los datos magnéticos en la exploración minera también queda satisfecho. El desarrollo de este trabajo se hizo con datos magnéticos exclusivamente ofreciendo productos sumamente útiles para el cliente. Como se sabe, se obtienen mejores resultados al correlacionar con otros tipos de estudios de exploración como geoquímicos, geológicos e incluso otros métodos de exploración geofísica. Esto no resta ninguna importancia a la prospección magnetométrica en la búsqueda de yacimientos minerales.

Por último, con el desarrollo de este trabajo, la incursión del autor en el ámbito de la interpretación magnética ya es un hecho. Resta poner en práctica lo aprendido en la búsqueda de yacimientos minerales de diversas génesis y conocer otros métodos de auxilio a la interpretación para el enriquecimiento de los métodos utilizados actualmente por el departamento de geofísica de Peñoles.

### **6.1 Estudios Geofísicos posteriores.**

Es muy común la aplicación de más de un método geofísico en exploración minera. Los resultados de cada método aportan datos importantes para la ubicación y delimitación de los yacimientos mineros. Este trabajo mostró los resultados de la magnetometría aérea en la etapa inicial de exploración de la zona. Los resultados obtenidos fueron muy satisfactorios, pero es hora de redondear el trabajo con la aplicación de otros métodos.

El propósito de aplicar otros métodos geofísicos es el de la delimitación de los cuerpos minerales del área. Al mismo tiempo se confirma la existencia de los cuerpos hallados con la magnetometría, apoyados en otras de sus propiedades físicas.

La gravimetría es un buen ejemplo de lo anterior. Al tratarse de cuerpos minerales de contenido metálico importante, son mas densos que las rocas que los rodean, es de esperarse una respuesta gravimétrica favorable justo sobre los cuerpos minerales. Por lo tanto es un método que ayudaría a la delimitación y a la confirmación de la existencia del depósito.

Por otro lado están los métodos eléctricos, de los cuales podemos esperar un contraste importante. Los cuerpos minerales metálicos se caracterizan por ser de baja resistividad y puede ayudar mucho a la delimitación de los cuerpos. Esta propiedad puede medirse al mismo tiempo que un levantamiento de polarización inducida, un método que tiene una respuesta favorable para sulfuros y que ha sido utilizado ampliamente para la exploración de este tipo de depósitos.

## VI. CONCLUSIONES

---

Dentro de los métodos electromagnéticos puede pensarse en levantamientos de TEM, CSAMT y AMT. Todos con el propósito de medir los contrastes de resistividad de los depósitos. Estos métodos son conocidos por su alcance en profundidad, pero en este caso la profundidad no es factor determinante, ya que los cuerpos son someros, más bien puede pensarse en la resolución latera que ofrecen.

El departamento de geofísica de Peñoles cuenta con el equipo necesario para realizar los levantamientos de los métodos mencionados arriba. No significa que tengan que realizarse todos ellos, esto elevaría enormemente el costo de la exploración. Incluso hay más opciones en el mercado, nuevos métodos y procesos de los cuales puede hacerse uso en cuanto se cuente con el equipo y software necesarios.

A lo largo de los últimos años la geofísica se ha ganado un lugar privilegiado en los equipos de exploración y se le exige cada día más y mejores resultados, así como variedad en sus productos. Cada día se espera más de la geofísica y somos los encargados de satisfacer esas nuevas necesidades.



## REFERENCIAS

- A. B. Reid. "Magnetic interpretation in three dimensions using Euler deconvolution" geophysics. vol. 55, no. I (january 1990);
- A. Spector. "statistical models for interpreting aeromagnetic data" Geophysics, vol 35, no 2, 1970.
- Ángel Francisco Nieto-Samaniego. "La Mesa Central de México: estratigrafía, estructura y evolución tectónica cenozoica" boletín de la sociedad geológica mexicana, volumen conmemorativo del centenario. temas selectos de la geología mexicana tomo lvii, núm. 3, 2005, P. 285-318
- Angeles Cordero Edgar. "Estudio de microgravimetría" Facultad de Ingeniería de la UNAM, 2007.
- Baranov, V., and H. Naudy, 1964, Numerical calculation of the formula of reduction to the magnetic pole, Geophysics, 29, 67-79.
- Battacharyya. "Continuous spectrum of the total-magnetic-field anomaly due to a rectangular prismatic body". Geophysics 1966.
- Battacharyya. "continuous spectrum of the total-magnetic-field anomaly due to a rectangular prismatic body" geophysics, vol. xxxi, so. I (FEBRUARY, 1966),
- Burckhardt, C y S. Scalia, 1906. "Géologie des environs de Zacatecas-Guide des excursions". Congreso geológico Internacional, 10, México, D.F.,16, 26 pp.
- Carrillo-Bravo, J., 1971, "La plataforma de Valles-San Luis Potosí" Asociación Mexicana de Geólogos Petroleros, Boletín, 23, 1-102.
- Centeno-García, E., Silva-Romo G., 1997, Geology, geochemistry, and tectonic evolution of central Mexico during Mesozoic time, Revista de Ciencias Geológicas, Instituto de Geología UNAM, v. 14, n. 2, p. 244-260.
- D. T. Thompson. "EULDPH: A new technique for making computer assisted depth estimates from magnetic data" geophysics. vol 47. no i (january 19x2):
- Dr. W.E.S. (Ted) Urquhart. "General Frequency Domain Theory for Magnetic Fields". GeoExplo, <http://www.geoexplo.com/> 2006.
- Funda Bilim, "Analytical signal inferred from reduce to the pole data" Journal of the Balkan Geophysical society, Vol. 6, No. 2, May 2003,
- G. Silva-Romo. "A submarine fan in the Mesa Central, Mexico" Journal of South American Earth Sciences 13 (2000).
- Grant, F.S., Dodds, J., 1972, MAGMAP FFT processing system development notes, Paterson Grant and Watson Limited.

Hartman, R.R., Teskey, D.J., Freidberg, J.L., 1971: A system for rapid digital aeromagnetic interpretation. *Geophysics*, 36, 891-918.

Henry Naudy. "automatic determination of depth on aeromagnetic profiles" *Geophysics* vol 36, 1971.

Ian N. McLeod. "Analytical signal and reduction to the pole in the interpretation of total magnetic field data at low magnetic latitudes" *Geosoft*.

Jain, S., 1976, An automatic method of direct interpretation of magnetic profiles: *Geophysics*, 41, 531-541.

Ku, C.C., & Sharp, J.A., 1983. "Werner deconvolution for automated magnetic interpretation and its refinement using Marquardt's inverse modeling", *Geophysics*, 48, 754-74.

MacLeod Ian N., Keith Jones, Ting Fan Dai. "3-D Analytic Signal in the Interpretation of Total Magnetic Field Data at Low Magnetic Latitudes" *Geosoft*.

Maksaev V. "Sulfuros Masivos Volcanogénicos (VMS)" *Apuntes de Metalogénesis*.  
Maksaev. "sulfuros masivos volcanogénicos (vms)"

Miriam Yta" Contribución a la definición de superposición de eventos metalogénicos en el yacimiento de Francisco I. Madero" *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, v. 20, núm. 2, 2003.

Nabighian, M.N., 1972. "The analytic signal of two- dimensional magnetic bodies with polygonal cross-section: its properties and use for automated anomaly interpretation". *Geophysics* 37, N° 3, 507-517.

O'Brien, D., 1972. "CompuDepth, a new method for depth to basement computations". *Society of Exploration Geophysicists Report*, 45 pp.

Quintero-Legorreta, O., 1992. "Geología de la región de Comanja, estados de Guanajuato y Jalisco". *Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geología, Revista*, 10, 1, 6-25.

Roest, W.E., Verhoef, J., Pilkington, M., 1992, *Magnetic interpretation using 3-D analytic signal: Geophysics*, 57, 116-125.

Sarah E. Shearer. "Three-dimensional inversion of magnetic data in the presence of remanent magnetization" *Master thesis, Colorado school mines, Center for gravity, Electrical & Magnetic Studies*.

Spector and Grant. "Statistical models for interpreting aeromagnetic data". *Geophysics* 1970.

Walter R. Roes. "Magnetic interpretation using the 3-D analytic signal" geophysics, vol. 57, no. 1 (january 1992)

Winograd Samuel. "On computing the discrete Fourier Transform"

Won, I., "Computing the gravitational and magnetic anomalies due to a polygon algorithms and fortran subroutines". Geophysics vol 52 No. 2. 1987.

Zeyen, H.; Pous, J., 1993. 3-D joint inversion of magnetic and gravimetric data with a priori information. Geophysical Journal International, *112*, 244 – 256.