



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

POSGRADO EN CIENCIAS DE LA TIERRA

Análisis de métodos de procesamiento magnético y percepción remota aplicado a la exploración minera en el sureste del estado de Durango.

TESIS

que para optar por el grado de:

Maestro en Ciencias de la Tierra

Presenta

Rodrigo Santiago Ramírez

Director de Tesis:

Dr. Tomás González Morán

Instituto de Geofísica

Jurado para examen de grado:

Dr. Augusto Antonio Rodríguez Díaz

Instituto de Geofísica

Dra. Vanessa Colás Ginés

Instituto de Geología

Dra. Claudia Arango Galván

Instituto de Geofísica

Dr. Gilles Pierre Levresse

Centro de Geociencias

Ciudad Universitaria, Ciudad de México, diciembre 2021



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

A mi padre.

Gracias por enseñarme a no
darme por vencido y luchar
siempre.

Te amo, eternamente estarás
en mi corazón.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo de Maestría no hubiera sido completado sin la ayuda de tantas personas que estuvieron ahí, a lo largo de mis estudios de posgrado en la UNAM me enseñaron, me dieron apoyo y enriquecieron de alguna manera mi formación. Gracias.

Agradezco a la Universidad Nacional Autónoma de México, mi alma máter a la que he pertenecido en los últimos 10 años, por nuevamente darme la oportunidad de seguir aprendiendo, conociendo personas y hacer de sus instalaciones un nuevo hogar. Al Posgrado en Ciencias de la Tierra, por haberme dado un lugar en el programa, así como siempre apoyar los proyectos y prácticas que enriquecieron mi estancia. Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología por el apoyo económico otorgado para lograr este grado académico.

Al Dr. Tomás González Morán, por nuevamente darme la oportunidad de desarrollar este proyecto, bríndame todo el apoyo necesario , confiar en mí, guiarme y enriquecer con sus consejos mi proyecto de Tesis.

Todo mi agradecimiento al Dr. Augusto Antonio Rodríguez Díaz, por ser parte de mi comité tutor y haberme brindado todo el apoyo necesario para la realización de este trabajo a través muestras del área y consejos para desarrollar un mejor trabajo.

Mi completa gratitud a la Dra. Vanessa Colás Ginés por sus consejos, comentarios, y grandes aportaciones en la corrección de este trabajo.

Gracias a mi jurado evaluador, el Dr. Gilles Levresse y la Dra. Claudia Arango Galván, por sus ideas geniales y aportaciones a esta tesis.

Al Ing. Antonio González Rangel y al Dr. Luis Alva Valdivia, por su ayuda en la medición de las muestras de este trabajo y por sus enseñanzas y comentarios.

Gracias a la Dra. Christina Siebe, Araceli Chamán , Erika Ulloa, Gloria Alba y todo el crew del Posgrado en Ciencias de la Tierra quien siempre fueron muy atentos y siempre estuvieron al pendiente. A todos los profesores y amigos que conocí en mi paso por el posgrado, gracias por siempre aportar ideas y consejos.

A Gerardo, por siempre incitarme a terminar la Tesis, lo lograte.

Finalmente, pero no por ello menos importante, a mis hermanos por siempre apoyarme incondicionalmente y creer en mí. Gracias a mi madre que siempre está a mi lado apoyándome y a mi padre quien siempre creyó en mí y me brindó todo su apoyo hasta el final.

Gracias a todos.

Índice

1	CAPÍTULO I INTRODUCCIÓN.....	11
1.1	JUSTIFICACIÓN.....	14
1.2	HIPÓTESIS.....	14
1.3	OBJETIVOS.....	15
1.4	ZONA DE ESTUDIO.....	16
2	CAPÍTULO II CONTEXTO MINERO.....	18
2.1	FORMACIÓN DE DEPÓSITOS MINERALES.....	18
2.2	ALTERACIONES HIDROTERMALES.....	21
2.3	YACIMIENTOS RELACIONADOS A INTRUSIVOS.....	23
2.3.1	<i>Yacimientos tipo pórfido.....</i>	<i>23</i>
2.3.2	<i>Yacimientos tipo Skarn.....</i>	<i>26</i>
2.3.3	<i>Sistema de vetas epitermales -mesotermas de intermedia a baja sulfuración.....</i>	<i>28</i>
2.4	GEOFÍSICA EN EXPLORACIÓN MINERA.....	30
2.5	MINERÍA EN EL ESTADO DE DURANGO.....	32
3	CAPÍTULO III MARCO GEOLÓGICO -MINERO.....	34
3.1	TRABAJOS PREVIOS EN LA ZONA DE ESTUDIO.....	34
3.2	TECTÓNICA Y GEOLOGÍA REGIONAL.....	35
3.3	GEOLOGÍA LOCAL.....	37
3.3.1	<i>Litología Sedimentaria.....</i>	<i>38</i>
3.3.2	<i>Geología estructural.....</i>	<i>41</i>
3.3.3	<i>Litología Ígnea.....</i>	<i>41</i>
3.3.4	<i>Metamorfismo y Yacimientos Minerales.....</i>	<i>42</i>
4	CAPÍTULO IV FUNDAMENTOS TEÓRICOS.....	44
4.1	FUNDAMENTOS BÁSICOS DE LA MAGNETOMETRÍA.....	44
4.1.1	<i>Campo magnético.....</i>	<i>44</i>
4.1.2	<i>Magnetización y remanencia.....</i>	<i>45</i>
4.1.3	<i>Susceptibilidad magnética.....</i>	<i>46</i>
4.1.4	<i>Magnetismo de rocas.....</i>	<i>47</i>
4.1.5	<i>Campo magnético terrestre.....</i>	<i>48</i>
4.1.6	<i>Variaciones del campo magnético.....</i>	<i>50</i>
4.1.7	<i>IGRF.....</i>	<i>51</i>
4.1.8	<i>Anomalías Magnéticas de campo total.....</i>	<i>51</i>
4.2	TRANSFORMACIONES Y FILTRADO MAGNÉTICO.....	52
4.2.1	<i>Reducción al Polo.....</i>	<i>52</i>
4.2.2	<i>Filtros de continuación del campo: ascendente y descendente.....</i>	<i>54</i>
4.2.3	<i>Señal analítica.....</i>	<i>57</i>
4.2.4	<i>Modelado con el algoritmo de Talwani.....</i>	<i>58</i>
4.3	AEROMAGNETOMETRÍA.....	61
4.3.1	<i>Magnetómetro.....</i>	<i>63</i>
4.3.2	<i>Respuestas magnéticas de materiales.....</i>	<i>63</i>
4.4	FUNDAMENTOS BÁSICOS DE LA PERCEPCIÓN REMOTA.....	65
4.4.1	<i>Espectro Electromagnético.....</i>	<i>65</i>

4.4.2	<i>Sensores y plataformas</i>	66
4.4.3	<i>Sensor ASTER</i>	67
4.4.4	<i>Detección de minerales, interacciones de radiación y firmas espectrales</i>	69
5	CAPÍTULO V METODOLOGÍA	70
5.1	OBTENCIÓN DE INFORMACIÓN	70
5.2	ANÁLISIS DE DATOS MAGNÉTICOS	70
5.2.1	<i>Métodos geoestadísticos y elaboración de mapas magnéticos</i>	71
5.3	PROCESAMIENTO DE DATOS MAGNÉTICOS	72
5.3.1	<i>Mapa magnético reducido al polo</i>	72
5.3.2	<i>Mapa magnético de la señal analítica</i>	72
5.3.3	<i>Mapas con continuaciones descendentes y ascendentes</i>	72
5.4	MODELADO DIRECTO	73
5.5	PROCESAMIENTO DE IMÁGENES MULTIESPECTRALES	74
5.5.1	<i>Realce espectral para la identificación de minerales típicos de alteración</i>	76
5.5.2	<i>Realce espacial en imágenes ASTER para el mapeo de lineamientos</i>	77
6	CAPÍTULO VI RESULTADOS	79
6.1	ANÁLISIS CUALITATIVO	79
6.2	ANÁLISIS ESTRUCTURAL	83
6.3	MODELOS GEOLÓGICOS ESTRUCTURALES.	88
6.3.1	<i>Perfil geológico-estructural A-A'</i>	89
6.3.2	<i>Perfil geológico-estructural B-B'</i>	90
6.3.3	<i>Perfil geológico-estructural C-C'</i>	92
6.4	ANÁLISIS GEOLÓGICO POR PERCEPCIÓN REMOTA.....	93
7	CAPÍTULO VII ANÁLISIS DE RESULTADOS	97
8	CAPÍTULO VIII CONCLUSIONES	102
9	REFERENCIAS	104

Índice de Figuras

FIGURA 1.1 MAPA DE POTENCIAL GEOLÓGICO DE LA REPÚBLICA MEXICANA (SERVICIO GEOLÓGICO MINERO, 2018).....	13
FIGURA 2.1. DEPÓSITOS INTERESTRATIFICACIÓN: A) MINERALIZACIÓN AURÍFERA <i>SADDLE REEF</i> DEPOSITADOS EN PLIEGUES ANTIFORMES. B) LENTES DE MINERALIZACIÓN ENCAPSULADOS EN ESTRATOS. C) BRECHAS MINERALIZADAS O STOCKWORKS EN PLIEGUES <i>ARKANSAS USA</i> (MCKNIGHT IN BATEMAN, 1950). D) REMPLAZAMIENTO METASOMÁTICO EN CAPAS FORMANDO MANTOS CON UN CANAL ALIMENTADOR (FALLA, FRACTURA) E) LENTES DE MINERALIZACIÓN EN ZONA DE BUCKLING (FLUJO FLEXURAL). TOMADOS Y EDITADOS DE KUZVART y BÖHMER (1986).....	20
FIGURA 2.2. MINERALIZACIÓN EN VETAS (6) QUE MANTIENEN LAS GEOMETRÍAS DE LOS INTRUSIVOS (1-3) Y DIQUES (4-5) DE UN MODELO EN TEPEZALÁ AGUASCALIENTES MÉXICO. TOMADO DE (KUZVART y BÖHMER, 1986).....	21
FIGURA 2.3. DISTRIBUCIÓN DE LOS PRINCIPALES YACIMIENTOS TIPO PÓRFIDO EN EL MUNDO (MISRA, 2000).....	24
FIGURA 2.4. DIAGRAMA DE UN SISTEMA DE PÓRFIDO CUPRÍFERO EN LA ZONA RAÍZ DE UN ESTRATOVOLCÁN ANDESÍTICO (KIRKHAM y SINCLAIR, 1995).....	25
FIGURA 2.5. MODELO ESQUEMÁTICO DE UN PÓRFIDO CUPRÍFERO Y SUS HALOS DE ALTERACIÓN DISEÑADO POR LOWELL y GUILBERT (1970).....	26
FIGURA 2.6. MAPA DE DEPÓSITOS TIPO SKARN EN EL MUNDO, LA MAYORÍA CON DISTRIBUCIÓN GEOGRÁFICA COINCIDENTE CON EL CINTURÓN DE FUEGO DEL PACÍFICO. (MISRA, 2000).....	27
FIGURA 2.7 ESQUEMA DE PROCESOS QUÍMICOS, TEMPERATURA, TIPOS DE ALTERACIÓN Y DE FLUIDOS EN LA FORMACIÓN DE DEPÓSITOS EPITERMALES DE BAJA Y ALTA SULFURACIÓN. SILLITOE (1995) Y EDITADO EN CAMPRUBÍ ET AL. (2003).....	29
FIGURA 3.1. MAPA DE LA UBICACIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO EN PROYECCIÓN UTM 13N.....	16
FIGURA 3.2. PATRÓN DE DRENAJE EN LA ZONA DE ESTUDIO.....	17
FIGURA 3.3. PRINCIPALES CONJUNTOS ÍGNEOS DE LA SIERRA MADRE OCCIDENTAL (FERRARI ET AL., 2005).....	36
. FIGURA 3.4 MAPA TECTÓNICO DE LA SIERRA MADRE OCCIDENTAL (FERRARI ET AL., 2005).....	37
FIGURA 3.5 MAPA GEOLÓGICO DEL ÁREA DE ESTUDIO QUE INDICA LAS PRINCIPALES LITOLOGÍAS DE LA ZONA CON INFORMACIÓN OBTENIDA DE LAS CARTAS GEOLÓGICAS DEL SERVICIO GEOLÓGICO MEXICANO F13B23 Y F13B13 Y MAPEO GEOLÓGICO POR FOTOINTERPRETACIÓN DE LA COMISIÓN DE ESTUDIOS DEL TERRITORIO NACIONAL (SERVICIO GEOLÓGICO MEXICANO,2018).....	38
FIGURA 3.6 COLUMNA ESTRATIGRÁFICA REGIONAL DE LA ZONA, ADAPTADA CON INFORMACIÓN DE LAS COLUMNAS ESTRATIGRÁFICAS DE SAN JOSÉ DE LA PARRILLA Y NOMBRE DE DIOS DEL SERVICIO GEOLÓGICO MEXICANO (2001).....	43
FIGURA 4.1. REPRESENTACIÓN DE LOS MOMENTOS MAGNÉTICOS INMERSOS EN UN MATERIAL DONDE EL MOMENTO MAGNÉTICO SE ASOCIA A UN LOOP DE CORRIENTE A ESCALA ATÓMICA (IZQUIERDA). ALINEAMIENTO DE LOS MOMENTOS MAGNÉTICOS EN UN MATERIAL AL APLICAR UN CAMPO INDUCIDO (DERECHA). EDITADO DE W. LOWRIE (2007).....	45
FIGURA 4.2 PRINCIPALES LINEAMIENTOS DE LOS MOMENTOS MAGNÉTICOS EN DIFERENTES MATERIALES.(REEVES, 2005).....	48
FIGURA 4.3. DISTRIBUCIÓN DE LAS LÍNEAS DE FUERZA DEL CAMPO MAGNÉTICO TERRESTRE. (NETTLETON, 1940).....	49
FIGURA 4.4 COMPONENTES DEL VECTOR F DEL CAMPO GEOMAGNÉTICO (GLABMEIER ET AL., 2009).....	49

FIGURA 4.5 CONCEPTO DE ANOMALÍA. LA $F(\text{OBSERVADO})-F(\text{IGRF})$ NO DIFIEREN SIGNIFICATIVAMENTE DE LA COMPONENTE $\ominus F \cos(\ominus)$ MIENTRAS $F(\text{IGRF}) \gg \ominus F$. (REEVES, 2005)	52
FIGURA 4.4 COMPONENTES DEL VECTOR F DEL CAMPO GEOMAGNÉTICO (GLABMEIER ET AL., 2009).....	49
FIGURA 4.7 PERFILES MAGNÉTICOS A LO LARGO DE DIFERENTES ÁNGULOS DE INCLINACIÓN EN LA INDUCCIÓN MAGNÉTICA DEL CAMPO GEOMAGNÉTICO. LAS FLECHAS REPRESENTAN EL MOMENTO MAGNÉTICO DE UN CUERPO. (LANZA y MELONI, 2002).....	53
FIGURA 4.8 POTENCIAL EVALUADO DENTRO DE UNA REGIÓN R EN CUALQUIER PUNTO DENTRO DE R . TOMADO DE BLAKELY, 1996.....	55
FIGURA 4.9 PRINCIPIO DEL FILTRO DE CONTINUACIÓN ASCENDENTE DE UNA FUENTE DONDE EL POTENCIAL U ES CONOCIDO DENTRO DEL PLANO $Z=Z_0$, DESEADO EN EL PUNTO P . LA INTEGRACIÓN DE Q ESTÁ SOBRE LA SUPERFICIE S , R ES LA DISTANCIA ENTRE LOS PUNTOS Q Y P (BLAKELY, 1996)	56
FIGURA 4.10 DIAGRAMA DEL MÉTODO DE LA SEÑAL ANALÍTICA CALCULADO A PARTIR DE LAS DERIVADAS HORIZONTALES Y VERTICALES DEL CAMPO PARA SER COMBINADAS EN VALOR ABSOLUTO. (ROEST ET AL., 1992).....	57
FIGURA 4.1 VOLUMEN INFINITESIMAL DENTRO DE UN CUERPO CON N LADOS (KRAVCHINSKY ET AL., 2019)	59
FIGURA 4.2 ELEMENTO POLIGONAL AFGBA CONTENIENDO UN CUERPO QUE SE EXTIENDE AL INFINITO.....	60
FIGURA 4.3 METODOLOGÍA EN ESTUDIOS AEROMAGNÉTICOS, QUE INICIA POR LA ADQUISICIÓN Y FINALIZA POR EL ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN. MODIFICADO DE ZHOU (2018).....	61
FIGURA 4.4 SEPARACIÓN SENSOR-FUENTE, LA ROCA METAMÓRFICA E IGNEA INDICAN EL BASAMENTO MAGNÉTICO. TOMADO DE REEVES (2005)	62
.....	66
FIGURA 4.5 ESPECTRO ELECTROMAGNÉTICO (ELACHI y ZIMMERMAN, 1988)	66
FIGURA 4.6 FIRMAS ESPECTRALES DE MINERALES DE CAOLINITA (A) OBTENIDO DE LA LIBRERÍA USGS Y (B) DATOS MUESTREADOS EN BANDAS ASTER (FATIMA ET AL., 2017).....	69
FIGURA 5.1 DIRECCIÓN DE LÍNEAS DE VUELO UTILIZADAS EN ESTE TRABAJO QUE DELIMITAN EL ÁREA DE LA CARTA F13B13 NOMBRE DE DIOS Y F13B23 SAN JOSÉ DE LA PARRILLA	71
.....	74
FIGURA 5.2 SUSCEPTIBILÍMETRO KAPPABRIDGE KLY-2 DEL INSTITUTO DE GEOFÍSICA DE LA UNAM.....	74
FIGURA 5.3 EMPALME DE IMÁGENES MULTIESPECTRALES, INTERPOLACIÓN DE UNIÓN Y CORTE DE REGIÓN DE INTERÉS	75
FIGURA 5.4 FIRMAS ESPECTRALES DE ALGUNOS MINERALES CON LA REFLECTANCIA SEGÚN LA BANDA ASTER ÚTIL PARA OBTENER LA COMPONENTE QUE REALCE AL MATERIAL EN LA METODOLOGÍA CROSTA (ELSAID ET AL., 2014)	76
FIGURA 6.1 MAPA DE ANOMALÍAS MAGNÉTICAS TOTALES, CON AGRUPAMIENTO DE DOMINIOS MAGNÉTICOS, ESCALA DE COLOR DISTRIBUIDA UNIFORMEMENTE.	78
FIGURA 6.2 MAPA DE ANOMALÍAS MAGNÉTICAS REDUCIDAS AL POLO (IZQUIERDA), EN COMPARACIÓN CON MAPA GEOLÓGICO (DERECHA), DE LA MISMA ÁREA DE ESTUDIO.....	82
FIGURA 6.3 SEÑAL ANALÍTICA OBTENIDA DEL MAPA DE ANOMALÍAS MAGNÉTICAS REDUCIDAS AL POLO.	82
FIGURA 6.4 LINEAMIENTOS SUPERFICIALES DEL ÁREA DE ESTUDIO PREDOMINANTEMENTE LOCALIZADOS EN LA FRANJA SW	84
FIGURA 6.5 DIRECCIONES PREFERENCIALES DE LOS LINEAMIENTOS SUPERFICIALES.....	85

FIGURA 6.6 LINEAMIENTOS OBTENIDOS EN EL MAPA DE CONTINUACIÓN ASCENDENTE A 500 M.....	86
FIGURA 6.7 LINEAMIENTOS MAGNÉTICOS OBTENIDOS EN EL MAPA DE CONTINUACIÓN DESCENDENTE A 300 M	87
FIGURA 6.8 DIRECCIONES PREFERENCIALES DE LOS LINEAMIENTOS MAGNÉTICOS.....	88
FIGURA 6.9 LOCALIZACIÓN DE LOS PERFILES A-A', B-B' Y C-C' EN A) MAPA DE ANOMALÍAS REDUCIDAS AL POLO Y B) MAPA GEOLÓGICO DEL ÁREA DE ESTUDIO.....	89
FIGURA 6.10 MODELO BIDIMENSIONAL GEOLÓGICO- ESTRUCTURAL A-A' MOSTRANDO LA SEÑAL MAGNÉTICA EN NT QUE GENERA.	90
.....	91
FIGURA 6.11 MODELO BIDIMENSIONAL GEOLÓGICO- ESTRUCTURAL B-B' MOSTRANDO LA SEÑAL MAGNÉTICA EN NT QUE GENERA.	91
FIGURA 6.12 MODELO BIDIMENSIONAL GEOLÓGICO- ESTRUCTURAL C-C' MOSTRANDO LA SEÑAL MAGNÉTICA EN NT QUE GENERA.	92
FIGURA 6.13 IMAGEN PROCESADA CON EL MÉTODO DE COCIENTE ESPECTRAL QUE RESALTA MINERALES ARCILLOSOS.	94
FIGURA 6.14 IMAGEN PROCESADA CON LA TÉCNICA CROSTA PARA RESALTAR MINERALES ARCILLOSOS ASOCIADOS A ALTERACIÓN ARGÍLICA EN LA REGIÓN DEL VISIBLE E INFRARROJO CORTO.....	95
FIGURA 6.15 IMAGEN PROCESADA CON LA TÉCNICA CROSTA PARA RESALTAR MINERALES ARCILLOSOS ASOCIADOS A ALTERACIÓN ARGÍLICA EN LA REGIÓN INFRARROJO TÉRMICO.	96

Lista de Tablas

- TABLA 2.1 PRINCIPALES TIPOS DE ALTERACIÓN UTILIZADOS COMO GUÍA DE MINERALIZACIÓN. TOMADO Y EDITADO DE PIRAJNO (1992) Y PETERS (1978). **22**
- TABLA 2.2 NATURALEZA GENERAL DE ALGUNOS TIPOS DE SKARN. OBTENIDO DE EVANS, 1993 CON DATOS DE MEGAW ET AL. (1988) **28**
- TABLA 2.3 TIPO DE PROSPECCIÓN UTILIZADA SEGÚN LAS PROPIEDADES FÍSICAS DEL TERRENO EN ALGUNOS DEPÓSITOS MINERALES (DENTITH ET AL., 2014). **30**
- TABLA 2.4 PRINCIPALES TIPOS DE YACIMIENTOS EN DIFERENTES REGIONES MINERAS EN DURANGO (SERVICIO GEOLÓGICO MINERO, 2018) **32**
- TABLA 4.1 ESPECIFICACIONES DEL SENSOR ASTER (ABRAMS, 2000).**68**
- TABLA 5.1 MEDICIONES DE SUSCEPTIBILIDAD MAGNÉTICA DE MUESTRAS DE LA ZONA DE ESTUDIO. **88**

Abstract

Geophysical exploration has been used in mining survey to identify geological structures related to mineralization. Through the analysis and processing of aeromagnetic data, around 1900 km² were studied to delimit zones of shallow intrusions and alterations in the Parrilla mining district area.

The studied area is located in the province of Basin and Range on the eastern margin of the Sierra Madre Occidental at southeast of Durango, México. Ignimbrites from the Paleogene and Miocene and intermediate felsic intrusive are set in calcareous formations and have originated metallic mineral deposits (Pb, Zn, Cu, and silver) under meta-somatic and hydrothermal conditions, source of epithermal vein systems and skarn deposits. The “La Parrilla” exploitation area corresponds to 17% of the study area. Surface geology and geophysical evidences permitted to evidence the possibility of finding others mineralized bodies in the area -

To simply the analyses of the magnetic signal, transformations were applied to the aeromagnetic data using the algorithm proposed by Baranov and Naudy (1964), implementing the signal reduced to the pole to obtain the magnetic reduced to pole anomaly map that was correlated with the different geological units. Subsequently, an upward continuation filter was used to obtain the regional trend of the magnetic basement and a downward continuation operator allowed to highlight effects that provide new geological information at depth. Remote Sensing using ASTER multispectral image processing, partially supported the analysis and processing of geophysical information.

Three sections that cross the most interesting magnetic anomalies were carefully chosen to use the algorithm of Talwani's (1959). To reduce ambiguity we presented two-dimensional models using magnetic susceptibility parameters measured in samples of lithostratigraphic units. The analysis of the magnetic interpretation allowed us to inferring the existence of buried intrusive at the NW and NE regions, adjacent to the La Parrilla mining region. As well as the southern region of the study area that are favorable for the existence of mineralized systems (eg. skarn and epithermal). The results allowed knowing the potential for mineral exploration that must be explored in detail with the proposed zones, in subsequent works.

Keywords Mining exploration; Aeromagnetic Surveys; Geophysical processing; Talwani Models; Durango, Remote Sensing

Resumen

En las provincias de Sierras y cuencas en el margen oriental de la Sierra Madre Occidental ubicadas dentro de la franja Ignimbrítica mexicana, al sureste del estado de Durango, afloran ignimbritas del Paleógeno y Mioceno e intrusivos intermedios a félsicos emplazados en formaciones calcáreas los cuales han dado origen a yacimientos minerales en metales base (Pb, Zn, Cu y Plata) que bajo condiciones metasomáticas e hidrotermales dieron origen a yacimientos en sistemas de vetas epitermales y mantos de Skarn.

En el presente trabajo se utilizó la exploración geofísica para identificar estructuras geológicas relacionadas con mineralización a través del análisis y procesamiento de datos aeromagnéticos e imágenes satelitales multiespectrales, en un área de aproximadamente 1900 km² con el fin de delimitar zonas de intrusiones someras y alteraciones. La zona de explotación de “La Parrilla”, corresponde al 17% del área de estudio, y a partir de evidencias superficiales se presume la posibilidad de encontrar mayores cuerpos mineralizados en la zona, que no han sido verificadas mediante exploración geológica, y que, con los métodos geofísicos propuestos se pretende complementar información al otorgar zonas concretas de posible mineralización e intrusivos no aflorantes.

Con la finalidad de facilitar el análisis e interpretación de la información geofísica se realizaron transformaciones a los datos aeromagnéticos usando el algoritmo propuesto por Baranov y Naudy (1964) implementando la señal reducida al polo con el fin de obtener un mapa de anomalías que pueda ser correlacionado con las diferentes unidades geológicas. Posteriormente se utilizaron filtros de continuación analítica de campo, ascendente a 500 metros con la finalidad de conocer la tendencia regional del basamento magnético, mientras que al aplicar el operador de continuación descendente permitió resaltar efectos que aportan nueva información geológica a profundidad. Con el análisis, interpretación magnética y la geología regional, se seleccionaron tres secciones que cortan las anomalías magnéticas más interesantes y se realizaron, modelos geológicos. - estructurales desde el punto de vista minero utilizando el algoritmo de Talwani (1959). Estos modelos bidimensionales, utilizaron parámetros medidos en muestras de las principales unidades litoestratigráficas. Los modelos geológico-estructurales obtenidos y el análisis de la interpretación magnética permitieron establecer la existencia de intrusivos a profundidad y que las regiones NW, NE aledañas a región minera de La Parrilla, así como la región sur del área de estudio son favorables para la existencia de sistemas mineralizados (e.g. Skarn y epitermales). Los resultados permitieron inferir el potencial para la exploración minera que podría ser explorada a detalle con las zonas propuestas, en trabajos posteriores.

Capítulo I Introducción

La industria minera es un sector multidisciplinario donde coexisten diversas ramas de profesionistas, que trabajan con el fin de localizar, extraer, procesar y dar apoyo en las diferentes etapas de la industria que en muchas regiones del país representa una actividad fundamental de gran impacto, ambiental, social y económico. La cadena de valor en la industria consta de diversas etapas que inician generalmente en una prospección regional hasta una estimación puntual de una reserva mineral; en los primeros pasos de la exploración se inicia al descubrir el depósito mineral seguido de estudios de factibilidad para, posteriormente desarrollar infraestructura para el prospecto minero.

En esta primera etapa del proceso minero se lleva a cabo una prospección donde se identifican las características generales de un probable yacimiento a través un trabajo multifacético para detectar distintos rasgos característicos de la zona como áreas de interés, antecedentes mineros y legales, entre otras. La fase posterior de exploración consiste en búsqueda y evaluación de los recursos minerales mediante visitas a campo con muestreo superficial, geoquímica, geofísica y en las etapas finales una barrenación que permite delimitar e interpretar claramente la información recabada dimensionando y calculando las reservas minerales (SE, 2016).

La geofísica es utilizada como un método auxiliar que contribuye al mapeo y la solución de problemas estructurales. Las metodologías geofísicas como la teledetección y aeromagnetometría permiten realizar exploración remota de manera eficaz y con resultados en grandes áreas logrando identificar zonas de potencial minero en una de las primeras etapas de investigación minera.

La minería en nuestro país es un pilar fundamental para muchas regiones y su historia se remonta siglos atrás. Se conoce que en la época prehispánica los conocimientos mineros y metalúrgicos de los pueblos indígenas eran necesarios con el fin de contener a las provincias tributarias del imperio Azteca, esto se lograba a través de técnicas de explotación y exploración de minerales metálicos y no metálicos (Muñoz, 1986). Durante los siglos posteriores la modernización del país logró colocar a la minería como una industria económicamente importante, que actualmente contribuye con el 2.4 % del PIB nacional (INEGI, 2018).

La Secretaría de Economía del Gobierno de México indica que el país se encontraba en 2018 entre los diez primeros productores de 16 minerales metálicos y no metálicos manteniéndose el primer lugar en producción de plata, segundo

lugar en producción de fluorita, tercero en wollastonita (útil en la industria de cerámicos y construcción); cuarto en bismuto y celestina (uso químico en diversas industrias); quinto en molibdeno plomo y diatomita (usado para productos de filtrado microscópico); sexto y séptimo en producción de cadmio, selenio, zinc, feldespato, yeso, oro, barita y sal; octavo en cobre y noveno en tungsteno y manganeso. En el país los principales elementos obtenidos con mayor valor de remuneración son el oro, plata, cobre, zinc y hierro explotándose principalmente en los estados de Sonora, Guanajuato Zacatecas, Chihuahua, Durango y Coahuila (Servicio Geológico Mexicano, 2019).

La participación minera se encuentra repartida en tres sectores, la minería a gran escala constituye entre el 93 y 98% de la producción de minerales preciosos y minerales accesorios, la minería a mediana escala participa con menos del 5% de la producción al igual que la de pequeña escala, que obtiene minerales y productos no metálicos.

Las cifras de la Cámara Minera de México indican que la industria minera en el país se mantuvo en 2018 con uno de los mejores niveles de remuneración, al tener un salario promedio de 39% superior al nivel nacional manteniendo proyectos mineros y concesiones que cubren el 11% del territorio nacional aunque el 70% del territorio es susceptible a desarrollar esta industria (Figura 1.1), a lo largo del tiempo el Servicio Geológico Mexicano ha usado mapas metalogenéticos u otros minerales industriales con el objetivo de precisar áreas favorables para la investigación y búsqueda de potencial geológico –minero (Servicio Geológico Minero, 2018).

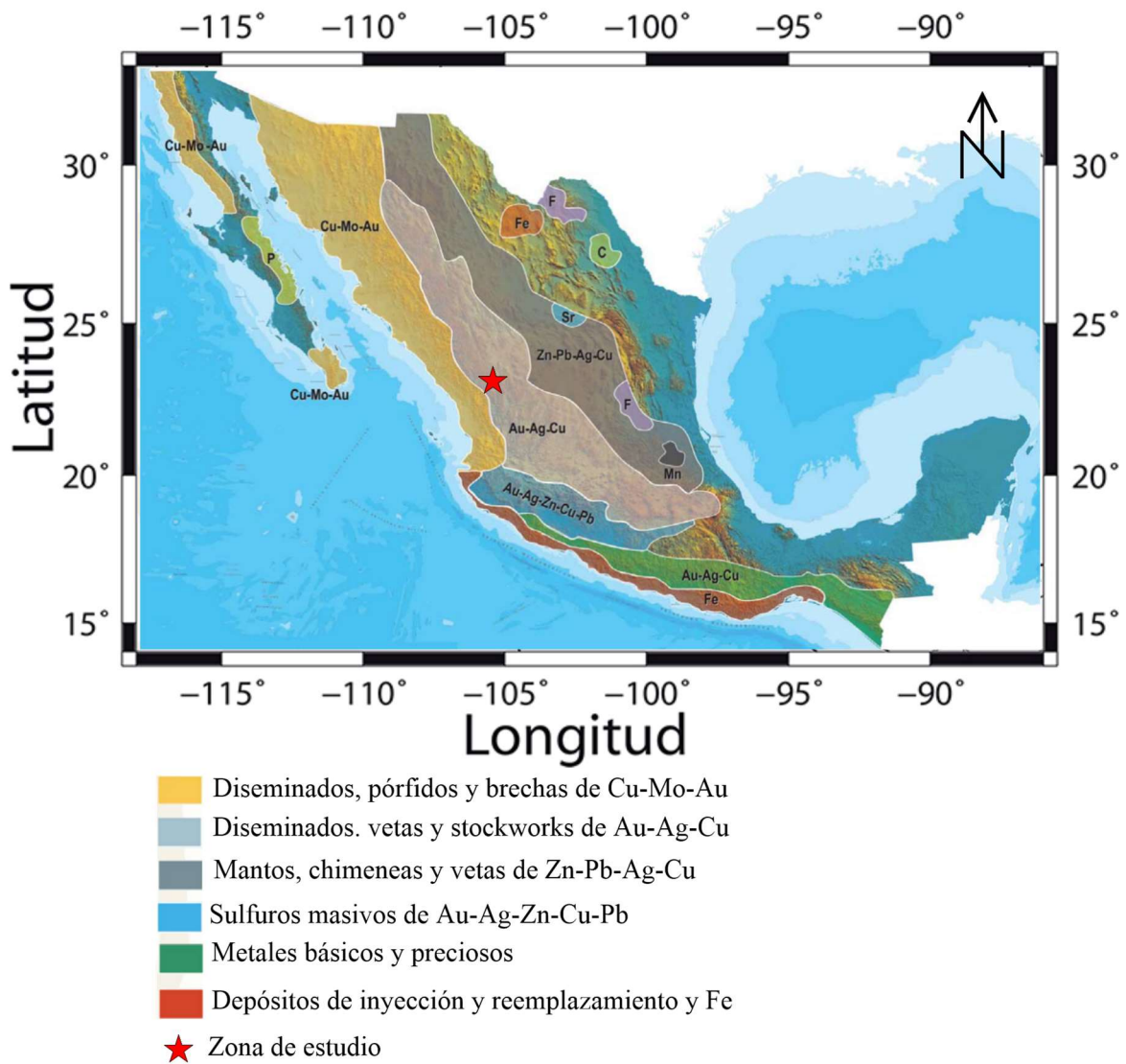


Figura 1.1 Mapa de potencial geológico de la república mexicana (Servicio Geológico Minero, 2018)

1.1 Justificación

Un gran número de trabajos de geológicos y mineros describen una viable exploración minera en el área circundante al distrito Minero de La Parrilla en Durango. Actualmente la zona de La Parrilla ha sido estudiada y trabajada por la empresa First Majestic Resources con extracción principalmente de Zn y Ag, sin embargo, en las últimas épocas la producción minera ha decaído considerablemente, la distribución de los yacimientos y su relación con rasgos geológicos semiregionales y locales ha sido poco estudiada. Por ello el empleo de estudios geofísicos, en combinación con algoritmos computacionales, representa una buena alternativa que, en conjunto, con los estudios geológicos permite entender y analizar, el comportamiento, generalmente complejo, de los yacimientos minerales, e identificar nuevas áreas para su futura evaluación.

Con ello incrementar reservas minerales en regiones con áreas de oportunidad para el desarrollo minero local y regional con el fin de mantener y desarrollar nuevos empleos en sectores que por posición geográfica representan un área de oportunidad inmejorable.

1.2 Hipótesis

Los métodos geofísicos han sido utilizados en diversos tipos de estudios que abarcan desde trabajos regionales hasta de detalle, y en estudios mineros, se han utilizado dependiendo del tipo de yacimiento. Con magnetometría, el análisis de las anomalías magnéticas presentes ha sido de gran utilidad para identificar contrastes litológicos y estructurales que pueden ser correlacionados y utilizados para localizar y caracterizar rasgos litológicos asociados con la mineralización.

Además, El procesado y análisis de imágenes multiespectrales satelitales lograrán facilitar la identificación de rasgos geológicos superficiales, y distribución de principales minerales de alteración.

La correlación geológica, magnética, y de teledetección permitirá obtener información valiosa sobre la localización de sitios promisorios para la exploración minera, que a su vez estén asociados con las condiciones geológicas que permitan la formación de yacimientos.

1.3 Objetivos

1. Generar mapas magnéticos con base en la información magnética obtenida a través de aeromagnetometría con el fin de identificar fuentes asociadas a cuerpos generadores de mineralización.
2. Realizar interpretaciones cualitativas describiendo los principales rasgos litológicos y condiciones favorables para la formación de estructuras que den origen a yacimientos minerales a escala semiregional (1:50,000).
3. Utilizar técnicas de percepción remota en imágenes multiespectrales satelitales para explorar amplias áreas identificando posibles zonas de interés a partir de minerales de alteración hidrotermal.
4. Realizar modelos bidimensionales geológicos -geofísicos a partir de cálculos de modelado directo con fin de realizar interpretaciones que permitan entender y caracterizar rasgos de posibles yacimientos en la zona de estudio.

1.4 Zona de estudio

El área estudiada se localiza al NW de la república mexicana (Figura 1.2), con un área de ca. 1900 km², al SE del estado de Durango, incluye los municipios: Nombre de Dios, Poanas, Vicente Guerrero, Súchil, Mezquital y en menor medida Chalchihuites, en el estado de Zacatecas. La región cuenta con zonas de aprovechamiento minero como es el caso del distrito minero de la Parrilla.

El relieve presenta lomeríos bajos y grandes valles al NE que se acuñan hacia el W de la zona. De acuerdo con su topografía, geología, hidrología etc., el área se encuentra en la porción SE de la provincia fisiográfica de la Sierra Madre Occidental (SMO), colindante con la Mesa del Centro en las subprovincias de Sierras y Cuencas de Durango y la Gran meseta y cañones duranguenses.

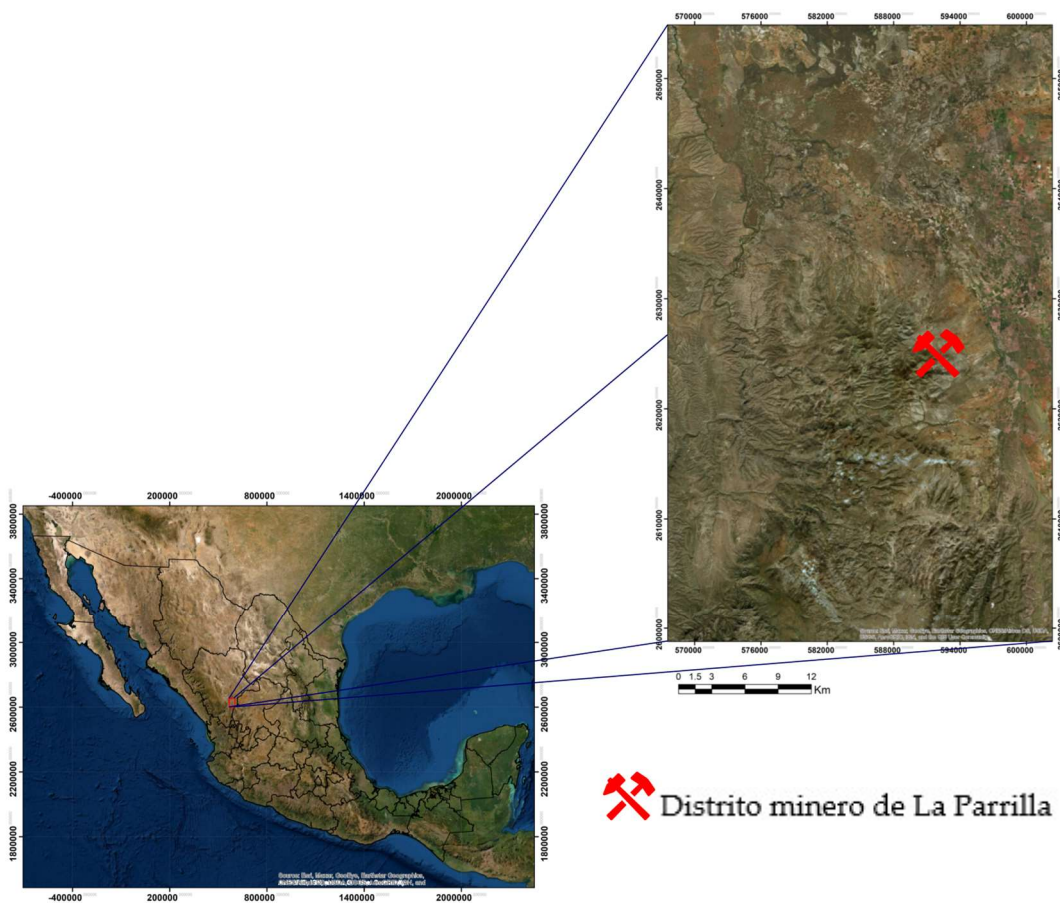


Figura 1.2. Mapa de la ubicación del área de estudio en proyección UTM 13N

Gran parte de la porción S y SE se muestran pronunciados cambios topográficos debido a barrancas, cañones y terrenos escalonados (Tristán et al., 2001) .La red hidrológica muestra diferentes tipos de drenaje, en su mayoría déndrico y subdéndrico, muestran una clara dirección NW-SE en el valle de Nombre de Dios (Figura 1.3). En las zonas centrales montañosas el patrón subdéndrico es controlado por la geomorfología de los altos topográficos que, en su mayoría, tienen una dirección N-S y NW-SE.

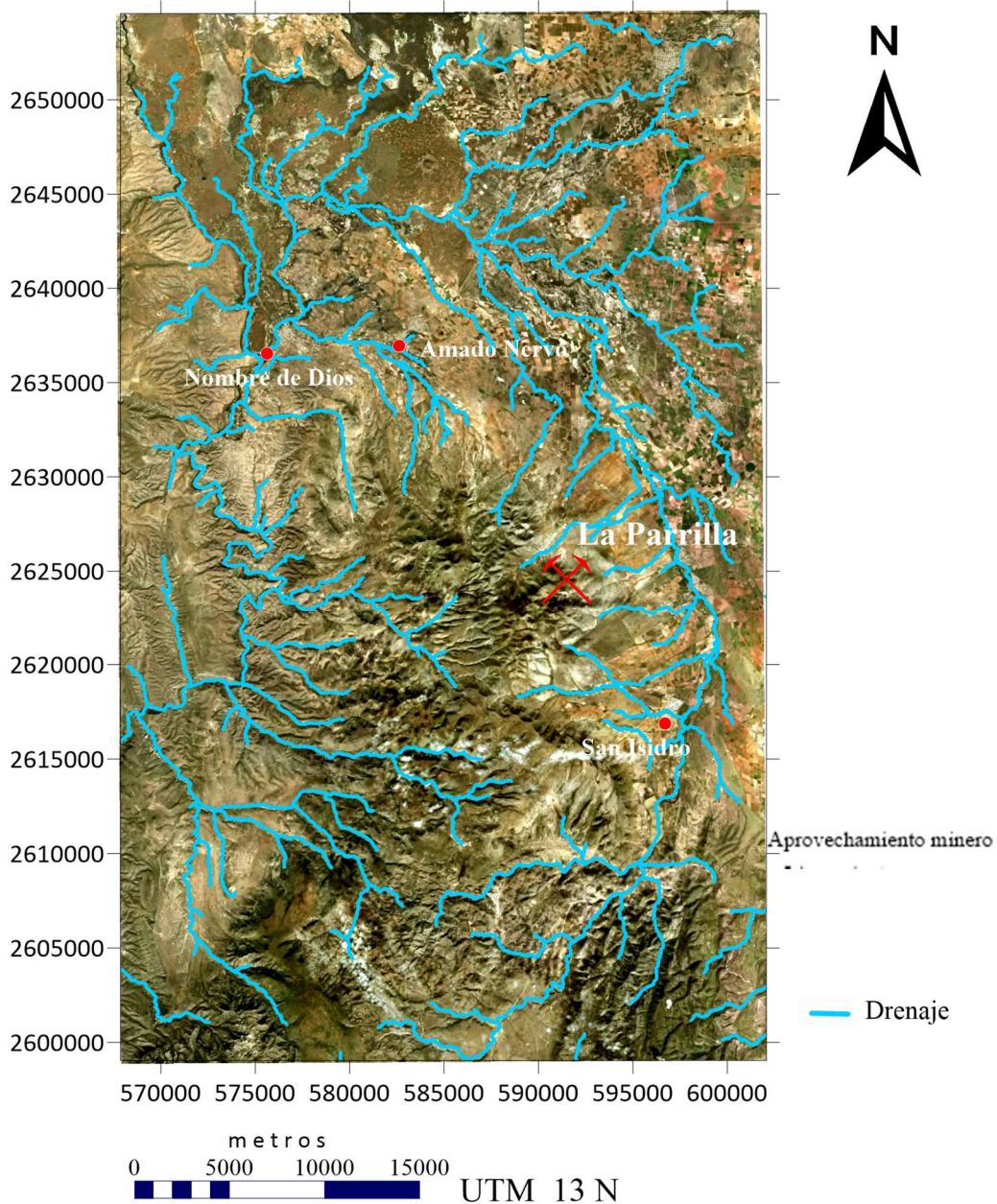


Figura 1.3. Patrón de drenaje en la zona de estudio.

Capítulo II Contexto minero

2.1 Formación de depósitos minerales

El término yacimiento mineral se define como un volumen de roca natural enriquecido en uno o más minerales (Haldar, 2018, Moon et al., 2006, Stevens 2010) o como concentración de minerales y/o metales suficientemente elevadas para ser explotable con las condiciones económicas y tecnológicas presentes (Gandhi y Sarkar, 2016).

La geometría de los yacimientos suelen ser cuerpos únicos, en conjunto o parcialmente continuos de roca mineralizada (Gandhi y Sarkar, 2016) compuesta por minerales cuya explotación contiene mena, que es el mineral del que se puede extraer uno o más metales para ser aprovechado y obtener un beneficio económico. La relación entre calidad y cantidad de minerales explotables es llamada ley minera y describe el grado de recursos naturales valiosos (Haldar, 2018). Dentro de los yacimientos existe gran porcentaje de roca sin interés económico llamado ganga donde el material de mena se encuentra intercrecidos (Evans, 1993).

Los yacimientos minerales han sido clasificados de diferentes maneras, según:

- la geometría de emplazamiento
- el uso de material extraído (metálico o no metálico)
- la génesis y tectónica; éste último comprende el tiempo de formación con respecto a su entorno.

Si bien, Misra (2000) clasifica los yacimientos minerales, según el proceso de formación, en:

- *Ortomagmático*: formado directamente por la evolución y cristalización de magmas que dependiendo de su emplazamiento y tipo pueden formar distintos yacimientos. Los magmas máficos a ultramáficos forman yacimientos con alto contenido en hierro, cobre, níquel, titanio y platino, cromo y elementos del grupo del platino, mientras que los magmas félsicos son comúnmente asociados con yacimientos de cobre, zinc, oro o plata.
- *Sedimentario*: ocurren predominantemente de manera singenética por procesos de enriquecimiento que pueden ser la meteorización y precipitación química, de minerales residuales resistentes a estos procesos. Un ejemplo de este tipo de yacimiento son las bauxitas, que son la principal fuente de aluminio.

- *Metamórfico*: dan origen a nuevos minerales modificando los preexistentes, generalmente el metamorfismo de contacto o regional involucra recristalización. Ejemplos de este tipo de yacimientos son el grafito y el talco.
- *Sistemas Hidrotermales*: La formación de estos depósitos involucra la precipitación de minerales constituyentes en fluidos calientes de composición variable, en general, son sistemas de gran flujo calorífico y actividad tectónica dominada por agua marina o meteórica y guiada por fuentes de calor magmáticas

Los yacimientos minerales suelen ser clasificados según su temperatura y profundidad de formación (Lindgren, 1933):

- Hipotermales, observados en depósitos formados a una gran profundidad, presión y temperatura.
- Mesotermales para depósitos de mayor temperatura y presión a lo largo de fisuras.
- Epitermales, relacionados a procesos a bajas temperaturas y más cercanos a la superficie.
- Teletermales formados a pocas profundidades, bajas temperaturas y presión de una lejana a la fuente hidrotermal.

Según la geometría de la roca encajonante la mineralización puede seguir un control estructural (Smirnov, 1957), el conocimiento del entorno del yacimiento es pieza clave para la exploración y explotación de los yacimientos, por ello la Figura 2.1 ilustra ejemplos de mineralización en diferentes geometrías.

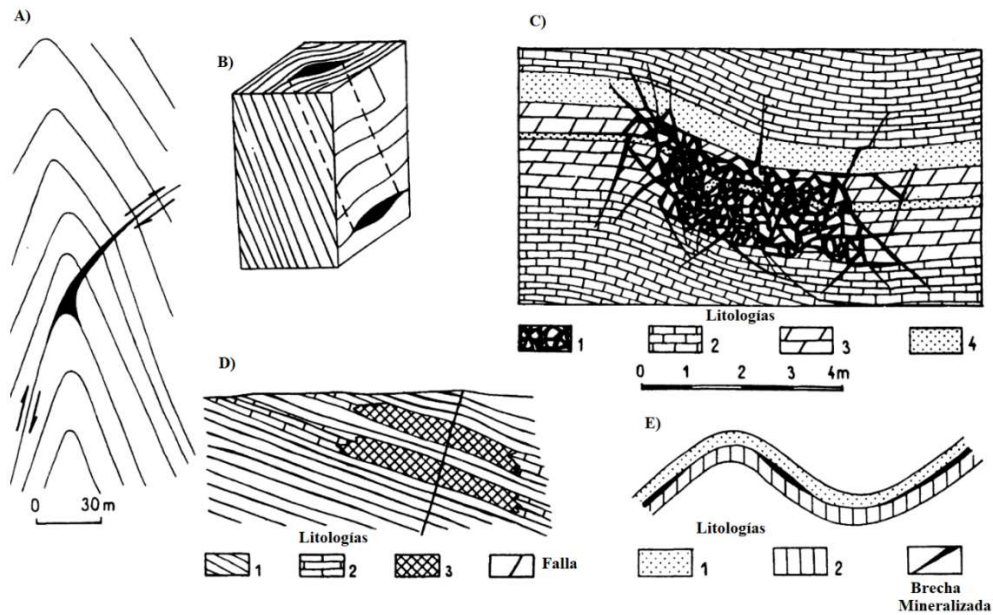


Figura 2.1. Depósitos interstratificación: A) mineralización depositada en pliegues antiformes. B) Lentes de mineralización encapsulados en estratos. C) Brechas mineralizadas o stockwork en pliegues *Arkansas USA* (McKnight in Bateman, 1950). D) Remplazamiento metasomático en capas formando mantos con un canal alimentador (falla, fractura) E) Lentes de mineralización en zona de buckling (flujo flexural). Tomado de Kuzvart y Böhmer (1986).

Los cuerpos mineralizados pueden estar asociados con fallas regionales de cualquier cinemática al rellenar vetas en fallas auxiliares, estar contenidas en patrones por mecánica de transurrencia, zonas de brecha, en fracturas generadas en un sector de alta tensión tectónica, ramificaciones o grietas por enfriamiento en intrusivos. Generalmente las vetas pueden ser zonas de gran longitud pero poco espesor, con ángulos pronunciados (López, 1994). Los yacimientos también pueden formarse en los límites de contacto de los cuerpos plutónicos (Figura 2.2) o dentro de los cuerpos intrusivos contener la mineralización e incluso verse afectados por fallas posteriores (Kuzvart y Böhmer, 1986)

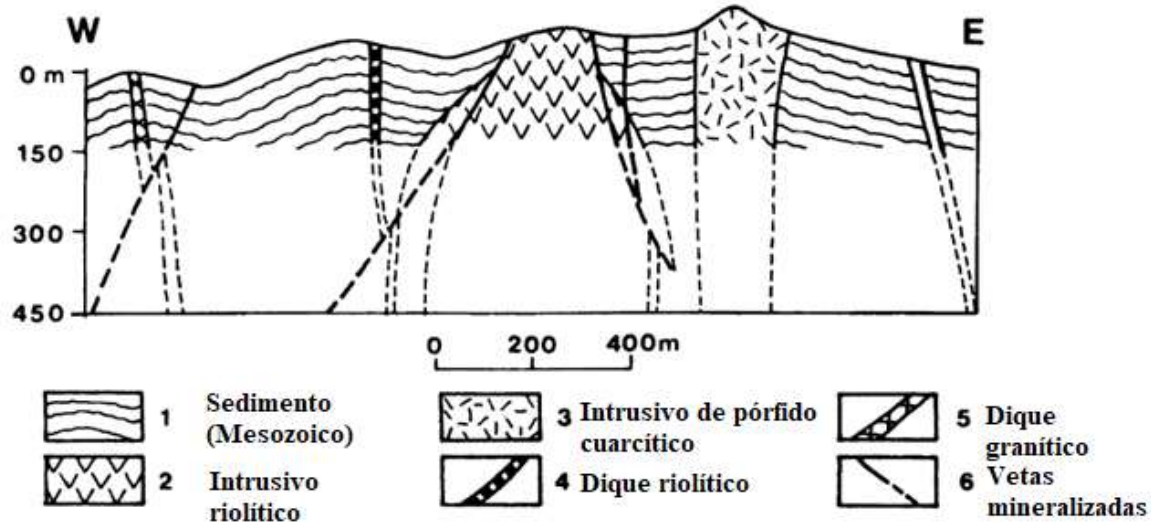


Figura 2.2. Modelo en Tepezalá Aguascalientes México donde las vetas mineralizadas siguen el contacto de las intrusiones (Kuzvart y Böhmer, 1986).

Finalmente, existen otros tipos de yacimientos como los masivos que se caracterizan por ser de tamaños kilométricos con mineralización distribuida uniformemente; o los depósitos sedimentarios de tipo placer, donde los ríos, concentran partículas de minerales densos como oro, platino o estaño en los depósitos de gravas y arenas (López, 1994).

2.2 Alteraciones Hidrotermales

Existen diferentes tipos de alteraciones, las cuales indican un cambio físico y químico de las rocas como resultado de las reacciones hidrotermales de los minerales que involucran el cambio mineralógico y textural de la litología original (Misra, 2000).

Browne (1978) describió las variables que influyen en las alteraciones de los sistemas hidrotermales y son.

- La temperatura, que es el factor más importante, ya que favorece la estabilidad de algunas especies minerales, generando secuencias de mineralización.
- La tasa de depósito de minerales en fluidos hidrotermales.
- La permeabilidad de la litología invadida.
- La composición química del fluido.

Las alteraciones hidrotermales son de gran importancia como guías de exploración en depósitos epigenéticos, ya que donde las rocas ígneas exhiben cambios mineralógicos, particularmente, en los límites de la zona de alteración formando anillos exteriores (Corbett y Terry, 1997). En otros casos cuando coexisten vetas poco espaciadas las zonas alteradas se fusionan para formar un halo general que rodea al sistema, por ello las manifestaciones de una roca alterada suelen ser el primer indicio de un cuerpo mineralizado cercano (Gandhi y Sarkar, 2016).

Los fluidos hidrotermales que generan de alteraciones pueden tener temperaturas de 100 °C, para aguas meteóricas en bajas profundidades y hasta 600°C, en fluidos magmáticos que reemplazan de manera completa o selectiva los minerales de la roca encajonante. La tabla 2.1 muestra algunas de las alteraciones hidrotermales más comunes.

Tabla 2.1 Principales tipos de alteración utilizados como guía de exploración de yacimientos minerales. Modificado de Pirajno (1992) y Peters (1978).

Alteración	Características	Mineralogía
Sílica	Alteración muy común en yacimientos hidrotermales. Durante la formación se puede introducir sílice de los fluidos circulantes, o quedarse en forma de sílice residual, esto debido a que la solubilidad de sílice aumenta con la temperatura y la presión. En muchos depósitos de minerales epitermales se caracterizan por <i>sinters</i> , cubiertas de sílice, brechas silíceas, vetas y silicificación de rocas encajonantes.	Ópalo y Cuarzo . Ocasionalmente arcilla, Barita, Pirita o Calcita.
Argílica	Formación de arcillas debido a un metasomatismo intenso, a temperaturas entre 100 y 300 ° C, es común en yacimientos tipo pórfido. Es común la presencia de arcillas tipo: montmorillonita, illita, clorita o sericita y arcillas del grupo caolín.	Caolín y Montmorillonita
Argílica avanzada	En los sistemas tipo pórfido, tras una destrucción total de feldspatos debido a hidrólisis, se suelen formar caolinita o alunita. Consecuencia de un ataque ácido intenso y una lixiviación.	Dickita, Caolinita, Pirofilita
Fílica (sericitización)	Muy común y presente en casi todos los depósitos hidrotermales. Esta alteración tiende a ser potásica cuando aumenta la cantidad de feldespato potásico y/o biotita, o argílica al aumentar las cantidades de minerales arcillosos.	Sericita, Cuarzo, Pirita

Potásica	Común e importante en yacimientos tipo pórfidos y epitermales. Ocurre en las zonas cercanas a la alta temperatura de formación y suele ir acompañada de sulfuros (ej., calcopirita, pirita, molibdenita).	Feldespato potásico, Biotita, Hematita, Magnetita, Sericita, Anhidrita
Propilítica	Su formación es de baja temperatura (200°C – 300°C), bajo grado de hidrólisis de los minerales, cercano a la alteración potásica. Es particularmente útil en sistemas epitermales para monitorear la proximidad a la fuente de calor y a la zona de ebullición, donde se pueden encontrar mayor ley de mineralización de oro.	
Skarn	Mineralización formada por la sustitución de material calcáreo por minerales de calcosilicatos adyacentes a un cuerpo intrusivo.	Granate, Diopsida, Wollastonita, Anfíbol, Magnetita y Pirita
Greisen	Común en los sistemas de pórfidos granítico emplazados en formaciones sedimentarias a temperaturas mayores de 250°C relacionados con liberación de volátiles durante su solidificación.	Moscovita, Feldespatos, Cuarzo, Topacio, Turmalina, Fluorita

2.3 Yacimientos relacionados a intrusivos

2.3.1 Yacimientos tipo pórfido

Este tipo de yacimientos suelen ser los de mayor tamaño en la corteza terrestre. La mayoría de ellos están relacionados a los cinturones orogénicos desde el Mesozoico al Cenozoico dentro de los límites de placa litosféricas actualmente activos (Misra, 2000), su importancia radica en ser la principal fuente de cobre y molibdeno en el mundo, con una producción del 60% al 70% de Cu y más del 95% de Mo (Sinclair, 2007).

La distribución predominante en América obedece al cinturón de fuego del Pacífico (Figura 2.3). Los principales productores de cobre a nivel mundial obtenido de pórfidos ubican a Chile y Perú en los primeros lugares (International Cooper Study Group).

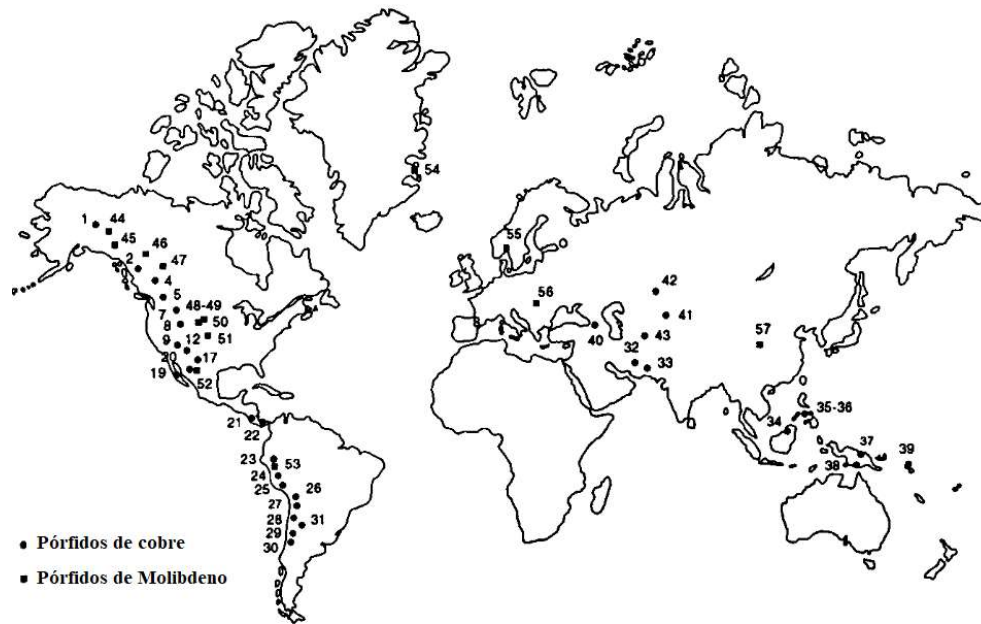


Figura 2.3. Distribución de los principales yacimientos tipo Pórfido en el mundo (Misra, 2000)

Estos depósitos son comunes en zonas magmáticas cercanas a raíces de estratovolcanes andesíticos, zonas de subducción de arco volcánico continental e insular y en algunos casos la distribución de los depósitos tipo pórfido puede relacionarse a estructuras regionales con actividad hidrotermal. La mineralogía es variada dominando la pirita sobre cobre y/o en combinaciones con Au, Mo y Ag. Los pórfidos de cobre explotados generalmente contienen entre el 0.25 al 1% de Cu, por tonelada como principal componente metálico extraído por otro lado oro y molibdeno también pueden ser el metal principal o secundario, mientras que la plata suele ser exclusivamente un metal secundario en estos depósitos (Stevens, 2010).

El modelo más usado sobre la génesis de los yacimientos de pórfido es el sistema magmático-hidrotermal (Figura 2.4) donde la formación de los metales está relacionada con intrusiones que han interactuado con fluidos meteóricos (Kirkham y Sinclair, 1995). En este modelo los fluidos ascienden en forma de vapor a través del stock produciendo alteración propilitica y potásica, con zonas estrechas de alteración fílica en el área de interacción (Misra, 2000).

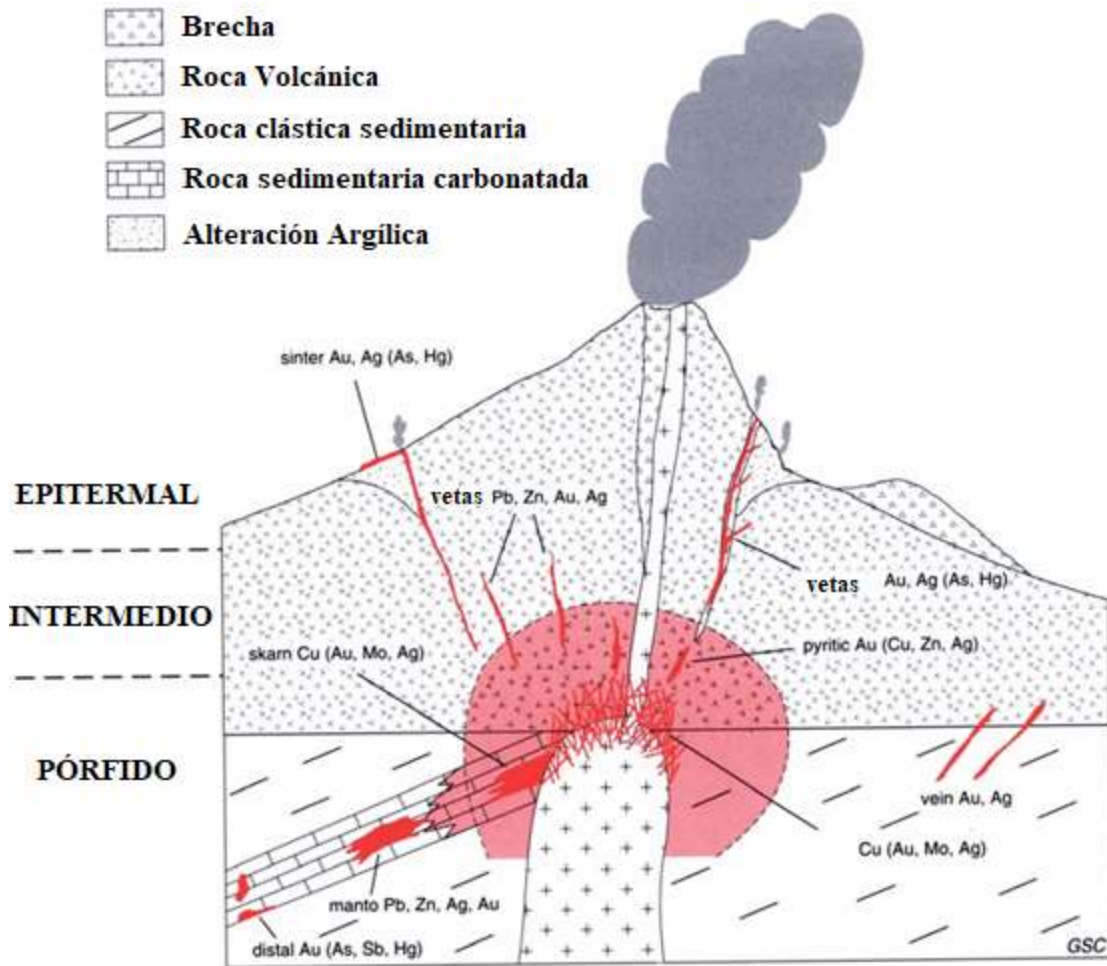


Figura 2.4. Diagrama de un sistema de pórfido cuprífero en la zona raíz de un estratovolcán andesítico (Kirkham y Sinclair, 1995)

Un segundo modelo describe a los fluidos hidrotermales en un movimiento convectivo provocado por el emplazamiento magmático, que produce la alteración fílica y propilitica en la zona perimetral. El origen de los metales y sulfuros es proveniente, en gran medida, del magma en el modelo hidrotermal-magmático, mientras que en el convectivo proviene de la roca encajonante (Misra, 2000). Lowell y Guilbert (1970) han desarrollado un modelo zonificado (Figura 2.5) donde se describe el tipo de alteración y zonas mineralizadas de un pórfido cuprífero típico, que en general mantienen una forma ovoidea columnar de cientos de metros.

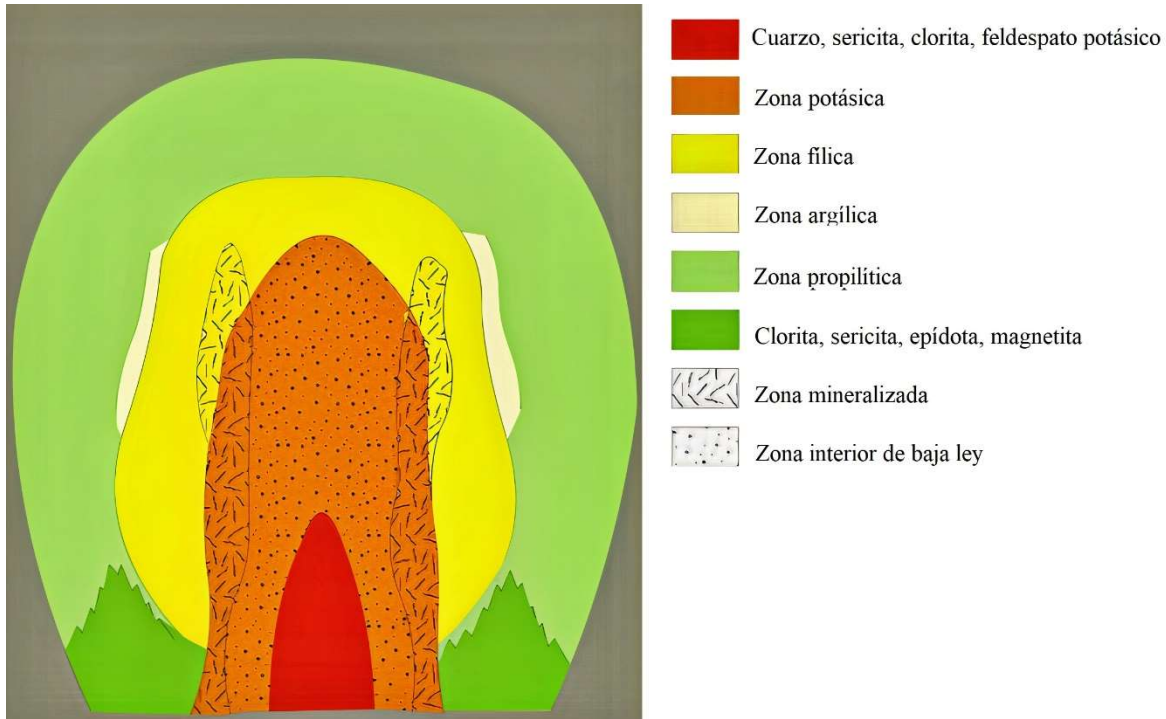


Figura 2.5. Modelo esquemático de un pórfido cuprífero y sus halos de alteración (Lowell y Guilbert ,1970)

En la alteración y exploración geoquímica los patrones guía tienden a ser grandes y concéntricos que generan información útil para conocer zonas de alto potencial de exploración (Sinclair, 2007). En México destacan este tipo de yacimientos en los estados de Sonora, Michoacán, Sinaloa, Baja California, Guanajuato Puebla y San Luis Potosí (Servicio Geológico Mexicano, 2019)

2.3.2 Yacimientos tipo Skarn

Los yacimientos tipo skarns son depósitos asociadas a rocas carbonatadas que se han alterado hidrotermalmente a silicatos que son ricos en calcio, hierro, magnesio, aluminio o manganeso, asociada con menas de sulfuros (Robb, 2005) por el remplazamiento de rocas carbonatadas en procesos metasomáticos (Misra, 2000). Estos depósitos son los más abundantes en la corteza terrestre y se encuentran presentes en todos los continentes (Figura 2.6). La mayoría de los depósitos skarn se asocian con plutones máficos, diques o con aureolas de corneanas de feldespato potásico. Algunos skarns, como los de cobre están asociados con plutones porfídicos calco-alcalinios, serie magnetita, cercano a rocas volcánicas, vetas de stockwork con fracturación frágil y brecha, así como una

alteración hidrotermal intensa; en un entorno de formación relativamente poco profundo (Meinert et al., 2005).

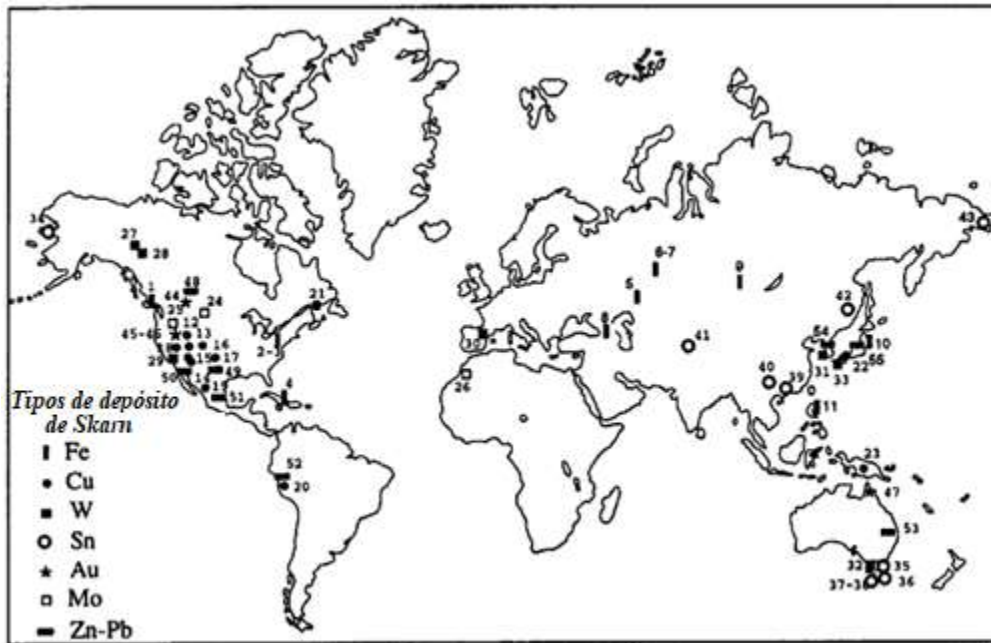


Figura 2.6. Mapa de depósitos tipo Skarn en el mundo, la mayoría con distribución geográfica coincidente con el cinturón de fuego del pacífico. (Misra, 2000)

En los depósitos tipo skarn dominan metales como Au, Cu, Pb-Zn, Fe o Mo (Tabla 2.2) sin embargo, su tamaño suele ser relativamente más pequeño que, por ejemplo, los depósitos tipo pórfidos (Evans, 1993). Su mineralización no siempre es económica ya que los minerales principales son los silicatos de calcio formados como resultado de reacciones químicas entre la roca encajonante y el metasomatismo. Los skarns que contienen mineralización metálica son llamados depósitos de tipo Skarn, suelen existir con otras rocas parecidas, llamadas skarnoides. Éste tipo de roca se forman por metamorfismo en rocas carbonatadas diferentes a la caliza como margas o tobas calcáreas de grano fino que desarrollan poco o nulo contenido metálico (Meinert et al., 2005; Smirnov, 1982).

Los depósitos tienden a ser sumamente irregulares y son hallados en aureolas de contacto, en la estratificación, en fallas o fracturas (Moon et al., 2006), áreas cercanas a vetas, estructuras conectadas como chimeneas o cuerpos masivos (Meinert et al., 2005).

Tabla 2.2 Características generales de diferentes yacimientos de tipo de skarn. Modificado de Evans, 1993 y Megaw et al. (1988)

Tipo de skarn	Asociación de Metales	Principales minerales menas	Intrusivos asociados	Morfología del intrusivo
Cu Cálculo	Cu, Mo (W, Zn)	calcopirita, bornita, pirita, hematita, magnetita	Granodiorita monzogranito	Stocks, diques, brecha, chimeneas
Fe Cálculo	Fe (Cu, Co, Au)	magnetita (calcopirita, cobaltita, pirrotina)	Gabro a sienita, diorita	Intrusivos de tamaños variables, diques.
Mg-Fe	Fe(Cu, Zn)	magnetita (pirita, calcopirita, esfalerita, pirrotina)	Granodiorita a granito	Pequeños diques y sills
W Cálculo	W, Mo, Cu(Zn, Bi)	molibdenita galena calcopirita pirrotina, pirita	Cuarzo-diorita - monzogranito	Grandes plutones y batolitos.
Zn-Pb Cálculo	Zn, Pb, Ag (Cu, W)	esfalerita galena arsenopirita calcopirita	Granodiorita a granito, diorita a sienita	Puede presentarse en stocks y diques
Mo Cálculo	Mo, W, (Cu, Bi, Zn)	molibdenita scheelita bismutina pirita calcopirita	Monzogranito	Intrusivos variados
Sn Cálculo	Sn (Be, W)	casiterita, arsenopirita pirrotina estannita	Granito	Intrusivos variados y batolitos
Mg-Sn	Sn (Be)	Casiterita arsenopirita, pirrotina estannita, esfalerita	Granito	Intrusivos variados y batolitos

2.3.3 Sistema de vetas epitermales -mesotermales de intermedia a baja sulfuración

Los fluidos hidrotermales rellenan estructuras como fisuras o fallas en diferentes condiciones de presión y temperatura con mineralización que puede ocurrir hasta los 2 km de profundidad en rangos donde se puede catalogar como epitermal o mesotermal (Sillitoe, 2003) donde algunos metales son encontrados según el estado de oxigenación del azufre. Los metales transportados en fluidos de baja sulfuración provienen de aguas meteóricas y magmáticas enriquecidas y precipitadas en superficie. En la alta sulfuración los fluidos son de origen magmático que precipita metales y minerales al enfriarse por agua superficial o lixiviar en rocas encajonantes (Sillitoe, 1993).

El vulcanismo de composición ácida a intermedia y su emplazamiento en cualquier tipo de rocas encajonantes son algunas características asociadas a los

depósitos epitermales. En los sistemas epitermales de baja sulfuración, el emplazamiento se encuentra en zonas de fractura y fallas, relacionadas con vulcanismo, que logra desarrollar alteraciones en este tipo de depósitos, de manera argílica que tiende a ser abundante al disminuir la temperatura y en zonas periféricas suele observarse alteraciones argílicas avanzadas (Figura 2.7). Este tipo de mineralización tiende a rellenar oquedades, cavidades o formar vetas en contacto a la roca encajonante para formar filones, y en superficie sistemas de stockwork. Entre los minerales metálicos presentes puede hallarse pirita, esfalerita, galena, electrum, oro, calcopirita o argentita (Camprubí et al., 2003).

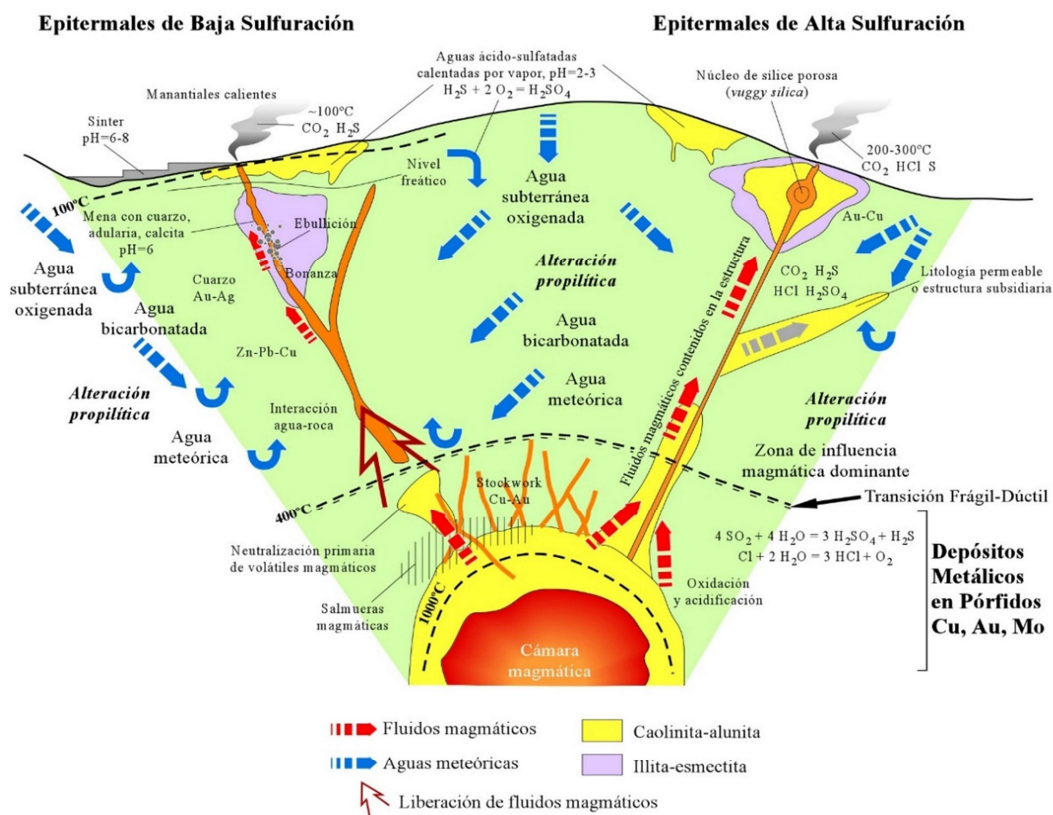


Figura 2.7 Esquema de procesos fisicoquímicos, tipos de alteración y de fluidos en la formación de depósitos epitermales de baja y alta sulfuración. (Sillitoe (1995) y editado en Camprubí et al. (2003))

Por otra parte, la extensión periférica de alteración en la formación de depósitos epitermales de alta sulfuración es extensa y prominente. En el sistema, los controles de emplazamiento son guiados por fallas regionales o intrusiones subvolcánicas. La mineralización económica generalmente se encuentra diseminada en zonas de alteración argílica avanzada con abundante pirita generalmente poco común en relleno de cavidades o porosidades en una profundidad de formación entre 500 m a 2000 m de la paleosuperficie. (Camprubí et al., 2003).

2.4 Geofísica en exploración minera

La exploración geofísica propone diferentes métodos de exploración según las particularidades del ambiente geológico de los depósitos (Tabla 2.3). Las propiedades físicas medidas por la industria de la minería son: el magnetismo, la densidad, radiactividad y poco común las propiedades elásticas. El propósito principal es localizar y caracterizar las fuentes que generan las anomalías y medir en la superficie los contrastes de las propiedades físicas del terreno con el propósito de delimitar zonas factibles que puedan ser relacionados con yacimientos minerales.

Tabla 2.3 Tipo de prospección utilizada según las propiedades físicas del terreno en algunos depósitos minerales (Dentith et al., 2014).

Depósito	Densidad	Propiedades eléctricas	Magnetismo
Formación de Fe	Registro de pozo, mapeo geológico detección o delimitación	Mapeo geológico detección o delimitación	Mapeo geológico detección o delimitación
Carbón mineral	Registro de pozo o posible mapeo geológico.	Registro de pozo	Mapeo geológico detección o delimitación
IOCG (óxido de hierro, Cu-Au)	Mapeo geológico detección o delimitación	Detección o delimitación	Mapeo geológico detección o delimitación
MVS	Mapeo geológico detección o posible delimitación	Detección o delimitación	Mapeo geológico
Magmático Cu-Ni-Cr	Mapeo geológico detección o	Detección o delimitación	Mapeo geológico detección o

	delimitación		delimitación
Uranio	Mapeo geológico	Mapeo geológico	Mapeo geológico
Pórfido de Cobre	Mapeo geológico	Detección o delimitación	Mapeo geológico detección o delimitación
SEDEX	Mapeo geológico	Detección o delimitación	Mapeo geológico con posible detección y delimitación
Epitermal Au	Mapeo geológico	Detección o delimitación	Mapeo geológico
Depósitos de Placer	Mapeo geológico	Mapeo geológico	Posible mapeo geológico
Skarn	Mapeo geológico	Posible delimitación o detección	Mapeo geológico

La delimitación de estructuras como vetas, en sistemas epitermales, han sido exploradas de manera exitosa con el uso de prospección magnética de alta resolución donde se delinearán anomalías magnéticas que posteriormente son exploradas y delimitadas con el uso de métodos eléctricos, donde los resultados muestran zonas de alta resistividad debido a la silicificación de la zona. Otros métodos como la gravimetría, la sísmica o el magnetismo regional ayudan a identificar las principales estructuras extensionales que actúan como vías de fluidos hidrotermales (Hoschke & Sexton, 2005).

En las zonas de Skarn, las susceptibilidades magnéticas suelen ser mayores que en las rocas vecinas debido a su alto contenido en óxidos ferrosos, lo que mejora contrastes magnéticos en la exploración de estos yacimientos. Por otra parte, la sísmica, los métodos eléctricos y la medición de porosidades son otras propiedades físicas que en la exploración de depósitos de Skarn muestran firmas geofísicas complejas que son correlacionables con el metasomatismo (Kim et al., 2015).

2.5 Minería en el estado de Durango

El estado de Durango ha tenido históricamente a la minería como pilar esencial de la economía de la región a raíz de la explotación de sus yacimientos minerales. Actualmente, el estado de Durango ocupa el cuarto lugar en la participación minera nacional; siendo sus principales volúmenes de producción la extracción metálica como no metálica. Oro, plata, cobre, hierro, plomo y zinc encabezan la lista de su producción metálica mientras que los agregados pétreos, arenas, basaltos, bentonita, calcita, caliza, caolín, dolomita, riolita, perlita, fluorita y rocas dimensionales constituyen la minería no metálica. En general, el estado se encuentra en un contexto geológico regional particularmente de origen magmático y afectado por una tectónica extensional relacionada al *Basin and Range* (Aranda-Gómez et al., 2000) asociado a la Sierra Madre Occidental

El estado tiene 54 distritos mineros donde la principal mineralización es el oro, plata, plomo y zinc obtenido de vetas de diverso origen y estructuras (Tabla 2.4). La distribución geográfica de los principales yacimientos metálicos en producción se encuentra en la franja central-norte del estado y el caso de los minerales no metálicos existen diferentes zonas de explotación en la región noreste con empresas que explotan agregados pétreos (Servicio Geológico Minero, 2018).

Tabla 2.4 Principales tipos de yacimientos en diferentes regiones mineras en Durango (Servicio Geológico Minero, 2018)

Estructura mineralizada	Mineralización	Distrito minero
Vetas y stockwork	Au, Ag	San Fernando
Vetas y stockwork	Au, Ag, Pb, Zn	Topía
Vetas	Au, Ag, Pb, Zn	Tamazula
Vetas, stockwork, mantos	Au, Ag, Pb, Zn, Cu, Sb	San Miguel del Cantil
Vetas	Au, Ag, Pb, Zn, Cu	Santa María de Otaéz
Vetas y stockwork	Au, Ag, Pb, Zn	San Dimas
Vetas y stockwork	Au, Ag, Pb, Zn	Pueblo Nuevo
Vetas	Ag, Pb	Los Azules
Vetas y stockwork	Au, Ag, Pb, Cu, Zn	Guanaceví
Vetas	fluorita, Hg	El Colorado
Vetas, stockwork, mantos	Au, Ag, Pb, Zn	Santiago Papasquiario

Cuerpos masivos irregulares	Fe, perlitas	Durango
Vetas y cuerpos estratiformes	Au, Ag, Zn, Ba, zeolitas	Mezquital
Vetas, mantos y chimeneas	Au, Ag, fluorita	Santa María del Oro
Vetas, mantos y chimeneas	Au, Ag, Pb, Zn, Sn, fluorita	Rodeo
Vetas, brechas y chimeneas	Au, Ag, Pb, Zn, Cu, fluorita	Guadalupe Victoria
Vetas y chimeneas	Ag, Pb, Zn	La Parrilla
Vetas y cuerpos irregulares	Ag, Au, Pb, Zn	Atotonilco
Chimeneas, vetas y mantos	Au, Ag, Pb, Mn, Cu, Fe, mármol	Mapimí
Vetas y cuerpos irregulares	Au, Ag, Pb, Sb, Cu, Zn	San Pedro del Gallo
Vetas, stockwork, cuerpos Irregulares y mantos.	Au, Ag, Pb, Zn, bentonita caolín	Cuencamé
Sedimentario	caliza y yeso	Tlahualilo
Vetas, mantos, disseminados Y stockwork.	Au, Ag, Pb, Zn, Cu	San Juan de Guadalupe

El área de estudio de esta tesis de Maestría contiene al distrito minero de La Parrilla dentro del ejido de “San José de la Parrilla” al SE de la ciudad de Durango, con un total de 41 concesiones mineras a cargo de la empresa First Majestic Resources. Estas concesiones abarcan un total de 69,478 hectáreas e incluye una infraestructura para las operaciones de la planta como laboratorios, edificios administrativos y plantas de procesado. El distrito minero de La Parrilla ha tenido una producción artesanal desde tiempos coloniales y desde los años sesenta del siglo pasado hasta 2016 se estima una producción de 903,500 toneladas de mena (Taylor et al., 2016).

Capítulo III Marco geológico -minero

3.1 Trabajos previos en la zona de estudio

El mapa geológico que se dispone del distrito minero de La Parrilla son las cartas geológicas de San José de la Parrilla y Nombre de Dios a escala 1:50,000 elaboradas por la Comisión de Estudios del Territorio Nacional. Estos mapas se realizaron que realizó con base en fotointerpretación y verificación de campo de imágenes aéreas, tomadas en 1969, en ellas se logra plasmar las principales litologías, estructuras geológicas, y algunos símbolos topográficos. Sin embargo, los trabajos geológicos más detallados de la zona son las cartas geológico-mineras a escala 1:50,000 de “San José de La Parrilla” (F13B23) y “Nombre de Dios” (F13B13); con una cartografía editada el Servicio Geológico Mexicano en ediciones de 2007 y 2016. En ambas cartas se integra la información topográfica, elementos estructurales, prospectos mineros y alteraciones minerales. Por otro lado, la carta geológico-minera a escala 1:250,000 “El Salto” (F13-2) editada en el año 2000 que contiene información geológica de la franja centro-sur del estado de Durango, porciones al oeste del estado de Zacatecas y sureste del estado de Sinaloa donde está la información que permite conocer la distribución regional de la geología de la Sierra Madre Oriental.

También, el Consejo de Recursos Minerales (CRM) a través de la Dirección de Minas de Durango han publicado inventarios entre los años 2005 y 2010 de recursos minerales en algunos municipios al norte y este del estado de Durango con el propósito de conocer el potencial de cada localidad estudiada y la importancia económica de los yacimientos existentes. Estos trabajos abarcan polígonos territoriales que pueden contener de uno a tres municipios, con similitud de rasgos geológicos usados en minería. (Servicio Geológico Minero, 2018).

En el suroeste del estado de Durango, en el municipio de Nombre de Dios (porción central del área de estudio), se encuentra la “Unidad Minera de La Parrilla” a cargo de la empresa *First Majestic Resources México S.A de C.V* con 41 concesiones mineras, en un área de 69,478 hectáreas. En su reporte técnico de 2016 se describe una interpretación estructural de las principales componentes de los esfuerzos tectónicos y el tipo de mineralización en las diferentes vetas explotadas.

Asimismo, se tiene reporte de un levantamiento geofísico aeromagnético a 75 metros de altura realizado por *MPX Geophysics Ltd.* en conjunto con *Ellis Geophysical Consulting Inc.* que cubre 31,500 hectáreas (aproximadamente 17% del área de estudio de este trabajo). El trabajo por su naturaleza generó un mapa a detalle de la zona con el objetivo de identificar anomalías causadas por minerales magnéticos asociados con los Skarn. El método geofísico eléctrico realizado por *Quantec Geoscience Ltd.* de resistividad y polarización inducida prospectó un área de 20 km² (90 kilómetros de líneas de cableado tendido) en estos estudios se realizaron inversiones 2D donde se identificaron áreas de alta resistividad con dirección NE, interpretado como parte del intrusivo intermedio de cuarzo monzonita, por otra parte, con la cargabilidad se interpretó la presencia de mineralización por sulfuros, grafito y algunos tipos de arcillas. Sin embargo, los reportes refieren una nula correlación entre los resultados eléctricos y la mineralización, indicando realizar trabajos adicionales (Taylor et al., 2016).

3.2 Tectónica y geología regional.

A escala regional el noroeste de México cuenta con diversas provincias geológicas. Gran parte de la sierra Madre Occidental se encuentra en las inmediaciones de las provincias de la faja ignimbrítica mexicana (Ortega-Gutiérrez et al. 1992) también descrita dentro de la provincia fisiográfica de Sierras y Cuencas "*Basin and Range*" que se extiende hacia la mesa central y gran parte del estado de Chihuahua como resultado de diversos procesos tectónicos (Ferrari et al., 2018).

Geológicamente, la Sierra Madre Occidental (SMO) se encuentra dominada por rocas ígneas formadas en dos eventos. El primero llamado Complejo volcánico inferior que presenta rocas plutónicas y volcánicas en dos periodos que van desde el Cretácico superior al Eoceno. El segundo evento llamado supergrupo volcánico superior (SVS) contiene ignimbritas silíceas emplazadas en otros dos grandes eventos magmáticos que van del Oligoceno al Mioceno medio (35-29 Ma.). La Sierra Madre Occidental presenta depósitos basálticos y andesitas que mantienen mayor distribución llamados SCORBA por sus siglas en inglés *Southern Cordilleran Basaltic Andesite*. Tectónicamente la Sierra Madre Occidental se interpretó como arcos magmáticos relacionados con la subducción probablemente formada por la refusión de la corteza. En el sector centro y sur de la Sierra Madre Occidental afloran secuencias de ignimbritas estratificadas con espesores kilométricos,

especialmente en el estado de Durango (Figura 3.1). Respecto a la deformación, es escasa en la parte central de la Sierra Madre (Figura 3.2). , pero aumenta hacia el N y S la cual está asociada a un evento de deformación extensional que va desde el Oligoceno al Eoceno. (Ferrari et al., 2005).

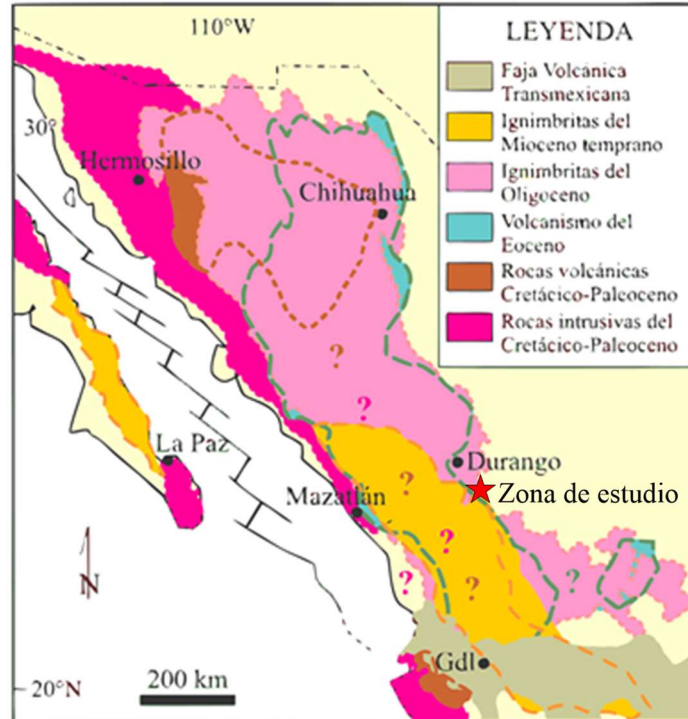


Figura 3.1 Principales conjuntos ígneos de la Sierra Madre occidental (Ferrari et al., 2005).

Por otro lado, la Mesa Central se caracteriza por presentar diferentes eventos de depósito de rocas marinas siliclásticas y clásticas. Las formaciones más antiguas comprenden secuencias siliclásticas del Triásico Medio y Jurásico Inferior con flujos de riolitas, derrames piroclásticos y sedimentos clásticos de la Formación Nazas. En general, las rocas sedimentarias se superponen sobre el basamento Triásico, e incluye desde la formación La Joya, formada por conglomerados polimícticos hasta lutitas de la formación El Caracol, a finales del Cretácico.

Entre las estratificaciones más potentes de la sucesión se encuentran grandes paquetes de caliza de la Formación Tamaulipas en sus miembros Superior e Inferior (Barboza-Gudiño et al., 2004).



. Figura 3.2 Mapa tectónico simplificado de la Sierra Madre Occidental (Ferrari et al., 2005).

3.3 Geología local

Rocas sedimentarias e ígneas de origen intrusivo y volcánico del Cretácico al Holoceno conforman la estratigrafía del área de estudio. La cartografía geológica de este estudio (Figura 3.3) fue realizada con adecuaciones de los documentos más actualizados y detallados de las cartas geológicas del Servicio Geológico Mexicano (2001) y las cartas geológicas realizadas por la Comisión de Estudios del Territorio Nacional (1969).

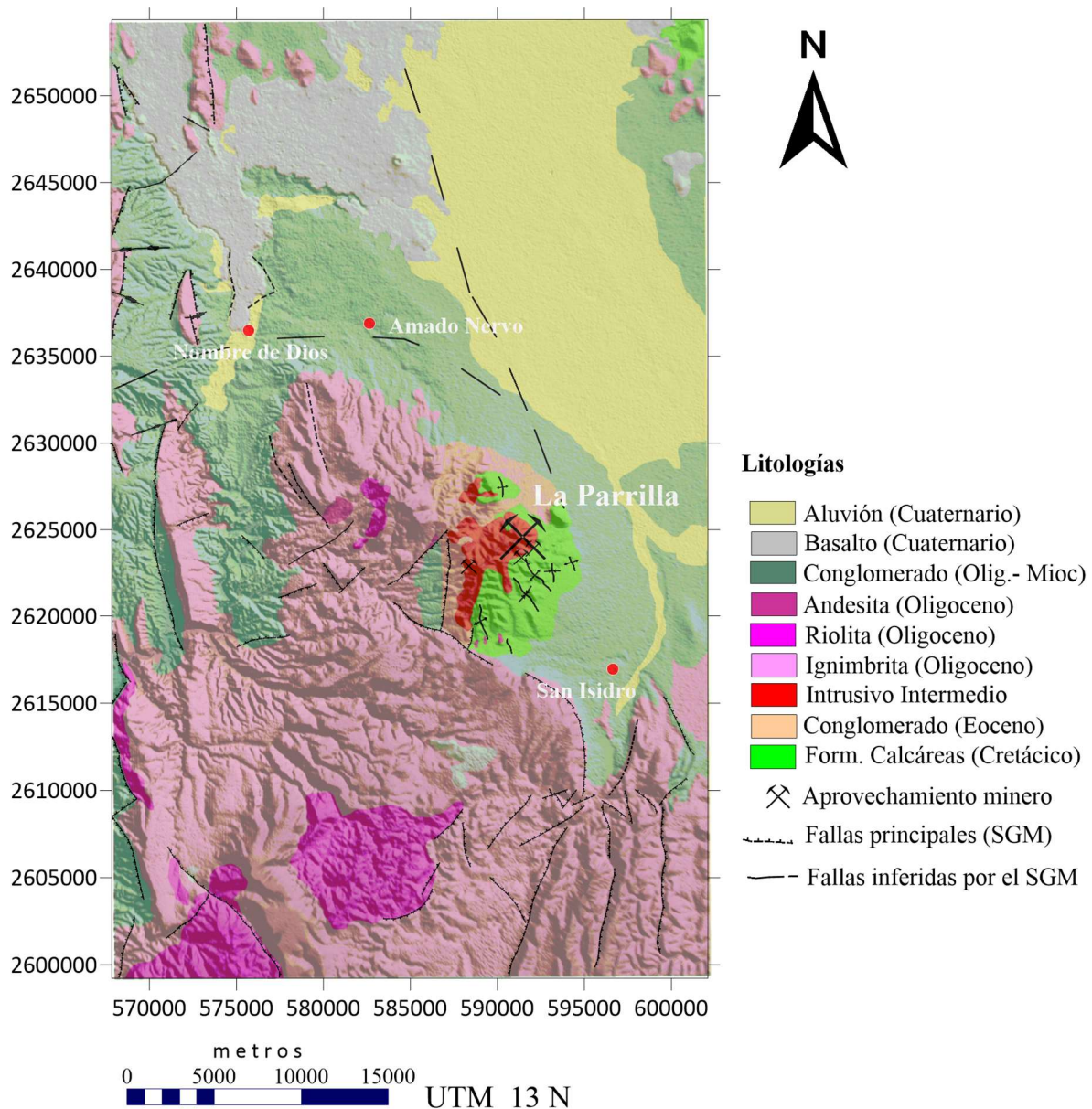


Figura 3.3 Mapa geológico del área de estudio que indica las principales litologías de la zona con información obtenida de las cartas geológicas del Servicio Geológico Mexicano F13B23 y F13B13 y mapeo geológico por fotointerpretación de la Comisión de estudios del Territorio Nacional (Servicio Geológico Mexicano, 2018).

3.3.1 Litología Sedimentaria

Las unidades basales en el área comprende de rocas sedimentarias del Cretácico, estas unidades se componen de secuencias de calizas de tipo Wackestone e intercalaciones de lutitas-limolitas en estratos delgados con lentes de pedernal, correlacionables con la formación Mezcalera del Cretácico Superior (Tristán et al., 2001). Las Formaciones Cuesta del Cura e Indidura, que conforman

calizas negras a lutitas presentan deformación con metamorfismo. Estas unidades se ubican en el sector de obras mineras en La Parrilla (Figura 3.3 y Figura 3.4)



Figura 3.4 Área de La Parrilla a cargo de la compañía First Majestic Silver.

Las unidades sedimentarias son intrusionadas por intrusivos de composición intermedia a ácida, en stocks, diques y sills (Figura 3.5). Se presume una edad del Cretácico-Paleógeno para estos cuerpos hipabisales. Las obras mineras se ubican al contacto de estos cuerpos hipabisales y las unidades sedimentarias que han sido localizados tras la barrenación y exploración en superficie (García, 2019).



Figura 3.5 Fotografía de obras mineras en unidades marinas del Cretácico con intrusiones en calizas.

En el área existe una gran distribución de conglomerados que se encuentran en la zona central. Los conglomerados policmíticos se encuentran bien consolidados y mal clasificados constituidos por clastos de calizas, areniscas y lutitas colocadas del Eoceno tardío al Mioceno (Tristán et al., 2001). Parte del conglomerado del Mioceno es considerado relleno de cuenca formado en ambientes lacustres o planicies de inundación además de encontrar depósitos de toba de caída libre que a lo largo de bloques fallados rellena estructuras como fosas tectónicas, lo que permite ver las unidades calcáreas correlacionables con la Formación Ahuichila (Armenta, 2001).

En la zona central del distrito minero de La Parrilla se encuentra un conglomerado andesítico, policmítico con clastos redondeados a subredondeados de fragmentos de caliza, arenisca, traquita y andesita sostenidos en una matriz arcillosa-limosa que estratigráficamente se encuentra del Oligoceno al Eoceno correlacionado con la Formación Ahuichila. Tras la disgregación de rocas se ha conformado una unidad de conglomerados y materiales aluviales cuaternarios con espesores de hasta 50m que sobreyacen a las rocas cretácicas además de encontrar depósitos de arena, limo, arcilla y grava depositada en ambientes fluviales. (Armenta, 2001).

3.3.2 Geología estructural

En el distrito minero de La Parrilla las secuencias sedimentarias están plegadas y falladas con una orientación NW-SE con secuencias sedimentarias generan sistemas de extensión en forma de fosas y pilares tectónicos en la zona central, el fallamiento lateral es de manera dextral y siniestral (Servicio Geológico Mexicano, 2001). Este sistema de fallas de tipo normal-lateral es debido a un sistema de fallamiento que contiene dos eventos; el primero en una dirección N-S con buzamientos de 40° a 85°, y un segundo evento que muestra una dirección NW-SE y buzamiento de 70° a 80°. Los esfuerzos compresionales muestran plegamientos de las secuencias calcáreas de la formación Mezcalera (Servicio Geológico Mexicano, 2001).

3.3.3 Litología Ígnea

Gran parte del área de estudio está cubierta por secuencias volcánicas, en su mayoría pertenecientes a la SVS compuestas por rocas máficas a intermedias y algunos pulsos félsicos (Figura 3.6). Las andesitas se encuentran en pocos afloramientos en la zona central del área de estudio y estratigráficamente se correlaciona con depósitos del Oligoceno (Tristán et al., 2001). Emisiones volcánicas fisurales de basaltos a andesitas se logran encontrar en pequeños afloramientos de la zona centro-norte del área de estudio y al oeste del distrito de La Parrilla con edades aproximadas a 12 Ma. Por otro lado, se presentan emisiones de basaltos cuaternarios vesiculares, tabulares, y masivos que forman geomorfologías suaves y mesas de poca elevación distribuidas en la franja noroeste de la zona. Las emisiones de provenientes del SVS, presentan una secuencia de capas delgadas de lapilli en la base, tobas líticas e ignimbritas en la cubierta que se consolidó de manera discordante con las unidades de conglomerado (Armenta, 2001).

Las emisiones ignimbríticas se encuentran ampliamente distribuidas en las zonas oeste, sur y centro discordantes a las unidades de caliza-lutita de la formación Mezcalera y a las emisiones volcánicas de andesita. Los flujos de lahar con de 200m de espesor se encuentran al noroeste del área de estudio sobreyaciendo concordantemente con tobas riolíticas en eventos correlacionados al Oligoceno. En

algunos sitios las unidades ignimbritas se encuentran afectadas por domos riolíticos del Oligoceno con espesores máximos de hasta 600m atribuibles a eventos del Oligoceno tardío. (Tristán et al., 2001)

El fallamiento NW se ha asociado como parte el conducto de emplazamiento de intrusivos como ocurre en la zona central del distrito de La Parrilla. Se cree que dentro del emplazamiento de los cuerpos intrusivos existe una migración de los plutones hacia el este y de composición más ácida (Armenta, 2001). Los cuerpos intrusivos descritos en el distrito minero comprenden rocas de composición granodiorítica a monzodioritas con texturas que van de faneríticas a porfídicas (García, 2019).

3.3.4 Metamorfismo y Yacimientos Minerales

En la zona central distrito minero de La Parrilla las Formaciones Mezcalera, Indidura y Cuesta del Cura están deformadas y afectadas por metamorfismo de contacto, debido a una intrusión de plutones de naturaleza granodiorítica a diorítica en forma de sills y diques (García, 2019). Por tanto, estas unidades representan la encajonante de los yacimientos minerales.

De acuerdo con la carta geológica del Servicio Geológico Mexicano (Tristán et al., 2001) en la región central cercana al distrito minero de La Parrilla, se describen las intrusiones como pórfido andesítico emplazado, en forma de apófisis irregular, en contacto con el conglomerado de clastos de origen andesítico y con rocas sedimentarias calcáreas que originan zonas de Skarn. La extracción de mena metálica se ubica en el distrito minero de La Parrilla debido a yacimientos de tipo hidrotermal, en fase mesotermal, que se manifiestan como depósitos tipo skarn y vetillas de cuarzo con hematites, sulfuros, cuarzo, calcita, clorita, siderita, cerusita y algunos óxidos como la limonita.

Las principales estructuras que controlan la mineralización en el área de La Parrilla tienen una dirección N70W, N20W, N10W y N85E ubicadas en los bordes N, E y S del stock que origina la veta principal. Estas estructuras que controlan la mineralización podrían estar asociadas a una zona de debilidad creada en el contacto entre el stock y las rocas sedimentarias de las Fm. Indidura y Cuesta del Cura (Taylor et al., 2016).

En este tipo de yacimiento la mena incluye galena, argentita, estibinita, esfalerita y calcopirita con trazas de oro; mientras que la ganga está formada por pirita, cuarzo, calcita y óxidos. En la parte oriental del área de estudio se ha

identificado una mineralización de hierro asociada a las riolitas. Las principales alteraciones observadas de la zona son la oxidación, solidificación, propilitización y argilización proveniente de la alteración hidrotermal. (Tristán et al., 2001)

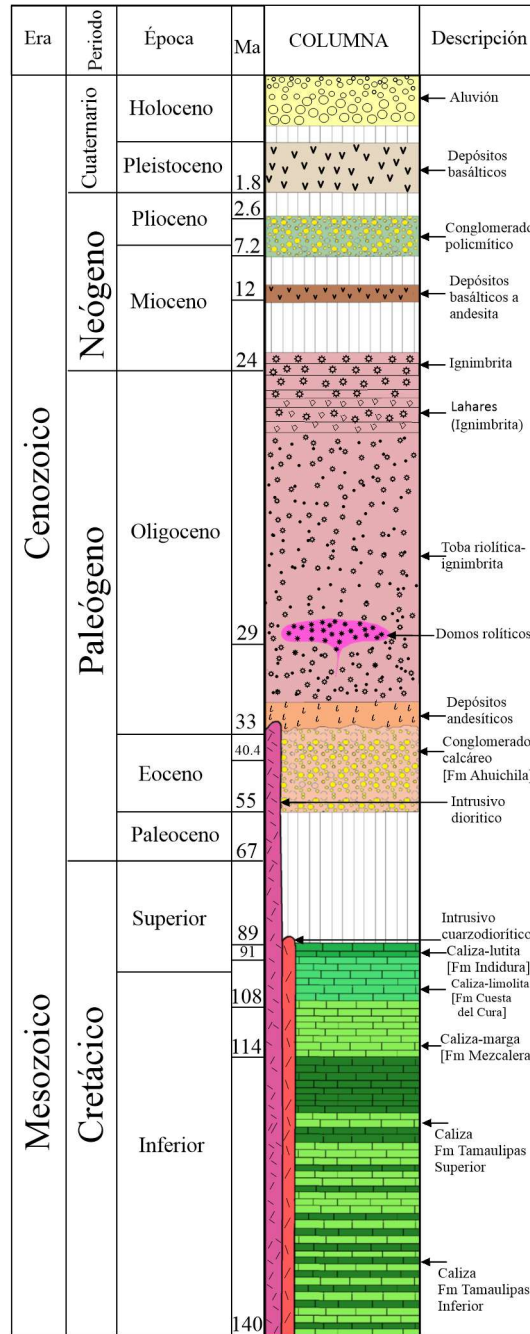


Figura 3.6 Columna estratigráfica de la zona de estudio, Modificada con información de las columnas estratigráficas de San José de la Parrilla y Nombre de Dios del Servicio Geológico Mexicano (2001).

Capítulo IV Fundamentos Teóricos

4.1 Fundamentos básicos de la magnetometría

Los fenómenos magnéticos medidos en la superficie terrestre permiten observar variaciones en el campo magnético, que surgen de un campo potencial que describe un conjunto de fuerzas en un campo vectorial con las direcciones de flujo magnético que emite una fuente magnética (al igual que la gravimétrica) (Blakely, 1996). Con este fundamento, los estudios de prospección magnética mapean la distribución de minerales magnéticos en la corteza terrestre (Grant, 1985), con una contribución magnética de las rocas presentes afectadas por la presencia de magnetización y polarización de los materiales. Las mediciones permiten interpretar la probable localización de cuerpos magnéticos a profundidad generando inferencias de las probables condiciones geológicas (Nettleton, 1940), que con frecuencia son diagnóstico de estructuras minerales y estructuras geológicas (Telford et al., 1991).

4.1.1 Campo magnético

El campo magnético en comparación con el gravimétrico suele ser más complejo al ser dipolar y variante en el tiempo (Telford et al., 1991), contiene líneas de campo o líneas de fuerza magnéticas con componentes ortogonales que describen el vector de fuerza magnética generando la geometría del campo magnético el cual dependerá del cuerpo que lo genera.

El campo magnético da lugar a un flujo magnético y la densidad de ese flujo es llamada inducción magnética determinada como el flujo por unidad de área (B), que al ser medida en unidades del campo magnético tesla (T) indica el flujo total del campo en un área. Análogo a ello existe la intensidad del campo magnético que es expresada a partir de un vector H , de energía magnética producida por corrientes eléctricas y medida en ampere por metro. La relación de inducción magnética y el campo H dependen de una constante llamada permeabilidad (Lowrie, 2007).

4.1.2 Magnetización y remanencia

El movimiento orbital atómico de los materiales genera corrientes eléctricas y momentos magnéticos asociados, esto quiere decir, que dentro de una unidad de volumen del material existe una cantidad de spines magnéticos (Figura 4.1), en ella la magnetización de ese material será el grado de alineación de esos spines magnéticos al aplicar un campo magnético externo; físicamente puede ser descrito como el vector resultante de los momentos magnéticos de dicho material. Los imanes naturales contienen una corriente eléctrica en sus espines generando pequeños dipolos y su fuente principal de campo magnético (Lowrie, 2007).

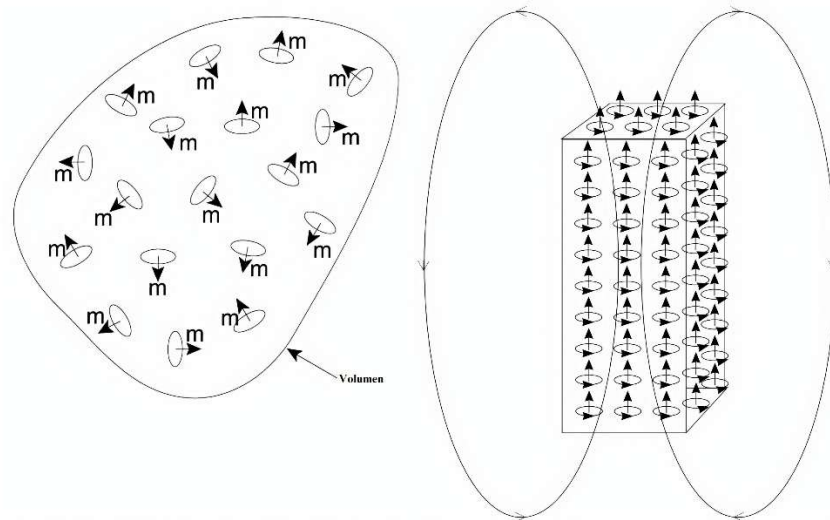


Figura 4.1. Representación de los momentos magnéticos inmersos en un material donde el momento magnético se asocia a un *loop* de corriente a escala atómica (izquierda). Alineamiento de los momentos magnéticos en un material al aplicar un campo inducido (Derecha). Editado de W. Lowrie (2007).

La magnetización dentro de los estudios geofísicos es considerable debido a la información anómala que pueda surgir en superficie sobre estructuras geológicas que se contrasten (Lowrie, 2007). Cuando un material magnético es expuesto a un campo externo y es magnetizado, la energía magnetizante es reforzada por el campo inducido en el material, llamado magnetización inducida, sí este campo externo es retirado, la magnetización también desaparece sin embargo algunos materiales mantienen esa magnetización adquirida de forma remanente (remanencia magnética) o permanente y sus spines magnéticos quedarán orientados en dirección del campo retirado.

El proceso de aplicar un campo magnético a un cuerpo magnético y retirarlo, del mismo modo invertir el campo es llamado ciclo de histéresis; su objetivo es describir la trayectoria de magnetización del cuerpo en un diagrama dependiente de la magnetización y el campo de inducción, en este proceso la temperatura es una variable transcendental dentro de los cuerpos magnéticos y la remanencia (Butler, 1992; Campbell, 2001; Lowrie, 2007). Los spines magnéticos alineados en un material magnético dejarán de estarlo cuando lleguen a una temperatura que los “libere” asíéndolos aleatorios y el material pierda su campo magnético; esa temperatura es llamada punto de Curie o Néel dependiendo el tipo de material; al disminuir la temperatura llegarán por debajo del punto de bloqueo y los spines tomarán la dirección del campo presente; en caso de no haberlo la magnetización será nula (Dunlop y Özdemir, 2007).

Existen diferentes tipos de remanencia dentro de las rocas; la termorremanencia ocurre cuando los materiales son enfriados por debajo del punto de bloqueo en presencia de un campo externo, los momentos magnéticos contendrán esa remanencia; la remanencia detrital ocurre mediante el depósito de minerales magnéticos finos orientados en dirección del campo existente y la química es el resultado de temperaturas y presión en rocas sedimentarias y metamórficas; la remanencia isothermal ocurre por la magnetización de un residuo magnético como un rayo eléctrico; finalmente la remanencia viscosa acontece por la exposición prolongada de un campo magnético (Telford et al., 1991).

4.1.3 Susceptibilidad magnética

Si un cuerpo magnetizable es puesto en un campo magnético, este tendrá un grado de magnetización proporcional a ese campo, la susceptibilidad magnética será el número de dipolos magnéticos dentro de una unidad de volumen del material con un grado de facilidad a orientarse (Nettleton, 1940). La susceptibilidad magnética es un valor adimensional y dentro de los sistemas de unidades SI y emu solo difiere un factor $1/4\pi$. La intensidad inducida de magnetización será equivalente a la fuerza de inducción magnética por el factor de la susceptibilidad (Blakely, 1996).

La susceptibilidad magnética dentro de las rocas está controlada por la cantidad de minerales ferromagnéticos que contenga, su tamaño de grano y distribución (Blakely, 1996), el valor de la susceptibilidad de una roca puede tener un amplio rango de valores (Reeves, 2005).

4.1.4 Magnetismo de rocas

Las rocas de la corteza son en general débilmente magnéticas, pueden contener magnetización inducida y remanente (Reeves, 2005). La magnetización en las rocas es debida en parte a la inducción de fuerzas magnéticas asociadas con el campo magnético generado por la Tierra y su remanencia adquirida. La intensidad depende de la susceptibilidad de la roca y la fuerza de campo magnetizante (Parasnis, 1962), o según su comportamiento atómico, simetría en su red cristalina y tamaño (Lowrie, 2007).

Los materiales diamagnéticos constituyen aquellos donde al aplicar un campo externo su alineación interna es inversa al campo inducido y su susceptibilidad es débil o negativa, visto atómicamente las orbitas atómicas de estos materiales están llenas y no apareadas, si el campo externo es aplicado su ruta orbital gira de modo a construir un campo opuesto. El paramagnetismo es un fenómeno donde los orbitales atómicos están incompletos (Kearey et al., 2013), cuando se aplica un campo magnético, la alineación caótica de los momentos magnéticos dentro del material está sesgada hacia la dirección del campo aplicado y una magnetización es inducida proporcional a la intensidad del campo aplicado y paralela a su dirección, sin embargo, se trata de un efecto relativamente débil (Lowrie, 2007). Finalmente, los materiales ferromagnéticos ocurren en materiales donde el arreglo interno de átomos de algunos metales es tan cercano que logran interactuar fuertemente y permite realizar lineamientos espontáneos. Al aplicar un campo externo estos materiales pueden contener esa dirección incluso después de eliminarlo. La temperatura de Curie se logra en este tipo de materiales pasando de ferromagnético a paramagnético. Dentro de esta misma clasificación se encuentran los materiales antiferromagnéticos donde su dirección de momentos magnéticos se anula por estar en direcciones opuestas y en misma cantidad, mientras que los ferrimagnéticos son materiales que contienen la magnetización en la dirección dominante de los momentos (Butler, 1992).

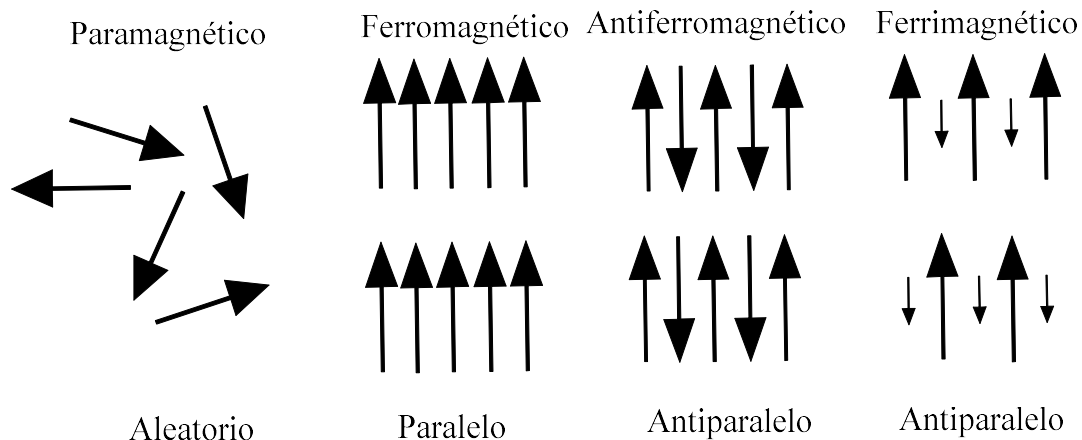


Figura 4.2 Principales lineamientos de los momentos magnéticos en diferentes materiales.(Reeves, 2005)

4.1.5 Campo magnético terrestre

La aproximación más simple de la generación del campo geomagnético es el hipotético dipolo magnético en el centro de la Tierra. Este dipolo geocéntrico axial contiene un eje inclinado a 11° con respecto al eje de rotación terrestre; Gauss en 1839 describió este campo usando funciones armónicas descritas dentro del gradiente de un potencial magnético (Glaßmeier et al., 2009).

En general la contribución a la generación del campo magnético proviene de tres fuentes principales: núcleo externo, manto y corteza terrestre (Reeves, 2005). Los procesos de convección de hierro líquido en el núcleo externo da origen al campo dipolar en el llamado teoría del dínamo donde la factores como la energía cinética, la viscosidad, temperatura y otras fuerzas como la de Coriolis que genera corrientes eléctricas es convertida en energía magnética (Glaßmeier et al., 2009). El núcleo terrestre contribuye un poco al magnetismo terrestre. La corteza terrestre produce y registra las anomalías que son medidas para la exploración (Reeves, 2005).

El comportamiento del campo geomagnético puede ser representado tomando al planeta como una esfera uniforme polarizada que genera líneas de inducción o de campo cercanas al polo sur y terminando en el polo norte. Cerca del ecuador el campo magnético tiene una intensidad cerca de la mitad que en los polos y es paralelo a la superficie. El comportamiento de del campo con forme avanza hacia el norte o al sur incrementa su inmersión hacia dentro del planeta aumentando gradualmente su inclinación, hasta lograr 90° en cualquiera de los polos (Nettleton, 1940).



Figura 4.3. Distribución de las líneas de fuerza del campo magnético terrestre. (Nettleton, 1940)

El campo vectorial magnético puede ser descrito en la superficie de la Tierra por sus tres componentes ortogonales en dirección al norte-sur geográfico, en dirección al este-oeste y en dirección al centro terrestre. Las componentes horizontales X y Y pueden ser combinadas dando origen a la componente H de la manera $H = \sqrt{X^2 + Y^2}$, la cual está alineada en la dirección de la aguja de la brújula. La componente vertical Z es parte de la intensidad total del campo F , de manera que $F = \sqrt{X^2 + Y^2 + Z^2}$. Dentro de las componentes angulares en sistema coordenado del campo se encuentra la declinación D la cual muestra el ángulo entre la componente horizontal H y la dirección X al norte geográfico. La inclinación I es el ángulo de inclinación o “inmersión” de la intensidad total de campo o F , parte de medir los grados de la componente horizontal H y F (Glaßmeier et al., 2009).

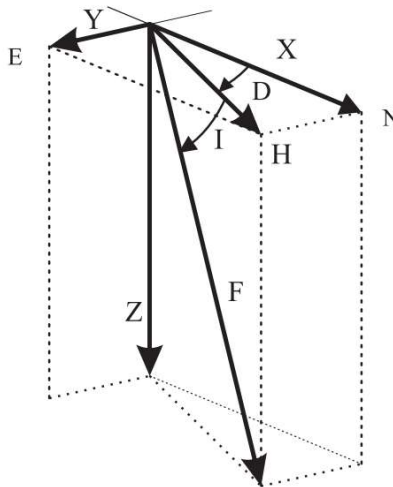


Figura 4.4 Componentes del vector F del campo geomagnético (Glaßmeier et al., 2009).

La fuerza de campo magnético es medida en Teslas (T) sin embargo las bajas intensidades en geomagnetismo son útil el uso de subunidades como el nanoTesla (nT) equivalente a 10^{-9} T. En geofísica ha sido utilizado también la unidad de Gauss y gamma siendo equivalente 10^{-5} Gauss= 1 gamma = 1 nT (Glaßmeier et al., 2009).

4.1.6 Variaciones del campo magnético

El campo magnético no es constante, en ningún punto de la superficie terrestre ya que existen factores de variación temporales que lo hacen fluctuar, con efectos que tienen un rango de duración de minutos a millones de años. Las variaciones magnéticas pueden ser clasificadas en dos tipos: las que tienen un origen interno terrestre y las de origen externo, de la superficie terrestre (Lanza y Meloni, 2002).

Las variaciones de mayor tiempo provienen de la polaridad geomagnética, la transición de los polos ha dejado evidencia en el fondo marino con aplicaciones en paleomagnetismo sobre el esparcimiento del fondo marino que contiene intervalos desde diez mil años hasta millones de años. La magnetoestratigrafía permite la datación y correlación de tiempos geológicos con cambios en la polaridad (Lowrie, 2007). Este tipo de variación no interfiere en las mediciones del campo en estudios de exploración.

Las variaciones seculares provienen de cambios internos del planeta, sus patrones de cambio son reconocidos desde observatorios magnéticos, en ellos el ángulo de declinación tiene cambios en tiempos que van desde decenas a centenas de años, entre las causas que lo generan se encuentra la variación del campo generado por el dipolo magnético que oscila entre el eje de rotación terrestre y 11.5° aproximadamente (Lanza y Meloni, 2002) .Las variaciones seculares usualmente son desplegadas en mapas de contorno donde se representan las constantes tasas de cambio ya sea en nT por año o grados por año (Blakely, 1996).

Una de las variaciones más cortas son las diurnas, este tipo de variación está directamente relacionada a la rotación terrestre. El viento solar y sus partículas tiende a distorsionar las regiones exteriores del campo magnético incluso en días con condiciones normales provocando alteración en la ionósfera modificando la amplitud de la intensidad F del campo geomagnético (Reeves, 2005).

En una escala mucho más corta de tiempo se encuentran las variaciones de campo debidas a micropulsaciones y tormentas magnéticas. Las micropulsaciones contienen algunos nT que distorsionan el campo en cortos periodos de tiempo, las tormentas magnéticas usualmente debidas a actividad solar pueden variar hasta cientos de nT con periodos en exceso de 24 horas, este efecto normalmente es observado en regiones polares (Reeves, 2005).

Realizar correcciones por variaciones del campo magnético en magnetometría es necesario para remover ruidos y tendencias dejando observar únicamente los efectos de la superficie (Kearey et al., 2013).

4.1.7 IGRF

El IGRF es un modelo aceptado globalmente del campo geomagnético basado en conjuntos de funciones armónicas esféricas que deben ser regularmente revisadas con el objetivo de seguir los cambios temporales del campo magnético generado en el núcleo externo terrestre, el modelo matemático no es definitivo y es remplazado por otro modelo que normalmente predice las variaciones a larga escala con periodos de revisiones suficientemente cortas para preservarlo como un modelo de referencia (Thébault et al., 2015). La formulación de esta serie de campos parte del potencial magnético escalar aproximado con series finitas dependientes del radio terrestre, la latitud, longitud y variaciones modeladas por los coeficientes de Gauss que logran modelar la variación secular. El IGRF ha llegado a su 13^a generación usada ampliamente para estudios del interior de la tierra, la corteza, ionósfera y magnetósfera. El valor de IGRF permite obtener anomalías magnéticas al ser eliminado dentro de los valores observados en campo.

4.1.8 Anomalías Magnéticas de campo total

En la porción cortical terrestre con grosor de 30 a 60 km dependiendo de la tectónica de la zona, las rocas con minerales ferromagnéticos pueden ser localizados al contribuir al campo geomagnético. Las rocas ígneas y metamórficas formadas a temperaturas de hasta 600 °C compuestas por la serie de magnetita, titanomagnetita y hematita, usualmente contienen altas susceptibilidades y pueden ser fuentes potenciales de anomalías magnéticas (Lanza y Meloni, 2002).

Las mediciones de la intensidad de magnética (F) no contienen las direcciones vectoriales del campo ya que se considera un escalar de la componente

total del campo magnético (Reeves, 2005) . El resultado de la anomalía de campo total es la suma del campo geomagnético en ese punto (escalar calculado con el IGRF), la variación del campo magnético diurno y una componente anómala ΔF de la corteza (Figura 4.5).

De manera que la anomalía magnética se puede definir de la manera:

$$\Delta F = F_{\text{campo total medido}} - F_{IGRF} \quad (4.1)$$

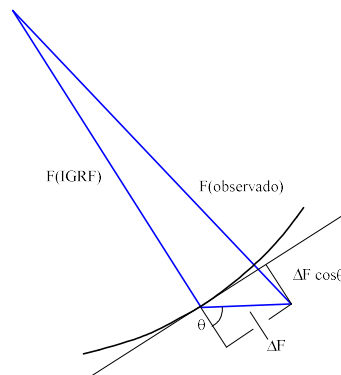


Figura 4.5 Concepto de anomalía. La $F(\text{observado}) - F(IGRF)$ no difieren significativamente de la componente $\Delta F \cos(\theta)$ mientras $F(IGRF) \gg \Delta F$. (Reeves, 2005)

4.2 Transformaciones y filtrado magnético

4.2.1 Reducción al Polo

La interpretación de las anomalías magnéticas se vuelve compleja cuando la dirección de inserción del campo magnético terrestre (inducido) y la magnetización del material rocoso no son paralelos. El campo magnético inducido es completamente vertical en los polos magnéticos donde la inclinación del es de 90° con respecto a la horizontal y cero grados la declinación. Debido a este fenómeno las demás latitudes no sólo registran una componente vertical del campo; los efectos de la oblicuidad de la inclinación y dirección de declinación logran distorsionar la geometría de las anomalías en los mapas magnéticos (Lanza y Meloni, 2002).

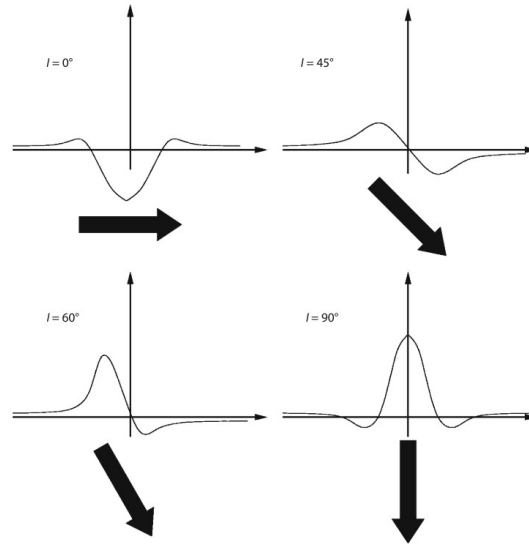


Figura 4.6 Perfiles magnéticos a lo largo de diferentes ángulos de inclinación en la inducción magnética del campo geomagnético. Las flechas representan el momento magnético de un cuerpo. (Lanza y Meloni, 2002)

El algoritmo de reducción al polo es una transformación de anomalías que permite presentar la información magnética de cualquier inclinación como si fuera medida en los polos, removiendo efectos dipolares en las anomalías totales de campo (Baranov, 1957). Este proceso hace a la interpretación menos compleja ya que desplaza las anomalías a sus respectivas fuentes que lo generan al crear anomalías simétricas sin efectos dipolares (Blakely, 1996).

El fundamento matemático realizado por Baranov (1957) y Baranov y Naudy (1964), utiliza el gradiente del potencial magnético en relación con la magnetización al calcular el campo en cualquier punto para transformar la anomalía en una “pseudoanomalía gravimétrica” y ubica la anomalía directamente en la fuente. Los primeros cálculos de esta metodología se realizaron numéricamente, no obstante, Bhattacharyya (1965) logra simplificar la metodología utilizando los datos en el espacio de Fourier.

La transformación de la anomalía está dada la siguiente en el dominio del número de onda está dado por la expresión:

$$F(A_R) = \frac{F\{A\}k^2}{(\hat{B} \cdot \hat{C})(\hat{M} \cdot \hat{C})} \quad (4.2)$$

$F(A_R)$ es la transformada de Fourier de la anomalía magnética reducida al polo, mientras que $F\{A\}$ es la transformada sólo de la anomalía, k es el número de onda radial dependiente de los números de onda bidireccionales, \hat{M} la dirección unitaria

de la magnetización. Mientras que B campo de inducción y G son direcciones ortogonales en las direcciones del campo (Bhattacharyya, 1965; Blakely, 1996; Nava Flores, 2010)

Por otra parte, la ecuación puede ser descrita en el dominio de la frecuencia y en coordenadas polares dependiente de las direcciones del campo inclinación (I) y declinación (D) geomagnética.

$$H(\theta) = \frac{[\text{sen}(I) - i \cos(I) \cdot \cos(D - \theta)]^2}{[\text{sen}^2(I_a) + \cos^2(I_a) \cdot \cos^2(D - \theta)] \cdot [\text{sen}^2(I) + \cos^2(I) \cdot \cos^2(D - \theta)]} \quad (4.3)$$

si ($|I_a| < |I|$), $I_a = I$

Ya que $H(\theta)$ depende de I y D; en bajas latitudes cerca del ecuador magnético el valor de I estará cerca de cero por lo que este método se vuelve inestable y en otros casos la declinación (D) se acerca a $\pm 90^\circ$, la función tiende al infinito y de la misma manera la transformación se vuelve inestable. (Zhang et al., 2018). El método requiere del conocimiento de la dirección de magnetización que usualmente se asume paralelo al inducido como si la remanencia fuese indetectable o alineada al campo inducido. (Nabighian et al., 2005)

4.2.2 Filtros de continuación del campo: ascendente y descendente

Existen diversas metodologías de filtrado que transforman los campos potenciales medidos en una superficie, en aquellas que se habrían medido en diferentes posiciones de la fuente que lo genera. Estos procesos de transformación son llamados filtros de continuación ascendente y descendente. Su función radica en intensificar o atenuar las anomalías. El proceso de continuación ascendente elimina y/o atenúa las anomalías causadas por fuentes locales cercanas a la superficie en relación con las anomalías causadas por fuentes más profundas. El proceso contrario en la continuación descendente, el filtrado proporciona una intensificación de las anomalías someras (Blakely, 1996).

Los filtros de continuación se obtienen utilizando a la tercera identidad del Teorema de Green, donde se puede calcular el valor de un campo potencial en cualquier punto dentro de una región cerrada; siempre y cuando no existan otras fuentes que no satisfagan la ecuación de Laplace. Al ser funciones armónicas,

continuas y derivables en una región, se puede calcular el potencial de la siguiente manera:

$$U(P) = \frac{1}{4\pi} \int_S \left(\frac{1}{r} \frac{\partial U}{\partial n} - U \frac{\partial}{\partial n} \frac{1}{r} \right) dS \quad (4.4)$$

Donde U es el potencial medido en un punto P , en la región R con una frontera S y n la dirección normal de la superficie (Figura 4.8).

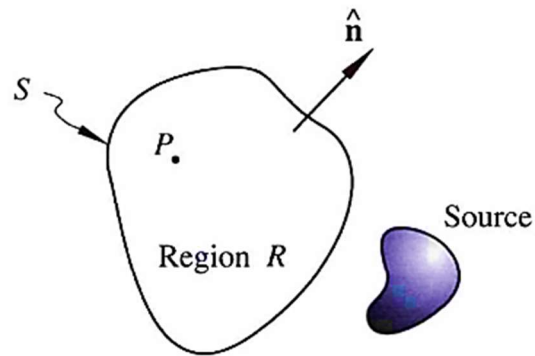


Figura 4.7 Potencial evaluado dentro de una región R en cualquier punto dentro de R. Tomado de Blakely, 1996

Al considerar un sistema coordenado donde Z+ tiene dirección hacia abajo, se puede seleccionar cualquier punto por encima del nivel de superficie horizontal, de forma que, si se necesita el potencial a un nivel superior al de la superficie se tomará de referencia $U(x,y,z_0 \pm \Delta z)$, donde el potencial se asume ser calculado en $z=z_0$ (Figura 4.9).

La ecuación para el cálculo del potencial será:

$$U(x, y, z_0 \pm \Delta z) = \frac{\Delta z}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{U(x', y', z_0)}{[(x-x')^2 + (y-y')^2 + \Delta z^2]^{\frac{3}{2}}} dx' dy' \quad \text{donde} \quad \Delta z > 0 \quad (4.5)$$

Con la finalidad de hacer más eficiente el proceso se puede trabajar en el dominio de Fourier al transformar la ecuación (4.) en una convolución, donde el potencial del punto U queda en términos del número de onda diferente a cero:

$$U(u, v) = e^{-\Delta z |k|}, \quad \Delta z > 0 \quad (4.6)$$

La expresión (4.6) refiere a una continuación ascendente y para la continuación descendente se utiliza una dirección positiva como la expresión:

$$U(u, v) = e^{+\Delta z |k|}, \quad \Delta z > 0 \quad (4.7)$$

Este procedimiento descrito por Blakely (1996) es práctico para atenuar o intensificar valores gravimétricos o del campo magnético medido en una superficie horizontal.

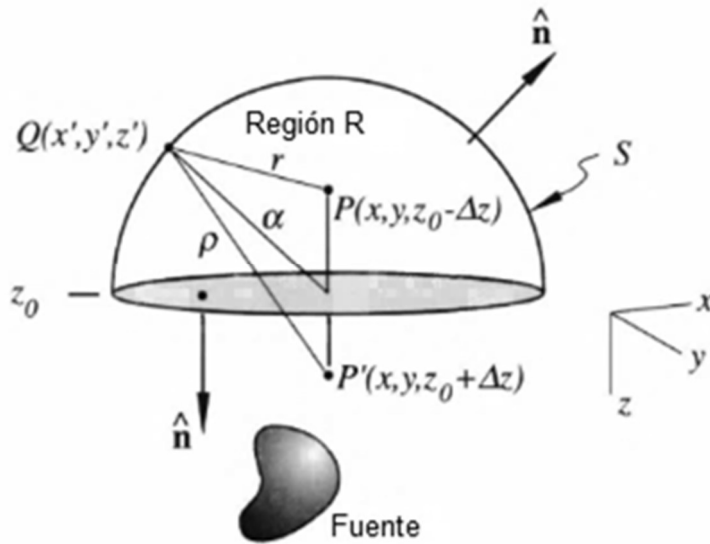


Figura 4.8 Principio del filtro de continuación ascendente de una fuente donde el potencial U es conocido dentro del plano $Z=Z_0$, deseado en el punto P. La integración de Q está sobre la superficie S, r es la distancia entre los puntos Q y P (Blakely, 1996)

4.2.3 Señal analítica

Dada la complejidad de las señales en estudios magnéticos se requiere de diversos métodos de filtrado para mejorar la interpretación. La señal analítica es un procedimiento efectivo para delimitar fronteras entre los cuerpos, que generan anomalías de campos potenciales, por otro lado, el resultado del método es independiente de la dirección de magnetización debida a la remanencia mejorando los límites de las estructuras generadoras de anomalías (Rajagopalan, 2003).

La señal analítica se obtiene de la combinación de los gradientes horizontales y verticales de una señal magnética (Figura 4.10). El método es realmente útil en la ausencia de muestras magnéticas orientadas donde la fuente de magnetización se asume únicamente inducida especialmente en áreas donde la contribución remanente, no es conocida. (Roest et al., 1992).

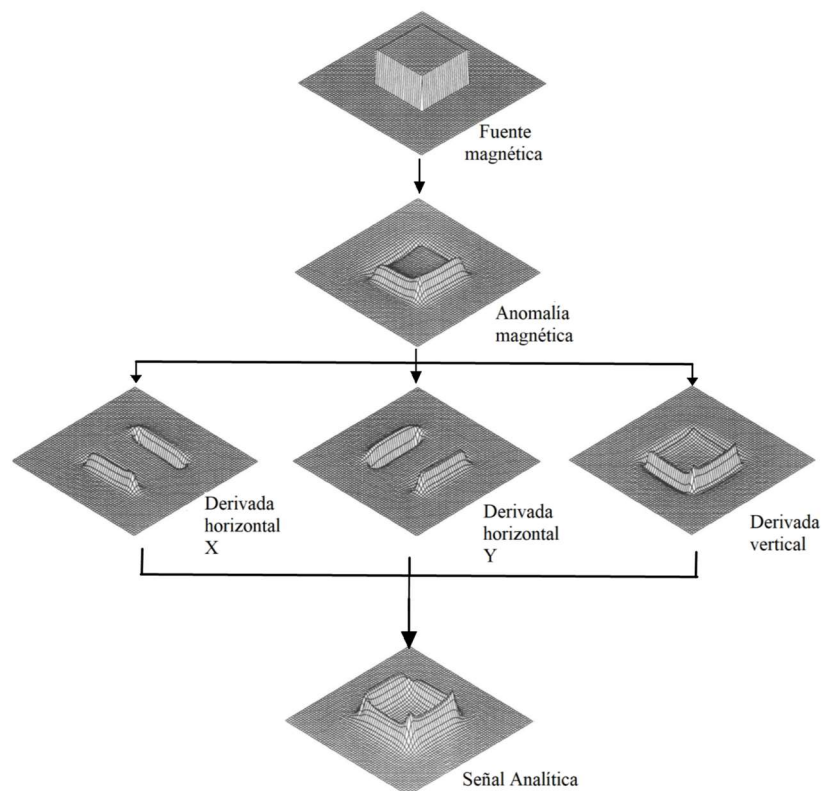


Figura 4.9 Diagrama del método de la señal analítica calculado a partir de las derivadas horizontales y verticales del campo para ser combinadas en valor absoluto. (Roest et al., 1992)

El modelo matemático de la señal analítica puede ser descrito en el dominio del número de onda o en términos espaciales en un espacio cartesiano (x, y). La expresión (4.8) describe la señal analítica 3D de la siguiente manera:

$$SA(x, y) = \left(\frac{\partial V}{\partial x} \hat{x} + \frac{\partial V}{\partial y} \hat{y} + i \frac{\partial V}{\partial z} \hat{z} \right) \quad (4.8)$$

Al obtener en valor absoluto se obtiene la amplitud de la señal analítica se expresa:

$$|SA(x, y)| = \sqrt{\left(\frac{\partial V}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial V}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial V}{\partial z} \right)^2} \quad (4.9)$$

Generalmente se asume que la geología es bidimensional al colocar la derivada Y a cero. (Dentith et al., 2014).

4.2.4 Modelado con el algoritmo de Talwani

Talwani et al en 1959 han desarrollado una metodología para calcular por medio de polígonos de n lados, el potencial magnético causado por cuerpos irregulares de propiedades homogéneas y compararlo con la señal magnética observada. De manera breve se describe el algoritmo:

Se parte de calcular el potencial magnético dependiente de las direcciones de la intensidad de magnetización remanente e inducida (\hat{M}) distribuida en elementos diferenciales de un cuerpo semi-infinito en una sección transversal y una distancia \vec{R} con el volumen elemental desde el origen (Figura 4.1), debido a la magnetización el cuerpo tendrá un momento magnético de la forma:

$$\vec{m} = \hat{M} dx dy dz \quad (4.10)$$

El potencial magnético es calculado desde el punto de observación, de un origen al elemento diferencial del volumen con una distancia r de la forma:

$$U = \frac{\vec{m} \cdot \vec{R}}{4\pi R^3} \quad (4.11)$$

Descrito de otra manera, el potencial es:

$$U = \iiint_V M \cdot \text{grad} \left(\frac{1}{R} \right) dv \quad (4.12)$$

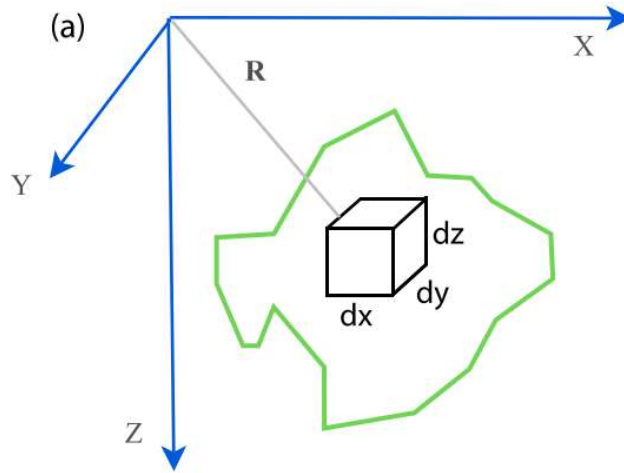


Figura 4.10 Volumen infinitesimal dentro de un cuerpo con n lados (Kravchinsky et al., 2019)

En una sección X, Z el elemento estará acotado a integrar el potencial en dos direcciones:

$$U = \int_{-\infty}^{\infty} \frac{\widehat{M} \cdot \widehat{r}}{r^3} dy = \int_{-\infty}^{\infty} \frac{\widehat{M}_x x + \widehat{M}_y y + \widehat{M}_z z}{4\pi(x^2 + y^2 + z^2)^{3/2}} dy = \left(\frac{\widehat{M}_x x + \widehat{M}_z z}{2\pi(x^2 + y^2)} \right) dx dz \quad (4.13)$$

Para obtener las componentes del campo magnético en la vertical (H_z) y horizontal (H_x) es necesario derivar en sus respectivas direcciones:

$$H_z = -\frac{\partial U}{\partial z} \quad H_x = -\frac{\partial U}{\partial x} \quad (4.14)$$

Para el cálculo de la anomalía producida por un lado del polígono será necesario establecer las funciones que dependan del ángulo en dirección al punto de observación y las componentes del campo geomagnético. Una sección poligonal ABCDE de n lados de una barra AFGBA como se muestra en la Figura 4.2 es definida a lo largo de AB requiere el cálculo de la anomalía con el uso de las

expresiones anteriores. En un número n lados de un polígono se requerirá de un número n de cálculos.

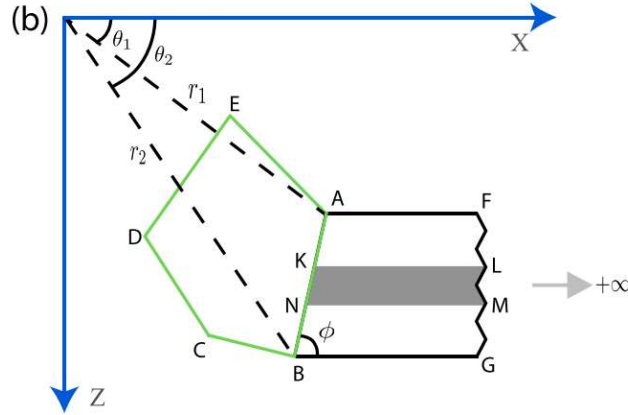


Figura 4.11 Elemento poligonal AFGBA conteniendo un cuerpo que se extiende al infinito.

Se evalúa la intensidad de la anomalía sumando las proyecciones verticales y horizontales del campo magnético generado del origen en dirección positiva al infinito por la barra AFGBA, en conjunto con los ángulos de las direcciones de magnetización remanente e inducida. El efecto magnético por un polígono dependerá del número de esquinas obteniendo anomalías positivas con referencia en el origen y el número de lados. Si la profundidad del cuerpo contiene una magnitud $Z_2 - Z_1 = 0$, es decir, una línea en la misma cota no contendrá contribución magnética. El ángulo entre la magnetización inducida (\hat{M}_i) y la remanente (\hat{M}_r) permitirá el cálculo de la magnetización total (M) de la forma:

$$\hat{M}^2 = \hat{M}_i^2 + \hat{M}_r^2 - 2\hat{M}_i\hat{M}_r\cos(\theta) \text{ donde } \theta \text{ es el ángulo entre } \hat{M}_i \text{ y } \hat{M}_r \text{ (4.15)}$$

La magnetización total (\hat{M}) es descompuesta en sus direcciones vertical y horizontales dependientes de la inclinación (I), declinación (D) y el ángulo entre el norte geográfico u el eje positivo x del perfil (C).

$$\hat{M}_x = \hat{M} \cos(I) \cos(C - D) \tag{4.16}$$

$$\hat{M}_z = M \text{sen}(I) \tag{4.17}$$

La intensidad magnética total del cuerpo representada por T es la proyección total de las componentes horizontales y verticales H_x y H_y , en sentido horizontal la dirección de magnetización C.

$$T = H_y \sin(I) + H_x \cos(C - D) \cos I \quad (4.18)$$

4.3 Aeromagnetometría.

La aeromagnetometría o magnetometría aérea es una metodología que implica el uso de magnetómetros montados sobre una aeronave (dron, avión o helicóptero), actualmente con un amplio número de sensores capaces de adquirir información geofísica (Figura 4.12). En la exploración magnética las mediciones comparadas con otros métodos suelen ser más fáciles y menos costosas (Telford et al., 1991). Permite obtener buenos resultados para aplicaciones como mapeo geológico-estructural, reconstrucción tridimensional de la superficie, estudios hidrológicos y evaluación de peligros. La ventaja principal de la aeromagnetometría incluye mapear grandes zonas de terreno para conocer la distribución de los materiales magnéticos (Zhou, 2018).

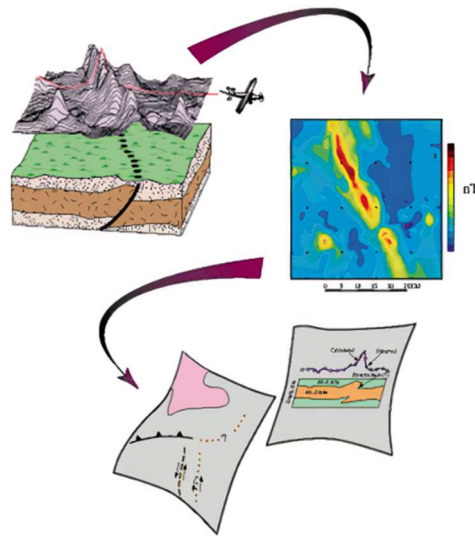


Figura 4.12 Metodología en estudios aeromagnéticos, que inicia por la adquisición y finaliza por el análisis e interpretación. Modificado de Zhou (2018)

Por lo general en los vuelos se forman mallas de líneas perpendiculares que contienen el diseño del levantamiento aéreo a una distancia óptima (generalmente a un kilómetro de separación) para un muestreo de datos. Las líneas principales y de mayor tamaño generalmente mantienen una dirección N-S. Para minimizar el riesgo de perder pequeñas anomalías entre las líneas de vuelo las líneas se suelen orientar en dirección de estructuras geológicas predominantes. Dentro del vuelo los magnetómetros son capaces de registrar datos diez veces por segundo, lo que equivale a un espaciamiento en el suelo de hasta 7 metros por muestra. (Reeves, 2005)

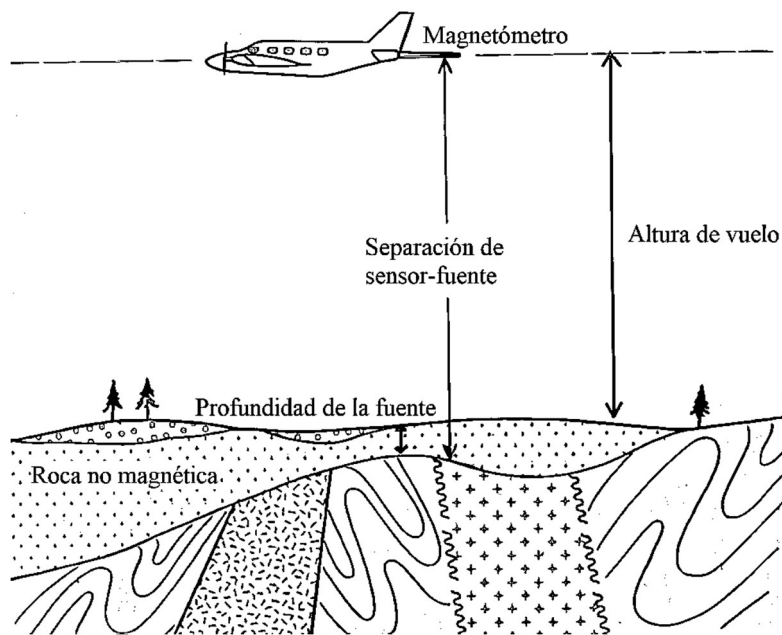


Figura 4.13 Separación sensor-fuente, la roca metamórfica e ignea indican el basamento magnético. Tomado de Reeves (2005)

La separación sensor-fuente (Figura 4.13) al ser mayor a la de un levantamiento magnético terrestre se evita la adquisición de algunos tipos de ruido ambiental, como ejemplos que provocan ruido magnético son la oxidación de especies minerales en regolito, detritos en sedimentos glaciales y objetos de origen ferroso como carreteras, tuberías o líneas de tensión eléctrica. En el caso de levantamientos aeromagnéticos las afectaciones son por fenómenos como campos asociados con la ionósfera o turbulencia durante los vuelos (Dentith et al., 2014).

4.3.1 Magnetómetro

El sensor de medición del campo magnético también llamado magnetómetro es un dispositivo diseñado para medir la intensidad del campo magnético. Los primeros magnetómetros electrónicos (fluxgate) usados para exploración son posteriores a la segunda guerra mundial cuando eran utilizados con fines bélicos. Hoy en día los magnetómetros más comunes son los de precesión protónica y los de bombeo óptico, el primero está capacitado para ser resistente y tener mediciones con precisión de 0.1 nT, con ciclos lentos de muestreo, en comparación con los de bombeo óptico que mantienen una precisión de 0.01 nT con la desventaja de ser frágiles. En aeromagnetometría los magnetómetros más usados son los de bombeo óptico de cesio, rubidio, helio o potasio (Reeves, 2005).

Las mediciones magnéticas contienen información del campo magnético terrestre o campo inducido y el efecto del campo remanente en las rocas, debido a los materiales magnéticos adquiridos durante su formación. La magnitud de estos materiales magnéticos se reflejan su intensidad medida de acuerdo con la cantidad, composición y tamaño (Isles y Rankin, 2013).

4.3.2 Respuestas magnéticas de materiales

Los principales minerales magnéticos son la magnetita, titanomagnetita, titanohematita, maghemita, pirrotina, y hierro nativo o sus aleaciones Fe- Ni- Co (Grant, 1985). Las propiedades magnéticas de cualquier roca están determinadas por el tamaño de grano de los minerales magnéticos. En la interpretación es conocido que las rocas sedimentarias usualmente son poco magnéticas generalmente en los estudios de prospección magnética se infiere que las fuentes magnéticas sobreyacen a las secuencias sedimentarias. Las rocas metamórficas e ígneas plutónicas contienen un amplio rango de susceptibilidades que en ocasiones sus altas intensidades magnéticas pueden ser interpretadas como basamento magnético, algunos diques y sills de composición máfica contienen una fuerte remanencia magnética y suelen generar anomalías magnéticas interesantes, también algunos yacimientos minerales pueden ser significativamente magnéticos y su estudio en conjunto con el análisis de sus minerales magnéticos puede ser utilizado como guía para un estudio de prospección (Reeves, 2005).

La influencia de materiales cercanos a alguna litología, además de su información química y de emplazamiento determinan las propiedades magnéticas de las rocas de un sitio. La magnetita no es un mineral indicador, por sí sola, en los estudios de prospección. Generalmente es importante conocer qué tipo de información litológica predomina y puede ser detectada con las prospecciones magnéticas. Con la intención de realizar una buena interpretación magnética de yacimientos es necesario reconocer factores dentro de la geología de la zona, uno de ellos es conocer el contenido de hierro en la mineralización ya que pueden llegar a contener grandes cantidades de magnetita (Grant, 1985).

Otros eventos suelen incrementar la magnetización en las rocas. Tal es el caso de la deformación mecánica, el metamorfismo o la alteración hidrotermal mientras que las condiciones que recuden la magnetización se encuentra la alteración por carbonización, cloritización, extrema oxidación, metasomatismo o granitización (Grant, 1985). Las rocas ígneas básicas usualmente presentan gran intensidad magnética debido a su relativo contenido de magnetita. Su proporción tiende a decrecer al hacerse ácida (Kearey et al., 2013).

La magnetita es un producto usual en la descomposición de silicatos de Mg-Fe que, durante el metamorfismo, el volumen de magnetita y por ende susceptibilidad magnética de una roca incrementa. Rocas sedimentarias e ígneas con bajos porcentajes de Fe no presentan importantes cantidades de magnetita. Las lutitas pelíticas a limolitas pueden llegar a contener grandes cantidades de Fe logrando incrementar su contenido en magnetita durante el metamorfismo (Isles y Rankin, 2013).

4.4 Fundamentos básicos de la Percepción Remota

En ciencias de la Tierra el uso de sistemas de información geográfica permite realizar mediciones a distancia a través de percepción remota con el uso de satélites. Estas tecnologías a distancia involucran trabajar con señales medibles de manera pasiva o inducida. Los sistemas de teledetección proporcionan una vista repetitiva y consistente, del planeta midiendo cambios a corto y largo plazo logrando identificar entre muchas cosas, el impacto de las actividades humanas. El extenso uso de la percepción remota desde monitoreo de cambio climático, meteorología, mapeamiento geológico, topográfico y el uso militar han hecho de estas técnicas una herramienta eficaz en la nueva era moderna (Schowengerdt, 2012).

4.4.1 Espectro Electromagnético

La fuente de energía obtenida por las imágenes proviene de la energía electromagnética ya que es el medio por el cual se transmite información desde un objeto a un sensor. La información captada puede estar codificada al ser capturados los parámetros de frecuencia, intensidad o polarización de la onda electromagnética. Su captura se realiza a través del espacio libre, o indirectamente por reflexión y dispersión al sensor, cada sustancia puede emitir cierta cantidad de radiación electromagnética o absorberla, esa cantidad medible permite la identificación de ciertos minerales. (Elachi y Zimmerman, 1988). Las longitudes de onda del espectro electromagnético están zonificadas y varían, desde las longitudes más cortas conocidas como rayos gamma o rayos X, hasta longitudes más largas como las ondas de radio o microondas. (Figura 4.14).

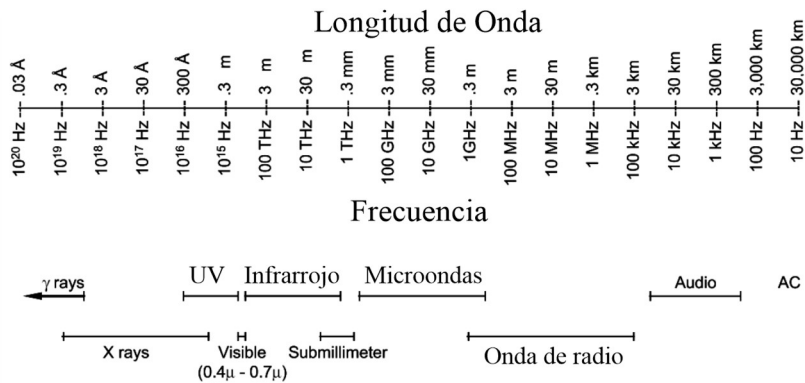


Figura 4.14 Espectro electromagnético (Elachi y Zimmerman, 1988)

4.4.2 Sensores y plataformas

Las imágenes remotas pueden ser adquiridas, con el uso de satélites o vehículos aéreos. En ellos están montados sensores con características similares capaces de detectar la energía electromagnética proveniente de manera natural como los rayos solares, la imagen al ser capturada requiere de la brillantez relativa de una superficie llamada reflectancia expresada en porcentaje. (Lillesand y Kiefer, 1979).

Hoy en día los satélites permiten la adquisición de información detallada proporcionando información sobre los patrones geomorfológicos, la dinámica de las nubes, cubierta vegetal, temperatura de la superficie y del océano en grandes áreas de monitoreo. Debido a que la atmósfera contiene compuestos como O_2 , CO_2 o H_2O que se comportan como filtros y no permiten la observación dentro de ciertas longitudes de onda existen ventanas atmosféricas de utilizan los sensores para la captura de información. La energía medida en estos sensores es de dos tipos según la fuente de energía: los sensores que miden la energía natural disponible, como la del sol, son llamados sensores pasivos y solamente pueden realizar adquisiciones durante la luz del día o por energía termal emitida naturalmente. Por otra parte, los sensores activos son fuentes de su propia energía al emitir radiación que después es detectada y medida por un sensor. Estos sensores tienen la ventaja de obtener mediciones a cualquier hora, pero a un mayor costo (The Canada Centre for Mapping and Earth Observation, 1982).

4.4.3 Sensor ASTER

A diferencia de otros sensores como los Landsat o SPOT, ASTER mantiene mayor número de rangos de captura en el espectro electromagnético, donde otros sensores suelen tener una sola banda, esto lo hace especialmente útil en la búsqueda de materiales que presenten información electromagnética en ese rango. La información capturada de los sensores contendrá diferentes resoluciones entre ellas la espacial donde se mide la separación angular o lineal entre los objetos definido por el sensor, es decir, el pixel será el nivel de detalle que tenga una imagen, la resolución espectral indica el rango electromagnético que es capaz de capturar en una imagen, la resolución temporal define la frecuencia con la que el sensor captura la imagen en el mismo lugar y finalmente la radiométrica como la capacidad del sensor en llevar la información espectral a bits (Resler, 2002).

El sensor ASTER (*Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer*) se encuentra cargado en la plataforma "Terra" perteneciente a la NASA. Este sensor ofrece observaciones en tres regiones espectrales (Tabla 4.1): el visible e infrarrojo cercano (VNIR), el infrarrojo de longitud de onda corta (SWIR) e infrarrojo térmico (TIR) cada una con diferentes resoluciones (Abrams, 2000).

Tabla 4.1 Especificaciones del sensor ASTER (Abrams, 2000).

Región espectral	Resolución espacial (metros en píxel)	Banda	Ancho de banda (μm)
VNIR	15	1	0.5-0.60
		2	0.63-0.69
		3	0.76-0.86
SWIR	30	4	1.6-1.7
		5	2.145-2.185
		6	2.185-2.225
		7	2.235-2.285
		8	2.295-2.365
		9	2.360-2.430
TIR	90	10	8.125-8.475
		11	8.475-8.825
		12	8.925-9.275
		13	10.25-10.95
		14	10.95-11.65

4.4.4 Detección de minerales, interacciones de radiación y firmas espectrales

La interpretación de información en imágenes espectrales se realiza mediante el conocimiento de la cubierta terrestre, al diferenciar sus características espectrales a través de una única firma espectral, se logra la identificación de objetos de interés dentro de una imagen con materiales mezclados (Haldar, 2018). El concepto de firmas espectrales es definido como la variación de reflectancia o emitancia de un material expuesto a una energía electromagnética con respecto al número de onda. Por lo que en estudios controlados se han medido materiales de la superficie con el uso de sus firmas espectrales de la vegetación, el suelo, las rocas y sus minerales (Figura 4.15) cada uno con patrones únicos y con valores específicos dentro del espectro electromagnético. (Schowengerdt, 2012).

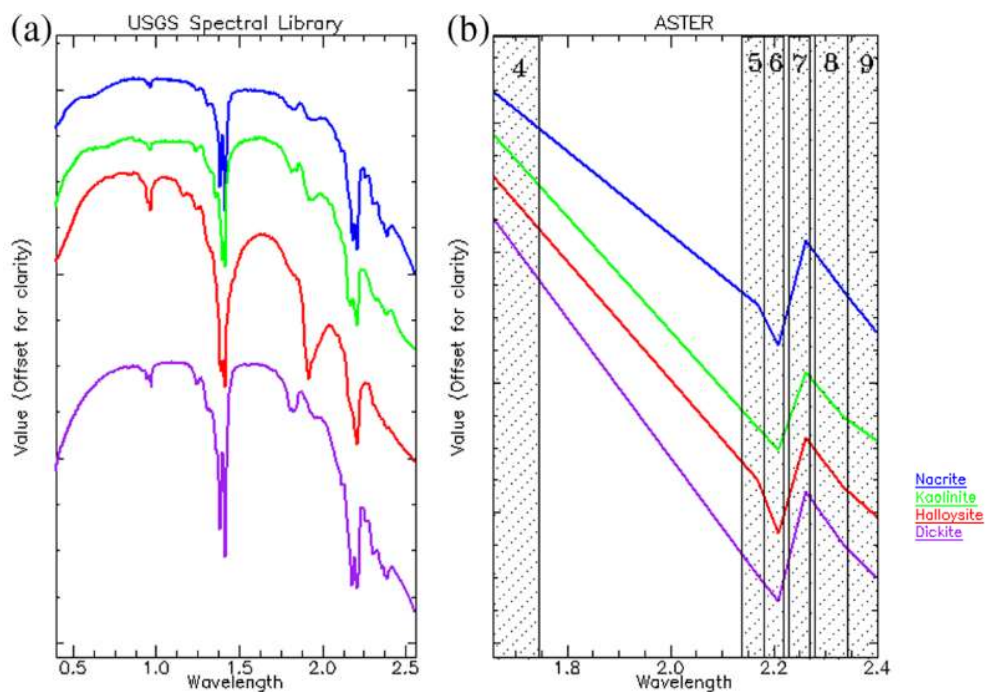


Figura 4.15 Firmas espectrales de minerales de caolinita (a) Obtenido de la librería USGS y (b) datos muestreados en bandas ASTER (Fatima et al., 2017).

Capítulo V Metodología

5.1 Obtención de información

La búsqueda de información sobre la zona de estudio se centró en la localización y revisión de diversos trabajos del gobierno, artículos, revistas científicas, tesis de distintos grados académicos y reportes de la industria minera. Todos estos trabajos sirvieron para obtener información geológica del área a explorar, esencial para realizar una investigación en función de los objetivos planteados, entre ellos se planeó encontrar información estratigráfica, estructural y litológica del área para correlacionar con la información magnética obtenida del Instituto de Geofísica.

Por otra parte, se obtuvo de la USGS imágenes satelitales (ASTER) multiespectrales para el análisis geológico con el fin de explorar de una manera remota la zona estudiada.

5.2 Análisis de datos magnéticos

La información magnética obtenida constó de 181804 puntos repartidos en un área de más de 1900 km, tomados por el Servicio Geológico Mexicano en el año 1998. Esta información fue recabada en aviones Islander BN2-27 equipados con magnetómetros de CS de bombeo óptico con una sensibilidad de 0.001 nT y un sistema de adquisición de datos PDAS 1000. En la base terrestre se utilizó un magnetómetro Gem System M19 con sensibilidad de 0.01 nT. Las distancias entre líneas de vuelo y líneas de control programadas a uno y diez kilómetros respectivamente fueron tomadas con una altura de 300 metros del terreno, que generaron mapas expuestos en las cartas geofísicas de Nombre de Dios (F13-B13) y San José de la Parrilla (F13-B23) del Servicio Geológico Mexicano.

Los datos magnéticos obtenidos contienen un preprocesamiento y corrección al haber sustraído del campo geomagnético internacional de referencia (IGRF) del año 1995, además, se realizaron correcciones por compensación magnética del avión, variación diurna y nivelación. En la Figura 5.1 se muestran las cartas

geofísicas cercanas al área de estudio y las líneas de vuelo (verticales) donde se tomaron los datos que fueron ocupados en esta tesis de Maestría.



Figura 5.1 Dirección de líneas de vuelo donde se tomaron los datos magnéticos empleados en esta Tesis de Maestría, utilizadas en este trabajo, Tomados de las cartas geofísicas F13B13 Nombre de Dios y F13B23 San José de la Parrilla

5.2.1 Métodos geoestadísticos y elaboración de mapas magnéticos

Existen métodos de análisis espacial geoestadísticos que permitieron generar diferentes mapas para una interpretación geofísica inicial los cuales se basan en una interpolación de los valores magnéticos y la generación de un mallado de datos o “*gridding*”. Cada método geoestadístico de mallado ofrece características diferentes según su algoritmo de cómputo; si bien para esta Tesis de Maestría se eligió el método curvatura mínima por ser aceptable en la formación de mapas suavizados, sin tendencias y con contornos mejorados.

Teniendo en cuenta lo anterior, se generó un mallado de 68 puntos en dirección E-W y 104 en dirección N-S con una distancia entre puntos que escala del mapa representan 511.3 m entre ellos. Esto restringe el estudio a la localización de cuerpos magnéticos y estructuras menores a un kilómetro, ya que, no serían detectadas o bien delimitadas.

El espaciado entre líneas de contorno fue equidistante a cada 50 nT y se evitó no saturarlo con etiquetas de valores con el fin de obtener una distribución de la información uniforme.

5.3 Procesamiento de datos magnéticos

5.3.1 Mapa magnético reducido al polo

Con la información magnética y las mallas obtenidas anteriormente se realizó el proceso con el software Geosoft Oasis Montaj (Versión 9.1) . Como se describe en el capítulo 4 de esta tesis, la reducción al polo consistió en una transformación de las rejillas interpoladas de los datos iniciales de anomalías magnéticas donde se utilizaron los parámetros de dirección del campo magnético indicados en las cartas “Nombre de Dios” y “San José de la Parrilla”, es decir, una inclinación: 50.95° y una declinación 8.71° .

5.3.2 Mapa magnético de la señal analítica

El algoritmo de la señal analítica es la raíz cuadrada de la suma de los cuadrados de las derivadas de las tres direcciones del campo magnético. Por tanto, se calcularon las respectivas derivadas en la rejilla de reducción al polo. Posteriormente se introdujeron las variables de la ecuación de la señal analítica en un mallado nuevo y se creó un mapa que logra resaltar bordes y discriminar las direcciones de remanencia de manera más cercana a su geometría real. Finalmente, se comparó este mapa con los mapas magnéticos previos para observar si realmente la remanencia es de gran importancia en la zona.

5.3.3 Mapas con continuaciones descendentes y ascendentes

Para obtener el mapa de continuaciones descendentes y ascendentes se requirió de las mallas obtenidas por la reducción al polo, en ellas se utilizó el promedio de las distancias entre celdas E-W y N-S del mallado en metros facilitados por la proyección en UTM, con el propósito de controlar los parámetros de continuación en el Sistema Internacional.

Para la continuación ascendente se utilizó el incremento $\Delta Z = 500$ m logrando crear un mapa que simula el campo magnético al alejarnos a esa distancia de la superficie de vuelo. Si bien, para el caso de la continuación descendente se buscó un ΔZ que no rebasara la profundidad de la fuente magnética, evitando una inestabilidad en la señal al aumentar las altas frecuencias que generan ruidos al calcular el campo, en el caso de incrementos mayores que generan información no deseada sería necesario aplicar filtros paso bajas para disminuir esas altas frecuencias. Por tanto, el ΔZ de -300 m fue obtenido con el objetivo de analizar las anomalías e intensidades magnéticas superficiales, en este mapa el realce define de mejor manera los cuerpos someros al amplificar las anomalías magnéticas que pudieran delimitar fallas y contrastes entre litologías superficiales. El mapa de continuación descendente que delimita cuerpos someros permitió generar rosetas de direcciones con lineamientos identificables en un mapa que implica correlacionar con direcciones de fallas a profundidad y superficiales debidos a cambios litológicos o desplazamientos de grandes cuerpos de importancia magnética.

5.4 Modelado directo

El modelado directo tiene como objetivo proponer una sección geológico-estructural a partir de las anomalías magnéticas observadas y la correlación de la señal magnética calculada en cuerpos poligonales de diferente magnetización con la señal magnética medida en campo, donde es posible obtener una gran cantidad de modelos que converjan, y que, para disminuir la ambigüedad se utiliza la información geológico-estratigráfica y las mediciones en laboratorio de la susceptibilidad magnética de las litologías de la zona. Dentro de ese análisis fue importante conocer los afloramientos y depósitos en superficie.

Tras la obtención de los mapas magnéticos se diseñan secciones con base en las anomalías más interesantes de la zona que pudieran ser asociadas a elementos estructurales y litológicos atribuibles a algunas de las condiciones necesarias para la formación de yacimientos minerales.

Fue necesario cortar muestras litológicas del área de estudio de un centímetro cúbico con el fin de ser medir su susceptibilidad magnética en laboratorio, utilizando un susceptibilímetro Kappabridge KLY-2 (Figura 5.2).

El paquete Geosoft cuenta con el software GM-SYS con una interfaz que permite el realizar el modelado de Talwani al crear un modelo geológico y corroborar la precisión al comparar las respuestas del modelo con las medidas en campo.



Figura 5.2 Susceptibilímetro Kappabridge KLY-2 del Instituto de Geofísica de la UNAM.

Al realizar los modelos con esta metodología, se intuye que, la geología lateral se extiende al infinito evitando efectos anómalos en los bordes, mientras que a profundidad la contribución al campo magnético va disminuyendo a causa de la supresión la magnetización al llegar al punto de Curie (Butler, 1992) tras el aumento de temperatura por gradiente geotérmico o anomalías térmicas de la corteza, de tal manera, se infiere que la contribución magnética por geoterma es pobre o nula a los 20 km.

5.5 Procesamiento de imágenes multiespectrales

Para el trabajo de percepción remota se utilizaron los paquetes de imágenes multiespectrales del sensor ASTER, de la USGS. Estas imágenes contienen un muestreo de reflectancia dentro de los rangos de 2 a 2.5 μm en el infrarrojo de longitud corta (SWIR) donde se analiza además de la topografía, la localización diversos minerales a través de sus firmas espectrales. En total, se obtuvieron dos

paquetes de 14 imágenes multispectrales (VNIR+SWIR+TIR) con el objetivo de integrar técnicas de procesamiento de imágenes para detectar áreas de alteración mineral asociado a los posibles yacimientos minerales de la zona de estudio . Las imágenes fueron tomadas el día 26 abril 2014 con una nubosidad menor al 10%.

Cada paquete de imágenes es obtenido del servicio geológico estadounidense (USGS/ EarthExplorer) en formato .HDF (*Hierarchical Data Format*) que es procesado en el software de análisis espacial ENVI 5 de *Harris Geospatial Solutions Inc.* donde se realizó el siguiente preprocesamiento (Figura 5.3):

1. Se desplegó cada paquete de imágenes (VNIR+SWIR+TIR) creando un ortomosaico georreferenciado.
2. Se realizaron las correcciones geométricas del ortomosaico a las imágenes finales y región de traslape se unió la información de los píxeles con el método geoestadístico vecino más cercano para recrear la imagen sin perder información.
3. Se creó un archivo de la región de interés con el área específica para posteriormente ser recortada y trabajar en ella.
4. Las 28 imágenes iniciales fueron corregidas en un solo paquete de 14 imágenes, no se realizaron interpolaciones y se mantuvo la información original.

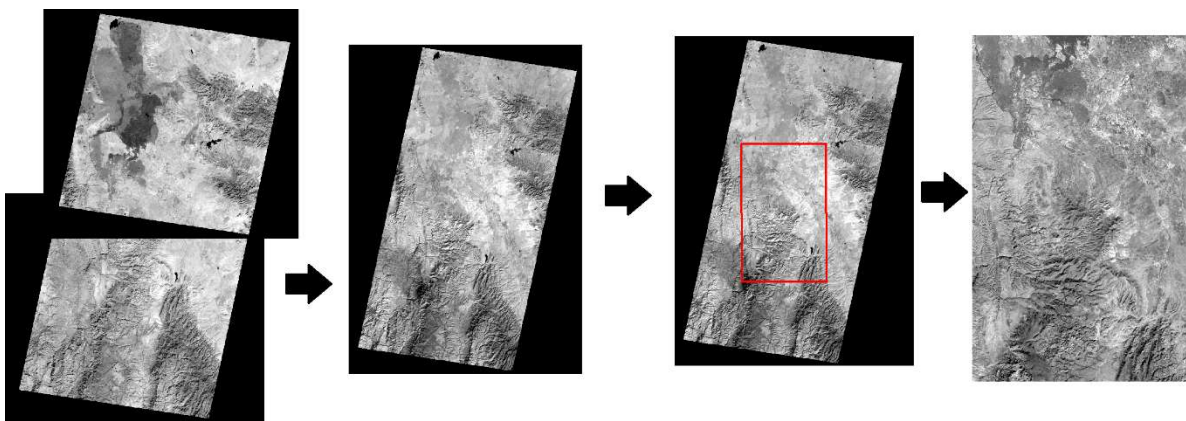


Figura 5.3 Unión de imágenes multispectrales, interpolación y corte de región de interés.

5. Se realizó una corrección radiométrica donde las resoluciones espaciales de las bandas de cada imagen se hacen coincidir en tamaño, remuestreando la imagen que originalmente era de 15 m por píxel en la región VNIR, 30 m por píxel en imágenes SWIR y 90 m por píxel en TIR y que finalmente pasan a ser de 15 metros por píxel en 8 bits.

- Finalmente se aplica una corrección atmosférica por el método del mínimo del histograma con un análisis estadístico.

5.5.1 Realce espectral para la identificación de minerales típicos de alteración

Existen técnicas que permiten de resaltar ciertos tipos de minerales constituyentes de alteraciones minerales que pueden ser útiles como guías de mineralización, para este estudio se utilizaron las imágenes multispectrales previamente procesadas para aplicar un cociente de bandas. La metodología parte de utilizar dos bandas en las que se realzan y suprimen, a partir de firmas espectrales de los minerales, la reflectancia de los minerales con el fin de resaltar (Schowengerdt, 2012). En el caso del mineral caolinita dentro de la región SWIR el cociente empleado fue la banda 5/ banda 7 (Fatima et al., 2017). Este paso requirió de las imágenes preprocesadas además de una reclasificación de valores de píxel diferentes de cero, aplicando el valor 1 a los pixeles de valor nulo, esto con el fin de evitar cocientes con denominador cero.

Una segunda metodología aplicada para la identificación de minerales fue el método Crosta, el cual utiliza un análisis de componentes principales donde se utilizan las bandas que contienen información espectral de materiales específicos (Prol-Ledesma y Ruiz-Armenta, 1995)

En este estudio se realizó una discriminación, con las firmas espectrales de la caolinita (Figura 5.4), con las imágenes SWIR-VNIR y por TIR (Elsaid et al., 2014)

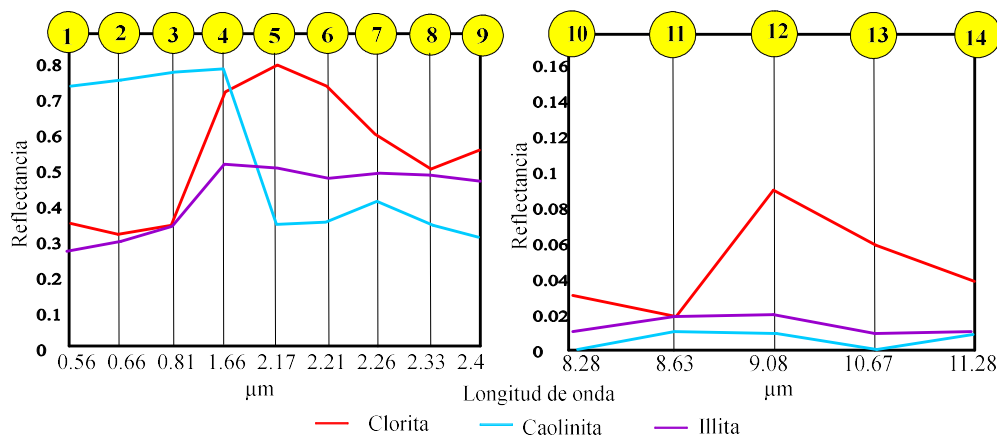


Figura 5.4 firmas espectrales de algunos minerales con la reflectancia según la banda ASTER útil para obtener la componente que realce al material en la metodología Crosta (Elsaid et al., 2014).

En este procesamiento se utilizó el software IDRISI Selva para realizar un análisis de componentes principales orientado (Técnica Crosta) con el fin resaltar únicamente los píxeles que espectralmente muestran evidencia de minerales guías de exploración. Se utilizó la técnica trabajada en Elsaid et al. (2014) con bandas TIR y SWIR que realzan parte de la alteración argílica utilizando las firmas de caolinita, clorita e Illita al mapear en la región VNIR-SWIR (Figura 5.4) con las bandas 3 (refleja), 7 (absorbe), 6 (refleja) y 9 (absorbe), y por otro lado, en la región TIR se utilizaron las bandas 11 (refleja), 12 (absorbe), 13 (absorbe) y 14 (refleja). A partir de la matriz de eigenvalores y matriz de carga se utiliza la componente con mayor carga en valores de reflectancia y menores de absorbancia al contener mayor cantidad de redundancia de información espectral (Prol-Ledesma y Ruiz-Armenta, 1995).

Posteriormente la imagen, resultado de la componente principal de mayor carga en absorbancia y reflectancia, se utilizó el valor umbral como se muestra en la Ec. 5.1 (Elsaid et al., 2014), para excluir las bajas concentraciones del mineral, buscado en imágenes reclasificadas con valores digitales 0-255.

$$Umbal\ de\ banda = media + 2(desviación\ estándar) \quad (5.1)$$

Posteriormente, se discriminan los valores obtenidos por debajo del umbral, resaltando las altas concentraciones del píxel buscado al tener siempre positiva la reflectancia del material sobre el mapa de la topografía del área de estudio.

5.5.2 Realce espacial en imágenes ASTER para el mapeo de lineamientos

Los elementos estructurales regionales visibles en superficie fueron mapeados a través del método de Moore y Waltz (1983); se utilizaron imágenes multiespectrales ASTER, donde se ocupó la mayor redundancia de una imagen obtenida a través de la metodología del análisis de componentes principales (Prol-Ledesma y Ruiz-Armenta, 1995) de las tres primeras imágenes VNIR del conjunto ASTER que mantiene la información del albedo y topografía.

El realce espacial de las imágenes se realizó con el programa IDRISI Selva y se realizó de la siguiente manera:

1. Remover las frecuencias altas aplicando un filtro digital 3 x 3 paso bajas

2. Utilizar los siguientes filtros direccionales (5.1) para distinguir elementos en las direcciones NE, SE, SW y NW:

$$\begin{array}{cccc}
 \text{NE} & \text{SE} & \text{SW} & \text{NW} \\
 1 \ 1 \ 1 & -1 \ -1 \ -1 & 1 \ -1 \ -1 & 1 \ 1 \ 1 \\
 -1 \ -2 \ 1 & -1 \ -2 \ 1 & 1 \ -2 \ -1 & 1 \ -2 \ -1 \\
 -1 \ -1 \ 1 & 1 \ 1 \ 1 & 1 \ 1 \ 1 & 1 \ -1 \ -1
 \end{array} \quad (5.1)$$

3. A cada imagen obtenida a partir de la convolución de las ventanas 3×3 , se les aplicó un nuevo filtro *Sobel* (detector de bordes) para incrementar las altas frecuencias y posteriormente aplicar un filtro paso bajas.

4. Aplicar una saturación de contraste de manera lineal (*stretch lineal*) a un 2%

5. Sumar la imagen resultante fue sumada con la original de modo que los lineamientos visibles puedan ser marcados y rectificadas.

Capítulo VI Resultados

6.1 Análisis cualitativo

A partir de la información aeromagnética obtenida, se generó el mapa de anomalía magnética total de la zona de estudio (Figura 6.1), donde se identifican los principales dominios magnéticos es decir los mínimos y máximos magnéticos relativos, presentes en las principales zonas de contribución magnética.

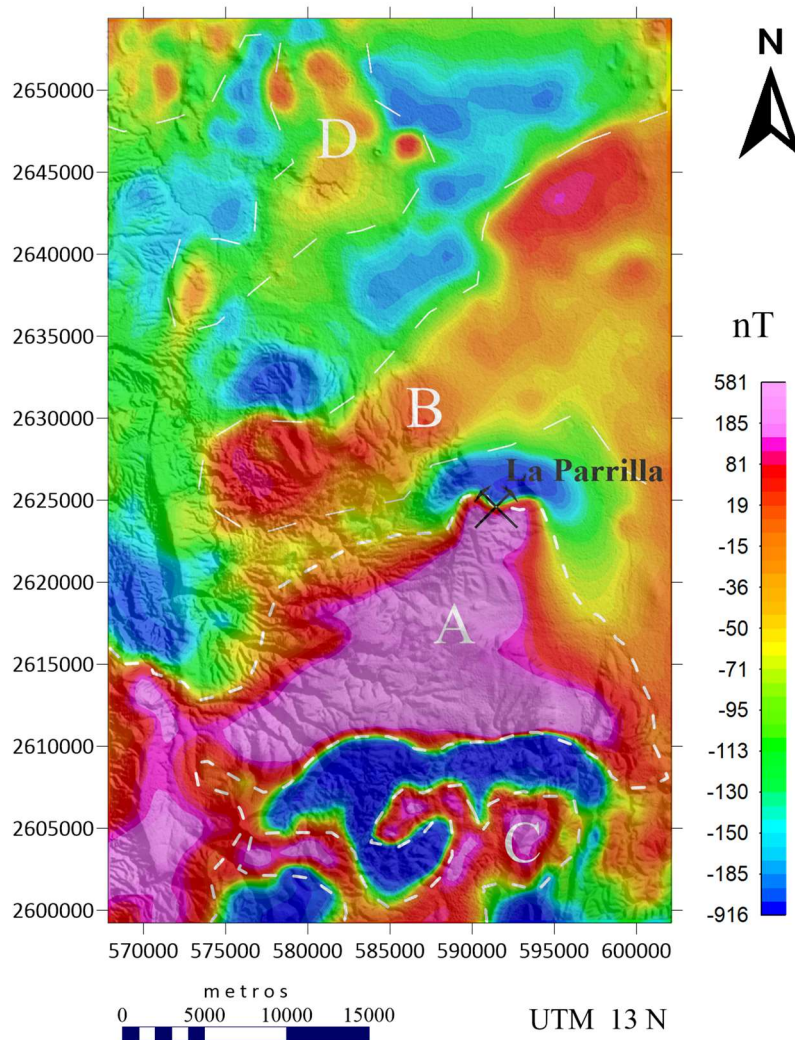


Figura 6.1 Mapa de anomalías magnéticas totales, con agrupamiento de dominios magnéticos, escala de color distribuida uniformemente.

Las anomalías magnéticas positivas se pueden agrupar en cuatro principales regiones o dominios de intensidad. La figura 6.1 también muestra las anomalías magnéticas de mayor intensidad (región A) con intensidades de hasta 581 nT. En la porción norte de esta región se encuentra la mina de La Parrilla que presenta una apariencia magnética dipolar al norte y anomalías irregulares en su parte sureste debido a la oblicuidad del campo magnético terrestre.

El dominio magnético B muestra una gran anomalía magnética SW-NE con extremos de mayor intensidad magnética y una geometría más amplia en los bordes SW-NE. El dominio magnético C tiene múltiples anomalías positivas aisladas en una región de bajos magnéticos. El dominio D muestra, diferentes anomalías positivas aisladas con intensidades medias en conjuntos que contrastan en una zona de bajos magnéticos donde predominan basaltos, aluviones y conglomerados.

La transformación conocida como reducción al polo permite observar una nueva distribución de las anomalías magnéticas. Esta transformación realizada de acuerdo al algoritmo de Baranov & Naudy (1964), requiere parámetros del campo magnético de la zona de forma que se utilizó una inclinación de 50.95° y una declinación de 8.7° (Figura 6.2). Las intensidades magnéticas de esa zona indican valores máximos de hasta 876 nT, en las regiones centro y sur del área de estudio.

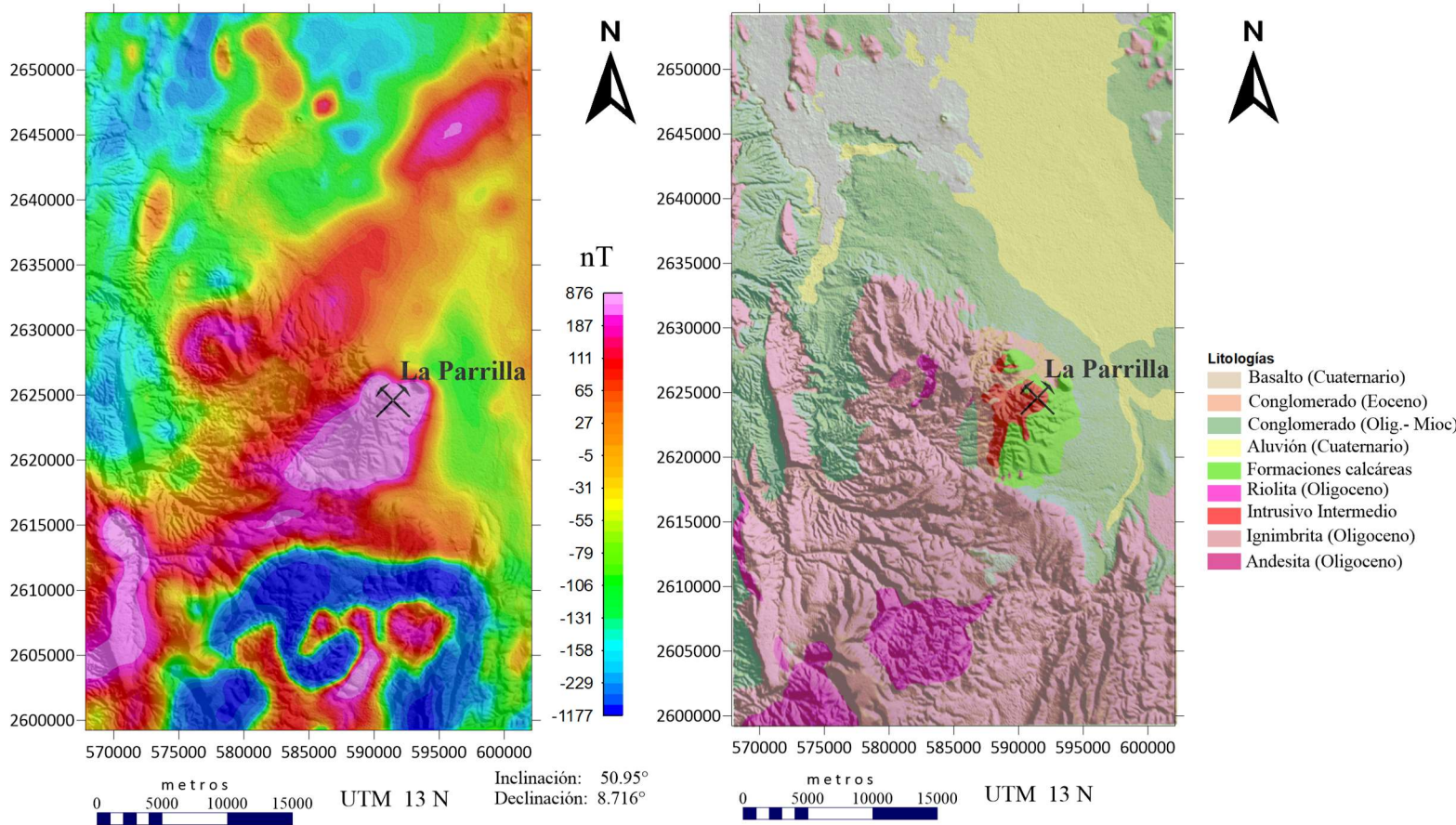


Figura 6.2 Mapa de anomalías magnéticas reducidas al polo (izquierda), en comparación con mapa geológico (derecha), de la misma área de estudio.

En el mapa de anomalías magnéticas la zona de bajas intensidades al sur del área de estudio no muestra cambios importantes con respecto a la figura 6.1, en la transformación se muestra una anomalía magnética negativa con una pendiente pronunciada en la dirección W-E, con valores mínimos de hasta -541.0 nanoteslas, y un gran contraste magnético asociado a las litologías presentes en la zona como son la riolita, ignimbrita y el intrusivo intermedio.

Se puede afirmar que la señal magnética en el mapa de anomalías reducidas al polo correlaciona con los límites de los intrusivos intermedios (monzodiorítico-diorítico) del distrito de La Parrilla, sin embargo, mantiene poca correlación superficial con algunas de las litologías del mapa geológico como la ignimbrita, los derrames basálticos o los domos riolíticos

Por otra parte, se obtuvo la señal analítica con la finalidad de delimitar los límites de los cuerpos a través de las anomalías magnéticas (Roest y Pilkington, 1993), ya que este algoritmo desplaza el máximo relativo de la anomalía magnética para que coincida aproximadamente con el centro generador de la fuente

magnética . Esta particularidad facilita el análisis e interpretación de las anomalías magnéticas al permitir conocer la geometría de los cuerpos intrusivos. Otra ventaja de la señal analítica radica en que se puede obtener sin necesidad de conocer parámetros del campo magnético como declinación o inclinación del campo local (Rajagopalan, 2003) . La Figura 6.3 muestra las agrupaciones de anomalías magnéticas asociadas a intrusivos presentes en la zona.

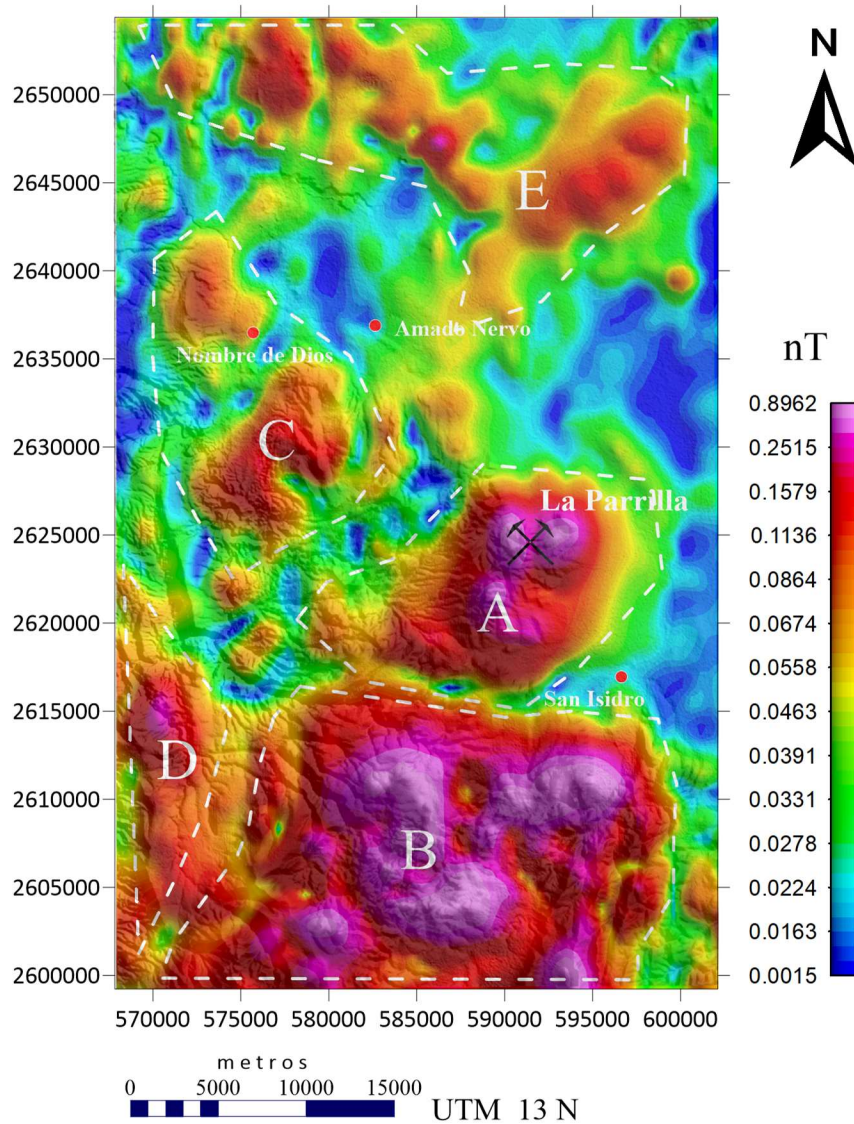


Figura 6.3 Señal analítica obtenida del mapa de anomalías magnéticas reducidas al polo.

El dominio "A" de la Figura 6.3 corresponde a las anomalías magnéticas positivas que definen bordes de intrusivos en la zona de La Parrilla los cuales tienen una dirección SW. En la zona sur, el dominio "B" muestra una mayor cantidad de anomalías magnéticas positivas con una orientación SW-NE que

inferen anomalías asociadas a cuerpos masivos y de mayor tamaño al centro del área. Por otra parte, los dominios “C”, “D” y “E” muestran anomalías magnéticas aisladas posiblemente asociadas a cuerpos intrusivos intermedios y/o derrames basálticos, que dominan la región norte del área de estudio.

6.2 Análisis estructural

En general, el fallamiento regional y las fracturas definen zonas de debilidad donde los fluidos mineralizantes pueden rellenar vetas, vetillas o llegar a formar otros tipos de estructuras. En este estudio, el tratamiento de imágenes ASTER permitió la identificación de los lineamientos estructurales más importantes en el área pudiendo ser correlacionables en superficie con fallas o fracturas regionales. La Figura 6.4 muestra los lineamientos identificados con la metodología presentada previamente.

En la Figura 6.4 se logra observar en la región NW grandes rasgos kilométricos y espaciados predominantemente en las direcciones NW-SE y SW-NE. Los lineamientos de la parte central y W del área de estudio, muestra rasgos de mayores longitudes en direcciones N-S y pequeños lineamientos en las direcciones NE-SW.

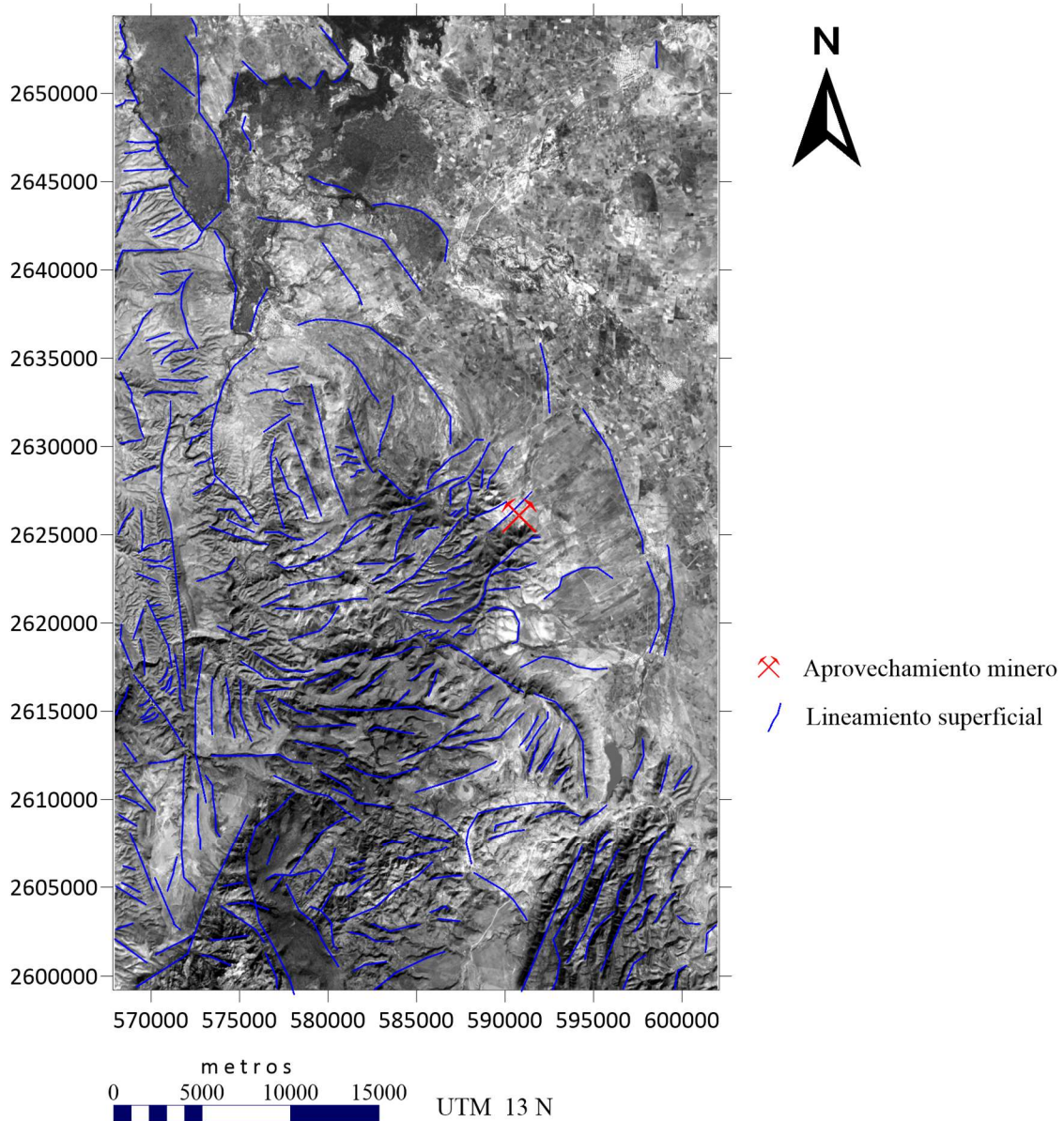


Figura 6.4 Imagen de la topografía de la zona, con los lineamientos superficiales del área de estudio concentrados predominantemente en la región SW.

La presencia de un gran relleno de aluviones y conglomerados cuaternarios en la región NE del área de estudio enmascara los rasgos asociados a fallas y fracturas.

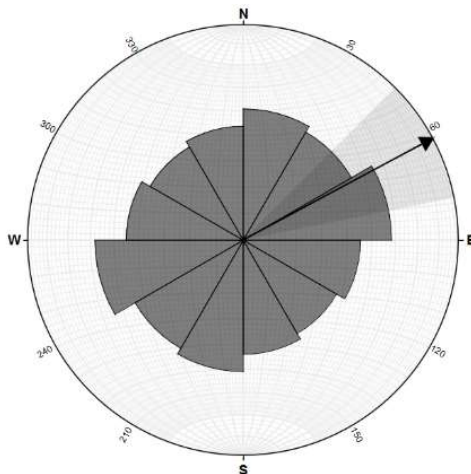


Figura 6.5 Direcciones preferenciales SW-NE de los lineamientos superficiales obtenidos del tratamiento de imágenes satelitales.

Por otro lado, se obtuvieron lineamientos a través de la identificación de contrastes magnéticos en el mapa de anomalías magnéticas(Figura6.6 y Figura 6.7), con la finalidad de interpretar los contactos litológicos en profundidad.

El filtrado por continuación descendente a 300 m y ascendente a 500m permitieron suavizar y/o amplificar el efecto de estructuras. En él se observa un patrón de fallas y estructuras con dirección SW-NE, que podrían corresponder con los cuerpos más profundos, mientras que en el mapa de las anomalías magnéticas descendentes se observa un patrón de fallas de mayor cantidad de rasgos que podrían ser asociados a contactos litológicos.

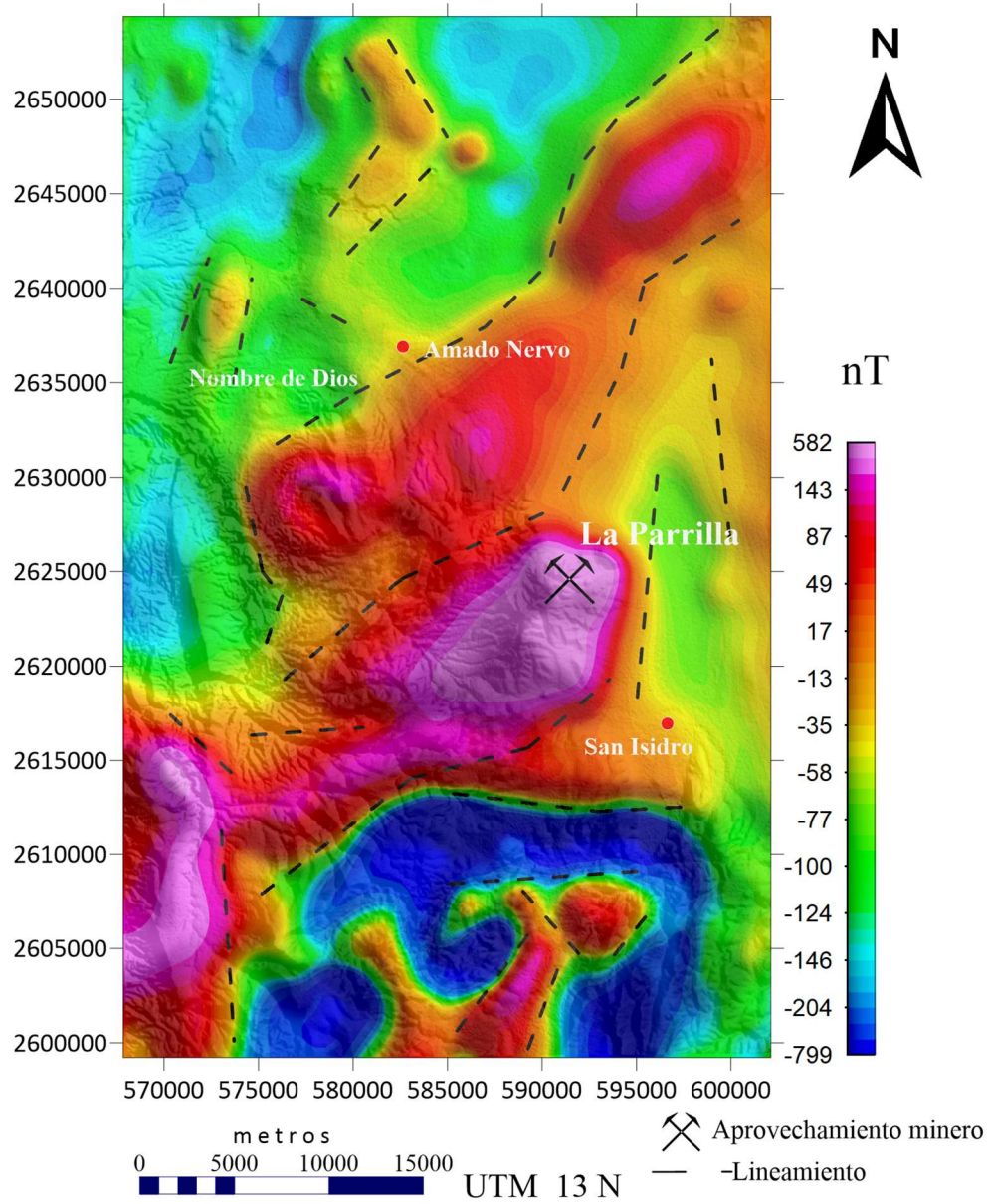


Figura 6.6 Rasgos obtenidos mediante el análisis del mapa magnético reducido al polo con continuación ascendente a 500 m.

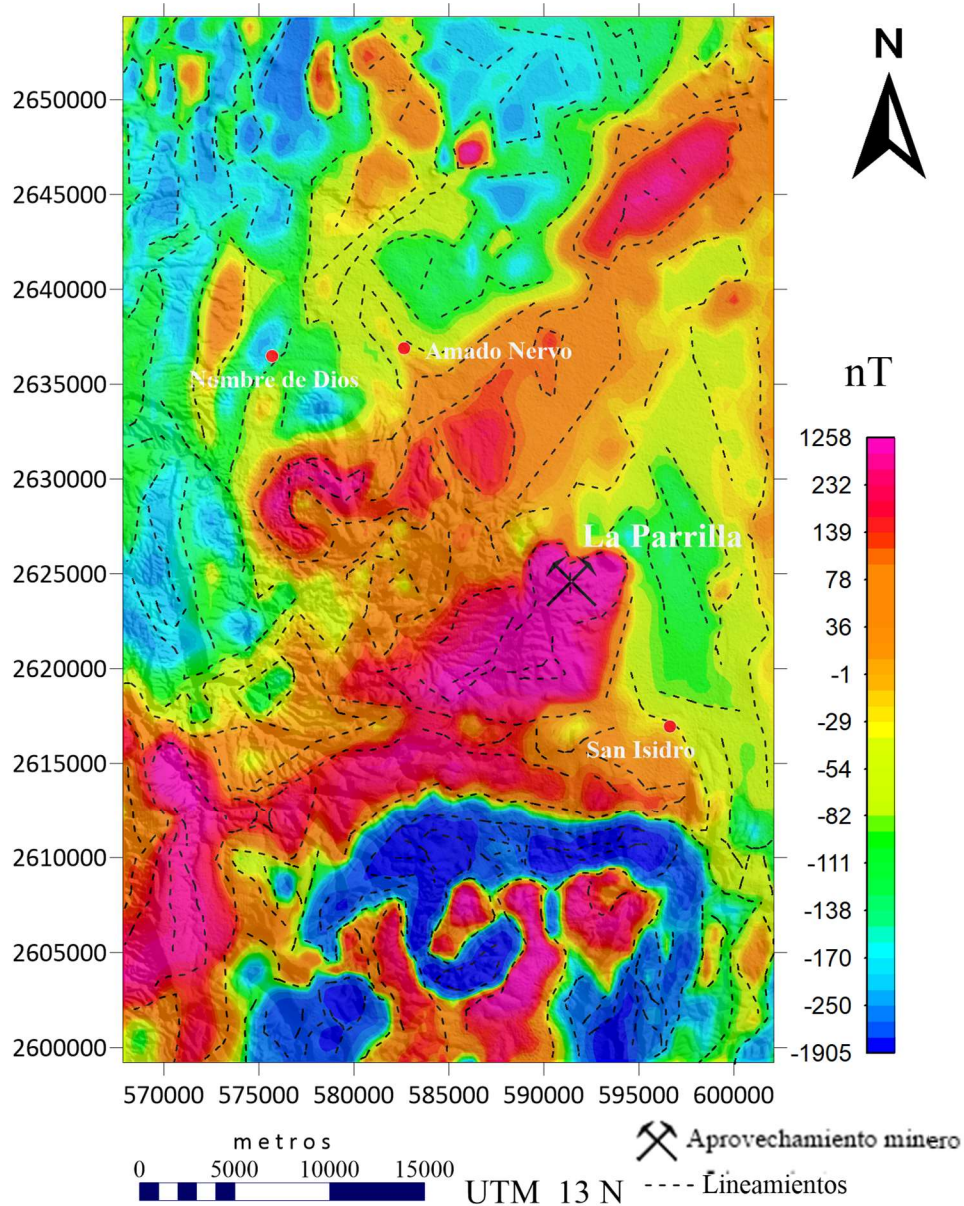


Figura 6.7 Lineamientos obtenidos en el mapa magnético de continuación descendente a 300 m

Los lineamientos magnéticos obtenidos del mapa de continuación descendente fueron representados en una roseta a cada 30° (Figura 6.8), los cuales muestran una dirección preferente NW-NE .

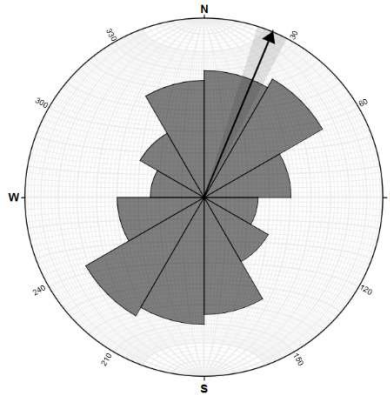


Figura 6.8 Direcciones preferenciales de los lineamientos magnéticos en intervalos de 30

6.3 Modelos geológicos estructurales.

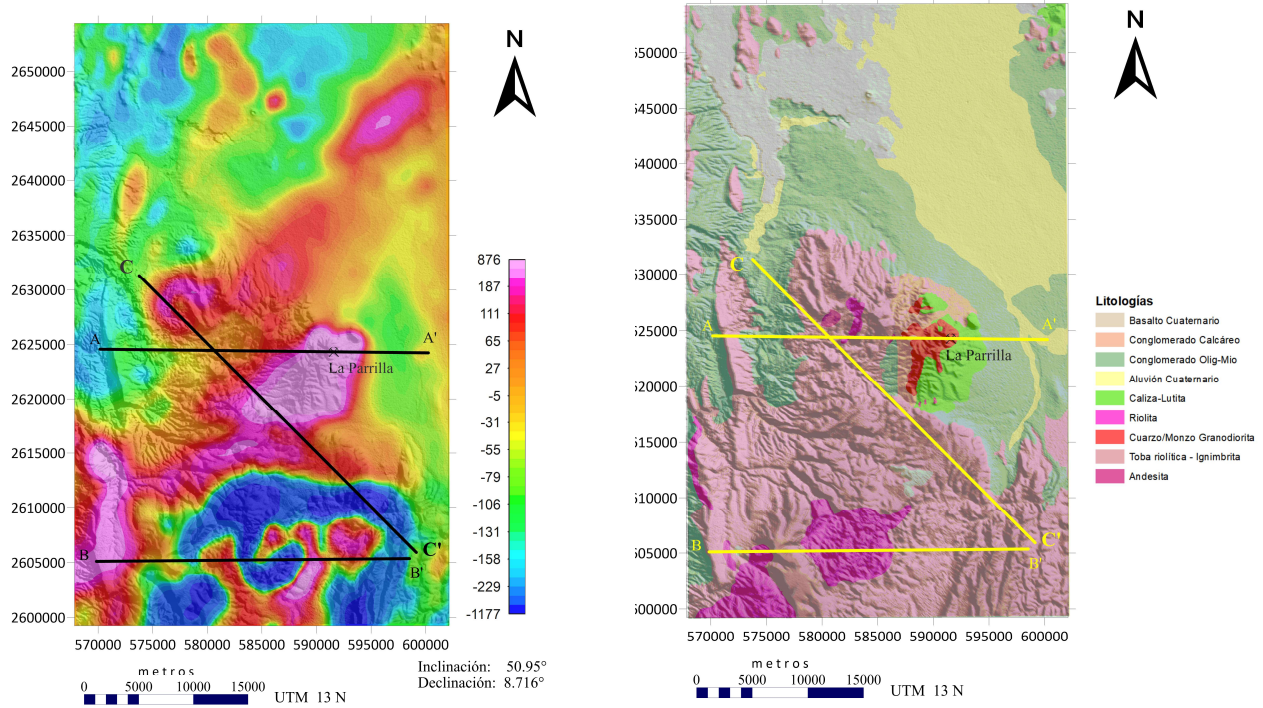
Los modelos geológicos-estructurales bidimensionales tienen como objetivo proponer una distribución, de las estructuras geológicas presentes en una sección que reproduzca el campo magnético observado. Para este proceso fue necesaria la medición de susceptibilidad magnética de las muestras litológicas presentes en la zona con la finalidad de disminuir la incertidumbre de los modelos. La tabla 5.1 indica los resultados de susceptibilidad magnética medidas en laboratorio con el equipo Kappabridge KLY-2, del Instituto de Geofísica de la UNAM.

Tabla 5.1 Susceptibilidad magnética de muestras del área de estudio.

Litología	Susceptibilidad SI 10^{-6}
Granodiorita alterada	34.80
Granodiorita Cuarzo-monodioritas	1464
Ignimbrita alterada	12.40
Basalto	920
Ignimbrita no alterada	112.30
Riolita	141.60
Riolita alterada	256.50
Andesita	263.09

Para realizar los modelos geológicos-estructurales se seleccionaron tres perfiles (i.e. A-A', B-B' y C-C') que cortan las anomalías más interesantes del área de estudio (Figura6.9). Los datos de la señal observada fueron extraídos de los

datos magnéticos reducidos al polo a cada 76m aproximadamente, a lo largo de tres perfiles: A-A', B-B' y C-C', de 30 Km, 29.5 Km y 38 Km, respectivamente, como se muestran en la Figura 6.9.



a)

b)

Figura 6.9 Localización de los perfiles A-A', B-B' y C-C' en a) Mapa de anomalías reducidas al polo y b) Mapa geológico del área de estudio.

6.3.1 Perfil geológico-estructural A-A'

El perfil A-A' (Figura 6.10) está ubicado en la zona central del área de estudio (Figura 6.9) presenta una orientación E-W y una longitud de 30 km. La señal magnética seleccionada tiene una clara tendencia positiva hacia el este con una pendiente suave en la señal magnética ente los primeros 18.5 km. Presenta una gran anomalía positiva con dos máximos relativos ubicados a 20 y 22 km con una intensidad de 870 nT y 720 nT, respectivamente. Estas anomalías fueron interpretadas como la respuesta magnética del intrusivo granodiorítico – cuarzdiorítico de composición intermedia, que dio origen a la mineralización presente en el distrito minero de La Parrilla y que cruza en la sección en el kilómetro 22. Finalmente, la señal magnética mantiene un cambio negativo cercano a los -100 nT que a partir del kilómetro 25 se mantiene prácticamente constante.

Por otra parte, la topografía, no se correlaciona con los cambios de pendiente de la señal magnética.

Las unidades litológicas modeladas son: la ignimbrita, intrusivo intermedio (granodiorita-diorita), conglomerados, aluviones y las principales formaciones calcáreas. Los intrusivos intermedios fueron modelados utilizando el mayor valor de susceptibilidad magnética medida en laboratorio (1464×10^{-6} SI). El modelo propuesto es concordante con el la geología regional ya que el ajuste entre el campo magnético observado y el calculado es bueno con un error del 14.48%.

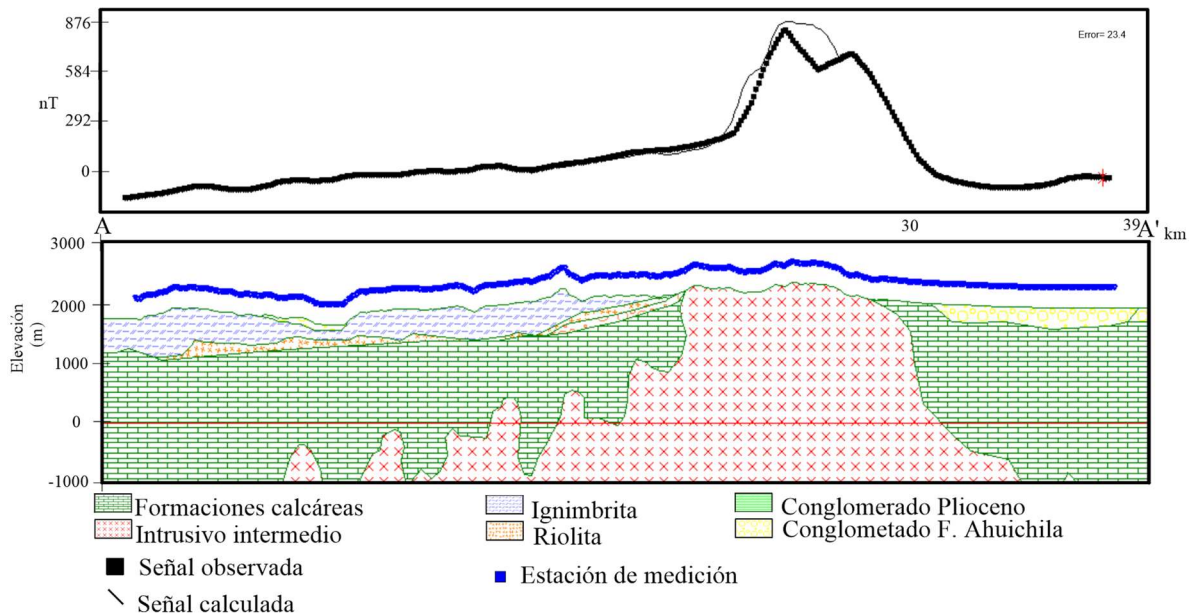


Figura 6.10 Modelo bidimensional geológico- estructural A-A' mostrando la señal magnética en nT que genera.

Se asumió que el basamento del modelo está constituido por un paquete de calizas de gran espesor, que no contribuyen al efecto del campo magnético. La contribución magnética de los aluviones se consideró baja debido a su contenido principalmente calcáreo, y su profundidad ambigua ya que no existe un contraste magnético entre las calizas y el aluvión.

6.3.2 Perfil geológico-estructural B-B'

La sección B-B, se localiza en la región sur, del área de estudio paralela al perfil A-A' con una longitud de 29.5 km (Figura 6.9).

La señal magnética muestra un conjunto de seis máximos y seis mínimos relativos dentro del rango de 280 nT y -530 nT. Los máximos relativos se

interpretaron como resultado de cuerpos del intrusivo intermedio que dominan en toda la zona de estudio con una dirección predominante SW y NE; mientras que los mínimos están asociados a la presencia de domos riolíticos que alcanzaron la superficie, con una susceptibilidad magnética comparablemente menor (Tabla 5.1).

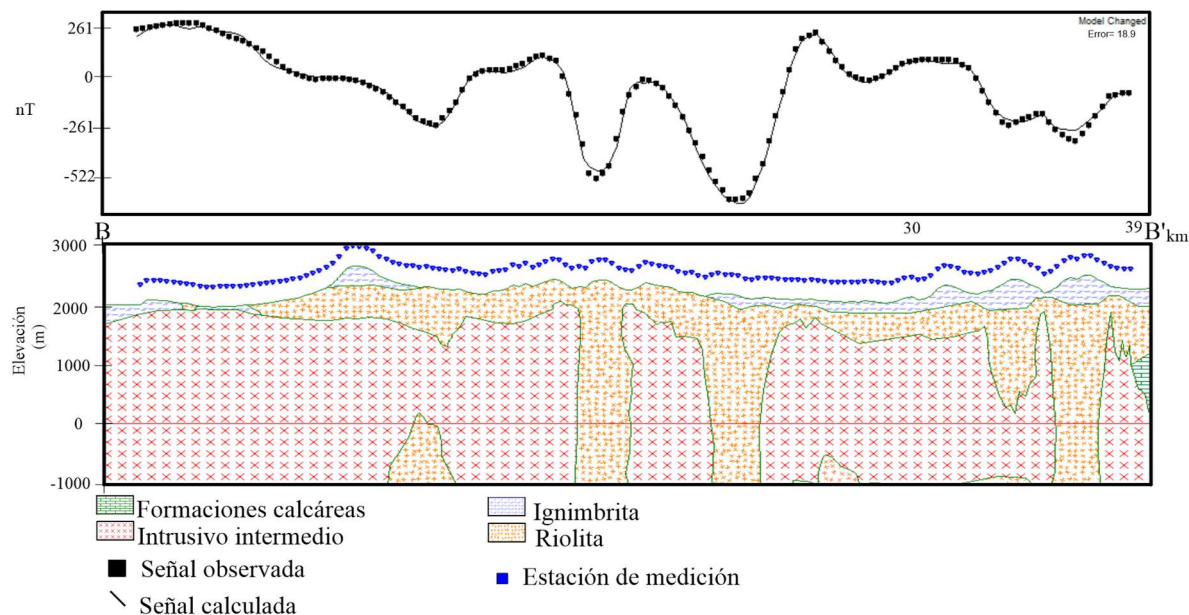


Figura 6.11 Modelo bidimensional geológico- estructural B-B' mostrando la señal magnética observada y calculada.

En el modelo se ubican algunos elementos superficiales, especialmente grandes extensiones de depósitos de ignimbritas y domos riolíticos que cubren los cuerpos intrusivos. Los domos no presentan continuidad vertical en el kilómetro 4 a 7, mientras que, en la región central del perfil, se destacan grandes áreas de riolitas que afloran e infieren en el modelo (por el campo magnético que generan) tres conductos volcánicos profundos en los kilómetros 14, 18 y 28 respectivamente.

En la región oriente del perfil los elementos estructurales fueron modelados como fosas y pilares tectónicos a profundidad, ya que el modelo correlaciona adecuadamente con la geología aflorante y el efecto entre el campo magnético calculado y el observado que presenta un error del 18.9%

6.3.3 Perfil geológico-estructural C-C'

Este perfil es transversal a la zona de estudio y se localiza en la porción centro- sur (Figura 6.9). Mantiene un rumbo NW- SE, con una longitud de 38 km, (Figura 6.12) cruza el perfil A-A' en su extremo W y culmina a unos kilómetros del extremo E del perfil B-B. Atraviesa superficialmente los depósitos ignimbríticos y conglomerados policmíticos del Plioceno. Sin embargo, tras el análisis estratigráfico y magnético se infirió la presencia de domos riolíticos y cuerpos del intrusivo intermedio, que predominan en el área de estudio.

La señal magnética a lo largo del perfil muestra al menos tres máximos relativos a 4,19 y 29 Km los cuales podrían estar asociados a los cuerpos del intrusivo intermedio de manera superficial, pero sin aflorar, en los kilómetros 17 a 20. Al final del perfil la señal muestra un mínimo relativo de -950 nT en el kilómetro 31 que es asociado a un gran domo riolítico cubierto por la ignimbrita del Oligoceno.

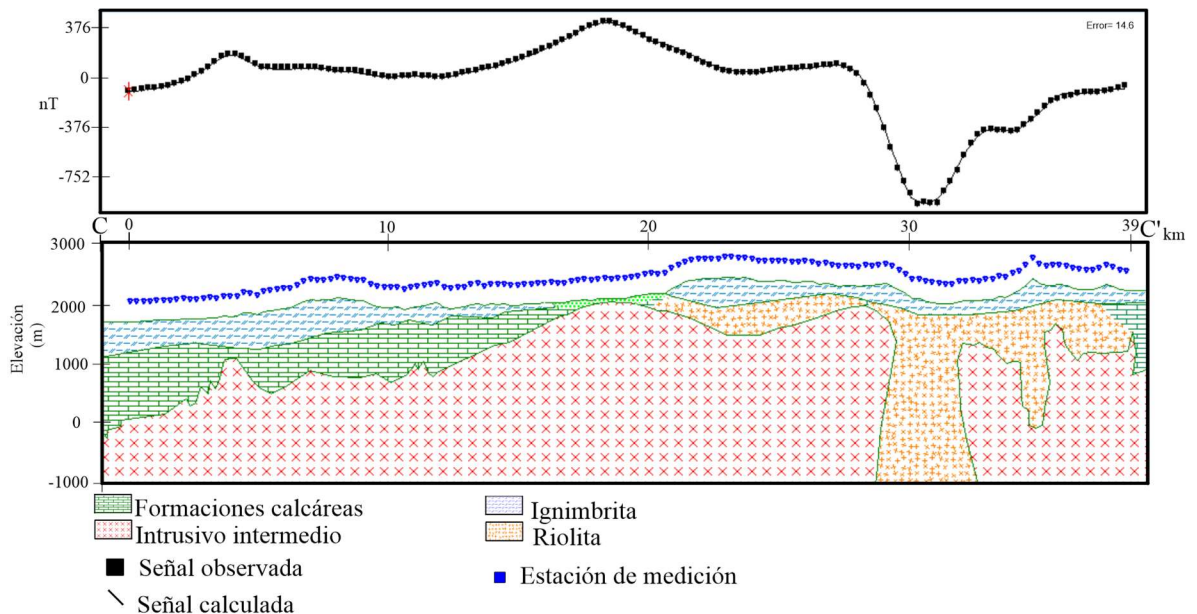


Figura 6.12 Modelo bidimensional geológico-estructural C-C', que muestra la señal magnética observada y calculada.

Este modelo infiere la presencia de los intrusivos intermedios de gran extensión en profundidad, que no aflora en superficie pero que de forma que

puede ser estimado con la señal magnética observada y su alta susceptibilidad magnética medida en las muestras. De acuerdo con el modelo, estos intrusivos intermedios (diorita-granodiorita) en su parte más somera se encuentra cubierto por conglomerados policmíticos del Plioceno y materiales calcáreos de la Formación Ahuichila en la zona de La Parrilla, y es cortado por un domo riolítico del Oligoceno en el kilómetro 30 del perfil. El ajuste entre las señales observada y calculada es bueno con un error del 14.6%.

6.4 Análisis geológico por Percepción Remota

A partir, de las imágenes satelitales ASTER, se realizó la metodología de cociente de bandas con el cociente de bandas 5/ 7 en una composición a falso color con el fin de resaltar la existencia de minerales arcillosos en colores rojizos.

Este método dio buenos resultados al resaltar zonas con presencia de materiales arcillosos que principalmente corresponden a áreas agrícolas, como es el caso del norte del poblado Nombre de Dios y NE de Amado Nervo (Figura 6.13). Sin embargo, estos resultados son poco útiles para el objetivo de esta investigación ya que en ella además se puede resaltar áreas de vegetación debido a la similitud en las firmas espectrales de minerales arcillosos.

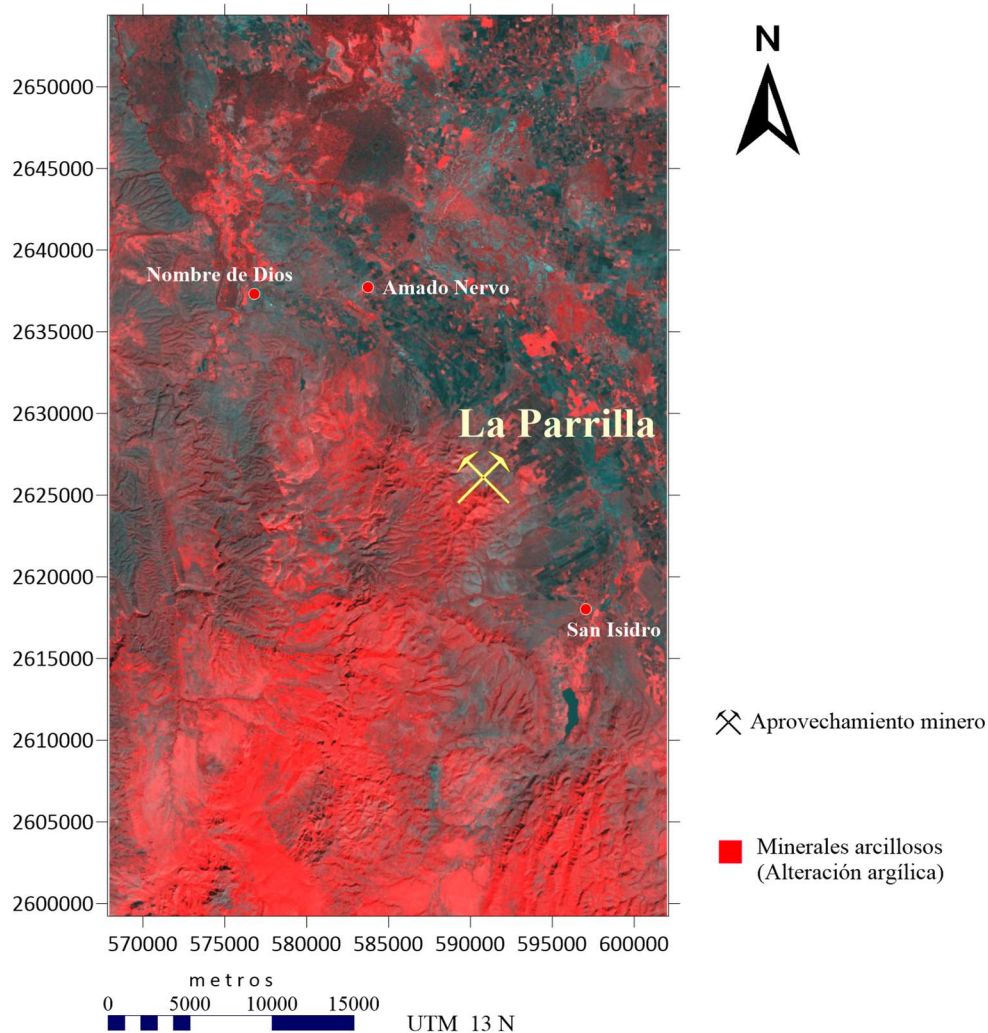


Figura 6.13 Imagen procesada con el método de cociente espectral para el realce de minerales arcillosos.

Los resultados de la componente principal obtenida con una alta correlación en la técnica de Crosta en la región SWIR, muestra a la Figura 6.14 como la mejor imagen que resalta las zonas de alteración argílica. Los píxeles morados indican presencia de minerales arcillosos asociados a la alteración argílica en la zona central, la franja sur del área de estudio y en las áreas aledañas a La Parrilla en dirección NW. No obstante, en el área de aluviones y conglomerados del área de estudio se muestran blancos negativos debido a ser material transportado. Para la mejora visual de las zonas de posible alteración se ocupó una capa de topografía.

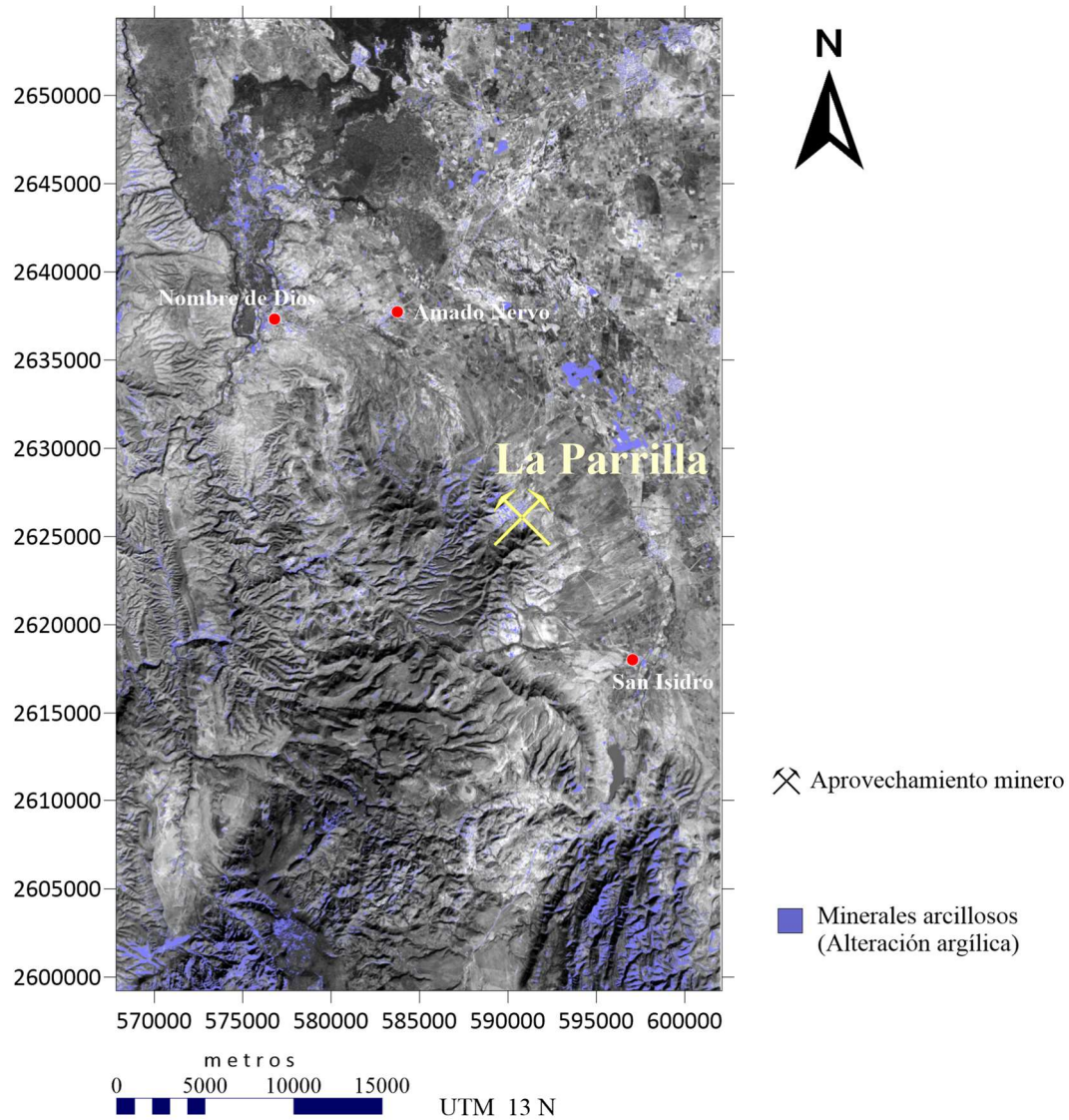


Figura 6.14 Imagen procesada mediante la técnica Crosta para resaltar minerales arcillosos asociados a alteración argílica en la región del visible e infrarrojo corto.

La Figura 6.15 muestra los resultados de la técnica de Crosta en la región TIR, donde se puede observar una mayor discriminación de áreas al mostrar concentraciones aún más pequeñas y correlacionables con la imagen 6.14, que, de la misma manera, muestra blancos negativos en zonas de conglomerados y aluvión. La región NW de La Parrilla y el costado SW del área de estudio muestran áreas de posible alteración argílica.

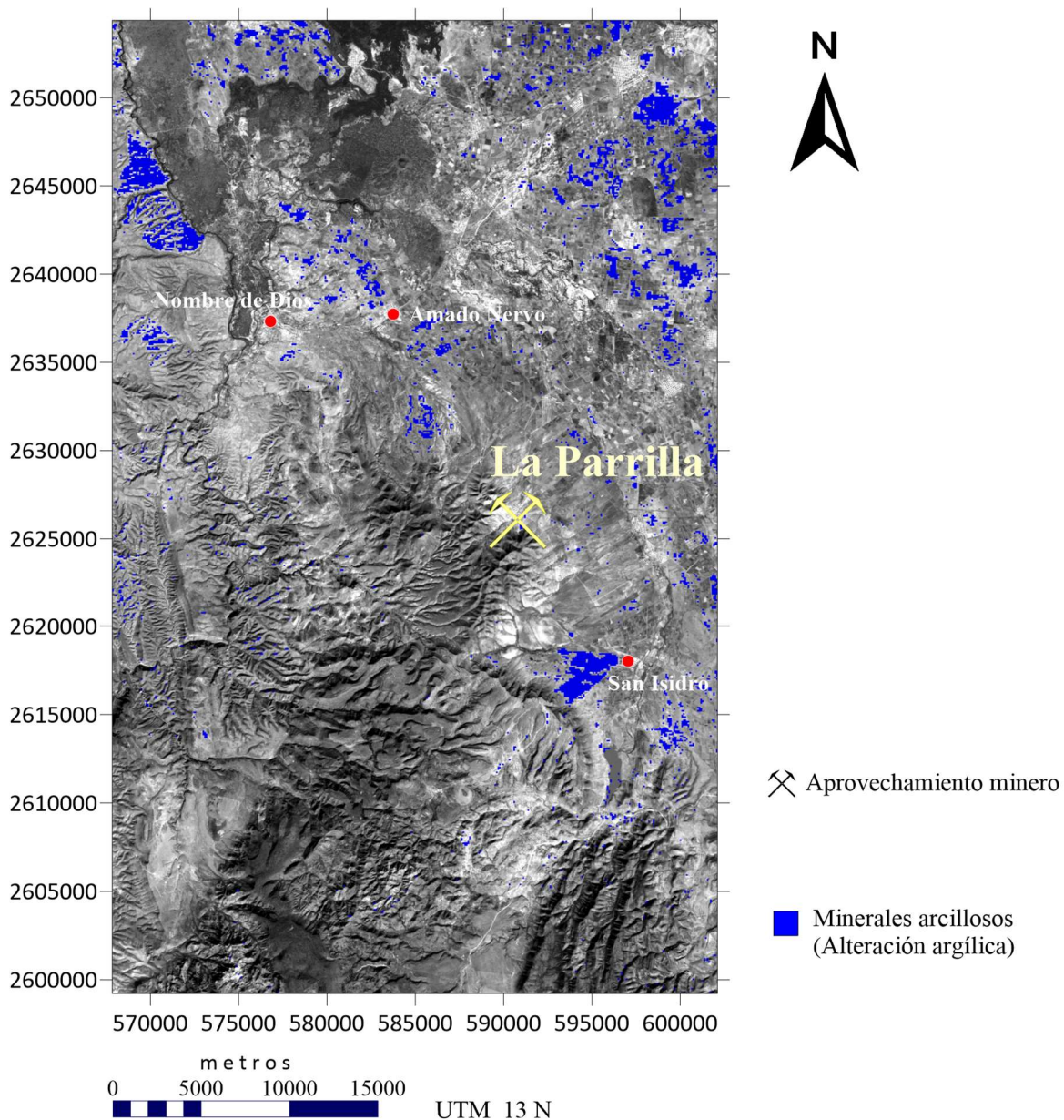


Figura 6.15 Imagen procesada con la técnica Crosta para resaltar minerales arcillosos asociados a alteración argílica en la región Infrarrojo Térmico.

Capítulo VII Análisis de resultados

La distribución de las anomalías magnéticas “positivas” permite identificar la presencia de cuerpos intrusivos ya que estos presentan mayor contenido ferrimagnético e infieren, a través del análisis de señales, áreas de importancia para la localización de posibles o intrusivos alimentadores de yacimientos no visibles en superficie.

En el mapa de reducción al polo, algunas anomalías fueron correlacionables directamente con la geología de la región (Figura 6.2). En este mapa se logra observar con una continuidad SW-NE de las anomalías magnéticas positivas que se correlacionan con los intrusivos a profundidad al mostrar un conjunto de máximos relativos en la parte centro y sur del área de estudio.

Existen patrones de intrusión en dirección SW-NE que confirman la localización y distribución del intrusivo cuarzodiorítico en estudios realizados previamente de manera local (Taylor et al., 2016). De esta manera, se puede afirmar que la señal magnética en el mapa de anomalías reducidas al polo correlaciona con los límites de los intrusivos de composición intermedia del distrito de La Parrilla, sin embargo, mantiene poca correlación superficial con algunas de las litologías del mapa geológico como la ignimbrita, los derrames basálticos o los domos riolíticos

Los lineamientos obtenidos en los mapas de continuación descendente y ascendente muestran resultados similares a los obtenidos por percepción remota (Figura 6.5) estos presentan la misma tendencia NE -SW con pequeñas diferencias en la dirección preferencial, asociado al cambio de rumbo de las fallas o fracturas a profundidad.

La Figura 6.4 presenta, en la zona central, sur y suroeste una región correlacionable con los depósitos volcánicos de ignimbrita y algunos domos riolíticos (Figura 6.2). Los lineamientos localizados al NW del mapa también muestran rasgos de cambios litológicos asociados con los derrames basálticos que sobreyacen otras litologías cuaternarias y del Neógeno. Por otra parte, se observan rasgos en la zona periférica SW y N de la zona de aprovechamiento minero. Mientras que en la zona oriente se identifican lineamientos de más de diez kilómetros que podrían estar relacionados con la presencia de algunas de las fallas profundas de gran importancia en relación con los cuerpos intrusivos. En general, la zona muestra un fracturamiento y fallamiento preferencial en dirección SW-NE como se muestra en la Figura 6.5.

Los diagramas de formación de depósitos epitermales (Sillitoe, 1995) permitieron idear la distribución de los depósitos hidrotermales cercanos a las fuentes de calor generadoras, y por tanto la identificación de intrusivos someros través del tratamiento y procesamiento de datos magnéticos de la zona, con la finalidad de establecer la orientación de los principales cuerpos intrusivos generadores de yacimientos hidrotermales.

Así mismo, las unidades basálticas que muestran altos valores de susceptibilidad magnética que se presenta en la zona norte y centro-norte, con una susceptibilidad magnética alta, pudiendo ser identificados por tener una susceptibilidad menor que los intrusivos granodioríticos (Ver Tabla 5.1). El mapa de la señal analítica permite considerar la continuidad de los basaltos. Los basaltos cuaternarios ligados a anomalías magnéticas positivas en el análisis de la señal analítica y se correlaciona su emplazamiento a profundidad con las anomalías en la región norte del poblado Nombre de Dios en dirección NE y SE hacia región de Amado Nervo, bajo los depósitos de aluvión .

En la región sur, como ha sido descrito en la información geológica, grandes domos riolíticos fueron identificados como anomalías negativas en contraste con intensas anomalías positivas interpretadas y posteriormente modeladas como intrusivos intermedios.

Aunque el campo magnético predominantemente es inducido y la magnetización remanente no pudo ser medida en campo, se calcularon con la señal analítica las anomalías magnéticas de manera independientes de la remanencia del campo (útil en zonas de bajas latitudes).

El empleo de filtros facilitó la interpretación de la señal reducida al polo permitiendo filtrar tanto pequeñas anomalías como amplificar efectos importantes. Así, la continuación ascendente y descendente del campo magnético delimitaron cabalmente la tendencia regional de los intrusivos de la siguiente manera:

Los resultados de realizar la continuación ascendente 500 m hacia arriba permitió delimitar las estructuras profundas y delimitar de manera regional una gran estructura de un intrusivo (Figura 6.6) en dirección SW.

Al realizar la prolongación de campo 300 m hacia abajo (Figura 6.7) se incrementaron las altas frecuencias. Esto permitió, identificar pequeñas anomalías correlacionadas con estructuras locales y superficiales con una dirección preferencial. Estos resultados permiten inferir que existe un fallamiento y fracturamiento regional en dirección SW-NE.

Con los resultados obtenidos se seleccionaron tres secciones con la finalidad de establecer un modelo geológico-estructural con un ajuste “razonable a la señal magnética. Estos modelos cuantitativos geológicos-estructurales respaldan el efecto geofísico analizado y permiten ofrecer un gran número de soluciones que podrían ajustarse con la señal aeromagnética, sin embargo, el uso de muestras litológicas y el conocimiento permitieron reducir la ambigüedad del modelo. El error de cada perfil al ser un proceso de interpretación de señales cumple el objetivo de proponer un modelo "general", representativo y acorde a los elementos litoestratigráficos de la zona

El modelo A-A' que cruza el área de La Parrilla, y que por razones computacionales y numéricas fue modelado como una gran unidad, independiente constituido por diferentes conductos que podrían haber favorecido las condiciones de formación de yacimientos, tal y como se observa en el área de explotación (Figura 6.10).

El modelo B-B' (Figura 6.11) se modeló con un conjunto de fosas y pilares resultado de la tectónica extensional del área de estudio como lo describe Ferrari et al. (2018) en los domos riolíticos cubiertos por depósitos de ignimbritas. La sección representa una zona geológicamente muy compleja y el modelo presenta un ajuste de 18.9%. Esta sección muestra el intrusivo en la parte profunda, que estratigráficamente pudiera encontrarse formaciones calcáreas, sin embargo, se carece de información de barrenación para confirmarlo.

La sección C-C' cruza en dirección NW-SE (Figura. 6.12) y describe la distribución litológica de la zona sur del área de estudio al mostrar las litologías ignimbríticas y domos riolíticos que afloran en la zona. El intrusivo de composición intermedia que aflora en el área de prospección de la Parrilla manera continua domina a profundidad la zona. Además, en este modelo es posible observar la distribución calculada del intrusivo con profundidad somera en la región del perfil con un aumento de grosor en los 20 km y 30km que podrían indicar el mayor grosor y geometría masiva que tiene en dirección NE hacia la región del distrito minero de La Parrilla . Por su localización, mantiene un control geológico de la zona debido a los cruces que tiene con los perfiles A-A' y C-C'.

Por otra parte, el tratamiento de imágenes multiespectrales ASTER, apoyaron parcialmente en el análisis y procesamiento de la información geofísica. El análisis de componentes principales orientados al usar las firmas espectrales de los principales minerales de alteración argílica, mostraron resultados con zonas de posible mayor concentración de minerales arcillosos (Prol-Ledesma & Ruiz-

Armenta, 1995). Asimismo, se presentan zonas de posible alteración en la litología cuaternaria que por efecto de remoción no fueron consideradas.

La ubicación de áreas potencialmente factibles de interés “minero” para considerar realizar estudios de mayor detalle en el mapa de la Figura 7.1 es el resultado de un análisis integral del procesamiento magnético, de teledetección e información geológica, asociados a los lineamientos posiblemente ligados a fracturamiento o fallamiento, la detección de zonas con posibles minerales arcillosos y regiones que presentan cercanía con intrusivos de composición intermedia similar a la que origina la mineralización en el área de La Parrilla.

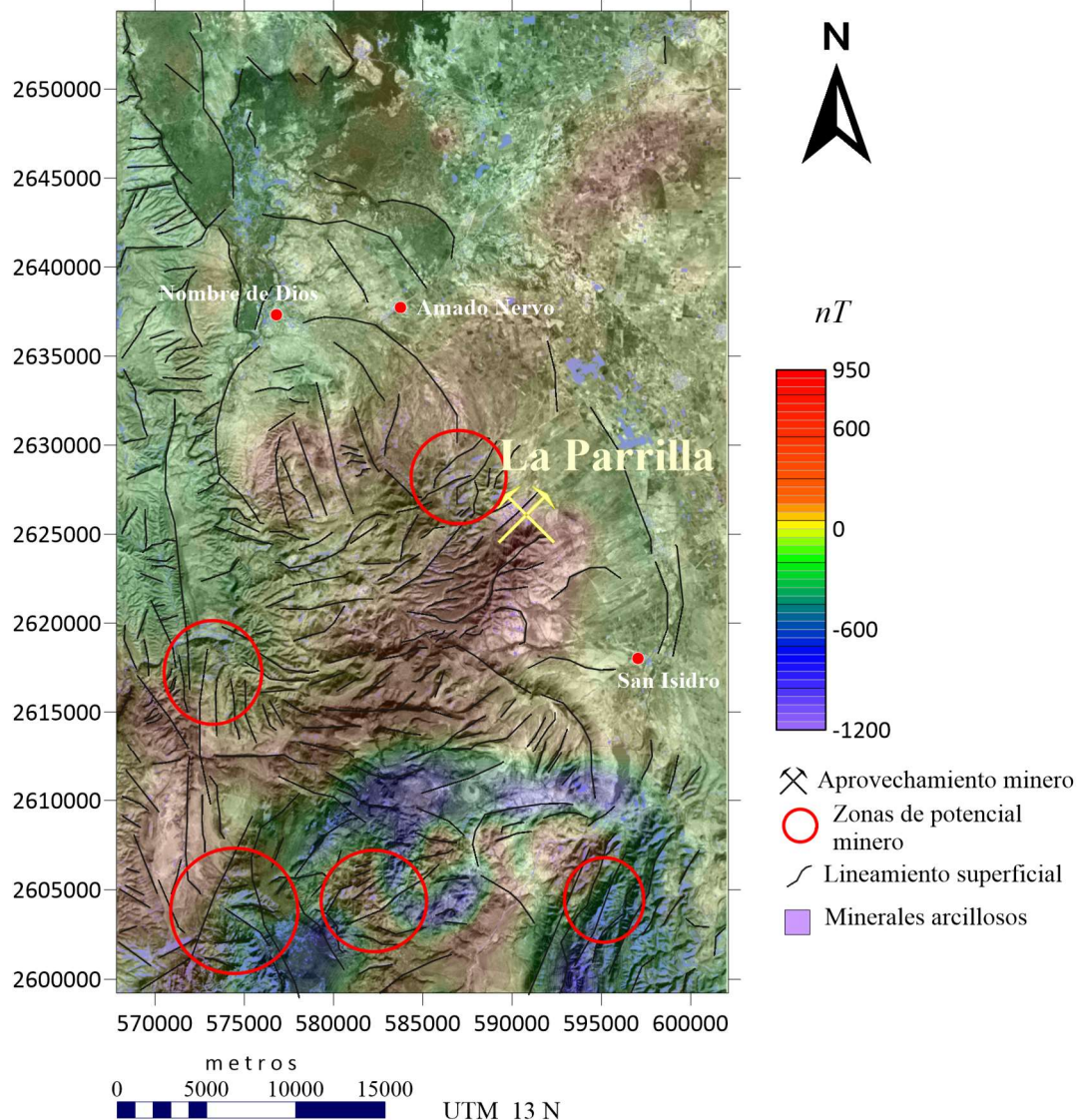


Figura 7.1 Mapa propuesta de áreas de interés que presenta factibilidad para realizar estudios más detallados.

El análisis realizado consideraría que al NW de la región del aprovechamiento minero de La Parilla, siendo la única región donde se observan afloramientos de formaciones calcáreas además de presentar minerales arcillosos y lineamientos asociados a fracturamiento, apoya a la zona como la región óptima para realizar nuevos estudios.

Es posible que estudios a mayor detalle se permita identificar otros elementos asociados a yacimientos, así como el empleo de técnicas y algoritmos computacionales más refinados que permitan la estimación de profundidades de los intrusivos y/o el empleo de información de barrenos.

Al sur del área se merece atención debido a los contrastes magnéticos que infieren y establecen la presencia somera del intrusivo de composición intermedia con gran presencia y extensión en el área de estudio.

Capítulo VIII Conclusiones

El uso de la información aeromagnética aplicado a estudios de exploración minera en conjunto con un buen esquema geológico permitió identificar áreas desconocidas que presentan las características esenciales para ser consideradas como áreas prospectivas, a futuro.

El área de La Parrilla y circundante presenta una geología muy compleja y el muestreo de susceptibilidad magnética realizado en conjunto con el análisis realizado al procesamiento aeromagnético permitió, establecer la presencia de gran número de intrusivos que no afloran.

También se pudo caracterizar la extensión del intrusivo de composición intermedia que exclusivamente aflora en La Parrilla. Los resultados indican que este gran cuerpo subvolcánico se extiende en dirección NE-SW con un espesor de más de un kilómetro .

En los modelos presentes, se decidió considerar a este intrusivo de gran susceptibilidad como una sola unidad pese a que el cálculo de la señal analítica indicaría la presencia de varios conductos que pudiera haber sido el medio de transporte de la mineralización presente.

La señal analítica en la región de La Parrilla permitió identificar que el intrusivo aflorante puede estar constituido por varios cuerpos en superficie en una dirección SW-NE y que a profundidad forman un intrusivo masivo. La sección A-A' modela al cuerpo intrusivo como una gran unidad continua a profundidad.

En la franja sur del área de estudio afloran domos riolíticos asociados a las anomalías de bajas intensidades magnéticas debido a su baja susceptibilidad magnética y aunque no se conoce una contribución directa a la minería su localización permite conocer su geometría y distribución si llegase a haber interés futuro.

El mapa de anomalías magnéticas filtrado con la señal analítica permitió identificar la continuidad del basalto cubierto por depósitos de aluvión hacia la región NE del valle de Amado Nervo. Su localización y dirección de emplazamiento logra crear pauta a exploraciones de interés futuras a detalle del basalto. El tratamiento de percepción remota no muestra áreas con presencia de minerales arcillosos cercano a los basaltos que pudieran estar asociados a alteraciones.

La región NW de La Parrilla y SW del área de estudio, muestran posibles áreas de alteración argílica que propiciarían en un futuro, una guía útil, para la exploración de vetas.

Por tanto, con esta tesis de Maestría se identificaron las anomalías que hayan dado origen a la formación de minerales de origen hidrotermal al establecer la existencia y extensión del intrusivo que aflora en pocos lugares y tiene grandes posibilidades de haber mineralizado regiones de fracturamiento en litologías encajonantes calcáreas. La concordancia entre lineamientos magnéticos a menor escala y los lineamientos superficiales de imágenes satelitales, respaldan la dirección preferencial de fracturamiento SW-NE del área de estudio, infiriendo una formación de intrusivos en esa dirección observados en el mapa de señal analítica, en las regiones centro y centro-sur del área de estudio.

El estudio realizado en esta tesis genera nuevos conocimientos y abre una puerta a trabajos futuros de mayor detalle en las áreas de interés para la exploración de yacimientos minerales en el área. Se recomienda la aplicación de otros algoritmos computacionales, geología de detalle y barrenación. Estos estudios permitirían determinar con menor incertidumbre los límites de las litologías formadoras y encajonantes de los yacimientos minerales teniendo en cuenta el análisis integral geológico, estratigráfico y estructural.

Referencias

- Abrams, M. (2000). The Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER): Data products for the high spatial resolution imager on NASA's Terra platform. *International Journal of Remote Sensing*, 21(5), 847–859. <https://doi.org/10.1080/014311600210326>
- Aranda-Gómez, J. J., Luhr, J., & Henry, C. (2000). Evolución tectonomagmática post-paleocénica de la Sierra Madre Occidental y de la porción meridional de la provincia tectónica de Cuencas y Sierras, México. *Boletín de La Sociedad Geológica Mexicana*, 53, 59–71.
- Armenta, R. (2001). Carta Geológica Nombre de Dios F13-B13. *Carta Geológico Minera, SGM*, 1.
- Baranov, V. (1957). A New Method for Interpretation of Aeromagnetic Maps: Pseudo-Gravimetric Anomalies. *Geophysics*, 22(2), 359–382. <https://doi.org/10.1190/1.1438369>
- Baranov, V., & Naudy, H. (1964). Numerical calculation of the formula of reduction to the magnetic pole. *Geophysics*, 29(1), 67–79. <https://doi.org/10.1190/1.1439334>
- Barboza-Gudiño, J. R., Hoppe, M., Gómez-Anguiano, M., & Martínez-Macías, P. R. (2004). Aportaciones para la interpretación estratigráfica y estructural de la porción noroccidental de la Sierra de Catorce, San Luis Potosí, México. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 21(3), 299–319.
- Bhattacharyya, B. K. (1965). Two-dimensional harmonic analysis as a tool for magnetic interpretation. *GEOPHYSICS*, 30(5), 829–857. <https://doi.org/10.1190/1.1439658>
- Blakely, R. J. (1996). *Potential Theory in Gravity and Magnetic Applications*. Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511549816.004>
- Browne, P. R. L. (1978). Hydrothermal alteration in active geothermal fields. *Annual Reviews in Earth and Planetary Sciences*, 6, 229–250.
- Butler, R. L. (1992). Ferromagnetic minerals. *Paleomagnetism: Magnetic Domains to Geologic Terranes*, 1(c), 16–30. <http://www.geo.arizona.edu/Paleomag/book/>
- Campbell, W. H. (2001). *Earth Magnetism: A Guided Tour Through Magnetic Fields*. http://books.google.ie/books/about/Earth_Magnetism.html?id=LtdzsDN5BcC&pgis=1
- Camprubí, A., González-partida, E., Levresse, G., & Tritlla, J. (2003). Depósitos epitermales de alta y baja sulfuración : una tabla comparativa. *Boletín de La Sociedad Geologica Mexicana*, LVI(1987), 10–18.
- Corbett, G., & Terry, L. (1997). *Gold-copper systems : Structure , Alteration , and Mineralization*
- Dentith, M., Targeting, E., Union, A. G., Society, A., Geophysicists, E., Geophysicists, E., Society, G., & Mudge, S. (2014). *Geophysics for the Mineral Exploration Geoscientist*.

- Dunlop, D., & Özdemir, Ö. (2007). Magnetizations in Rocks and Minerals. In *Treatise on Geophysics* (Volume 5, pp. 277–336). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-044452748-6.00093-6>
- Elachi, C., & Zimmerman, P. (1988). Introduction to the Physics and Techniques of Remote Sensing. *Physics Today*, 41(11), 126–126. <https://doi.org/10.1063/1.2811643>
- Elsaid, M., Aboelkhair, H., Dardier, A., Hermas, E., & Minoru, U. (2014). Processing of Multispectral ASTER Data for Mapping Alteration Minerals Zones: As an Aid for Uranium Exploration in Elmissikat-Eleridiya Granites, Central Eastern Desert, Egypt. *The Open Geology Journal*, 8(1), 69–83. <https://doi.org/10.2174/1874262901408010069>
- Evans, A. (1993). *Ore Geology and industrial minerals: An introduction* (Vol. 9, Issue 3). [https://doi.org/10.1016/0169-1368\(94\)90015-9](https://doi.org/10.1016/0169-1368(94)90015-9)
- Fatima, K., Khan, M., Kausar, A., Toqeer, M., Haider, N., & Rehman, A. (2017). Minerals identification and mapping using ASTER satellite image. *Journal of Applied Remote Sensing*, 11(04), 1. <https://doi.org/10.1117/1.jrs.11.046006>
- Ferrari, L., Orozco-Esquivel, T., Bryan, S. E., López-Martínez, M., & Silva-Fragoso, A. (2018). Cenozoic magmatism and extension in western Mexico: Linking the Sierra Madre Occidental silicic large igneous province and the Comondú Group with the Gulf of California rift. *Earth-Science Reviews*, 183(April 2017), 115–152. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2017.04.006>
- Ferrari, L., Valencia-Moreno, M., & Bryan, S. (2005). Magmatismo y tectónica en la Sierra Madre Occidental y su relación con la evolución de la margen occidental de Norteamérica. *Boletín de La Sociedad Geológica Mexicana*, 57(3), 343–378. <https://doi.org/10.18268/bsgm2005v57n3a5>
- Gandhi, S. M., & Sarkar, B. C. (2016). Essentials of Mineral Exploration and Evaluation. In *Essentials of Mineral Exploration and Evaluation*. <https://doi.org/10.1016/c2015-0-04648-2>
- García, K. A. (2019). *Establecimiento de guías de exploración de estructuras del skarn La Parrilla, Durango, a través del estudio geológico de los cuerpos mineralizados vacas y quebradillas*. Universidad Nacional Autónoma de México.
- Glaßmeier, K.-H., Soffel, H., & Negendank, J. (2009). The Geomagnetic Field. In *Geomagnetic Field Variations* (pp. 1–23). Springer Berlin Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-540-76939-2_1
- Grant, F. (1985). Aeromagnetism, geology and ore environments, I. Magnetite in igneous, sedimentary and metamorphic rocks: An overview. *Geoexploration*, 23(3), 303–333. [https://doi.org/10.1016/0016-7142\(85\)90001-8](https://doi.org/10.1016/0016-7142(85)90001-8)
- Haldar, S. (2018). Mineral Exploration. In S. K. Haldar (Ed.), *Mineral Exploration* (second, Vol. 23, Issue 4). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-814022-2.00001-0>
- Hoschke, T., & Sexton, M. (2005). Geophysical exploration for epithermal gold deposits at Pajingo, North Queensland, Australia. *Exploration Geophysics*, 36(4), 401–406. <https://doi.org/10.1071/EG05401>
- Isles, D., & Rankin, L. (2013). Geological Interpretation of Aeromagnetic Data. In *Geological Interpretation of Aeromagnetic Data*. <https://doi.org/10.1190/1.9781560803218>

- Kearey, P., Brooks, M., & Hill, I. (2013). *An Introduction to Geophysical Exploration*. Wiley.
<https://books.google.com.mx/books?id=hcWKltTxdC8C>
- Kim, E. J., Shin, D., Shin, S., Nam, H. T., & Park, S. (2015). Skarn zonation and rock physical properties of the Wondong Fe-Pb-Zn polymetallic deposit, Korea. *Geosciences Journal*, 19(4), 587–598. <https://doi.org/10.1007/s12303-015-0017-2>
- Kirkham, R. V., & Sinclair, W. D. (1995). *Porphyry copper, gold, molybdenum, tungsten, tin, silver* (Issue November). <https://doi.org/10.4095/208014>
- Kravchinsky, V., Hnatyshin, D., Lysak, B., & Alemie, W. (2019). Computation of Magnetic Anomalies Caused by Two-Dimensional Structures of Arbitrary Shape: Derivation and Matlab Implementation. *Geophysical Research Letters*, 46(13), 7345–7351.
<https://doi.org/10.1029/2019GL082767>
- Kuzvart, M., & Böhmer, M. (1986). *Prospecting and Exploration of Mineral Deposits* (M. Vanecek (ed.)). Elsevier.
- Lanza, R., & Meloni, A. (2002). The Earth's Magnetism. In *Mycological Research* (Vol. 106, Issue 11).
- Lillesand, T. M., & Kiefer, R. W. (1979). Remote sensing and image interpretation. In *Remote sensing and image interpretation*. <https://doi.org/10.2307/634969>
- Lopéz, V. M. (1994). *Manual para la selección de métodos de explotación de minas* (p. 126).
- Lowell, J. D., & Guilbert, J. M. (1970). Lateral and vertical alteration-mineralization zoning in porphyry ore deposits. *Economic Geology*, 65(4), 373–408.
<https://doi.org/10.2113/gsecongeo.65.4.373>
- Lowrie, W. (2007). *Fundamentals of Geophysics* (2nd Editio, Vol. 91). Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511807107>
- Meinert, D. L., Dipple, G., & Nicolescu, S. (2005). World Skarn Deposits. *Economic Geology*, 100th A., 299–336.
- Misra, K. C. (2000). *Understanding Mineral Deposits*. Springer Netherlands.
<https://doi.org/10.1007/978-94-011-3925-0>
- Moon, C., Whateley, Mi., & Evans, A. (2006). *Introduction to Mineral Exploration*. (M. Charles J., M. K.G, & W. M (eds.); second). Blackwell Publishing.
<https://doi.org/10.2113/gsecongeo.102.1.161>
- Moore, G. K., & Waltz, F. A. (1983). Objective procedures for lineament enhancement and extraction. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 49(5), 641–647.
- Muñoz, J. (1986). La minería en México. Bosquejo histórico. *Quinto Centenario*, 11, 145–156.
<https://revistas.ucm.es/index.php/QUCE/article/viewFile/QUCE8686220145A/1787>
- Nabighian, M. N., Ander, M. E., Grauch, V. J. S., Hansen, R. O., LaFehr, T. R., Li, Y., Pearson, W. C., Peirce, J. W., Phillips, J. D., & Ruder, M. E. (2005). Historical development of the gravity method in exploration. *Geophysics*, 70(6), 63ND-89ND.
<https://doi.org/10.1190/1.2133785>
- Nava Flores, M. (2010). *nava flors.pdf*. Universidad Nacional Autónoma de México.
- Nettleton, L. L. (1940). *Gravity and Magnetism in Oil Prospecting*. University Microfilms.
<https://books.google.com.mx/books?id=CVrTAAAACAAJ>

- Parasnis, D. S. (1962). Principles of applied geophysics. In *Gff* (Vol. 84, Issue 4).
<https://doi.org/10.1080/11035896209447317>
- Peters, W. (1978). Exploration and mining geology. In *Department of Mining and Geological Engineering* (2nd ed., Issue 4). Wiley, 1987. [https://doi.org/10.1016/0012-8252\(80\)90118-x](https://doi.org/10.1016/0012-8252(80)90118-x)
- Pirajno, F. (1992). *Hydrothermal Mineral Deposits Principles and Fundamental Concepts for the Exploration Geologist*. Springer-Verlag. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-75671-9>
- Prol-Ledesma, R., & Ruiz-Armenta, J. (1995). Técnicas de procesamiento de imágenes en la exploración de yacimientos minerales de origen hidrotermal. *Física de La Tierra*, 7, 105–138. https://doi.org/10.5209/rev_FITE.1995.n7.13141
- Rajagopalan, S. (2003). Analytic Signal vs. Reduction to Pole: Solutions for Low Magnetic Latitudes. *ASEG Extended Abstracts*, 2003(2), 1–4.
<https://doi.org/10.1071/aseg2003ab136>
- Reeves, C. (2005). Aeromagnetic Surveys. In *Earthworks* (pp. 1–155).
<https://doi.org/10.1007/BF01465543>
- Resler, L. M. (2002). Remote Sensing and Image Analysis. In *Geomorphology* (Vol. 46, Issues 1–2). [https://doi.org/10.1016/S0169-555X\(01\)00164-7](https://doi.org/10.1016/S0169-555X(01)00164-7)
- Robb, L. (2005). *Introduction to Ore-Forming Processes*. Blackwell Publishing.
- Roest, W. R., & Pilkington, M. (1993). Identifying remanent magnetization effects in magnetic data. *Geophysics*, 58(5), 653–659. <https://doi.org/10.1190/1.1443449>
- Roest, W. R., Verhoef, J., & Pilkington, M. (1992). Magnetic interpretation using the 3-D analytic signal. *Geophysics*, 57(1), 116–125. <https://doi.org/10.1190/1.1443174>
- Schowengerdt, R. A. (2012). Remote sensing: Models and methods for image processing: Second edition. In *Remote Sensing: Models and Methods for Image Processing: Second Edition*. <https://doi.org/10.1016/C2009-0-21902-7>
- SE, S. de. (2016). Etapas del proceso productivo para la pequeña Minería. In *Departamento de Orientación de la Inversión Minera y de Alianzas Estratégicas*.
- Servicio Geológico Mexicano. (2019). *Anuario Estadístico de la Minería Mexicana 2018*.
- Servicio Geológico Minero. (2018). *Panorama Minero del Estado de Durango*.
- Sillitoe, R. . (1993). Epithermal models: Genetic types, geometrical controls and shallow features. *Geological Association of Canada., Special pa*, 403–417.
- Sinclair, W. D. (2007). Porphyry Deposits. *Goodfellow, January 2007*, 223-243.
https://doi.org/10.1007/978-94-011-3925-0_8
- Smirnov, V. I. (1982). *Geología de Yacimientos Minerales*. Mir Moscú.
<http://repositorio.unan.edu.ni/2986/1/5624.pdf>
- Stevens, R. (2010). *Mineral exploration and mining essentials*. Pakawau GeoManagement.
- Talwani, M., Worzel, J. L., & Landisman, M. (1959). Rapid gravity computations for two-dimensional bodies with application to the Mendocino submarine fracture zone. *Journal of Geophysical Research*, 64(1), 49–59. <https://doi.org/10.1029/JZ064i001p00049>
- Taylor, S., José, S., Parrilla, D. La, & State, D. (2016). *La Parrilla Silver Mine Technical Report for the La Parrilla Silver*.

- Telford, W., Geldart, L., & Sheriff, R. (1991). Applied geophysics (second edition). In *Cambridge University Press* (Vol. 69, Issues 1–2). [https://doi.org/10.1016/0031-9201\(91\)90163-C](https://doi.org/10.1016/0031-9201(91)90163-C)
- The Canada Centre for Mapping and Earth Observation. (1982). Fundamentals of Remote sensing. In *ITC Journal* (Vols. 1982–1). <https://doi.org/10.1175/amsmonographs-d-16-0015.1>
- Thébault, E., Finlay, C. C., Beggan, C. D., Alken, P., Aubert, J., Barrois, O., Bertrand, F., Bondar, T., Boness, A., Brocco, L., Canet, E., Chambodut, A., Chulliat, A., Coïsson, P., Civet, F., Du, A., Fournier, A., Fratter, I., Gillet, N., ... Zvereva, T. (2015). International geomagnetic reference field: The 12th generation international geomagnetic reference field - The twelfth generation. *Earth, Planets and Space*, 67(1). <https://doi.org/10.1186/s40623-015-0228-9>
- Tristán, L. J., Enriquez, J., & Cruz, M. (2001). Carta Geológica San José de La Parrilla F13-B23. *Carta Geológico-Minera, SGM*, 1.
- Zhang, Q., Zhang, Y. T., Yin, G., & Li, Z. N. (2018). An improved frequency-domain algorithm for stable reduction to the pole at low latitudes. *Journal of Geophysics and Engineering*, 15(4), 1767–1782. <https://doi.org/10.1088/1742-2140/aaa227>
- Zhou, W. (2018). *Aeromagnetic Survey* (pp. 13–18). https://doi.org/10.1007/978-3-319-73568-9_8