



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE HIDALGO
INSTITUTO DE CIENCIAS BÁSICAS E INGENIERÍA
ÁREA ACADÉMICA DE
CIENCIAS DE LA TIERRA Y MATERIALES

“EXPLORACIÓN MAGNETOMÉTRICA DE LA ZONA DE
INFLUENCIA A LA MINA EL REFUGIO, MUNICIPIO DE
JACALA DE LEDESMA, HIDALGO (MÉXICO)”

TESIS PROFESIONAL
QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE
INGENIERO EN GEOLOGÍA AMBIENTAL

Presenta:

Maria Elena Balderas Espinosa

Director:

Dr. Kinardo Flores Castro

Co – directores:

Ing. Saúl Sánchez Quiroz (†)

Dr. Lázaro Raymundo Reyes Gutiérrez



Departamento de Geoquímica

Marzo de 2013










UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE HIDALGO
INSTITUTO DE CIENCIAS BÁSICAS E INGENIERÍA
DIRECCIÓN

M. en C. Julio César Leines Medécigo
Director de Control Escolar de la
Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo
Presente

Por este conducto le comunico que el Jurado asignado a la pasante de la Licenciatura en Ingeniería en Geología Ambiental: **MARIA ELENA BALDERAS ESPINOSA**, quien presenta el trabajo de: **"EXPLORACIÓN MAGNETOMÉTRICA DE LA ZONA DE INFLUENCIA A LA MINA EL REFUGIO, MUNICIPIO DE JACALA DE LEDESMA, HIDALGO (MÉXICO),"** después de revisar el trabajo ha decidido autorizar la impresión del mismo, hechas las correcciones que fueron acordadas.

A continuación se anotan las firmas de conformidad de los integrantes del Jurado:

PRESIDENTE:	Dr. José Luis Cadena Zamudio	
PRIMER VOCAL:	Dr. Kinardo Flores Castro	
SEGUNDO VOCAL:	Dr. Fidel Pérez Moreno	
TERCER VOCAL:	M. en C. Misael Eduardo Cruz Sánchez	
SECRETARIO:	M. en I. Patricia Montiel García	
PRIMER SUPLENTE:	Dra. Silvia Patricia Ambrocio Cruz	
SEGUNDO SUPLENTE:	Ing. José Alfredo Meneses Lugo	

Sin otro particular, le reitero a usted la seguridad de mi atenta consideración.

Atentamente

"Amor, Orden y Progreso"

Minera de la Reforma, Hgo., a 01 de Mayo de 2013.


Dr. Domingo Avila Pozos
Director



Dedicatorias

En primer lugar a Dios, que me ha brindado una vida llena de alegrías y aprendizaje, permitiéndome vivir una muy grata experiencia en mi etapa universitaria.

A mis padres que siempre me han apoyado y guiado, gracias de todo corazón por todas las oportunidades que me han brindado.

A mis hermanos por estar conmigo y apoyarme siempre, los quiero mucho.

A mis amigas que siempre estuvieron a un lado mío para ayudarme, escucharme, aconsejarme y en muchas ocasiones guiarme.

Agradecimientos

A DIOS.

Por darme la oportunidad de vivir y por estar conmigo en cada paso que doy, por fortalecer mi corazón e iluminar mi mente y por haber puesto en mi camino a aquellas personas que han sido mi soporte y compañía durante todo el periodo de estudio.

A MI MADRE MARÍA ELENA ESPINOSA LOZADA.

Por ser el pilar fundamental en todo lo que soy, en toda mi educación, tanto académica, como de la vida, por su incondicional apoyo perfectamente mantenido a través del tiempo.

A MI PADRE ADRIÁN ANTONIO BALDERAS LIRA.

Por los ejemplos de perseverancia y constancia que lo caracterizan y que me ha infundado siempre, por el valor mostrado para salir adelante y por su amor.

A MIS HERMANOS

Adrián y Eric, por formar parte de lo más hermoso que tengo. Mi familia, por comprenderme y por todo su amor.

A MIS AMIGAS XOCHITL PATIÑO HERNÁNDEZ Y MARICELA HERNÁNDEZ SOTO.

Que nos apoyamos mutuamente en nuestra formación profesional y que hasta ahora, seguimos siendo amigas, por compartir los buenos y malos momentos, las quiero mucho.

A todas aquellas personas que han sido importantes para mí durante todo este tiempo.

Agradecimientos Especiales

Al Programa de Mejoramiento del Profesorado (PROMEP), de la Secretaría de Educación Pública (SEP), que financió el Proyecto de Investigación Aplicada aprobado dentro del marco del Programa de Redes Temáticas Nacionales denominado: "Estudio Bioestratigráfico y Geoquímico de la Formación La Casita (Jurásico Superior) del Norte – Noreste de México: Implicaciones Paleoambientales", en el cual participan activamente la Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, Universidad Autónoma de Nuevo León y la Universidad Nacional Autónoma de México que actualmente integran la Red Temática Nacional "Recursos Geoenergéticos Renovables y No Renovables". Gracias a este proyecto fue posible llevar a cabo la presente Tesis de Investigación.

A MI DIRECTOR DR. KINARDO FLORES CASTRO

Por el apoyo siempre decidido, amistad y enseñanza depositadas, así como también el haberme facilitado los medios suficientes para llevar a cabo todas las actividades propuestas durante el desarrollo de este proyecto.

A MI CO – DIRECTOR ING. SAÚL SÁNCHEZ QUIROZ (+)

Quien me compartió su conocimiento y experiencia, además de las herramientas para preparar este camino hacia el mundo profesional y que marcará un importante precedente en mi formación. Q.E.P.D.

A MI CO – DIRECTOR DR. LÁZARO RAYMUNDO REYES GUTIÉRREZ

Por su permanente disposición y desinteresada ayuda dentro de los trabajos de campo.

AL ING. MIGUEL ÁNGEL ARIAS GUTIÉRREZ

Por sus valiosas sugerencias y acertados aportes durante el desarrollo de este trabajo

A MIS MAESTROS

Gracias por su tiempo, por su apoyo así como por la sabiduría que me transmitieron en el desarrollo de mi formación profesional

Gracias a todos y cada uno de los que lean y han leído este trabajo porque, por ese simple hecho, ya forman parte de él.

ÍNDICE	
	Paginas
CAPITULO I	
1 Introducción	1
1.2 Antecedentes	2
1.3 Justificación	7
1.4 Objetivo General	8
1.5 Objetivo Especifico	8
CAPITULO II	
2 Marco Geológico	9
2.1 Situación Geográfica	9
2.1.1 Localización y vías de acceso	9
2.1.2 Localización fisiográfica	11
2.1.3 Geomorfología	13
2.1.4 Clima	13
2.1.5 Vegetación	15
2.1.6 Hidrografía	17
2.2 Geología	18
2.2.1 Geología Regional	18
2.2.2 Geología Local	21
2.3 Estratigrafía	23
2.3.1 Mesozoico, Jurásico Superior	23
2.3.2 Cretácico Inferior	24
2.3.3 Cretácico Superior	25
2.3.4 Terciario	26
2.3.5 Cuaternario	28

CAPITULO III

3 Marco Teórico	30
3.1 Yacimientos Minerales	30
3.1.1 Rocas Ígneas	30
3.1.2 Yacimiento	30
3.1.2.1 Clasificación de Yacimientos Minerales	31
3.1.3 Yacimientos topo <i>Skarn</i>	33
3.1.3.1 <i>Skarn</i> Auríferos	35
3.1.4 Clasificación de los tipos de <i>Skarn</i>	36
3.1.5 Descripción y Mineralización	38
3.2 Prospección Geofísica: Fundamento teórico del método magnético	39
3.2.1 El magnetismo como herramienta de exploración	39
3.2.1.1 Breve historia del método magnético	40
3.2.1.2 Recientes desarrollos en las técnicas de registro magnético	42
3.2.2 Anomalías Magnéticas	44
3.2.3 Propiedades magnéticas de las rocas y su composición mineralógica	45

CAPITULO IV

4 Metodología	50
4.1 Método Magnético	50
4.2 Trabajo de campo	50
4.3 Muestreo	53

CAPITULO V

5 Resultados	55
5.1 Resultados de Campo	55
5.2 Procesado de Datos	57
5.2.1 Campo Magnético Total	60
5.2.2 Campo Magnético Residual	60
5.2.3 Reducción al Polo	60
5.3 Interpretación Geofísica	61
5.3.1 Plano de anomalías magnéticas realizado en <i>Surfer 8</i>	61
5.3.2 Plano de anomalías magnéticas realizado en <i>Geosoft</i>	64

CAPITULO VI

6 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	71
6.1 La conclusión del área mineralizada de la zona de estudio	71
6.2 Las conclusiones que se desprenden de los resultados obtenidos en el trabajo	73
6.3 Desde el punto de vista geofísica, las recomendaciones son	74
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	77
GLOSARIO	82

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 Plano del Distrito Minero Zimapán.	6
Figura 2.1. Mapa de localización y vías de acceso al área de estudio.	10

Figura 2.2 Ubicación del área de estudio dentro del mapa de provincias fisiográficas.	12
Figura 2.3 Mapa de climas.	14
Figura 2.4 Mapa vegetación en el municipio de Jacala de Ledesma, Hidalgo.	16
Figura 2.5 Plano geológico-topográfico regional del área El Refugio.	20
Figura 2.6 Columna estratigráfica del área de estudio.	29
Figura 3.1 (a) las líneas del campo gravitacional apuntan hacia el centro de masa de la Tierra. (b) las líneas del campo magnético de la Tierra son dipolares por naturaleza.	40
Figura 4.1 Diagrama de trabajo en campo.	53
Figura 4.2 Puntos de muestreo magnetométrico.	54
Figura 5.1 Plano de campo magnético total (CMT) por el programa <i>Surfer</i> versión 8.	58
Figura 5.2 Plano de Campo Magnético Total (CMT), Campo Magnético Residuales (CMR) y Reducción al Polo por el programa <i>Geosoft</i> .	59
Figura 5.3 Plano de campo magnético total (CMT) mostrando las áreas de interés.	63

Figura 5.4 Mapa del campo total. En el área de estudio se observan anomalías positivas en tonos rojos y anomalías negativas en tonos azules.	65
Figura 5.5 Mapa del campo residual. En el área de estudio se observan anomalías positivas en tonos rojos y anomalías negativas en tonos azules.	67
Figura 5.6 Mapa de intensidades magnéticas reducido al polo en el área de estudio. Se observan anomalías positivas en tonos rojos a magenta y anomalías negativas en tonos azules a verde.	69
Figura 6.1 Mapa de intensidades magnéticas reducido al polo en el área de estudio. Mostrando anomalías en forma de bolsadas de Fe y <i>Skarn</i> en tonos rojos a magenta y el paquete de calizas en tonos azules a verde.	72
Figura 6.2 Mapa de campo magnético total (CMT) mostrando las localidades de barrenación propuestas.	76

ÍNDICE DE FOTOGRAFÍAS

Fotografía 2.1 a" mineral de hierro (magnetita y hematita), "b" mineral de cobre (calcopirita y malaquita) encontrados en la zona de estudio.	23
Fotografía 4.1 Posición del Magnetómetro de protón con alta precisión (<i>Geometrics G-856</i>).	51
Fotografía 4.2 Mediciones en el área de trabajo.	52

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 3.1 Esquema general de la clasificación de Lindgren.	32
Tabla 3.2 Propiedades magnéticas de minerales ferromagnéticos.	48
Tabla 3.3 Susceptibilidad magnética de minerales.	48
Tabla 5.1 Resultados de muestreo en campo.	55
Tabla 5.2 Valores máximos y envolventes en la parte norte.	61
Tabla 5.3 Valores de mediana intensidad y envolventes en la parte sureste.	62
Tabla 6.1 Características de los barrenos recomendados.	75

CAPITULO I

1. INTRODUCCIÓN

La presente investigación se realizó en el área denominada "El Refugio", ubicada a 20 km al SW de la comunidad de San Nicolás, perteneciente al municipio de Jacala de Ledesma, estado de Hidalgo. Dichas localidades se incluyen en la Carta Geológico – Minera San Nicolás (F14C59) a escala 1:50,000; editada por la Gerencia de Geología del Servicio Geológico Mexicano (2001).

En este trabajo se emplean herramientas geológicas y geofísicas (método magnético) con el fin de establecer el área de influencia, la morfología de cuerpos mineralizados y su conexión con la mineralización metálica que aflora en dicha área, como apoyo a la evaluación del potencial de hierro y aurífero del área de influencia en la mina El Refugio asociada al intrusivo El Calvario (Zamorano-Téllez, 2011).

El proyecto de tesis consistió de dos actividades principales, la primera de reconocimiento de la zona de estudio, cartografía con muestreo de rocas y minerales de mena asociados, además de una campaña de geofísica para implementar el método magnético, conducente a estimar el área de influencia de la mineralización metálica que aflora en el área El Refugio (magnetita-hematita, calcopirita, galena, esfalerita y trazas de oro asociado a los sulfuros de cobre), delimitando el intrusivo de carácter hipabisal localmente diseminado "El Calvario" y su encajante metamórfico tipo *skarn*.

La segunda fase consistió en el tratamiento de los datos geofísicos y el diseño de la cartografía geológica y geofísica, que posteriormente fueron interpretados.

1.2 ANTECEDENTES

La minería es una actividad económica que ha estado presente en el desarrollo histórico de México desde tiempos prehispánicos; la riqueza que conlleva esta actividad ha servido de detonante para el crecimiento de la infraestructura de nuestro país, siendo los minerales metálicos y no metálicos la materia prima para la industria metalmeccánica y de transformación, que indudablemente ha apoyado la mejora en los servicios de poblaciones antes aisladas.

La aplicación de los métodos geológicos y geofísicos en la exploración minera en nuestro país da inicio a finales de la Segunda Guerra Mundial, dentro de una serie de acuerdos celebrados entre Estados Unidos y México, en los que figura el azufre como el principal objetivo de exploración (Hernández y Alam, 2009).

Los métodos geofísicos más empleados en esa época fueron la gravimetría y la sismología (Guiza, 1951) y da inicio mediante contratos con compañías americanas, como la Texas Gulf Sulphur Company, de las cuales existen reportes de avance dirigidos a la Comisión de Fomento Minero en los años de 1950 y 1951.

El detonante para utilizar estos métodos surge por la necesidad de ampliar las zonas de reservas en gran parte del país y esta inquietud fue tomada primero por la Comisión de Fomento Minero del Gobierno Federal; posteriormente, turnada al entonces Consejo de Recursos Naturales No Renovables, que después pasó a ser el Consejo de Recursos Minerales, hoy representado por el Servicio Geológico Mexicano (Hernández y Alam, 2009).

Si bien la gravimetría en nuestro país vio sus primeras aplicaciones en la exploración por azufre, también sirvió de apoyo a otros estudios con métodos geofísicos, tal es el caso del levantamiento gravimétrico y magnetométrico complementario del yacimiento de hierro "Peña Colorada" en el estado de Colima, (Estrada-Barraza y Pineda-Ramírez, 1964), en donde se utilizó un gravímetro modelo Shape de la marca Canadian.

Por otra parte, la necesidad de activar la industria llevó al gobierno de nuestro país a solicitar en 1961 asistencia técnica en la exploración de depósitos ferrosos y desde Julio de 1962 hasta Julio de 1967, el Gobierno Mexicano, representado por el Consejo de Recursos Naturales No Renovables y con la ayuda de las Naciones Unidas a través del Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD), llevó a cabo un programa de reconocimiento de los yacimientos minerales metálicos en México.

Para este proyecto la ONU donó un avión bimotor Twin Pioneer construido por Scottish Aviation. Este avión había sido empleado con anterioridad en trabajos de reconocimiento aéreo y estaba equipado con una cámara fotográfica Aeropath AS-5 de 35mm de película continua; un cintilómetro nuclear Enterprice Mark IV, modelo 321PL; un radioaltímetro RT7/APN-1; un magnetómetro Gulf Mark III y grabadores necesarios para hacer registros permanentes de la información recolectada.

La referencia más antigua a la que se tuvo acceso corresponde a un trabajo que data aparentemente de 1936 y es el resultado de un contrato entre la Compañía Minera Peñoles y la Combined Geophysical Methods Inc. (Sherwin, 1936) para la exploración de una mina en el estado de Guerrero, con los métodos de potencial natural y resistividad. Desafortunadamente este es un reporte muy escueto en donde no se especifica el equipo empleado en la prospección.

Dentro del programa de exploración del Consejo de Recursos Minerales en el estado de Hidalgo, se llevó a cabo un reconocimiento de las obras mineras localizadas en el área minera de Jacala, considerado el Tercer Distrito Minero del estado y que tiene posibilidades de reservas de Ag, Pb, Zn Cu y Mn (Huitron, 1979).

Fue hasta 1905 cuando iniciaron los primeros trabajos mineros de exploración y explotación a gran escala en el Municipio de Jacala, efectuados por la compañía norteamericana Cortes Mine Associated. Esta compañía trabajo hasta el año de 1910, fecha en que cesó actividades debido a la Revolución Mexicana.

Durante el tiempo que permaneció esta compañía en Jacala, se desarrollaron más de 2,500 metros lineales de cuele, entrecruceros, frentes y tiros. (Elvir y Echavarría, 1961).

Zamorano-Téllez (2011), menciona que en el área llamada el refugio, encontró óxidos de Fe (hematita y magnetita), con hasta 4.12 g/ton de oro, el cual se encuentra emplazado en la Formación El Abra, desarrollo metasomatismo de contacto y marmorización.

Dentro del Distrito Minero Zimapán se localiza la región Nicolás Flores – Jacala la cual se encuentra en la porción noroccidental el Estado dentro de la provincia de la Sierra Madre Oriental (Figura1.1).

La mineralización de la zona se asocia a cuerpos intrusivos de composición ácida, representados por diques y otros cuerpos menores que intrusionan rocas sedimentarias calcáreo-arcillosas y calcáreas de las formaciones Las Trancas (Jurásico Superior) y El Doctor (Cretácico Inferior) respectivamente, en las que se aloja la mineralización hidrotermal. Los minerales de mena son esfalerita, galena, pirita y calcopirita; carbonatos de cobre de tipo secundario. La ganga es calcita (Flores-Castro, 2001 y Zamorano-Téllez, 2011).

Entre las minas de mayor importancia se tienen San Miguel, Santa Elena, San Francisco y Santo Domingo, actualmente inactivas. Otra de las áreas que pertenece a esta región es la de La Luz, localizada al NE del poblado de Maguey Verde, donde se tienen depósitos de tipo hidrotermal en forma de mantos, emplazados en los planos de estratificación de las rocas sedimentarias de la Formación El Doctor. Estos mantos han sido explotados mediante las obras de San Antonio, La Luz y Bonanza, entre las principales, encontrándose actualmente inactivas.

Es en la porción sur central de esta región donde se localiza el área de El Zapote y El Águila, en la vecindad de los poblados de Puerto de Vigas, San José del Oro y Las Milpas a 5 km al NW de Nicolás Flores, la mineralización presente en

esta área corresponde a yacimientos de composición diorítica, originados por la interacción de un intrusivo diorítico con rocas sedimentarias calcáreas del Cretácico Inferior de la Formación El Doctor, produce principalmente hierro y cobre, asociado a zinc, oro y plata en menor cantidad, mineralización que ocurre en las cercanías del contacto. La zona de *skarn* tiene un desarrollo de 30 a 150 m de ancho en las minas Dos del Aguila y La Esmeralda, se presenta la mayor incidencia de mineralización, los minerales primarios son magnetita, pirrotita, pirita, calcopirita, bornita, esfalerita y oro nativo. Como minerales secundarios se presentan hematita, goethita, malaquita, crisocola y azurita (Consejo de Recursos Minerales, 1992).

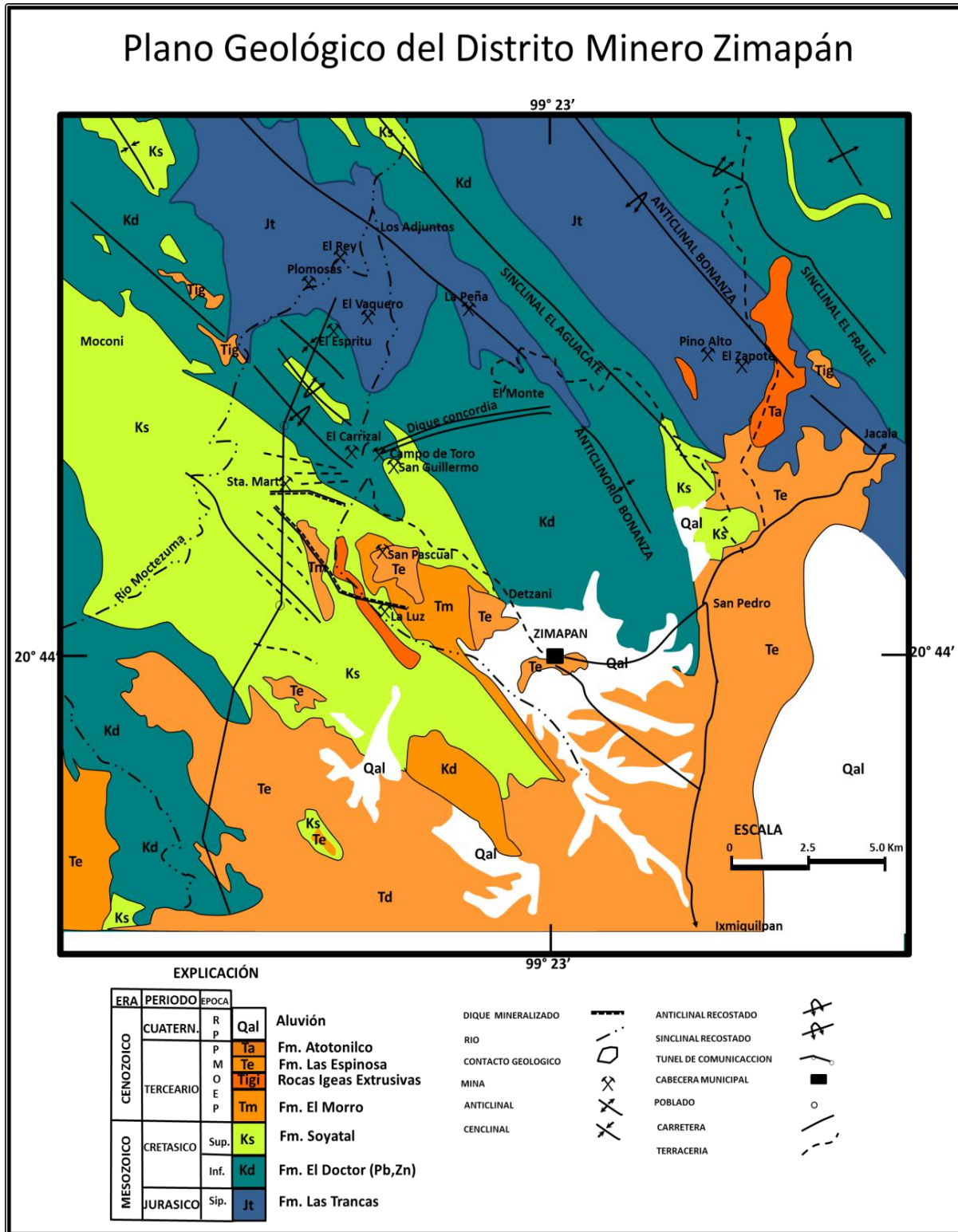


Figura 1.1.- Plano del Distrito Minero Zimapán.

1.3 JUSTIFICACIÓN

Con base en el análisis bibliográfico realizado y a falta de estudios que muestren regional y localmente la morfología, extensión y profundidad del cuerpo mineralizado, principalmente de óxidos y sulfuros asociados a la mina "El Refugio", de tipo *skarn*, se propone esta tesis de investigación para determinar, con base en prospección geológica y anomalías magnéticas,

Por lo antes mencionado, se realizó la investigación dirigida a la definición de la morfología de los cuerpos magnéticos y su extensión utilizando para ello el método geofísico, específicamente magnetométrico como apoyo a la evaluación del potencial de hierro y aurífero en el área denominada El Refugio asociada al intrusivo El Calvario.

Resulta de gran importancia el levantamiento magnetométrico para identificar nuevas áreas que definan la zona de interés económico con influencia a la mina El Refugio y así se tengan oportunidades de trabajo para la población.

1.4 OBJETIVO GENERAL.

Realizar una exploración magnetométrica para conocer la presencia (o ausencia) de elementos ferromagnéticos en la zona de influencia a la mina El Refugio, municipio de Jacala de Ledesma, en el estado de Hidalgo.

1.4.1 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.

- Realizar el levantamiento de prospección geofísica, utilizando el método magnético en la zona de influencia a la mina El Refugio, con el propósito de conocer la presencia (o ausencia) de elementos ferromagnéticos que aflora en esta localidad, tanto a rumbo como a profundidad.

- Mapear unidades que muestran contrastes de susceptibilidad magnética, utilizando el método magnético, aplicando con los Softwares Geosoft y Surfer versión 8, para mostrar anomalías geofísicas, estructuras y contactos presentes.

CAPITULO II

2 MARCO GEOLÓGICO

2.1 SITUACIÓN GEOGRÁFICA

2.1.1 Localización y vías de acceso

El área de estudio se localiza al noreste del estado de Hidalgo, formando parte del Municipio de Jacala de Ledesma. La zona está delimitada por las coordenadas geográfica 21°00'19" latitud norte y 99°10'19" longitud oeste, con una altitud de 1395 msnm, ocupa una superficie de 346.9 Km², lo cual significa el 1.7% de la superficie estatal (Figura 2.1).

Se llega partiendo de Pachuca o de la Ciudad de México por la carretera federal No. 85 México-Laredo que atraviesa a la población de Jacala en el Km. 265 y de manera conjunta comprende los municipios de Pacula, Pisaflores, La Misión y Chapulhuacán que integran esta región.

Colinda al norte con el Estado de Querétaro y el municipio de La Misión, al sur con Nicolás Flores, Tlahuiltepa y Zimapán al poniente con Pacula y Zimapán y al oriente con los municipios de La Misión y Tlahuiltepa, ocupa una superficie de 346.9 Km², lo cual representa el 1.7% de territorio Hidalguense.

De Jacala al municipio de San Nicolás se recorre aproximadamente una distancia de 5 km por una carretera pavimentada que es transitable todo el año, llegando a este poblado se toma una terracería que nos lleva a los poblados de El Refugio y Octupilla, donde se toma la desviación para El Refugio.

2.1.2 Localización Fisiográfica

El área de estudio se encuentra en la provincia de la Sierra Madre Oriental (Raisz, 1964), se caracteriza por diversos sistemas montañosos alargados de orientación NW-SE y en menor proporción N-S, los cuales son disectados profundamente por efecto de la disolución del carbonato de calcio, lo que imprime una particularidad muy notoria al terreno, y que caracteriza a la subprovincia denominada “Carso Huasteco (Figura 2.2)”, formada por cadenas orográficas tectonizadas de rocas sedimentarias eminentemente marinas, que se encuentran plegadas y separadas por estrechos valles longitudinales casi paralelos, además observándose un complejo de dolinas y polges de diversas dimensiones, disectados por un drenaje principalmente dendrítico, y ocasionalmente rectangular (Córdoba, 1991).

2.1.3 Geomorfología

Geomorfológicamente esta provincia corresponde al tipo de montañas plegadas, en una etapa del ciclo erosivo de juventud tardía, con una topografía abrupta y arroyos profundos. Las geoformas están controladas principalmente por rocas calcáreas y calcáreo – arcillosas. Las primeras dan origen a relieves fuertes con drenaje paralelo y las arcillas a relieves suaves.

El relieve que presenta el área es montañoso y accidentado formado por sierras orientadas NW – SE constituidas por rocas calcáreo – arcillosas (Córdoba, 1992). El drenaje que presenta es de tipo dendrítico y subdendrítico. Destacan los acantilados verticales por fallas.

2.1.4 Clima

El clima que presenta la región es semi – cálido ((A)C(wo)w), el más cálido de los templados, con temperaturas medias anuales mayores a los 18 °C y la del mes más frío menor a los 18 °C, siendo el más seco de los templados sub – húmedos con lluvias en verano (Figura 2.3), con un coeficiente de P/T menor a 43.2 mm Teniendo su porcentaje de lluvia invernal menor a 5 de la anual (García, 1964).

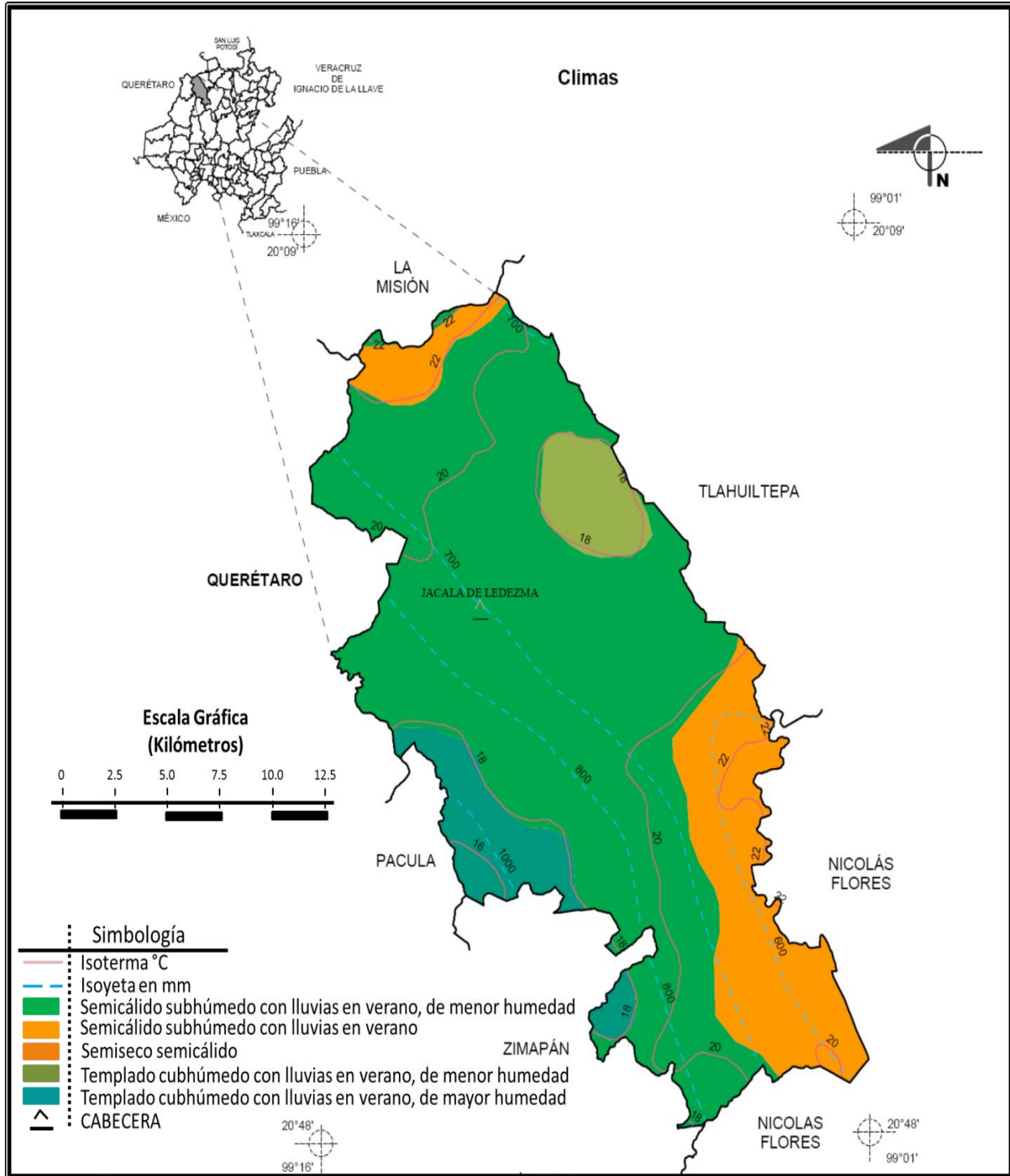


Figura 2.3.- Mapa de climas de Inegi, 2005 (Modificada de Zamorano, 2011).

2.1.5 Vegetación

La vegetación predominante en la región de Jacala está constituida por bosque de pino-encino en las partes altas, mientras que en las zonas bajas abundan matorrales arbustivos, que en general se encuentran soportados por Feozem, Rendzinas, Luvisoles y Regosoles, bien drenados, con presencia de calizas y lutitas. La distribución altitudinal del bosque varia de 500 a 1200 metros y es común de climas semi-secos, o templados subhúmedos y semi-calidos donde las temperaturas medias anuales tienen rangos de 20 a 24 °C y las precipitaciones entre 600 y 1200 milímetros en el mismo lapso (Gobierno del Estado de Hidalgo, 2001) (Figura 2.4).

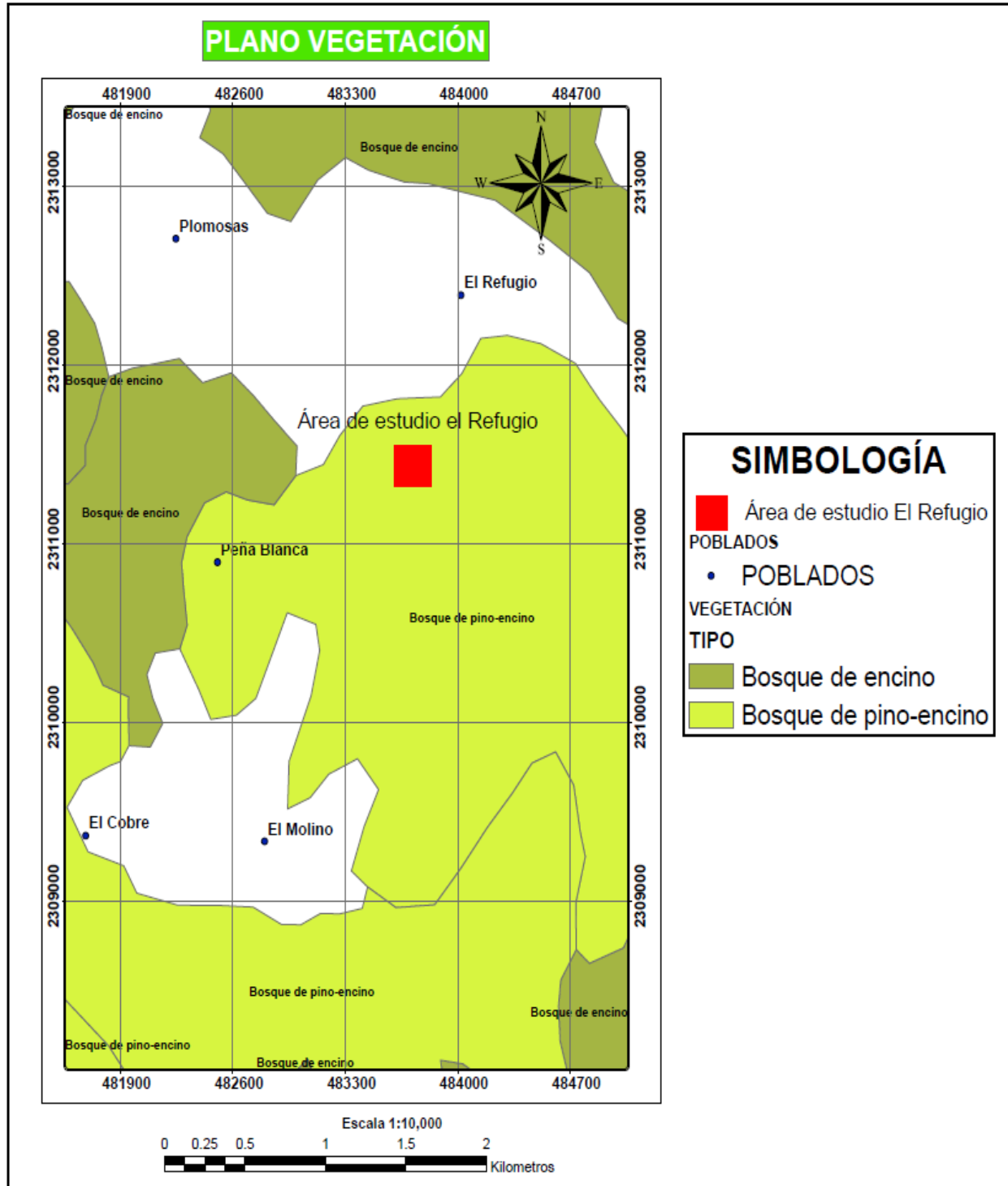


Figura 2.4.- Mapa vegetación en el municipio de Jacala de Ledesma, Hidalgo.

2.1.6 Hidrografía

En el estado de Hidalgo las corrientes son escasas, esto se debe al clima y a la topografía. En las porciones norte y noreste, aunque los vientos húmedos del Golfo propician abundantes lluvias, lo abrupto de la Sierra Madre Oriental impide el aprovechamiento de los escurrimientos, ya que descienden rápidamente a las zonas bajas, las cuales forman parte de los estados de San Luis Potosí, Veracruz y Puebla. En cuanto a la explotación del agua subterránea ésta es baja, pues son pocas las áreas planas.

El municipio de Jacala se extiende entre los Ríos Moctezuma hacia el norte colindando con el Estado de Querétaro y el Río Amajac o Quetzalapa hacia la porción sur, la cual pasa por las comunidades de La Palma, Santo Domingo, Vado Hondo y Quetzalapa.

El drenaje que caracteriza a la zona es tipo dendrítico y el subterráneo está controlado por numerosas fallas y fracturas que disectan al paquete calcáreo.

Cuenta con diversos mantos acuíferos que dan vida a los diferentes nacimientos de agua conocidos en superficie, éstos se ven favorecidos por el periodo de lluvias de junio a septiembre y son aprovechados para la distribución de agua potable en la región.

Existen lagunas que se forman en las comunidades de El Coñesito, Laguna Seca, Agua Fría, Laguna Grande, Los Hoyos, Hilojuanico y la del Pinalito Alto, así como una infinidad de jagüeyes en la mayor parte de sus comunidades sirviendo de bebedero para sus ganados (Solano, 2008).

2.2 GEOLOGÍA

2.2.1 GEOLOGÍA REGIONAL

Está representada por un marco geológico que ha sido definido por una sucesión de eventos tectónicos relacionados principalmente al origen de la Sierra Madre Oriental.

Durante el Triásico e inicios del Jurásico el área se vio afectada por procesos de distensión, relacionados con la apertura del Golfo de México, originando una serie de fosas, que al ser transgredidas por los mares jurásicos, desarrollaron una cuenca que evoluciono a una plataforma carbonatada en el Albiano-Cenomaniano (PVSLP), que facilitó posteriormente el depósito de rocas calcáreas, representadas en el área por la Formación El Abra, hasta que los depósitos se hicieron más pelíticos originando la Formación Soyatal, mientras que hacía el oriente los depósitos de cuenca continuaban su desarrollo.

Todos estos rasgos litológicos se deformaron durante los eventos laramídicos, resultando una serie de plegamientos y cabalgamientos, dando origen a la Sierra Madre Oriental, estructuralmente los pliegues que se presentan en la región tienen una tendencia NW-SE, muchos de ellos recostados hacia el E-NE, mientras que las fallas de orientación NW-SE actúan como contactos litológicos.

Los rasgos estructurales típicos que se observan incluyen pliegues, fallas de despegue, rampas de cabalgadura, combamientos de fallas, y pliegues asociados a sedimentos jurásicos y cretácicos. Las rocas cretácicas se deformaron como una sola unidad ya que forman un paquete de rocas competentes de espesor considerable (Suter, 1990).

Bajo este contexto se han diferenciado distintos elementos morfoestructurales que corresponden con paleoelementos que representan características particulares

propias de cada uno, dentro del área de estudio, pueden diferenciarse tres elementos que han sido definidos por su expresión regional y que corresponden con la Plataforma Valles San Luis Potosí, La Cuenca de Zimapán y la Cuenca de Metztitlán.

La Cuenca de Zimapán es una cuenca intracratónica, la cual se desarrolla entre la Plataforma Valles San Luis Potosí y el Complejo Arrecifal de El Doctor, en ella se depositó, en su base, una secuencia de rocas jurásicas de origen vulcano-sedimentario asociada a la presencia de un arco volcánico probablemente perteneciente al Terreno Guerrero. Estas secuencias paulatinamente cambian a sedimentos cretácicos de naturaleza calcárea arcillosa. Posteriormente en el Albiano-Cenomaniano se desarrollaron rocas carbonatadas en ambientes de mar abierto con presencia de derrubios de material arrecifal de los complejos arrecifales que lo bordeaban, lo que corresponde a la Formación Tamabra.

La cuenca de Metztitlán se identifica como la secuencia aflorante del Anticlinorio de Huayacocotla, se encuentra constituida por una potente carpeta de sedimentos cretácicos de mar abierto que se depositaron sobre una secuencia transgresiva del Jurásico, es decir ambientes mixtos en la base y de cuenca en la cima.

Finalmente estas secuencias han sido afectadas por distintas etapas orogénicas, y por cuerpos de rocas volcánicas y plutónicas de edad terciaria, que han alterado su morfología original.

Las rocas ígneas se encuentran representadas por masas intrusivas “*Stocks*” de composición acida a intermedia, expuestas ampliamente en la zona, las cuales se encuentran intrusionando a las rocas sedimentarias antes mencionadas, dando origen a rocas metamórficas de contacto y depósitos de tipo pirometasomático.

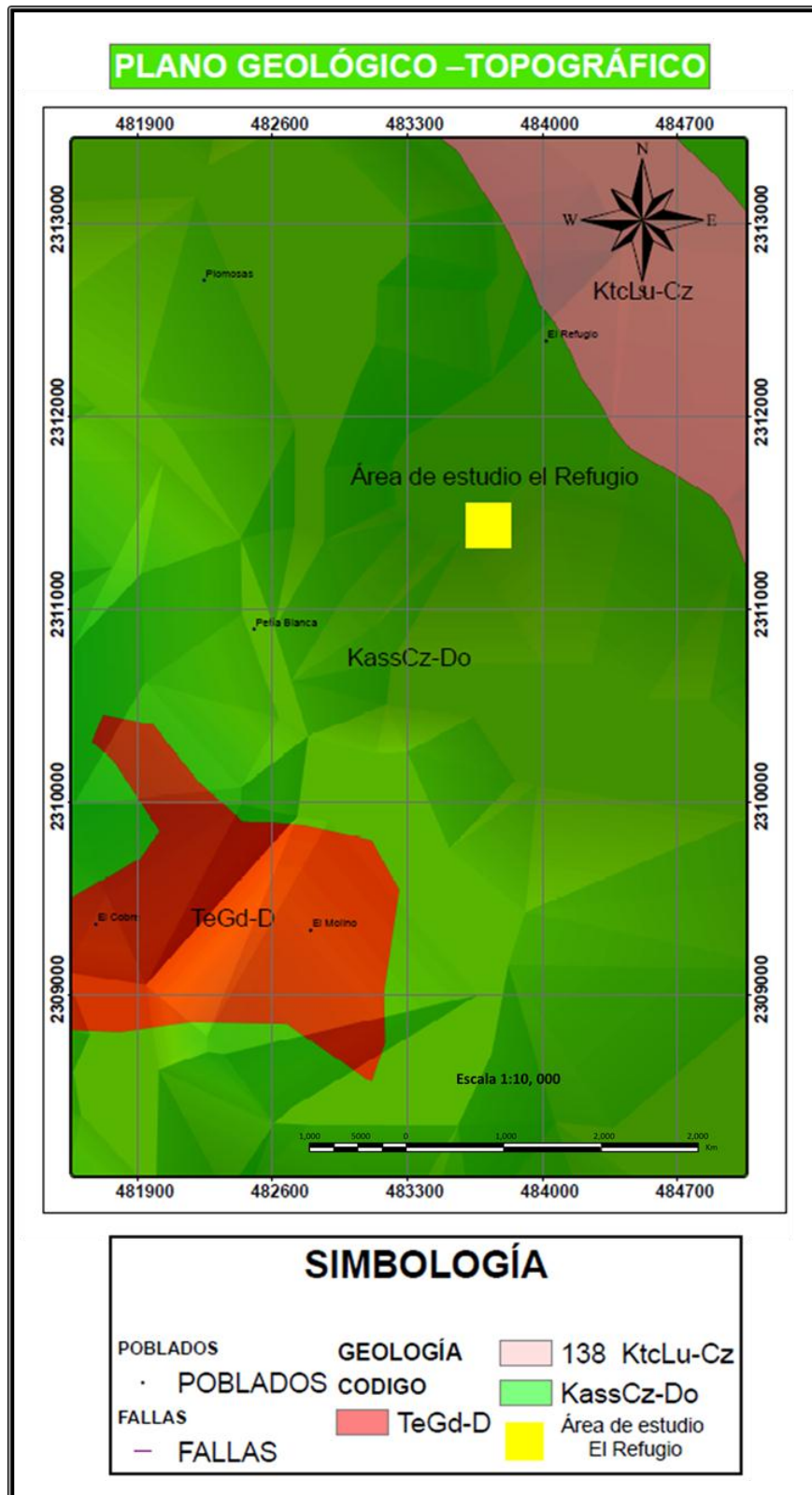


Figura 2.5.- Plano geológico-topográfico regional del área El Refugio.

2.2.2 GEOLOGÍA LOCAL

Geológicamente el área de estudio se encuentra constituida por una potente formación de calizas marinas conocidas como Formación El Abra, esta unidad estratigráfica es altamente fosilífera y se le ha asignado una edad Albiano-Cenomaniano (Suter, 1990; SGM, 2002).

Al norte del pueblo de Jacala de Ledesma, la Formación El Abra es de estratificación gruesa, plegada y muestra un rumbo N50°W y buzamiento de 54°SW. La caliza es de color gris – crema, cristalina, en fractura fresca y con nódulos de pedernal negro en algunos horizontes. Como a un kilómetro al norte de Jacala de Ledesma y en la barranca de San Antonio se aloja un dique de pórfido granodiorítico que corta a la Formación El Abra en forma de herradura abierta.

Este cuerpo ígneo tiene un ancho aproximado de 200 a 300 metros y cruza la carretera México-Laredo entre los kilómetros 269 y 270, megascópicamente el intrusivo ígneo presenta textura porfirítica, constituida por fenocristales de feldespatos potásicos alterados de color blanco contenidos en una matriz fina de plagioclasas, teniendo como máfico dominante la biotita. El color de la roca depende del grado de alteración y varía de blanco a gris claro verdoso.

Los efectos del metamorfismo de contacto ocasionado por el intrusivo en las calizas, se manifiesta en forma de marmorización y granatización.

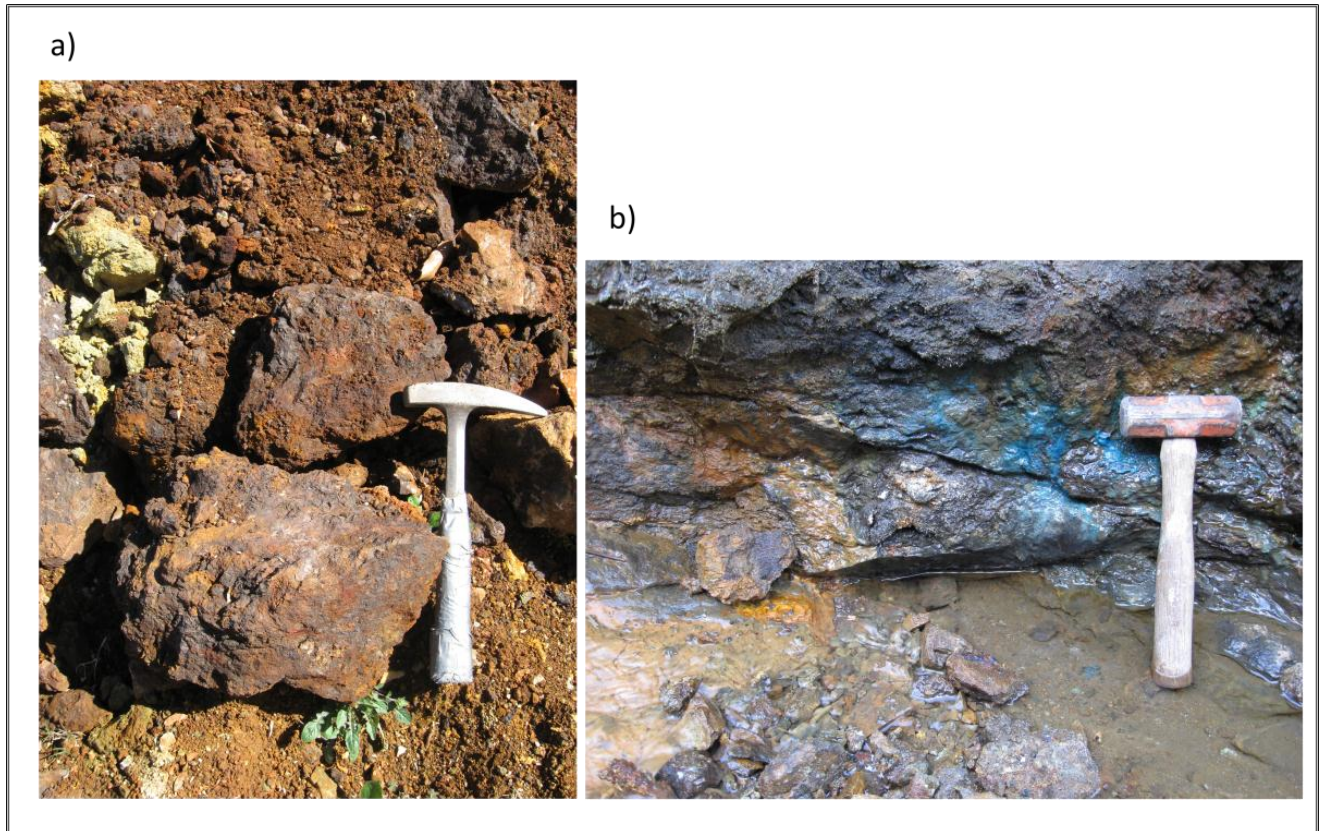
A ambos lados del intrusivo, las calizas están sumamente fracturadas, localizándose algunas fallas importantes en dirección normal al rumbo de dique. En algunas zonas presenta una estructura brechoide debido a numerosas fracturas que han sido rellenadas con calcita de redepositación.

Los depósitos minerales ocurren en la zona de *skarn* encontrados en varias localidades en contacto de la caliza y el intrusivo. Sin embargo, los minerales de

mena de estos depósitos principalmente consisten de hierro (magnetita y hematita) acompañados por cobre (calcopirita y malaquita secundaria), en general se encuentran depósitos principalmente compuestos por magnetita acompañados por minerales de cobre, y por el contrario, como se puede ver en la mina Nuevo Encino Prieto que están mineralizadas principalmente por sulfuros y en menor cantidad por magnetita y hematita diseminadas.

Dichos cuerpos graníticos forman *stock's* y apófisis en forma de diques de morfología irregular, observados en las inmediaciones del poblado de San Nicolás, las minas El Refugio, Nuevo Encino Prieto, y el arroyo de Guayabos; Flores-Castro (2001).

En la mina El Refugio la mineralización a la vista es básicamente de óxidos, entre los que destacan hematita, magnetita y goetita, y en menor proporción sulfuros como pirita y principalmente calcopirita, en esta última es en la que se podemos encontrar partículas de aproximadamente 1 a 12 micras de teluros de oro con bismuto o solo teluros de oro. Los granitoides encontrados en esta mina son de grano medio (milimétrico) en el que se pueden apreciar a simple vista plagioclasa, biotitas, anfíboles y minerales opacos (Fotografía 2.1).



Fotografía 2.1.- Minerales encontrados en el área de estudio “a” hierro (magnetita y hematita) y “b” cobre (calcopirita y malaquita).

2.3 Estratigrafía

2.3.1 Mesozoico, Jurásico Superior

Formación Las Trancas

La localidad tipo se encuentra en el poblado Las Trancas, en el km 217 de la carretera México-Laredo y aproximadamente 18 km al Norte de Zimapán (Segerstrom, 1956, 1961a y 1962).

Se encuentra constituida por lutita y limolita calcárea, ligeramente filitizada, de color gris oscuro con intercalaciones de caliza arcillosa parcialmente piritizada en capas delgadas de grauvaca y pedernal. Además presenta un conglomerado gris oscuro,

de pocos metros de espesor, que contiene una capa de coquina de bivalvos en la parte basal. El conglomerado está constituido en gran parte por guijas cuarcíferas bien redondeadas; la coquina contiene muchos bivalvos sin costillas. Sobreyacen al conglomerado capas de grauvaca de grano grueso e intercalaciones de lutitas que cambian hacia el techo de la secuencia a conglomerado.

El contacto superior de esta unidad es muy variable, por ejemplo en la localidad ubicada 10-20 km al este y sureste del poblado Las Trancas, yace sobre esta unidad, en aparente concordancia, un paquete de caliza de color gris perteneciente a la Formación Soyatal, mientras que la Caliza El Doctor yace directamente sobre esta unidad en el área cercana al pueblo de Las Trancas.

2.3.2 Cretácico Inferior

Formación Tamaulipas Superior

Belt (1925) la describió en una amplia zona de la Sierra de Tamaulipas, sin establecer una localidad tipo específica. Sin embargo, Muir (1936) designa al Cañón de La Borrega como sección tipo de la Caliza Tamaulipas, que en aquel lugar corresponde a la Formación Tamaulipas Superior, que posteriormente Stephenson (1921) la definió formalmente.

Los sedimentos que afloran en la Sierra de Tamaulipas son calizas criptocristalinas de color crema con líneas estilolíticas, paralelas a los planos de estratificación y nódulos de pedernal gris claro (Pérez *et al.*, 1990).

Se encuentra aflorando en las proximidades de la Ranchería Acoyotla en ambos flancos del Anticlinorio de Huayacocotla y en el núcleo del sinclinal, limitado al oriente por éste y al occidente por el Anticlinorio de Pisaflores. Descansa concordantemente sobre los sedimentos de la Formación Pimienta e infrayace de igual forma al Horizonte Otates del Aptiano.

El depósito de esta formación se efectuó bajo condiciones de mares neríticos, de aguas poco profundas, baja energía, buena oxigenación y con frecuentes aportes de terrígenos arcillosos.

Formación Tamabra

López-Ramos (1979) menciona que esta unidad se estudió preferentemente en los campos petroleros de Poza Rica, Veracruz, pero no especifica claramente la ubicación de la localidad tipo, referenciada por Heim (1940). Subyace a la Formación San Felipe/Agua Nueva y sobreyace a la Formación Tamaulipas (Becerra, 1970) o cambia lateralmente hacia el sur a calcilitas impermeables similares a las calizas de la Formación Tamaulipas de la Sierra Madre Oriental (Barnette y Illing, 1956). En la porción central del margen occidental de la PVSLP esta unidad está subyacente por la Formación La Peña y sobreyacente por la Formación Soyatal (López-Doncel, 2003).

En la Formación Tamabra pueden diferenciarse dos principales dominios sedimentarios, el primero representado por la sedimentación autóctona y el segundo por la sedimentación alóctona (López-Doncel, 2003).

2.3.3 Cretácico Superior

Formación El Abra

La localidad tipo está ubicada en la estación El Abra, a lo largo del ferrocarril nacional, alrededor de 9 km al este de Ciudad Valles, San Luis Potosí (Powers, 1925; Carrillo-Bravo, 1971; Aguayo-Camargo, 1975).

Carrillo-Bravo (1971) menciona que en la Sierra de El Abra las rocas arrecifales (facies Taninul) subyacen discordantemente a la Formación San Felipe al noroeste de Gómez Farias y al oriente de Jaumave, Tamaulipas. En el área de Miquihuana, Tamaulipas, se encuentra cubierta discordantemente por margas de la Formación Méndez; mientras que en la Sierra de Álvarez y área de Jalpan subyacen discordantemente a la Formación Soyatal.

PEMEX (1988) interpreta que el ambiente de depósito de esta unidad corresponde al de una plataforma amplia y estable de aguas someras, con dos facies principales: la post-arrecifal - lagunar y la arrecifal.

Formación Soyatal

White (1948) menciona que esta unidad está formada por una alternancia de caliza y lutita calcárea delgada, con aumento de lutitas laminares de la cima hacia la base de la secuencia se torna arenosa con alternancia de lutita.

López-Ramos (S/A) refiere esta unidad a la Formación Soyatal, debido a los buenos afloramientos observables en un pequeño campo minero de antimonio que lleva ese nombre y ubicado a 48 km al noreste de Zimapán, Hidalgo. Esta unidad es muy variable en sus relaciones estratigráficas, en la parte oriental del estado de Querétaro (Wilson, *et al.*, 1955), y al suroeste del estado de Hidalgo (Segerstrom, 1961) descansa discordantemente sobre la Caliza El Doctor.

Carrillo-Bravo (1971) menciona que la Formación Soyatal es un depósito de tipo transgresivo; asimismo, agrega que la presencia de clásticos del tamaño de limos, arcillas y fragmentos de mica y caliza indica condiciones inestables en el área donde se originaron

2.3.4 Terciario

Granitoides El Calvario

Este es un plutón fanerítico de textura porfídica inequigranular hipidiomórfica que a profundidad cambia a fanerítica equigranular. El plutón atraviesa y metamorfiza una espesa secuencia de calizas al este de Jacala sobre la barranca El Calvario. Se trata de un intrusivo que aflora escasamente entre las calizas y el caliche, debido a que ha sufrido una alteración hidrotermal muy intensa e intemperismo muy avanzado.

Estas rocas son de composición cuarzomonzodiorítica de grano medio cuyos principales componentes minerales son: augita, hornblenda común, biotita,

plagioclasa, feldespato alcalino (ortoclasa y pertita) y cuarzo, y minerales accesorios como el apatito, titanita, rutilo y magnetita. Los cambios de litofacies cambian localmente en las distintas localidades.

Este cuerpo es el responsable de la mineralización cuprífero –aurífera en la zona de estudio, así como de la marmorización y silicificación de la caliza de la Formación El Abra. En el cuerpo intrusivo se desarrolla oxidación, piritización, cloritización y epidotización muy locales.

Formación Las Espinas

Simons y Mapes, 1956 nombraron Formación Las Espinas como una unidad volcánica compuesta en su mayor parte por derrames y aglomerados de composición andesítica y dacítica que cubren una extensión relativamente amplia del sur del Distrito Minero de Zimapán. Su base está interdigitada con los depósitos de la Formación El Morro, visible en el camino de Zimapán al Puerto "El Lefé" que por consecuencia se les considera contemporáneas.

Se han agrupado en esta unidad una serie de derrames lávicos de composición variable que va desde acida hasta básica, cubriendo en forma discordante a las formaciones precedentes.

Rocas andesíticas son las que se encuentran más ampliamente distribuidas en el área presentándose como derrames e intercalaciones de horizontes tobáceos arenosos. Cubriendo a estas efusiones se tienen lavas amigdaloides de composición basáltica.

Derrames dacíticos y piroclásticos de la misma composición son observados hacia la porción central del área donde parecen ser las rocas volcánicas más jóvenes.

Formación Atotonilco

Geyne *et al.*, 1963, describe esta unidad proponiendo como localidad tipo el poblado de Atotonilco El Grande, estado de Hidalgo. Según este autor esta formación está compuesta principalmente por capas de textura variable desde

fangolita hasta conglomerado. En esta área los basaltos se encuentran intercalados con tobas de composición dacítica a riolítica, dando así una secuencia bimodal como lo consideró Robin (1975).

Los basaltos megascópicamente presentan una estructura compacta masiva, con tonalidades gris oscuro y verde que intemperizan a color rojizo y tienen textura afanítica a veces esferoidal y también vítrea.

Las tobas riolíticas son de color crema que intemperizan a color rojizo y blanquecino (caolinización) con textura fanerítica de aspecto vítreo, constituida por fenocristales de plagioclasas, cuarzo, ferromagnesianos alterados y óxidos de hierro.

Las andesitas se presentan de color gris oscuro, estructura compacta, textura afanítica y los minerales observables son principalmente máficos (Servicio Geológico, 2002).

2.3.5 Cuaternario

Conglomerado Polimíctico

Consiste en un conglomerado de color gris claro a pardo claro, con estructura de grano grueso poco consolidado y mal clasificado que incluye sedimentos del tamaño de las arcillas hasta cantos de 10 cm de diversa composición, entre los que destacan andesita, caliza, lutita y cenizas.

Estos materiales de relleno son originados por corrientes fluviales en los cauces de los ríos y arroyos y depositados en llanuras de inundación. Estos depósitos corresponden en orden de importancia a arenas, arcillas y gravas de diferentes tamaños y formas de subredondeados a redondeados. Dichos depósitos se encuentran burdamente estratificados, se observan en algunos cortes de caminos y canales de riego con espesores no mayores a 1 metro.

Por su posición estratigráfica y características físicas de la unidad se le ha asignado una edad del Pleistoceno (Figura 2.6).

CAPITULO III

3 MARCO TEÓRICO

3.1 Yacimientos Minerales

3.1.1 Rocas Ígneas

La susceptibilidad de las rocas depende, en gran parte, de su contenido en minerales ferromagnéticos y, principalmente, en magnetita e ilmenita.

En el caso de las rocas magmáticas la dirección de la imantación coincide con la dirección del campo geomagnético existente en el intervalo de tiempo, en que las rocas empezaron a solidificarse y que se extiende hasta el momento en que las rocas se han enfriadas debajo de la temperatura de *Curie*. A este tipo de imantación remanente se llama imantación termoremanente. En el caso de rocas fundidas rápidamente enfriándose como las corrientes de lava por ejemplo sus minerales magnéticos se alinean paralelamente a la dirección del campo geomagnético existente en el tiempo de la solidificación y del enfriamiento de las rocas. En el caso de las rocas sedimentarias clásticas los granos magnéticos se alinean durante la deposición en agua quieta según la dirección del campo geomagnético existente. Este tipo de imantación se denomina imantación remanente de deposición (Reyes G. L. R., 2009).

3.1.2 Yacimiento

La zona mineralizada de Jacala presenta dos características metalogenéticas diferentes; la primera y mayormente estudiada es cerca del intrusivo El Calvario que cubre el área más interior afectada por el metasomatismo y se encuentra incluida dentro de la segunda de mayores dimensiones y llamada El Pinalito, que abarca las brechas y depósitos manganesíferos.

Elvir en 1961 caracteriza tanto física, mineralógica y estructuralmente los yacimientos de Jacala y San Nicolás, clasificándolos como yacimientos

hidrotermales y depósitos secundarios supergénicos, consistentes de vetas y filones de origen hipotermal y mesotermal, alojados en los contactos de rocas ígneas intrusivas con calizas o bien en fallas o fracturas.

Posteriormente, Huitrón (1979) argumenta que al sur de Jacala se encuentran los depósitos de hierro de La Encarnación y los de cobre de Flojonales, por lo que dichos yacimientos quedan incluidos dentro de la extensa franja mineralizada que va desde el Estado de Puebla hasta el estado de Querétaro, pasando por el Estado de Hidalgo.

Luego en 1983, Guerra, documenta la mineralización presente en el Distrito de Jacala, describiéndola en forma de cuerpos de reemplazamiento metasomático; en chimeneas, mantos y en menor proporción vetas, las cuales son producto de un hidrotermalismo tardío.

Moreira *et al.*, 1996, añade que los depósitos de esta región pertenecen a la provincia metalogénica de yacimientos tipo *skarn*, del noreste de México, por lo que se considera a esta región como parte del cinturón plumbo-zincífero de Xilitla-Tamazunchale, paralelo a la primera provincia.

3.1.2.1 Clasificación de Yacimientos Minerales

Lindgren introdujo su sistema de clasificación (tabla 3.1) en 1913; se usa hoy en día casi en su forma original. Se han añadido términos tales como "teletermal" (Graton, 1933) y "exotermal" (Buddington, 1935). Ridge en 1968 reconoció la necesidad de revisión, conservando los principios básicos de Lindgren.

El sistema de Lindgren está considerado como el mejor para uso en el campo. Una modificación que parece esencial es una atenuación del papel del magma. Por consiguiente el origen del calor no se especifica. El término "hidrotermal" significa simplemente "agua caliente" y no implica asociación magmática. Tal cambio en el sistema de clasificación fue sugerido por K.L. Williams y se adapta bien con los descubrimientos de los estudios isotópicos y de inclusiones fluidas.

Las denotaciones de temperatura y presión en el esquema de Lindgren son a lo más solamente aproximadas y sujetas a modificación constante. Por ejemplo, aunque la mayor parte de la metalización en los yacimientos mesotermales tiene lugar posiblemente entre los 300° y 200° C, los estados iniciales y finales de la deposición mineral pueden pasar de estos límites.

Tabla 3.1.- Esquema general de la clasificación de Lindgren.

Tipo de Yacimientos	Temperatura °C	Presión
I. Depósitos por Procesos mecánicos.	-	-
II. Depósitos por Procesos mecánicos.	-	-
A. En aguas superficiales.	-	-
1. Por reacciones.....	0 -70	Media a Alta
2. Evaporación.	-	-
B. En la masa de rocas.	-	-
1. Concentraciones de sustancias contenidas en las rocas:	-	-
A) Por meteorización.....	0 - 100	Media
B) Por agua subterránea.....	0 - 100	Media
C) Por metamorfismo.....	0 - 400	Alta
2. Por sustancias introducidas:	-	-
A) Sin actividad ígnea.....	0 - 100	Media
B) Relacionadas con actividad ígnea:	-	-
a) Pro aguas ascendentes:	-	-
➤ Depósitos epitermales.....	50 - 200	Media
➤ Depósitos mesotermales.....	200 - 300	Alta
➤ Depósitos hipotermales.....	300 - 500	Alta +
b) Por emanaciones ingas directas:	-	-
➤ Depósitos pirometasomático.....	500 - 800	Alta +
➤ Sublimados.....	100 - 600	Baja a Media
C. En magmas por diferenciación:	-	-
1. Depósitos magmáticos.....	700 - 1500	Alta +
2. Pegmatitas.....	575 +/-	Alta +

Cabe mencionar que ninguno de estos criterios es infalible; debido a la complejidad y variabilidad de los factores involucrados, los minerales que normalmente se forman en una zona también se forman en otros lugares, a presiones y

temperaturas más altas o más bajas. Las zonas deposicionales se caracterizan por ciertas asociaciones de minerales de mena y minerales de ganga, así como por la presencia de ciertos productos de alteración de la roca en cajante (Bateman A. M. 1968).

3.1.3 Yacimientos de Tipo *Skarn*

El término *skarn* fue introducido por petrólogos metamórficos suecos para designar rocas metamórficas regionales o de contacto constituidas por silicatos de Ca, Mg y Fe derivados de un protolito de calizas y dolomitas en las cuales se ha introducido metasomáticamente grandes cantidades de Si, Al, Fe y Mg, a partir de una intrusión ígnea.

De modo que se entiende por *skarn* rocas que contienen minerales calcosilicatados, como por ejemplo: diópsido, wollastonita, granate andradita y actinolita. Estas comúnmente ocurren en aureolas metamórficas de contacto entorno a plutones que intrusionan secuencias calcáreas.

A este tipo de rocas metamórficas se asocia un variado grupo de depósitos minerales extremadamente irregulares, los que pueden formar lenguas de mena que se extienden a lo largo de cualquier estructura planar (estratificación, diaclasas, fallas, etc.) y su distribución dentro de la aureola de contacto de un intrusivo es a menudo irregular. Los cuerpos de mena pueden terminar abruptamente con cambios en la estructura.

Los depósitos de tipo *skarn* han sido denominados también:

- Metamórficos hidrotermales.
- Metamórficos ígneos.
- Metamórficos de contacto.
- Pirometasomáticos (Lindgren, 1922).

Sin embargo, el término ***skarn*** es ampliamente utilizado y es adecuado para referirse a este tipo de depósitos relacionados a aureolas de contacto de intrusiones

dentro de secuencias calcáreas estas últimas rocas formadas por calcita o dolomita (CaCO_3 y $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$) se convierten en mármoles, rocas córneas calcosilicatadas (hornfels) y/o *skarns* por el efecto del metamorfismo de contacto.

La producción principal de depósitos de tipo *skarn* incluye: **Fe, Cu, W, C (grafito), Zn, Pb, Mo, Sn, U, Au, Ag, Te, Bi, granate, talco y wollastonita.**

El metamorfismo de contacto afecta a las rocas encajonantes, pero es frecuente que la intrusión también sufra efectos metasomáticos. Esto resulta en una zonación de ***endoskarn*** (minerales calcosilicatados dentro del intrusivo) y ***exoskarn*** (*skarn* en las rocas calcáreas). El ***endoskarn*** ocurre principalmente en la periferia de los plutones intrusivos donde el flujo de fluidos fue hacia adentro del plutón o paralelo al contacto de éste, pero usualmente están ausentes en las cúpulas de intrusiones con mineralización de tipo pórfido debido a que domina el flujo ascendente de los fluidos provenientes del plutón.

La formación de depósitos de tipo *skarn* involucra esencialmente tres etapas:

1) Metamorfismo isoquímico: Recristalización metamórfica y cambios mineralógicos reflejando el protolito y circulación de fluidos a alta temperatura formando minerales calcosilicatados. Incluye además el desarrollo de: mármol, rocas córneas, cuarcitas, *skarn* de reacción, skarnoides, talco y wollastonita hacia la periferia.

2) Etapas múltiples de metasomatismo: Cristalización del magma y liberación de una fase fluida produciendo *skarn* metasomático. Se forman principalmente minerales anhidros por acción de fluidos de derivación magmática a temperaturas de 400° - 800°C. Usualmente en esta etapa ocurre o comienza la mineralización.

3) Alteración retrógrada: Enfriamiento del plutón y circulación de aguas de temperatura más baja, posiblemente meteóricas, oxigenadas, causando alteración retrógrada de los minerales calcosilicatados metamórficos y metasomáticos. En esta etapa se forman nuevos minerales hidratados de temperatura más baja, a partir de los minerales anhidros formados previamente. Incluyen: epidota, actinolita, clorita y

otras fases minerales hidratadas, típicamente con control estructural y sobrepuestos a la secuencia de progrado (fallas, contactos estratigráficos o intrusivos). En algunos casos la mineralización se extiende también a esta etapa de retrogrado.

Los depósitos minerales de tipo **skarn** son yacimientos de reemplazo metasomático caracterizados por la presencia de minerales calcosilicatados de grano grueso de Ca, Fe, Mg y Mn.

Reemplazan selectivamente a rocas carbonatadas y pueden asociarse con mineralización metálica de **W, Cu, Mo, Zn, Pb, Sn, Fe-Ca y en menor proporción Au-Ag.**

3.1.3.1 *Skarn* Auríferos

Los *skarns* auríferos fueron introducidos como una clase diferente de depósitos minerales hasta 1987. Este tipo de depósitos minerales no están clasificados en base a la combinación de minerales que los forman, tanto de metálicos como de los silicatos en sub-ganga, ni en base al ambiente geológico en el que se depositaron, sino que su definición se basa en sus aspectos económicos. El boletín 1930 del Servicio de Investigación Geológica de los E.U.A. (USGS) publicado a principios de 1991, define a los *skarns* auríferos como aquellos *skarns* con contenidos de 1 gramo o más por tonelada. Se reconocen dos sub-tipos de *skarns* auríferos: *gold skarns* (*Skarns* auríferos propiamente dichos) y los *By-Product gold skarns* (*Skarns* con oro como sub-producto). Los depósitos del sub-tipo “*gold skarns*” son aquellos en los cuales el oro es el único mineral económicamente recuperado, o al menos predominante. Mientras que los *skarns* del sub-tipo “*by-product*” son aquellos que se explotan principalmente para extraer minerales básicos ferrosos, pero que también contienen un gramo o más de oro. La mayoría de los “*by-product gold skarns*” conocidos son de cobre, pero también algunos *skarns* de hierro o zinc presentan contenidos de un gramo o más de oro, y por lo tanto considerados como *skarn* auríferos (Meinert, 1989).

El oro en *skarns* se encuentra asociado con minerales opacos que fueron introducidos en el *skarn* posteriormente a la etapa prógrada de la formación del *skarn*. El oro puede aparecer libre, aunque es más común encontrarlo como inclusiones microscópicas en minerales de sulfuros. El oro es generalmente invisible, por lo que muchos *skarns* auríferos no han sido descubiertos. En *skarns* ferrosos el oro tiende a concentrarse en lugares donde abundan los sulfuros, normalmente en las partes de *skarn* enriquecidas en pirita y calcopirita.

El oro se presenta más comúnmente en *skarns* formados en ambientes de reducción y ambientes de oxidación. Al usar los términos de reducción y oxidación, se refiere a las condiciones de formación. Una forma de indicar las condiciones de reducción en un *skarn* es con el cociente de Fe_2O_3/FeO . En términos más prácticos, los *skarns* reducidos presentan piroxenos de colores mas oscuros (hedenbergita) y por la presencia de pirrotita, arsenopirita, telurios, bismuto nativo, y por cantidades menores de calcopirita y pirita (McAnulty, 1991).

3.1.4 Clasificación de los depósitos de *Skarn*

La clasificación de los *skarn* se realiza con base al metal económico dominante (en base a Einaudi y Burt, 1982). Existen cinco tipos principales que son: hierro, tungsteno, cobre, plomo-zinc y el de estaño- tungsteno.

***Skarn* de Hierro**

Los *skarn* de hierro son producto de la intrusión diorítica, de troncos o diques de gabro o sienita y en ocasiones de diabasa. En el *endoskarn* están presentes la epidota y los piroxenos; dirigiéndonos en la interfase de *endoskarn* y el *exoskarn* localizamos ferrosilita, granate, epidota, magnetita, ilvaita, anfíbol, y clorita. El *exoskarn* está compuesto por magnetita en su mayoría; calcopirita, cobaltita y pirrotita; los metales asociados en estos *skarn* además del Fe son de Cu, Ca, y Au.

Skarn de Tungsteno

El tungsteno o wolframio (W) es el metal predominante, acompañado de Mo, Cu, y en menor cantidad Zn y Bi, formándose en el cuerpo scheelita, molibdenita, calcopirita, esferita pirrotita, magnetita pirita y bismuto nativo. La morfología de los protones es general mente amplia y extensa, como los batolitos de cuarzodiorita o cuarzomonzonita; raras veces alaskita. Minerales como el piroxeno y las plagioclasas-muscovita-sulfuros, predominan en el *endoskarn*. Los primeros minerales en la aureola son ferrosilita - hedenbergita, granate, vesuvianita (idocrasa) y wollastonita. Posteriormente, espesartita, granate, vesuvianita, hornblenda, plagioclasa. Minerales con concentración elevada de Al, Fe, y bajos en S se presentan en le *exoeskarn*.

Skarn de Cobre

Se forma en pequeños troncos y diques de granodiorita o cuarzomonzonita, con epidota, piroxeno y granate; los metales asociados son los Mo, Zn, W, y con gran presencia el Cu, ocurriendo en minerales como calcopirita, pirita, hematita, magnetita y arsenopirita. En el *exoskarn* exhibe mineralización alta en Fe, S, y baja en Al y Mn. En la aureola se forman los primeros minerales: andradita, diópsido y wollastonita, siendo los últimos minerales: actinolita (clorita y montmorillonita).

Skarn de Plomo-Zinc

Los troncos y diques granodioríticos, graníticos y dioríticos, aportan las condiciones adecuadas para formar con metales (Zn, Pb, Ag, Cu, y W); minerales como la esfarelita, galena, pirrotita, magnetita, calcopirita y arsenopirita, que se acompañan paragenéticamente con no-metálicos como: epidota, piroxeno y granate, otros productores de la alteración argílica y propilítica que son menos abundantes. En la zona de la aureola de contacto se ubican los minerales como: hedenbergita magnésica, granate andradítico, bustamita, rodonita (como primeros minerales), los últimos son: actinolita, clorita, rodocrosita, entre otros. En el *exoskarn* encontramos minerales con concentración elevada en Fe, Mn, S, y bajos en Al.

Skarn de Estaño – Tungsteno

Los troncos y batolitos graníticos con origen a este depósito; la casiterita scheelita, esfalelita, pirrotita, pirita y arsenopirita presentes en el cuerpo da pie a concluir que los metales asociados son Sn, F, W, Be, y Zn. En la porción central del depósito encontramos vesuvianita, espesartita, almandino rico en Sn, andradita, malayaita, burita, datolita, anfíbol, mica, clorita, turmalina y fluorita. En el exterior del *skarn* se confinan minerales con alto contenido en Al, F y bajo en Fe, S (López-Acosta, 2007).

3.1.5 Descripción y Mineralización

El cuerpo mineralizado en el área de estudio tiene una longitud aproximado de 200 a 300 metros con un ancho de aproximadamente 50 metros y 10 metros de potencia, cruza la carretera México-Laredo entre los kilómetros 269 y 270, esta asociado a un cuerpo ígneo intrusivo que presenta textura porfirítica, constituida por fenocristales de feldespatos potásicos alterados de color blanco contenidos en una matriz fina de plagioclasas, teniendo como máfico dominante la biotita. El color de la roca depende del grado de alteración y varía de blanco a gris claro verdoso.

La forma que adopta los cuerpos minerales son lenticulares alargados en dirección a la actitud del mismo, lo cual les da característica de cuerpos en forma de bolsadas aisladas una de otra, pero que en conjunto forman yacimientos de interés económico.

Los depósitos minerales en el área de estudio ocurren en la zona de skarn encontrado en contacto con la caliza y el intrusivo. Los minerales de mena de este depósito principalmente consisten de hierro (magnetita y hematita) acompañada por cobre (calcopirita y malaquita secundaria), en general se encuentran depósitos principalmente compuestos por magnetita acompañados por minerales de cobre (Zamorano – Téllez, 2011).

La mineralización en la zona El Refugio es básicamente de óxidos, entre los que destacan hematita, magnetita y goetita, en menor proporción sulfuros como pirita y

principalmente calcopirita, en esta última es en la que se podemos encontrar partículas de aproximadamente 1 a 12 micras de teluros de oro con bismuto ó solo teluros de oro. Los granitoides encontrados en esta área son de grano medio (milimétrico) en el que se pueden apreciar a simple vista plagioclasa, biotitas, anfíboles y minerales opacos. Asi también los granitoides se asocian a un skarn de wollastonita, granate y epidota con mineralización de pirita y calcopirita diseminadas con hematita y limonita y malaquita accesorias (Flores – Castro, 2001).

Los valores de fierro en la mina El Refugio, de acuerdo al panorama minero del estado de Hidalgo menciona que se certificaron reservas de 221,970 toneladas y 62.7 % Fe_2O_3 (Servicio Geológico Mexicano, 2011).

3.2 PROSPECCIÓN GEOFÍSICA: Fundamento teórico del método magnético

3.2.1. El magnetismo como herramienta de exploración

La exploración magnética es un método que mide el campo magnético natural existente de la Tierra, además del efecto integrado de las rocas del subsuelo; el campo magnético es un campo vectorial rotacional descrito por la teoría del potencial. Esta técnica geofísica involucra mediciones del campo medible con un (magnetómetro) en un área de investigación a lo largo de una línea o serie de líneas. Los levantamientos pueden hacerse por tierra, o por aire, van juntos los parámetros de separación entre línea, altura del levantamiento y densidad de lecturas.

Al igual que el campo gravitacional, el campo magnético es un campo vectorial (tiene dirección y magnitud en un punto) y es un campo potencial. Sin embargo, el campo magnético es dipolar en naturaleza (a diferencia del campo gravitacional), es decir, el campo gravitacional terrestre apunta hacia el centro (de masa) de la Tierra, mientras que el campo magnético, es similar a una barra de imán en el centro de la Tierra (Figura 3.1). La dirección del campo en un punto se define como la dirección que tomaría un polo norte magnético hipotético si se coloca en un punto en el

campo. Así, el polo sur terrestre, actualmente se encuentra en el polo norte geográfico.

Como los cambios de densidad dan lugar a anomalías del campo gravitacional, los cambios de la susceptibilidad magnética generan anomalías del campo magnético. También, es posible que un material ferromagnético genere su propio campo permanente (una polarización magnética de volumen).

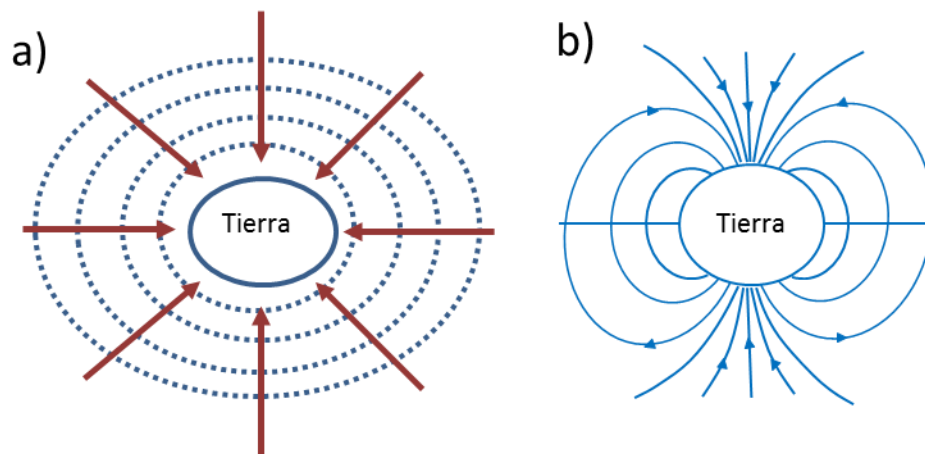


Figura 3.1.- “a” las líneas del campo gravitacional apuntan hacia el centro de masa de la Tierra. “b” las líneas del campo magnético de la Tierra son dipolares por naturaleza (Lillie, 1999).

3.2.1.1 Breve historia del método magnético

El método magnético es el más antiguo de todas las técnicas de la exploración geofísica. Las primeras observaciones sobre los imanes se llevaron a cabo por el filósofo griego Tales en el Siglo VI a.C., los chinos estaban usando la brújula magnética hacia el año 1100 d.C., los europeos occidentales en 1187, los árabes de 1220, y los escandinavos en 1300. Algunos especulan que los Chinos descubrieron el efecto de orientar la magnetita en el siglo IV d. C., y que los barcos chinos habían llegado a la costa este de la India por primera vez en el año 101 d. C., con una brújula de navegación (Reynolds 1995).

Sir William Gilbert (1540-1603) hizo la primera investigación del magnetismo terrestre. En "De Magnete" mostró que el campo magnético de la Tierra se puede aproximar al campo de una esfera uniformemente magnetizada por un imán que se extiende en dirección norte-sur, cerca de la dirección del eje de rotación de la Tierra (Telford et al., 1990).

La atracción de la aguja de una brújula a las formaciones naturales de hierro finalmente llevó a su utilización como una herramienta de prospección en el Siglo XIX. Como la asociación entre magnetita y la base de los depósitos de metal se han entendido mejor, la demanda de instrumentos sensibles creció más, hasta la Segunda Guerra Mundial, estos instrumentos fueron en su mayoría adaptaciones especializadas de la brújula vertical, aunque los instrumentos basados en rotación de bobinas inductoras también se desarrollaron y se utilizaron tanto para levantamientos en tierra como en aire (Reynolds, 1995).

Andre-Marie Ampere, en 1820, asoció los campos magnéticos a las corrientes eléctricas en términos de la fuerza. Actualmente, las corrientes eléctricas se miden en amperes y la intensidad de un imán (el momento dipolar), tiene unidades de amperes metros cuadrados (Am^2).

En 1828, Carl Friedrich Gauss inicia su investigación en el magnetismo e inventa el primer magnetómetro, a la par con Wilhem Weber. El inventor Americano Nikola Tesla, también realizó importantes contribuciones a la ciencia, inventando la bobina Tesla y el dínamo de corriente alterna. Dependiendo del sistema que se esté utilizando, la intensidad del campo magnético tiene unidades de Gauss, Weber por metro cuadrado o Teslas ($1\text{T}=\text{Wbm}^{-2}=10^4$ gauss), las unidades para el SI es el $\text{nT}=10^{-9}$ Tesla. James Clerk Maxwell, desarrolló la teoría del electromagnetismo en 1864 mostrando la interrelación del campo eléctrico y magnético. Las cuatro ecuaciones de Maxwell siguen siendo la piedra angular en estos días.

3.2.1.2 Recientes desarrollos en las técnicas de registro magnético

Las primeras medidas del campo magnético se realizaron en 1910 desde una plataforma aérea por Edelman, quien diseñó una balanza vertical para utilizarla en un globo. Sin embargo, las medidas adquiridas de este modo no se aplicaron a la prospección geofísica hasta 1921, año en el que Lundberg midió el campo magnético sobre el yacimiento de Kiruna (Suecia) desde un globo.

Víctor Vacquier y sus asociados en la Gulf Research & Development Company, fueron los actores clave en el desarrollo del primer magnetómetro de saturación para uso aéreo y submarino (1940 y 1941), durante la Segunda Guerra Mundial. Este instrumento ofrece un orden de magnitud y mejora la sensibilidad respecto a los diseños anteriores. Después de la guerra, hubo un avance iniciando una nueva era en el uso de estudios magnéticos desde el aire, tanto para la industria de exploración como para los esfuerzos del gobierno para obtener la geología regional a escala nacional (Hanna, 1990).

Los oceanógrafos adaptaron rápidamente magnetómetros para uso marino. En 1948, el Observatorio Geológico Lamont, pidió prestado un cardán al Servicio Geológico de los EE.UU, donde montaron un magnetómetro de saturación y lo remolcaron a través del Atlántico (Heezen et al., 1953). La Institución —Scripps de Oceanografía, comenzó a remolcar un instrumento similar a finales de 1952 y en 1955 realizó el primer levantamiento magnético marino en 2D de la costa del sur de California (Mason, 1958). Este famoso levantamiento de prospección magnética marina, mostró un patrón de bandas magnéticas compensadas por una zona de fractura: más tarde, las bandas fueron atribuidas a la expansión del fondo marino, durante los períodos de inversiones geomagnéticas (Morley et. al., 1964).

El uso de la magnetometría para la exploración geofísica es común y actualmente existen tres tipos de magnetómetros. El fluxgate, el de precesión de protones y el de bombeo óptico.

El magnetómetro se diseñó durante la Segunda Guerra Mundial como un dispositivo para detecciones submarinas. Consiste de dos bobinas y analiza la diferencia en la corriente eléctrica para determinar el campo magnético total en un punto. El magnetómetro fluxgate puede dar las componentes direccionales del campo, así como el campo total. Puede resolver rasgos alrededor de 1 nT (Telford et al., 1996).

El magnetómetro de precesión de protones trabaja con el principio de resonancia magnética nuclear. El instrumento contiene núcleos de hidrogeno (protones) que preceden alrededor del campo magnético terrestre. Los protones tienen una velocidad angular (frecuencia precesional) que es proporcional a la magnitud del campo magnético terrestre. La constante de proporcionalidad se conoce con una exactitud de 0.001 % y así, las mediciones son precisas. El equipo tiene mayor resolución que el magnetómetro fluxgate, mejorando la exactitud hasta por dos órdenes de magnitud (Jensen, 1965). Sin embargo, el equipo sólo mide la magnitud del campo total.

El magnetómetro de bombeo óptico opera con el principio de niveles de energía alterna de los electrones en los átomos aplicando alguna fuente de energía. Los elementos específicos (cesio, rubidio, sodio y helio en particular) se han elegido, ya que responden a los niveles de energía producidos por el campo magnético terrestre. Es posible medir anomalías del campo total con una exactitud de aproximadamente 0.01 nT. Los magnetómetros de vapor de cesio son un tipo común del magnetómetro de bombeo óptico (Hardwick, 1984).

La disponibilidad del Sistema de Posicionamiento Global (GPS), de la década de 1990, ha mejorado enormemente la precisión de localización y, por lo tanto, el margen de error de los levantamientos aéreos. Al mismo tiempo, exploradores comenzaron a diseñar levantamientos aéreos para resolver en detalle las variaciones del campo magnético como las causadas por fuentes intrasedimentarias (Pierce et al., 1998). La mayor resolución se ha logrado, principalmente minimizando el espacio entre líneas y la reducción de la altitud de vuelo.

Los datos del campo magnético pueden colectarse desde plataformas aéreas o marinas, o también como parte de un prospecto en tierra. Los estudios aéreos tienen el beneficio de que son capaces de cubrir grandes áreas en un tiempo relativamente corto y pueden utilizarse para cubrir áreas que no pueden alcanzarse en tierra (por ejemplo, sobre agua y en terrenos montañosos). Un factor importante en estudios aéreos es la rapidez con que el equipo realiza los registros. La distancia de los recorridos aéreos sobre el periodo de medición debe ser pequeño de otra manera quedan manchas espaciales en los datos.

Mientras que la aeronave genera sus propios campos magnéticos, el magnetómetro suele ser remolcado alguna distancia por debajo de la aeronave, en un recipiente conocido como "stinger o agujón". Por otro lado, los sensores pueden colocarse en las puntas de las alas o en la cola de la aeronave, con protección proporcionada por las bobinas de descarga eléctrica o imanes permanentes colocados adecuadamente. Los datos casi siempre son tomados de líneas de vuelo paralelas, con líneas perpendiculares (tie-lines) utilizadas para ayudar a correlacionar los datos. Los datos deben someterse a varias correcciones antes de que sean utilizados para la interpretación. Estas incluyen la corrección de las diferencias de altitud, la deriva del instrumento y las diferencias en la línea de cruce de puntos. El campo magnético terrestre varía con el tiempo y esto, debe corregirse como parte del procesamiento mediante el uso de una estación base magnética fija.

Los estudios magnéticos terrestres pueden ser similares a los estudios aéreos en que los datos se colectan con líneas cruzadas para amarrar los datos. Sin embargo, los estudios terrestres toman más tiempo para realizarlos y para el trabajo regional, los estudios aéreos en general son más factibles.

3.2.2 Anomalías Magnéticas

La desviación de la intensidad del campo de lo normal se denomina anomalía magnética, causada por la variación de la composición de las rocas que constituyen la corteza terrestre.

Cualquier sección de observación a través de un cuerpo magnético local (cuerpo fuente), normalmente pasará por lugares donde el campo magnético tiende a reforzar el campo geomagnético. De ello se deduce que un cuerpo magnético sencillo compacto, produce una anomalía magnética que tiene aspectos positivos y negativos. Esto es consecuencia de la propiedad física medida del cuerpo fuente a interpretar.

3.2.3 Propiedades magnéticas de las rocas y su composición mineralógica

Todas las sustancias se dividen según sus propiedades magnéticas en diamagnéticas ($k < 0$), paramagnéticas ($k > 0$) y ferromagnéticas. Las últimas poseen, para las condiciones de temperatura conocidas, altos valores de susceptibilidad y se dividen en ferromagnéticos, antiferromagnéticos y ferrimagnéticos.

El diamagnetismo es propio de todas las sustancias, ya que la naturaleza de su unión está relacionada con el giro de los electrones alrededor del núcleo. El campo magnético externo ejerce una acción inductiva en los electrones que giran, a causa de la cual aumenta la frecuencia de la pulsación de Larmor en las orbitas de los electrones; como consecuencia del aumento de velocidad angular de los mismos, aparece un momento magnético orientado en sentido contrario al campo magnetizante.

Sin embargo, el diamagnetismo propiamente dicho, se manifiesta solamente en el caso de que los átomos de la materia no tengan momentos magnéticos constantes. Esta condición se cumple en caso de estructura electrónica simétrica, en la que los momentos magnéticos de los electrones, tanto de spin como orbitales, se compensan y en ausencia de un campo magnético externo, el momento resultante en cada átomo se hace igual a cero (Reinolds, 1997).

Las propiedades magnéticas serán distintas si existen en el átomo capas electrónicas incompletas. Entonces, el momento resultante en cada átomo es distinto de cero y la dirección de los momentos, en ausencia de un campo magnético externo, es indeterminada, dado que el momento térmico destruye

cualquier orientación coordinada. Un campo magnético externo, ejerce una influencia orientadora en los momentos constantes de los átomos, a causa de la cual, queda la materia en un estado de magnetización. Al incrementarse el campo magnetizaste, aumenta la cantidad de átomos con momentos orientados por el mismo, aunque siga siendo relativamente pequeña. Al estar en concordancia con la dirección de los vectores, la magnetización del cuerpo será positiva ($K > 0$), es decir, la sustancia será paramagnética. El paramagnetismo se manifiesta con más intensidad que el diamagnetismo (Revees, 2005).

La susceptibilidad magnética de las sustancias diamagnéticas se expresa en décimas o unidades del orden de magnitud de 10^{-6} cgs (cobre, plata, oro, mercurio, plomo, arsénico y otros).

La susceptibilidad de las sustancias paramagnéticas se manifiesta con más intensidad que el diamagnetismo por lo que se puede observar en algunas sustancias como el cromo, molibdeno, wolframio, uranio, manganeso y otros.

Las sustancias ferromagnéticas se distinguen por valores altos de K y una relación compleja entre la magnetización y la magnitud del campo magnetizante y la temperatura. Las propiedades de los materiales ferromagnéticos se manifiestan hasta su temperatura crítica (punto de Curie), por arriba de la cual, se transforman en paramagnéticos. Al grupo de ferromagnéticos pertenecen el hierro, níquel, cobalto y diversas aleaciones.

El ferromagnetismo se explica por la existencia de zonas de magnetización espontánea, llamadas dominios magnéticos (Reeves, 2005), dentro de los cuales, los momentos magnéticos de los átomos tiene el valor correspondiente al estado de saturación magnética y son paralelos entre sí o antiparalelos.

Si los materiales ferromagnéticos no están magnetizados, entonces el momento magnético total del cuerpo es nulo a causa de una distribución caótica de los momentos resultantes de los dominios.

La magnetización de un cuerpo ferromagnético bajo la acción de un campo magnético externo, se produce por un aumento en el volumen de los dominios, magnetizados según la dirección del campo y por la orientación de sus momentos magnéticos, también en la dirección del campo de rotación de momentos.

A los cuerpos ferromagnéticos corresponden ciclos de histéresis típicos. Bajo campos magnéticos muy altos, la magnetización alcanza un valor de saturación (J_s), en el cual, los momentos magnéticos individuales están alineados con el campo magnético. Al reducirse a cero, el material conserva una parte de la magnetización residual, la cual se considera como magnetización remanente (J_r).

En materiales antiferromagnéticos, como la hematita, el acoplamiento es antiparalelo con igual número de dipolos en cada dirección. Los campos magnéticos se cancelan y/o hay efectos magnéticos externos.

En materiales ferrimagnéticos, como la magnetita, el acoplamiento es antiparalelo, pero el número de dipolos en cada dirección no es el mismo, por lo que pueden tener magnetización espontánea y susceptibilidad alta. En la mayor parte de los minerales que originan el magnetismo de las rocas son de este tipo (Tabla 3.2) debido a la presencia de la magnetita ($FeO \cdot Fe_2O_3$), la titanomagnetita con un exceso de (TiO_3) y la pirrotina (FeS), a menudo se incluye en este grupo la hematita (Fe_2O_3) en el denominado estado α , que es antiferromagnética y tiene una susceptibilidad magnética débil pero una gran fuerza coercitiva y los momentos magnéticos de los átomos vecinos son de la misma magnitud pero anti paralelos; la maghemita tiene la misma composición química en (Fe_2O_3) en estado γ , por lo cual es ferromagnética; para temperaturas de algunos cientos de grados, pasa irreversiblemente a hematita, la cual es ferrimagnética, debido a que presenta momentos magnéticos de los átomos vecinos con la misma magnitud pero anti paralelos, la susceptibilidad es relativamente baja (Logachev y Zajarov, 1978).

Tabla 3.2. Propiedades magnéticas de minerales ferromagnéticos (Logachev y Zajarov, 1978).

MINERALES	K cgs	Js cgs	Hc cgs	Punto de Curie °C
Magnetita	0.3 – 2.0	490	10 – 50	578
Titomagnetita	–	75 – 490	–	100 – 578
Hematita	$1.10^{-3} - 10^{-4}$	1.5 – 2.5	7000 – 8000	675
Maghemita	0.3 – 2.0	435	10 – 130	–
Pirrotita	$1.10^{-3} - 10^{-2}$	17 – 70	15 – 110	300 – 325

Otros minerales ampliamente difundidos y que forman también rocas, tienen susceptibilidad magnética débil (Tabla 3.3). Ello hace que no tengan mucha influencia en la magnetización global de las rocas.

Tabla 3.3. Susceptibilidad magnética de minerales (Lanza y Meloni, 2006).

Minerales	K (μ SI) ^a
Diamagnético	
Dolomía	-40
Calcita	-15
Cuarzo	-15
Feldespato - K	-15
Yeso	-15
Paramagnéticos	
Clinopiroxenos	20 - 600
Orthopiroxenos	1000 - 3000
Anfíbol	100 - 1000
Biotita	800 - 3000
Moscovita	40 - 700
Clorita	70 - 1550
Olivino	-13 - 500
Granates	500 - 600
Ilmenita	300 - 350
Ferromagnético	
Goethita	2000
Hematita	$1000 - 5 \times 10^4$
Pirrotita	$5 \times 10^4 - 3 \times 10^4$
Magnetita	$10^6 - 10^7$

La magnetización remanente desaparece a partir de la temperatura de Curie en la transición (ferro-paramagnético), las distancias interatómicas aumentan y no se produce el acoplamiento de electrones, puesto que la energía térmica es superior a la magnética. En granos gruesos, la magnetización disminuye cuando existen dominios magnéticos con diámetros del orden del micrómetro, entre los cuales hay acoplamiento paralelo de dipolos. Cuando no hay campos externos, los dominios se orientan para reducir las fuerzas magnéticas entre dominios. El límite entre dominios es una zona estrecha en que los dipolos pasan de la dirección de un dominio a la del otro.

Cuando un grano multidominio se somete a un campo externo débil, el límite entre dominios se amplía y produce un crecimiento de los cristales magnetizados en la dirección del campo. Frente a los dominios magnetizados en otras direcciones (magnetización inducida), ésta desaparece al desaparecer el campo. Si el campo es mayor, los límites entre dominios quedan modificados de forma irreversible, de modo que hay una magnetización remanente J_r . Si los campos son mayores, todas las paredes se modifican y se produce la saturación magnética J_s .

CAPITULO IV

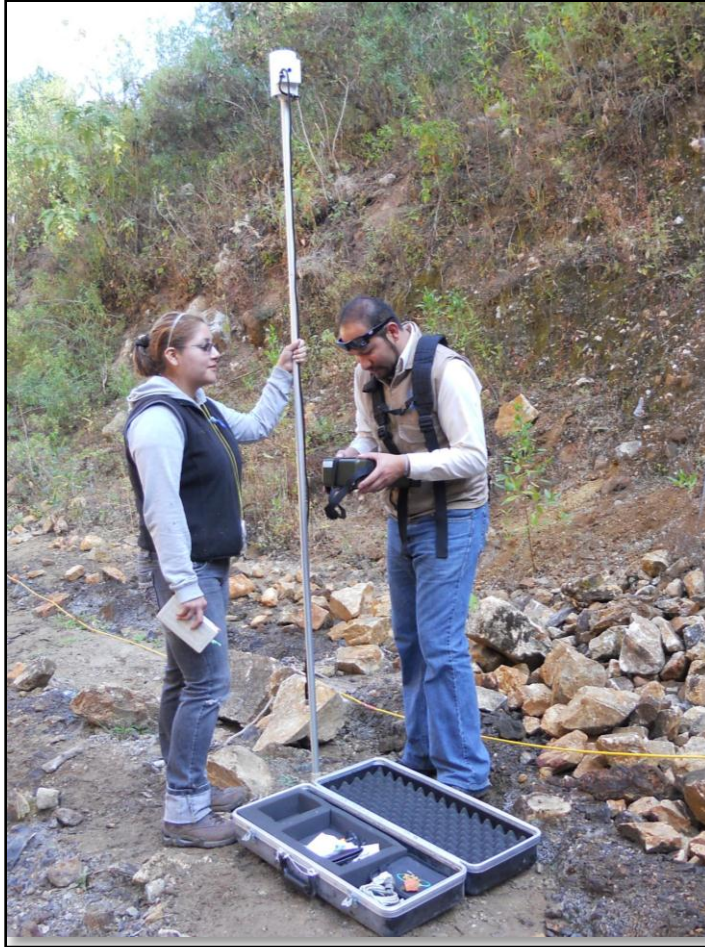
4 Metodología

4.1 Método Magnético

Es el método geofísico más antiguo aplicable en la prospección de exploraciones mineras, estudia el campo magnético producido por los cuerpos y estructuras en el subsuelo, su intensidad depende del contenido de magnetita y materiales magnéticos en ellos. Permite ubicar zonas y cuerpos minerales, zonas de falla y modelar estructuras geológicas a pequeña y gran escala.

4.2 Trabajo de campo

Para realizar las lecturas magnéticas, el operador debe de estar libre de materiales magnéticos sobre su persona, el cual da la posibilidad de obtener la precisión hasta de 1gamma. Asimismo, el sensor debe mantenerse limpio para evitar la posible contaminación; el sensor del magnetómetro es llevado sobre un soporte de 2.20 metros y una mochila en el que se registran las lecturas como se muestra en la fotografía 4.1.



Fotografía 4.1.- Posición del Magnetómetro de protón con alta precisión (Geometrics G-856).

La metodología en campo, se inicia con tres lecturas de calibración así como establecer la hora de inicio, ya que el campo magnético varía dependiendo de la hora, la cual no es constante, para posteriormente iniciar con las lecturas sobre cada línea, donde cada punto es ubicando topográficamente en cada estación de lectura; al llegar a la última medición se tiene que hacer un cierre, lo más factible es hacer el cierre en dos horas, regresar al inicio, medir nuevamente para saber la varianza que hubo de lectura de inicio y lectura final, así sabremos cuánto cambio el campo magnético, máximo se tiene dos horas porque si no el error se propaga, ya que hay más variación de tiempo (fotografía 4.2).



Fotografía 4.2.- Mediciones en el área de trabajo.

Se realizaron cinco líneas en dos horas, cada línea midió 100 metros, todas estas dirigidas al norte, con estaciones de lectura a cada 10 metros, al finalizar cada línea, se midieron 10 metros, al oriente y se continuaba con la siguiente línea, para concluir todas en el rango de tiempo ya mencionado.

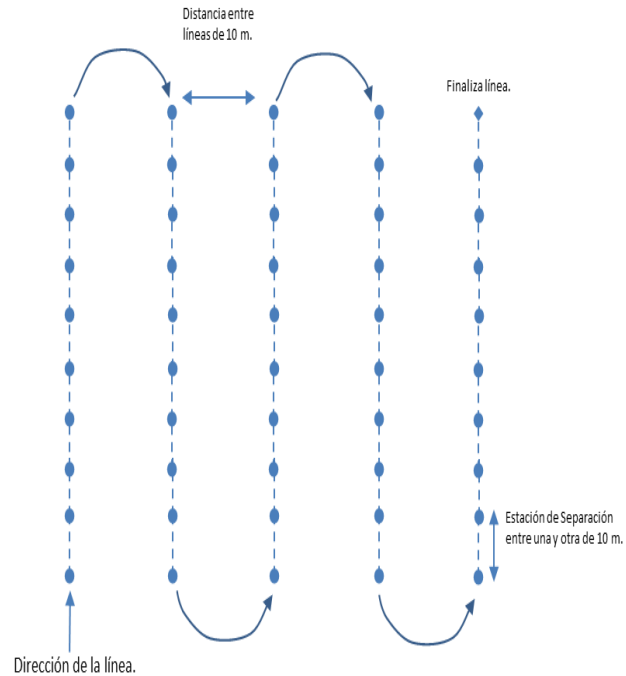


Figura 4.1.- Diagrama de trabajo en campo.

4.3 Muestreo

Se realizaron dos visitas al campo para reconocimiento del área de estudio (Junio 2010; Diciembre 2011), en la primera visita se realizó el reconocimiento geológico por medio de caminamientos e interpretación de los diferentes tipos de litología y estructuras encontradas en el área de estudio. Durante la segunda visitas se obtuvieron 50 puntos de muestreo con la ayuda del equipo de Magnetometría (*Magnetómetro de protón con alta precisión Geometrics G-856*).

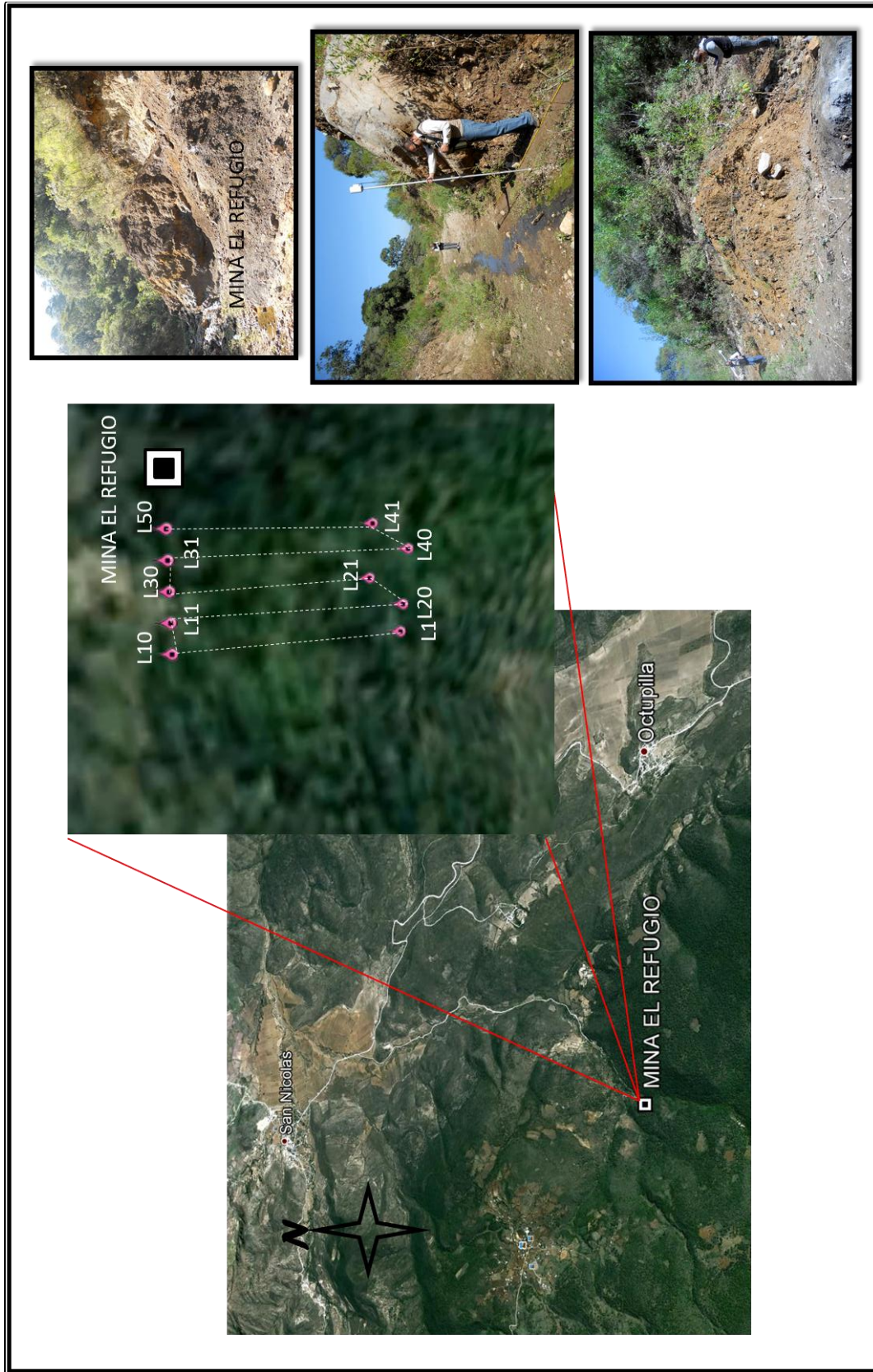


Figura 4.2.- Muestreo magnetométrico en la mina El Refugio.

CAPITULO V

5 Resultados

5.1 Resultados de Campo

Para la capturar de datos en campo se respaldó en el equipo (*Magnetómetro Geometrics G-856*) y se realizó un respaldo en campo capturando los datos en una libreta, en la cual se realizo una cuadrícula, donde venía el número de estación, el Campo Magnético Total (CMT), se registró la hora y las coordenadas de cada punto.

Tabla 5.1.- Resultados de muestreo en campo.

LINEA 1					
Estación	X	Y	Z	CMT (Gamas)	HORA
L1	483481	2311494	1339	41142.8	12:00
L2	483481	2311504	1344	41092	12:04
L3	483481	2311514	1348	40918.8	12:05
L4	483481	2311524	1348	40615.2	12:06
L5	483481	2311534	1351	40082.4	12:08
L6	483481	2311544	1354	40267	12:09
L7	483481	2311554	1356	39546	12:10
L8	483481	2311564	1356	44931	12:11
L9	483481	2311574	1363	44057.8	12:12
L10	483481	2311584	1376	43303.1	12:13
LINEA 2					
L11	483491	2311584	1332	44612	12:19
L12	483491	2311574	1335	45133	12:21
L13	483491	2311564	1334	39175	12:22
L14	483491	2311554	1330	35852	12:23
L15	483491	2311544	1333	38563	12:24
L16	483491	2311534	1331	40330.4	12:25
L17	483491	2311524	1331	40899.6	12:26
L18	483491	2311514	1329	40895.4	12:27
L19	483491	2311504	1331	40330	12:29
L20	483491	2311494	1332	41592.6	12:30

LINEA 3					
Estación	X	Y	Z	CMT (Gamas)	HORA
L21	483501	2311494	1322	41570.8	12:36
L22	483501	2311504	1325	41197	12:39
L23	483501	2311514	1326	40118	12:41
L24	483501	2311524	1324	38750.2	12:42
L25	483501	2311534	1325	34679	12:44
L26	483501	2311544	1327	37779	12:47
L27	483501	2311554	1327	45873	12:49
L28	483501	2311564	1328	57427	12:51
L29	483501	2311574	1336	47396	12:52
L30	483501	2311584	1335	47104	12:53
LINEA 4					
L31	483511	2311584	1329	56563	12:54
L32	483511	2311574	1324	47189	12:57
L33	483511	2311564	1322	37777	12:59
L34	483511	2311554	1326	37014	13:00
L35	483511	2311544	1325	39136	13:02
L36	483511	2311534	1328	40287.6	13:03
L37	483511	2311524	1326	41525.2	13:06
L38	483511	2311514	1325	45487	13:07
L39	483511	2311504	1327	39440	13:10
L40	483511	2311494	1322	39634	13:12
LINEA 5					
L41	483521	2311494	1331	40740.4	13:15
L42	483521	2311504	1334	41469.8	13:18
L43	483521	2311514	1334	40870.2	13:22
L44	483521	2311524	1344	39952.6	13:29
L45	483521	2311534	1348	40095	13:33
L46	483521	2311544	1340	41801.6	13:35
L47	483521	2311554	1330	45619	13:37
L48	483521	2311564	1334	47893	13:39
L49	483521	2311574	1338	46171	13:41
L50	483521	2311584	1333	45611.8	13:44

5.2 Procesado de Datos

Los datos obtenidos en campo fueron procesados mediante dos diferentes metodologías, una con el programa Surfer versión 8 y otra con el programa geofísico Geosoft. Con el primero se hace un tratamiento estadístico y la opción del valor por el inverso de la distancia entre las estaciones de lecturas, para generar un plano de anomalías magnéticas (figura 5.1). Con el segundo proceso también se genera un plano de anomalías magnéticas pero con más calidad ya que este método es utilizado por empresas dedicadas a la prospección geofísica; los planos generados en este programa fue una distribución de anomalías de campo magnético total, un plano de anomalías residual y final mente un plano de reducción al polo (figura 5.2).

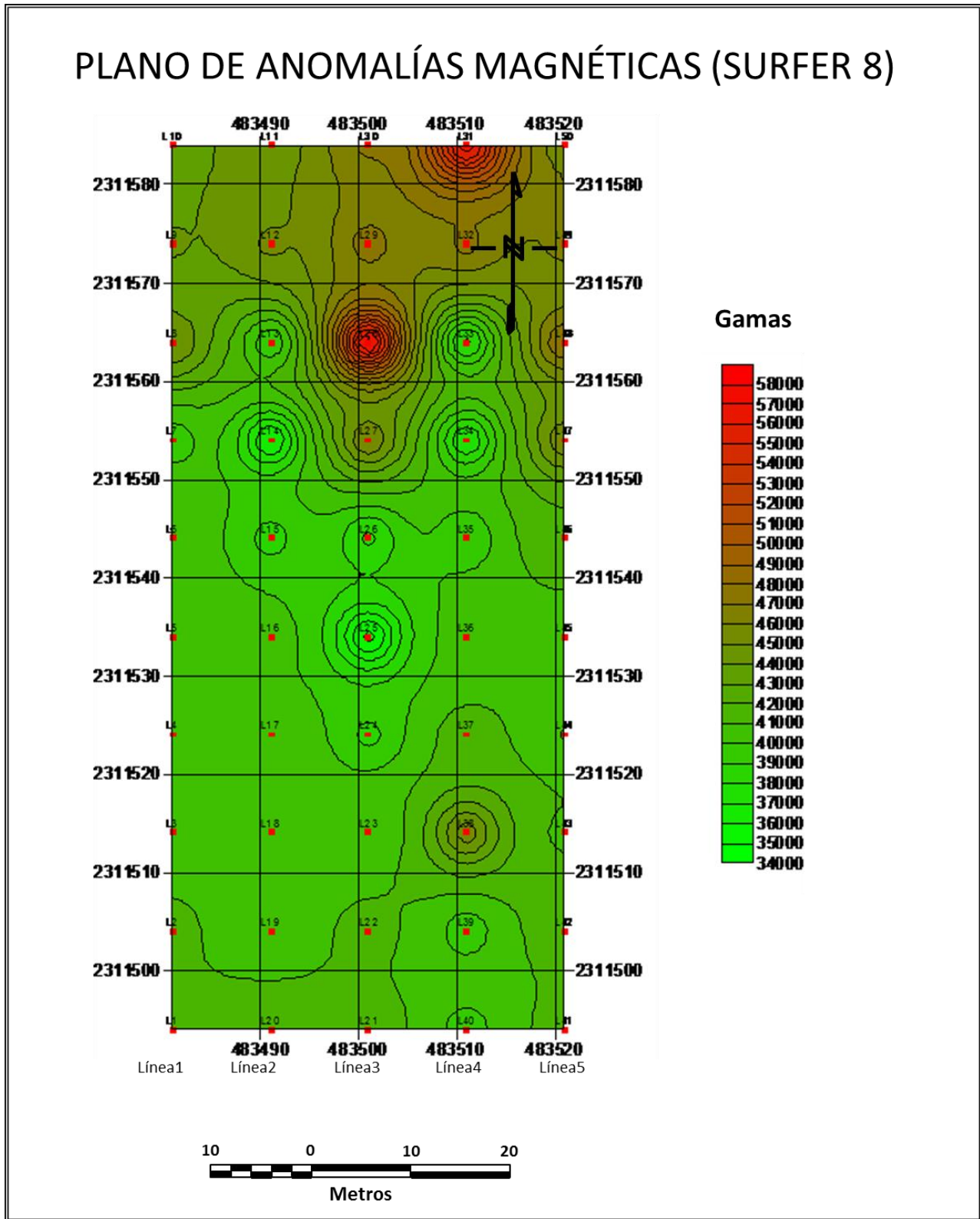


Figura 5.1.- Plano de campo magnético total (CMT) por el programa Surfer versión 8.

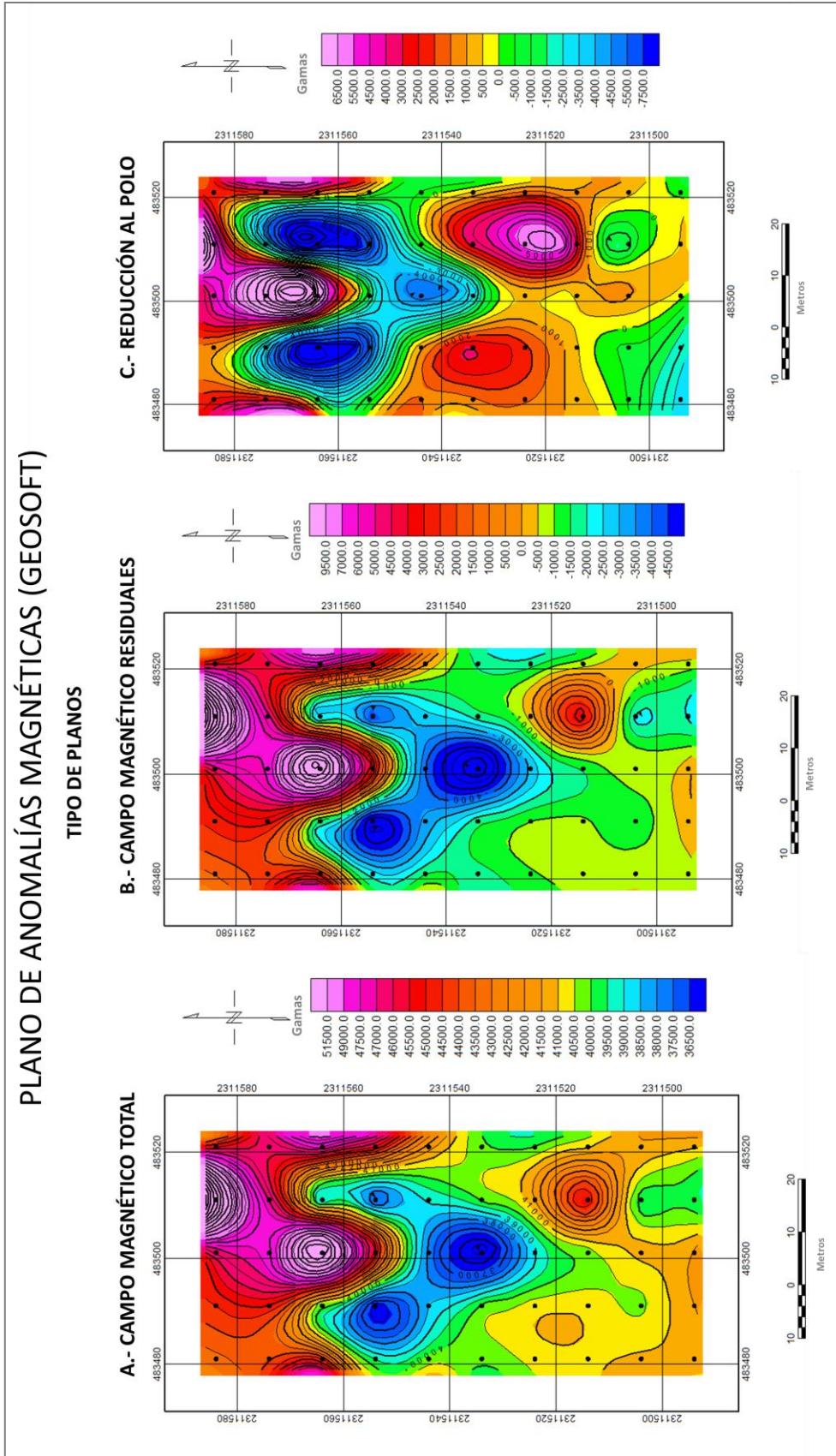


Figura 5.2.- Plano de Campo Magnético Total (CMT), Campo Magnético Residuales (CMR) y Reducción al Polo por el programa Geosoft.

5.2.1 Campo Magnético Total

El proceso de interpretación se inicia configurando los datos numéricos del campo magnético total (CMT), donde se observan una intensidad de 51,500 a 33,500 gamas; posteriormente, los datos de campo magnético total son reducidos para suprimir los efectos regionales producidos por el núcleo que corresponde a frecuencias altas y obtener anomalías locales, mediante la aplicación del campo geomagnético Internacional de Referencia (IGRF) se obtuvo la configuración del campo magnético residual (CMR).

5.2.2 Campo Magnético Residuales

Para la configuración del campo magnético residual (CMR), se aplicó el filtro de reducción al polo (Baranov, 1957), que es de gran utilidad, permite llevar las anomalías al polo magnético donde pasan a ser monopolares y centrados en el cuerpo que las produce.

5.2.3 Reducción al Polo

La forma de cualquier anomalía magnética depende de la inclinación y declinación del campo magnético de la tierra en un lugar específico. Por lo tanto el mismo cuerpo magnético puede producir una anomalía de forma distinta dependiendo de donde se encuentra y de su orientación. El filtro de reducción al polo reconstruye el campo magnético de un grupo de datos como si estos estuviesen sobre el polo. Esto significa que los datos pueden ser vistos en un mapa con inclinación magnética vertical y declinación cero. De esta forma la interpretación de los datos se hace mucho más fácil como cuerpos verticales que producirán anomalías magnéticas inducidas que se encuentran centradas en el cuerpo simétricamente.

El objetivo de la operación de reducción al polo es transformar la respuesta magnética medida (con una intensidad de 43,453 gamas, una inclinación de 49°

26´ y una declinación de 6° 5´), todos estos datos fueron tomados de la carta Geológico – Minera Jacala (F14-C49) a escala 1:50,000.

5.3 Interpretación Geofísica

5.3.1 Plano de anomalías magnéticas realizado en Surfer 8.

De acuerdo al plano con tratamiento estadístico, se muestra una anomalía en la parte norte del área estudiada, donde los valores máximos se definen en las estaciones de lectura L28 y L31, inmersas en un envolvente definido por las estaciones L11, L12, L27, L29, L30, L32 y L49, que se muestran en la tabla 5.2; estas anomalías se asocian a los cuerpos de magnetita que afloran en esta parte del área de estudio.

En la parte sureste se define un halo anómalo de mediana intensidad definida en la estación L38, inmersas en un envolvente definido por las estaciones L1, L2, L20, L21, L22, L37, L41 y L42, que se muestran en la tabla 5.3; que pudiera estar asociado a cuerpos magnéticos ocultos o bien a la zona de skarn, con mineralización de magnetita diseminada (figura 5.3).

Tabla 5.2.- Valores máximos y envolventes en la parte norte.

LECTURAS ALTAS (ÁREA1)					
Estación	X	Y	Z	CMT (Gamas)	HORA
L28	483501	2311564	1328	57427.0	12:41
L31	483511	2311584	1329	56563.0	13:12
LECTURAS ENVOLVENTES (ÁREA1)					
L11	483491	2311584	1332	44612.0	12:30
L12	483491	2311574	1335	45133.0	12:29
L27	483501	2311554	1327	45873.0	12:42
L29	483501	2311574	1336	47396.0	12:39
L30	483501	2311584	1335	47104.0	12:36
L32	483511	2311574	1324	47189.0	13:10
L49	483521	2311574	1338	46171.0	13:18

Tabla 5.3.- Valores de mediana intensidad y envolventes en la parte sureste.

LECTURA MEDIA (ÁREA2)					
Estación	X	Y	Z	CMT (Gamas)	HORA
L38	483511	2311514	1325	45487.0	12:59
LECTURAS ENVOLVENTES (ÁREA2)					
L1	483481	2311494	1339	41142.8	12:13
L2	483481	2311504	1344	41092.0	12:12
L20	483491	2311494	1332	41592.6	12:19
L21	483501	2311494	1322	41570.8	12:53
L22	483501	2311504	1325	41197.0	12:52
L37	483511	2311524	1326	41525.2	13:00
L41	483521	2311494	1331	40740.4	13:44
L42	483521	2311504	1334	41469.8	13:41

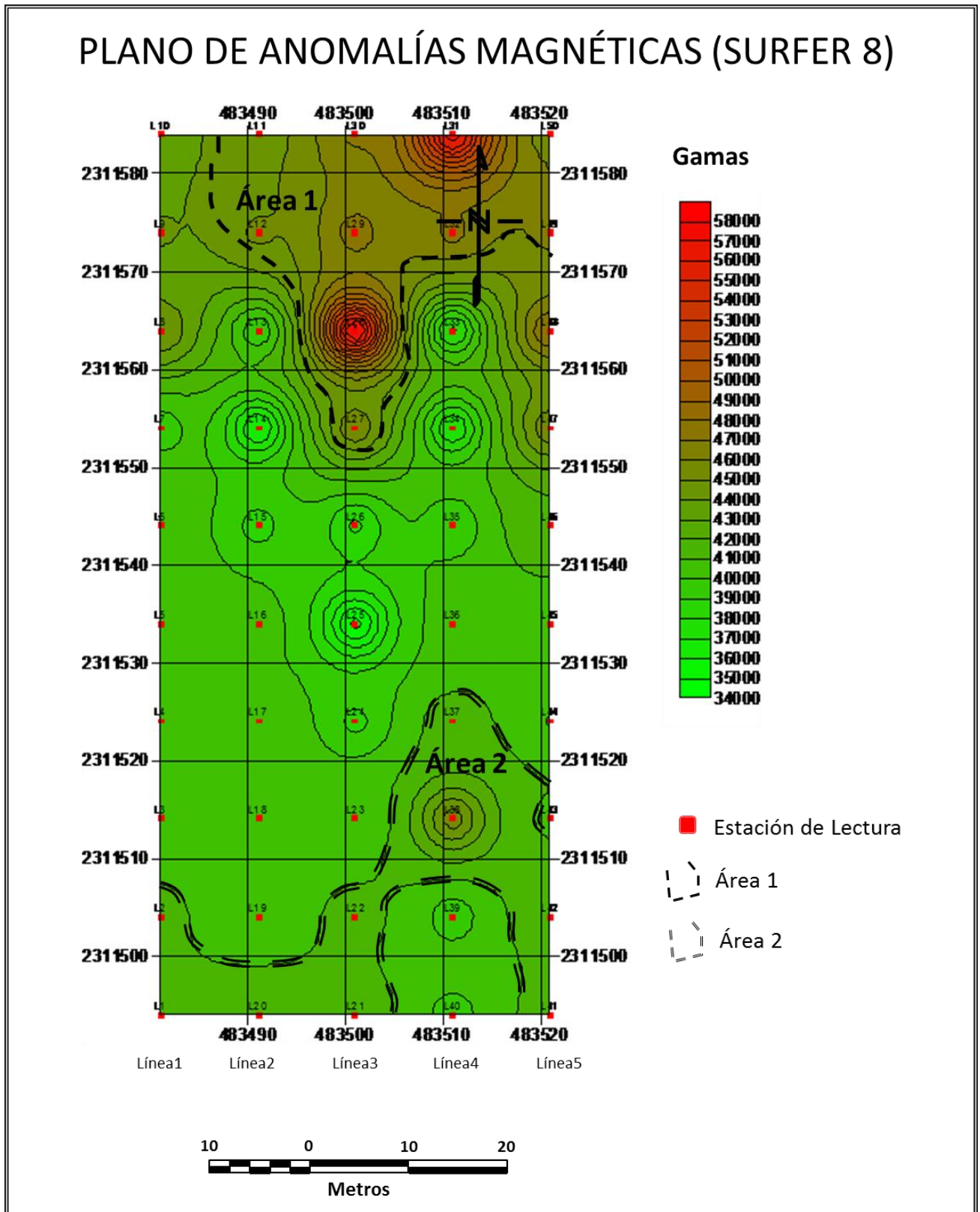


Figura 5.3.- Plano de campo magnético total (CMT) mostrando las áreas de interés.

5.3.2 Planos de anomalías magnéticas realizados en Geosoft.

En este programa se elaboraron tres tipos de planos, uno de campo magnético total (A), otro de campo magnético residual (B) y uno más de reducción al polo(C). En estos tres planos se observan las mismas anomalías obtenidas con el programa Surfer 8, solo que con una mayor definición y detalle, esto debido a las características de procesado de información del mismo programa.

Plano de campo magnético total (A)

Como se muestra en la Figura 5.4 es similar al del plano con tratamiento estadístico realizado en Surfer 8 (Figura 5.3), en el cual muestra las mismas zonas anómalas en la parte noreste del área estudiada, con esto se confirma que las anomalías que se encuentran en el área estudiada tiene una continuidad tabular y se encuentra asociada a cuerpos de magnetita que afloran en esta parte del área de estudio.

PLANO DE ANOMALÍAS MAGNÉTICAS (GEOSOFT)

A) CAMPO MAGNÉTICO TOTAL

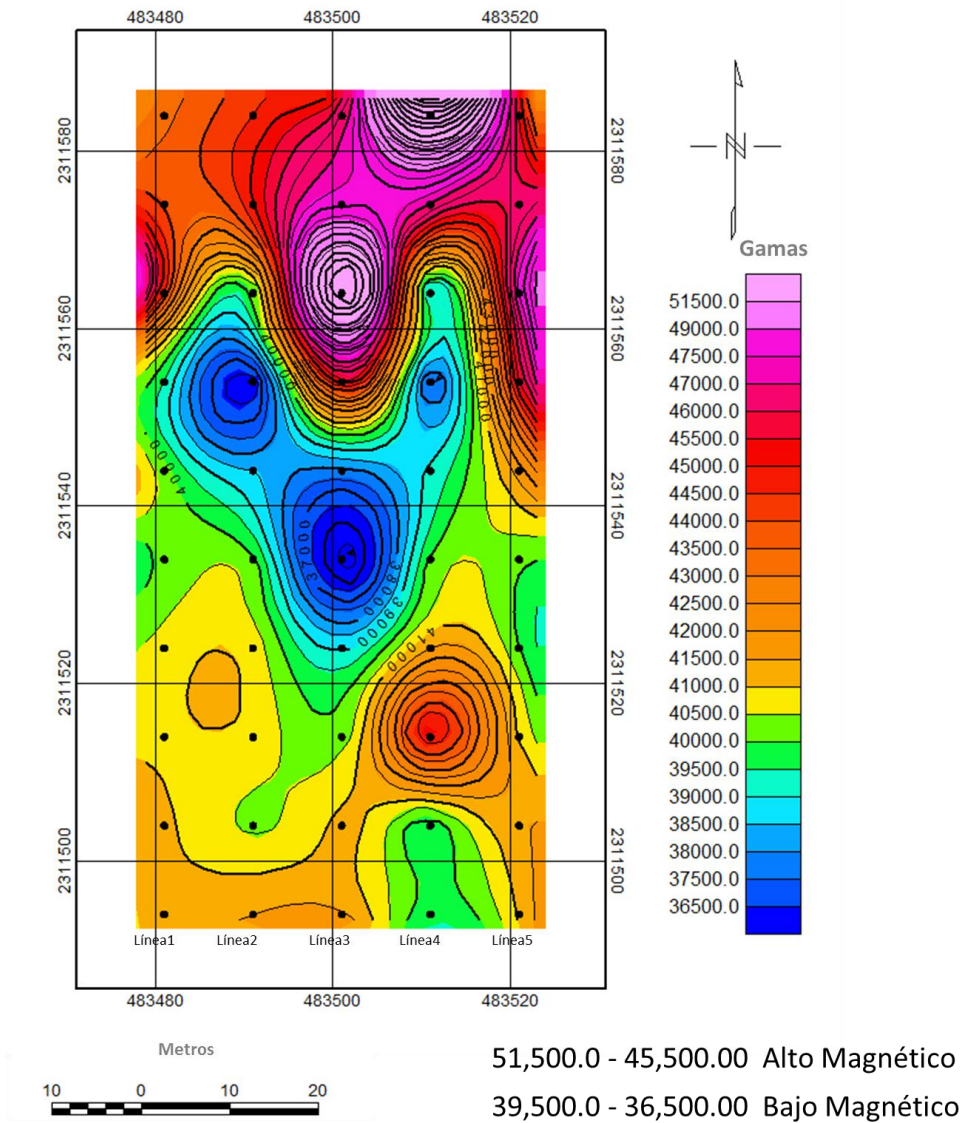


Figura 5.4.- Mapa del campo total. En el área de estudio se observan anomalías positivas en tonos rojos y anomalías negativas en tonos azules.

Plano de magnético residual (B)

La Figura 5.5 muestra el plano del campo magnético residual, donde se observa las anomalías de interés asociadas a rocas que se muestran aflorando sobre la superficie terrestre, en el área el Refugio de acuerdo con la escala de colores, la intensidad de CMR se encuentra entre los valores - 4,500.0 gamas a 9,500.0 gamas. Los valores negativos se correlacionan con rocas sedimentarias, mientras que las positivas se relacionan con rocas metamórficas.

PLANO DE ANOMALÍAS MAGNÉTICAS (GEOSOFT)

B) CAMPO MAGNÉTICO RESIDUALES

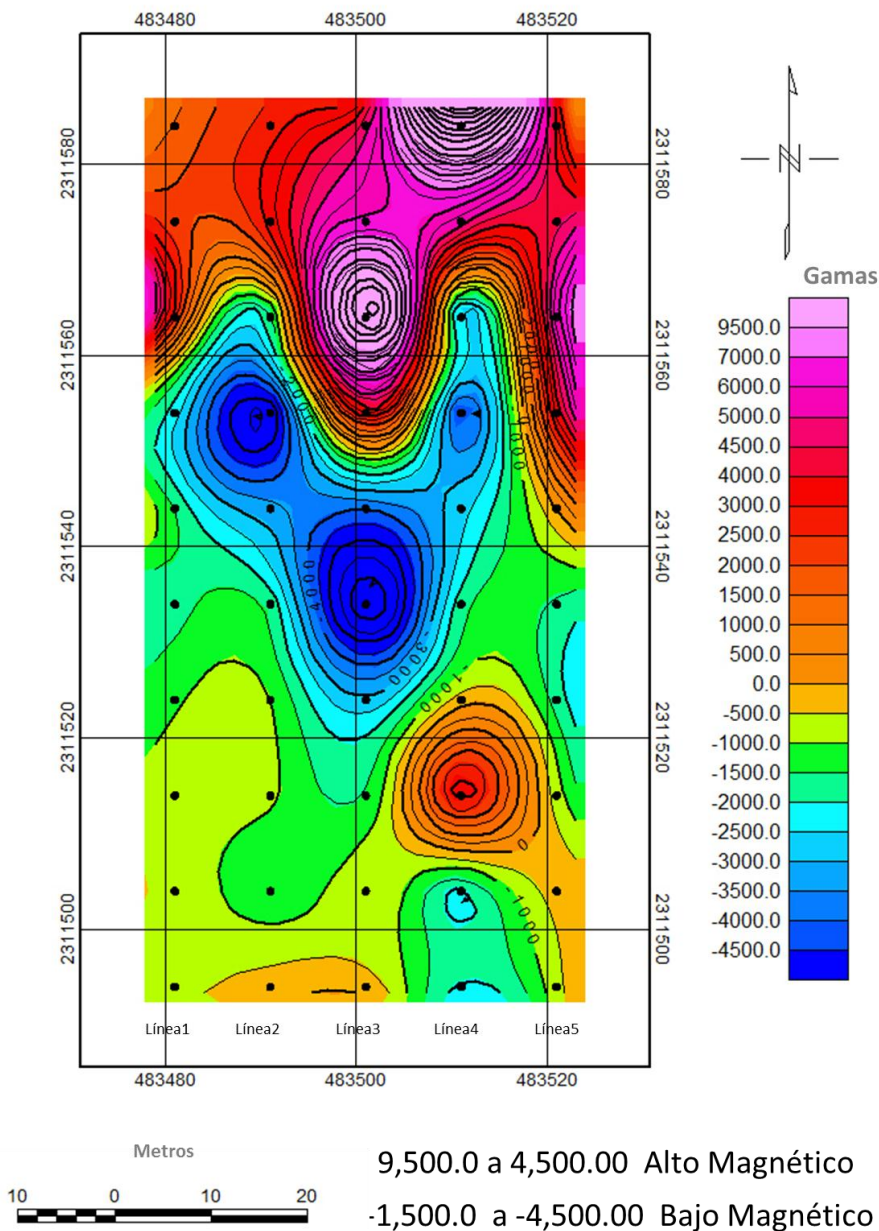


Figura 5.5.- Mapa del campo residual. En el área de estudio se observan anomalías positivas en tonos rojos y anomalías negativas en tonos azules.

Plano de reducción al polo (C)

A la configuración del campo magnético residual se le aplicó el filtro de reducción al polo, que es de gran utilidad, permite llevar las anomalías al polo magnético a donde pasan a ser un solo polo y se centran en el cuerpo que la produce. El mapa de la Figura 5.6 muestra los resultados obtenidos al reducir al polo el CMR, donde se aprecia la distribución de las anomalías magnéticas y situadas hacia el norte magnético, con gradientes principales de intensidad magnética de - 7,500 gamas a 6,500 gamas (altos y bajos magnéticos), la transición entre estos, permite definir contactos litológicos.

PLANO DE ANOMALÍAS MAGNÉTICAS (GEOSOFT)

C) REDUCCIÓN AL POLO

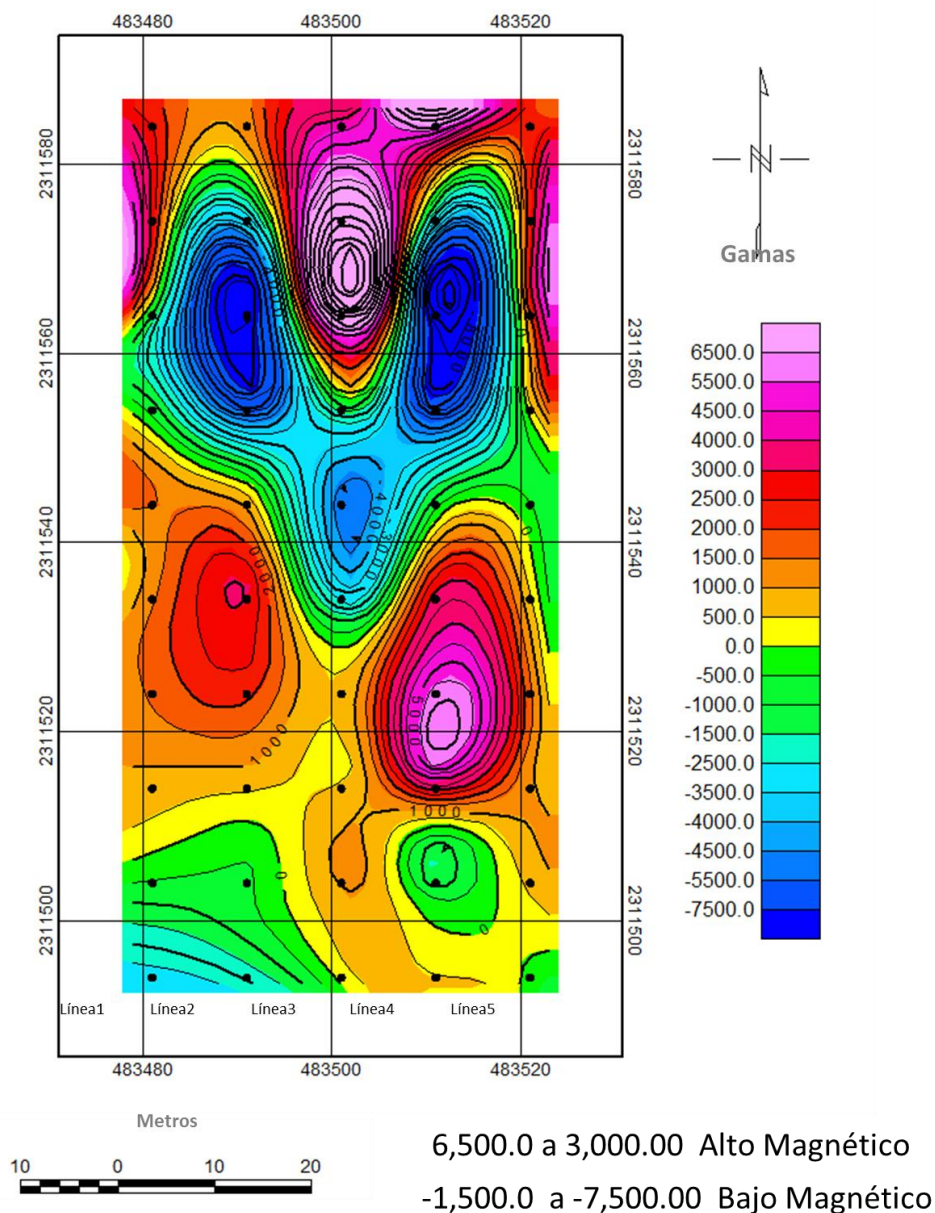


Figura 5.6.- Mapa de intensidades magnéticas reducido al polo en el área de estudio. Se observan anomalías positivas en tonos rojos a magenta y anomalías negativas en tonos azules a verde.

Si se compara este plano con el mapa original de intensidad magnética de la Figura 16 se observa que al reducir al polo se enfatizan algunas anomalías que no se apreciaban en el plano original. En este plano se aprecia las anomalías magnéticas más puntuales lo cual permite definir los contactos entre la zona anómala y contactos litológicos; que en superficie no son tan visibles porque son sepultados por unidades de aluvión presente en el área de estudio.

CAPITULO VI

6 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1 La conclusión del área mineralizada de la zona de estudio

- De acuerdo al área de estudio, la forma que adopta este cuerpo mineral es lenticular alargado en dirección al contacto adoptando la actitud del mismo, lo cual le da una característica de cuerpos aislados en forma de bolsadas mostrando una continuidad en la parte noreste del plano, mientras que en la parte sureste se muestra otra anomalía con las mismas características descritas anteriormente pero con posibilidades de ser mineralización en forma diseminada dentro del skarn, por último en la parte central en color azules a verde se muestra un bajo magnético el cual representaría el paquete de calizas (Figura 6.1).

- En campo se muestran paquetes de caliza (Formación El Abra), con un encape de aluvión, desarrollado en una zona de “skarn”. En la que se encuentra un cuerpo masivo de magnetita el cual presenta un rumbo N50°W y un echado de 54° al SW. Este cuerpo se definió en una longitud de 30 m con un espesor 20 m y una profundidad estimada de 12 m, lo cual da un potencial del orden de las 35,300.00 Toneladas, considerando un p. e. de 4.9 de la magnetita en referencia bibliográfica.

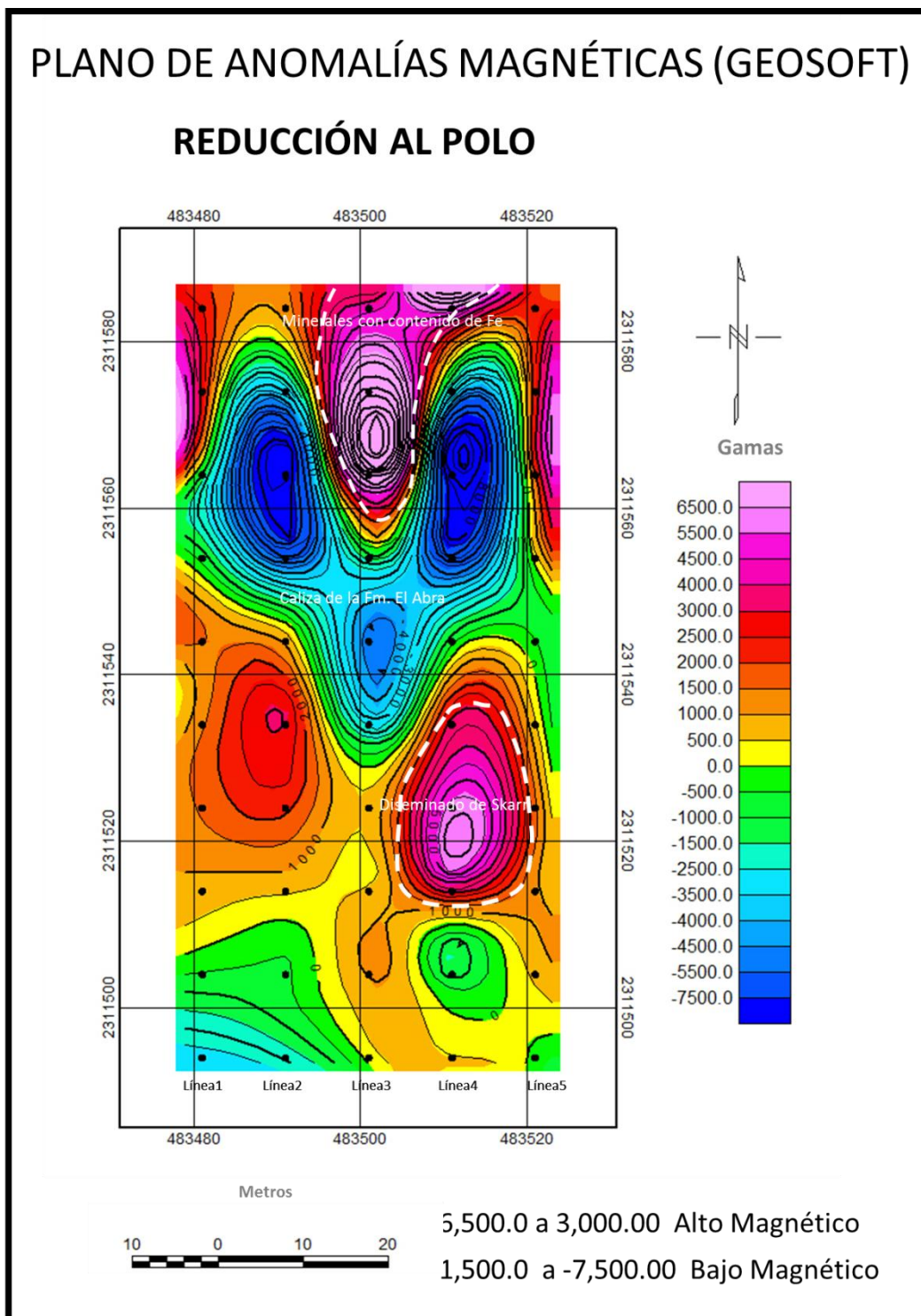


Figura 6.1.- Mapa de intensidades magnéticas reducido al polo en el área de estudio. Mostrando anomalías en forma de bolsas de Fe y Skarn en tonos rojos a magenta y el paquete de calizas en tonos azules a verde.

6.2 Las conclusiones que se desprenden de los resultados obtenidos en el presente trabajo

- Los resultados del levantamiento geofísico así como el reconocimiento geológico de campo realizado, indican la posible presencia de un yacimiento de fierro de característica magnética en el subsuelo.
- Una vez procesada la información del levantamiento magnetométrico realizada se definieron dos áreas anómalas de interés, una en la parte norte del área estudiada, la cual tiene una extensión en dirección norte-sur de 30 metros y de 20 metros en dirección oriente-poniente. Esta anomalía presenta sus valores máximos en las estaciones de lectura L28 y L31, inmersas en un envolvente definido por las estaciones L11, L12, L27, L29, L30, L32 y L49. La segunda se define en la parte sur del área estudiada, es de forma semicircular, con un diámetro 20 metros y tiene su máximo valor en la estación L38 y esta inmersa en un envolvente definido por las estaciones L1, L2, L20, L21, L22, L37, L41 y L42
- Para definir la mineralogía del posible yacimiento detectado con estas anomalías así como su importancia económica, es necesario realizar una exploración directa mediante barrenación a diamante con recuperación de núcleo, ya que las evidencias superficiales indican la presencia minerales de hierro (magnetita y hematita) acompañada por cobre (calcopirita y malaquita secundaria), y ambos son susceptibles de producir fuertes anomalías magnéticas.

6.3 Desde el punto de vista geofísico, las recomendaciones son

- De acuerdo con los resultados del presente estudio geofísico, se recomiendan 2 localidades a ser comprobadas mediante barrenación (Tabla 6.1), para comprobar la presencia y las características de un posible yacimiento de mineral de importancia económica.
- La longitud de los barrenos recomendados varía respecto a la anomalía que se trate, sin embargo en la mayoría de los casos, deberán ser de profundidad mayor a los 50 m, con la finalidad de atravesar la posible zona mineralizada
- Es recomendable determinar el contenido de oro libre en todas las muestras que se tomen para análisis químico cuantitativo en las zonas mineralizadas que se logran cortar con los barrenos propuestos, ya que el oro en yacimientos de este tipo presenta una afinidad con el hierro (por ejemplo: distrito minero de concepción del oro, Zacatecas).
- El programa de exploración mediante barrenación a diamante propuesto, estará condicionado a los resultados que se obtengan en los primeros barrenos a realizarse en las localidades de mayor intensidad magnética, el cual una vez concluido nos servirá para definir el potencial económico que puede representar esta área (volumen y leyes de mineral) (Figura 6.2).

Tabla 6.1.- Características de los barrenos propuestos.

Barreno Localidad 1	Coordenadas		Longitud (m)	Inclinación
	X	Y		
1	483516	2311583	50	Vertical
2	483510	2311583	50	Vertical
3	483506	2311583	50	Vertical
4	483505	2311580	50	Vertical
5	483510	2311579	50	Vertical
6	483516	2311580	50	Vertical
7	483506	2311576	50	Vertical
8	483510	2311576	50	Vertical
9	483516	2311576	50	Vertical
10	483506	2311573	50	Vertical
11	483505	2311571	50	Vertical
12	483506	2311568	50	Vertical
13	483501	2311568	50	Vertical
14	483501	2311566	50	Vertical
15	483501	2311563	50	Vertical
16	483503	2311564	50	Vertical
17	483503	2311567	50	Vertical
18	483503	2311569	50	Vertical
Barreno Localidad 2	Coordenadas		Longitud (m)	Inclinación
	X	Y		
19	483510	2311511	50	Vertical
20	483514	2311515	50	Vertical
21	483510	2311519	50	Vertical
22	483507	2311515	50	Vertical
23	483511	2311514	50	Vertical

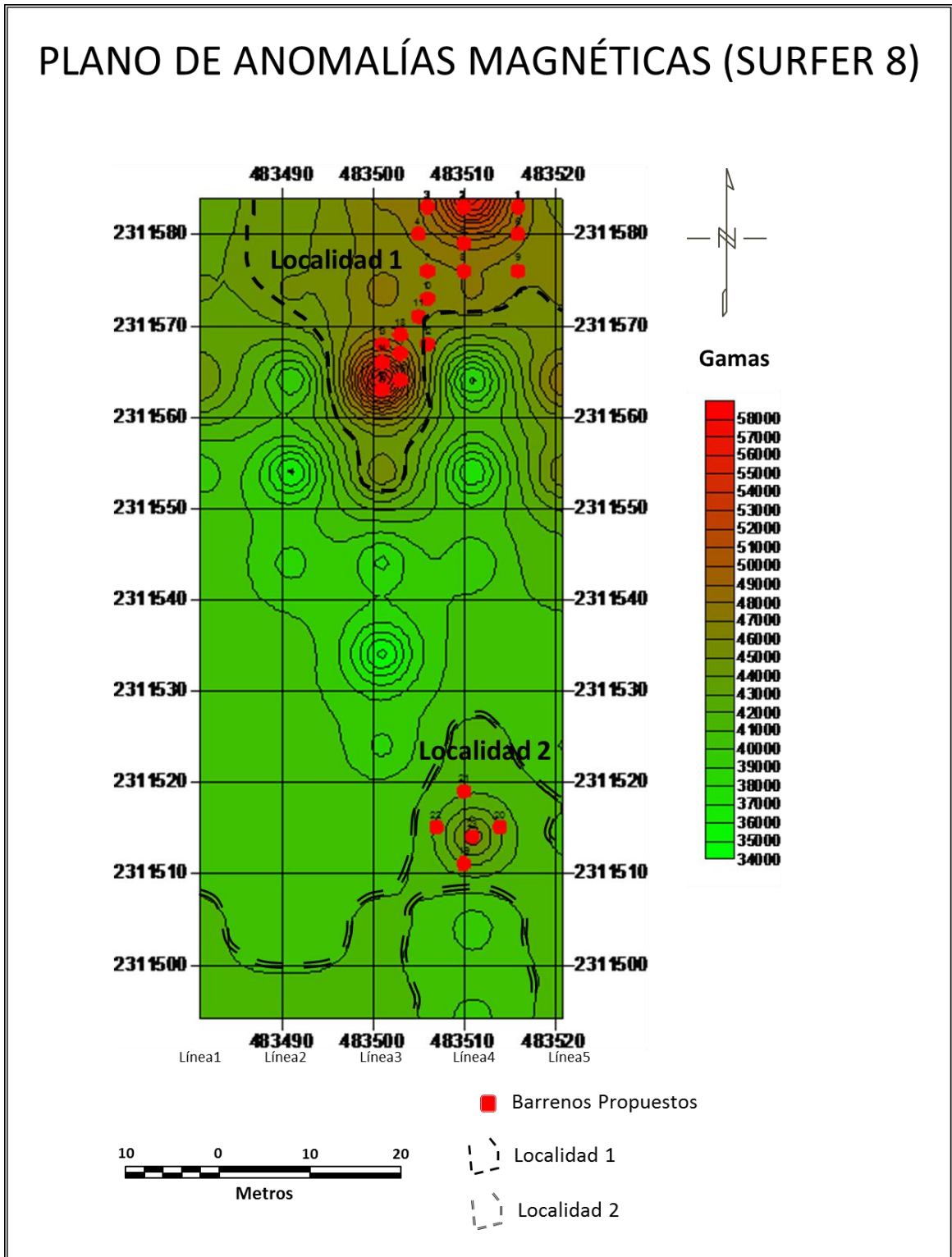


Figura 6.2.- Mapa de campo magnético total (CMT) mostrando las localidades de barrenación propuestas.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aguayo-Camargo, J.E., 1975, Sedimentary environments and diagenetic implications of the El Abra Limestone at its type locality, east Mexico: University of Texas at Dallas, Ph. D. dissertation, 159 p.
- Berrocal Huerta D., Salas Hernández J. E., 1998 Informe del levantamiento de polarización inducida, resistividad y magnetometría terrestre en el proyecto El Encino, Mpio. de Jacala, Hgo; Gerencia de geofísica, Consejo de Recursos Minerales.
- Belt, B.C., 1925, Stratigraphy of the Tampico District of Mexico, Bulletin American Association of Petroleum Geologist, 9(1), 136-144.
- Carrillo-Bravo, J., 1971, La Plataforma Valles-San Luis Potosí: Boletín de la Asociación Mexicana de Geólogos Petroleros, 23(1-6), 102 p.
- Consejo de Recursos Minerales, 1992, Monografía Geológica Minera del Estado de Hidalgo, Publicación C.R.M. pp 61-65.
- Córdoba-Méndez, D.A., Lugo-Hubp, M., Roche-Carrascosa, L. y Bertrand-Camargo, C., 1991. Bibliografía geológica preliminar del Estado de Hidalgo. Instituto de Geología, UNAM., Instituto de Investigaciones en Ciencias de la Tierra, UAH., 42p. (inédita).
- Córdoba-Méndez, D.A., 1992. Carta Geológica del Estado de Hidalgo, escala 1:250,000. Instituto de Investigaciones en Ciencias de la Tierra, UAEH., 134 p. (inédita).
- Elvir, A. R., 1961 Reconocimiento geológico efectuado en el distrito minero de Jacala, Estado de Hidalgo, Consejo de Recursos Naturales No Renovables.
- Estrada B. S., Pineda R. A., 1964. Estudios geofísicos complementarios de Peña Colorada, col., apéndice 1. Levantamientos gravimétricos y magnetométrico complementario del yacimiento de hierro Peña Colorada

- colima. Consejo de recursos naturales no renovables. crnr. Departamento de geofísica. Informe técnico. Pp 5 – 7.
- Flores-Castro, K., 2001. Geoquímica y petrología de los granitoides de la región noroccidental del Estado de Hidalgo, México. Universidad de Barcelona, Departamento de Geoquímica, Petrología y Prospección Geológica. Tesis doctoral. 400 p. (inédita).
 - García, E., 1964. Modificaciones al Sistema de Clasificación Climática de Köppen. Instituto de Geografía de la UNAM, 71p.
 - Gobierno del Estado de Hidalgo, 2001. Ordenamiento Ecológico Territorial del Estado de Hidalgo. 500 p.
 - Guiza F. R, 1951. Informe anual que rinde la compañía exploradora del istmo s.a. a la comisión de fomento minero respecto de los trabajos desarrollados entre el 1^a de marzo de 1950 y el 28 de febrero de 1951. SGM. Informe técnico. pp10.
 - Guzmán Soto E., García Martínez M., 1998 Estudio geológico minero del lote minero El Encino, Jacala, municipio de Jacala Estado de Hidalgo. Consejo de Recursos Minerales.
 - Heim, A., 1940. The front rangers of the Sierra Madre Oriental, México, from Ciudad Victoria to Tamazunchale. *Eclogae Geol. Helv.*, v. 33, p, 314-362
 - Hernández P. I., Alam H. C. E., 2009 historia de la geofísica minera en México. una retrospectiva desde el punto de vista del servicio geológico mexicano. Servicio Geológico Mexicano. pp 2, 3,4, 10, 11, 12, 13, 14.
 - Huitrón-Esquivel R., 1979. Reconocimiento geológico minero de la zona minera de Jacala, Estado de Hidalgo. Consejo de Recursos Minerales.
 - Lanza H., Meloni, S. K., Magnetic effects of a finite, arbitrarily oriented line of dipoles. *Geophysics*, V. 44, p. 1430 – 1433.

-
- López-Doncel, R., 2003, La Formación Tamabra del Cretácico Medio en la porción central del margen occidental de la Plataforma Valles-San Luis Potosí, centro-noreste de México: *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 20(1), 1-19.
 - López-Ramos, E., 1979, *Geología de México*, Tomo II, 2da. Edición, México, D.F., 454 p.
 - Lillie, R.J., (1999). *Whole Earth Geophysics: An Introductory Textbook for Geologists and Geophysicists*, Englewood Cliffs, N.J., Prentice Hall, Inc., 361 p.
 - Logachev A. A., Zajaronv V. P. (1978). *Elploración Magnética*. Reverte, 215. p.
 - Moreira Rivera F., et al. 1996 Informe final complementario a la cartografía geológica minera y geoquímica escala 1: 250,000 de la hoja Cd. Valles F14-8 Estados de San Luis Potosí, Guanajuato, Querétaro, Hidalgo y Veracruz. Consejo de Recursos Minerales.
 - Morley L.W. y A. Larochelle, (1964). *Paleomagnetism as a means of dating geological events: Royal Society of Canada Special Publication*, V. 8, p. 39–50.
 - Muir, J.M., 1936. *Geology of the Tampico Region*. Bulletin of the American Association of Petroleum Geologist: Tulsa, Oklahoma, U.S.A., 280 p
 - Petróleos Mexicanos (PEMEX), 1988, *Estratigrafía de la República Mexicana, Mesozoico*: México, D.F., Subdirección de Producción Primaria, Coordinación ejecutiva de Exploración, Informe inédito, 216 p.
 - Raisz, E., 1964. *Landforms of Mexico*. Geography branch of the office of Naval Research. Plano de Provincias fisiográficas.
 - Reinolds. I., 1997. A rapid method three- dimensional modeling of megnetic anomalies. *Geophysics*, V. 56, p 1729 – 1737.

- Revees, P. V., 2005, Interpretation of magnetic anomalies due to dykes: The complex gradient method. *Geophysics*, V. 46, p 1578 – 1981.
- Segerström, K., 1956. Estratigrafía y tectónica del Cenozoico entre México, DF. y Zimapán, Hidalgo. XX Congreso Geológico Internacional, guía de excursiones A-3 y C-1, p. 11 - 22 y también la A-14 y C-6, p. 311 – 323.
- Segerström, K., 1961a. Geología del suroeste del Estado de Hidalgo y noreste del Estado de México. *Boletín de la Asociación Mexicana de Geólogos Petroleros*, v. 13, p. 147 – 168.
- Segerström, K., 1961b. Geology of the Bernal-Jalpan area, Estado de Querétaro, México. *US Geological Survey Bulletin* 1104-B, p. 19 – 85
- Servicio Geológico Mexicano, 2001, Carta Geológico Minera San Nicolás F14C59, Escala 1:50,000.
- Stephenson, L. W., 1921. “Some Upper Cretaceous Shells of the Rudistid Group from Tamaulipas, Mexico:” *Proc. U. S. Nat. Hist. Mus.*, 61, Art. 1, No. 2422.
- Simons, F.S, Mapes, V.E., 1956, Geology and ore deposits of the Zimapan mining district, Hidalgo, Mexico: U.S. Geological Survey Professional Paper 284, 128 p
- Solano L. J., 2008, Inventario físico de los recursos minerales del Municipio de Jacala, Estado de Hidalgo, Servicio Geológico Mexicano Fideicomiso de Fomento Minero, Informe técnico, pp 11 y 12.
- Suter, M., 1990, Geología de la hoja de Tamazunchale, Estado de Hidalgo, Querétaro y San Luís Potosí, Escala 1: 100,000: Universidad Nacional Autónoma de México, *Revista del Instituto de Geología*, (22), 55 p.
- Telford W.M., Geldart L.P., y. Sheriff R.E., (1990). *Applied geophysics*, 2nd ed., Cambridge University Press, 860 p.

- Wilson, B.W., Hernández, J.P., Meave, E., 1955, Un banco calizo del Cretácico en la parte oriental del estado de Querétaro, México: Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana, 18(1), 1-10.
- Zamorano-Télez, T., 2011 Cartografía, petrogénesis y prospección geoquímica por oro en el intrusivo el calvario, municipio de Jacala de Ledesma, Hidalgo, México. Universidad Autónoma de Hidalgo. Tesis de Licenciatura. 40p.

GLOSARIO

Afloramiento: parte de un terreno que se encuentra en la superficie de la tierra.

Aluvión: sedimento no consolidado depositado por un río.

Anticlinal: Pliegue de estratos sedimentarios que recuerda a un arco.

Arenisca: roca sedimentaria detrítica compuesta de por lo menos 85% de granos de cuarzo más o menos redondeados de 1/16 mm (62.5 µm) a 2 mm de diámetro.

Cabalgadura: Ocasionada por un movimiento tectónico, que la lleva a cubrir un conjunto con otro.

Calcáreo: que contiene caliza.

Caliza: roca sedimentaria carbonatada que contiene al menos 50% de CaCO₃, bajo la acción ácido diluido produce efervescencia.

Cartografía: conjunto de técnicas y de artes gráficas que permiten la elaboración de mapas y su impresión.

Clasto: proviene del griego glastos que significa roto en pedazos. Se refiere a cualquier fragmento de roca, fósil o cristal incluido en una roca.

Contacto: (geológico). Hecho de tocarse dos materiales. Superficie que separa dos materiales.

Cuenca, cuenca sedimentaria: depresión de la corteza terrestre de morfología y dimensiones muy variables, normalmente situada en el interior o en el margen de los continentes, la cual es o ha sido un lugar de sedimentación actual o antiguo.

Erosión: (del latín *erodere*, roer). Conjunto de fenómenos externos que, en la superficie del suelo o a escasa profundidad, quita en todo o en parte los materiales existentes modificando el relieve.

Estratificación: disposición de los sedimentos o rocas sedimentarias en estratos superpuestos.

Exploración: conjunto de estudios y reconocimientos del terreno encaminados al descubrimiento de recursos minerales.

Explotación: Conjunto de métodos y de labores mineras que tienen por objeto la obtención de materias primas minerales.

Facies: categoría en la que puede clasificarse una roca o un terreno y que está determinada por uno o varios caracteres litológicos o paleontológicos. Este término se usa igualmente para designar una categoría correspondiente a un medio o dominio sedimentario.

Falla: fractura de las capas geológicas, acompañada de un desplazamiento vertical, oblicuo, u horizontal de los bloques.

Formación: conjunto de terrenos que poseen características comunes y constituyen un conjunto que se juzga útil diferenciar. Conjunto de estratos que forman una unidad litológica a la que se asocia generalmente el nombre de un lugar.

Fractura: en mineralogía, la manera como se rompe cuando no se exfolia o parte.

Hidrografía: es una rama de la Geografía que se ocupa de la descripción y estudio sistemático de los diferentes cuerpos de agua planetarios, en especial, de las aguas continentales.

Hidrotermal: relativo o perteneciente a aguas o fluidos acuosos con temperaturas superiores a la media ambiental.

Isótopo: variedades del mismo elemento que tienen diferentes números másicos; sus núcleos contienen el mismo número de protones, pero diferentes número de neutrones.

Lacustre: habita o se desarrolla en un lago o en sus cercanías.

Litológico: relativo a la naturaleza de las rocas.

Mármol: roca metamórfica que deriva de calizas o de dolomías por metamorfismo de contacto o regional.

Marmorizar: transformar en mármol.

Mena o mineralización: Asociación mineral que tiene sustancias útiles en una proporción y en cantidad suficientes para ser objeto de explotación. Términos que excluyen los materiales de construcción y combustibles, y que suelen extenderse a asociaciones minerales sin potencial económico o de potencial desconocido. El termino *mena* es de origen occitano (provenzal) y significa *mina*.

Metamorfismo: alteración de una roca en estado sólido debida a la elevación de temperatura y/o de presión, con cristalización de nuevos minerales.

Muestra: Porción de mineral, roca, suelo, fluido, etc., extraída para estudiar su composición, propiedades, contenido fósil, minerales, etcétera.

Protolito: roca que por erosión mecánica, dio origen a los componentes detríticos de un sedimento.

Rocas ígneas: se forman cuando la roca derretida se enfría y se solidifica.

Stock: plutón similar a un batolito, pero más pequeño.

Yacimiento mineral: Concentración natural de una o varias sustancias minerales útiles, que es objeto de explotación minera o es susceptible de ser explotado produciendo un beneficio económico.