

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO



FACULTAD DE INGENIERÍA
DIVISIÓN DE CIENCIAS DE LA TIERRA

*Caracterización de alteraciones y
rasgos estructurales utilizando
Percepción Remota y datos
Aeromagnéticos en Guanajuato: mina
El Cubo*

T E S I S

Para Obtener el Grado de:

Ingeniero Geofísico

Presenta:

Mario Alberto Torres Barrios



Director de Tesis: Dra. Elsa Leticia Flores Márquez
Instituto de Geofísica

Ciudad Universitaria, Cd. Mx. 2018



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.

Índice

RESUMEN.....	3
INTRODUCCIÓN	4
OBJETIVOS	5
JUSTIFICACIÓN	5
1. Capítulo 1. Descripción del Área de Estudio	7
2. Capítulo 2 Geología del Área de Estudio	11
2.1. Estratigrafía	13
2.2. Estructuras Geológicas	17
2.3. Características del Depósito	20
2.2.1. Alteración	22
2.2.2. Mineralización	22
3. Capítulo 3. Percepción Remota	24
3.1. Principio Físico	25
3.2. Firmas Espectrales.....	28
3.3. Dispersión Atmosférica	28
3.4. Refracción.....	29
3.5. Absorción.....	29
3.6. Reflexión	29
3.7. Trasmisión	29
3.8. Reflectancia	30
3.9. Componentes Principales	30
3.10. Satélites Landsat	31
3.10.1. Características de Satélites Landsat 4 y 5.	32
4. Capítulo 4. Exploración Magnética	35
4.1. Corrección por Variación Diurna	39
4.2. Corrección por IGRF.....	40
4.3. Anomalía Magnética	41
4.4. Anomalía Regional y Residual	41
4.5. Reducción al Polo	41
4.6. Amplitud de la Señal Analítica.....	43

4.7.	<i>Deconvolución de Euler</i>	43
5.	<i>Capitulo 5. Procesamiento de Datos</i>	49
5.1.	<i>Percepción Remota</i>	49
5.1.1	<i>Composición en Falso Color</i>	49
5.1.2	<i>Análisis de componentes principales</i>	57
5.2.	<i>Procesamiento de datos Aeromagnéticos</i>	62
5.2.1	<i>Datos Aeromagnéticos</i>	62
5.2.2	<i>Reducción al Polo</i>	62
5.2.3	<i>Separación Regional-Residual</i>	64
5.2.4	<i>Deconvolución de Euler</i>	65
6.	<i>Capitulo 6. Análisis de resultados</i>	72
7.	<i>CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES</i>	80
8.	<i>BIBLIOGRAFÍA</i>	82

Resumen

En esta tesis se analiza el sub-districto minero "El Cubo" en Guanajuato, que pertenece al sistema de vetas de La Sierra. Que está caracterizado por vetas epitermales de baja sulfuración, generalmente de miles de metros de largo, de hasta 400 metros de profundidad y un ancho de aproximadamente 15 metros de grosor con una dirección preferencial NW-SE. Razón por la cual, se considera una zona de alto potencial minero de gran valor económico. En la actualidad, "El Cubo" provee a una planta central de 1,550 toneladas por día para producir concentrado de plata-oro de alta ley provenientes de sus vetas mineralizadas. Aquí se realiza un estudio para la identificación de zonas de alteración por medio de imágenes satelitales, utilizando un análisis de componentes principales. De este se logró discriminar la presencia de óxidos e hidroxilos en la zona. Posteriormente se realizó un análisis de datos aeromagnéticos de los cuales se obtuvieron índices estructurales al aplicar el método de Deconvolución de Euler para datos aeromagnéticos. Los índices resultantes relacionan la profundidad y dirección asociadas a las fallas mineralizadas. Con base a los resultados de ambos estudios se identificaron posibles zonas de potencial minero.

Abstract

We will analyze mining sub-district "The cube" in Guanajuato, which belongs to the system of veins of a saw. This is characterized by grain low sulfuration epithermal, normally thousands of meters long, up to 400 meters and a width of approximately 15 meters of thickness with a preferential direction NW-SE. By which a mining potential of great economic value arises. At present, "The cube" provides a central plant of 1,550 tons per day to produce concentrate their mineralized veins from high-grade silver-gold. It was a study that identified areas of alteration by means of satellite images using a principal component analysis. These it was possible to discriminate the presence of oxides and hydroxyl in the area. Subsequently, an analysis of data aeromagnetic structural indices was obtained from which to make the solution of Euler deconvolution for aeromagnetic data. The resulting indices

relate the depth and address associated with the mineralized faults. Based on the results of studies of potential mining areas were identified.

Introducción

El Cubo es actualmente una de las minas más importantes del Distrito Minero de Guanajuato, localizada a seis kilómetros al sureste de la Ciudad de Guanajuato, en el Estado de Guanajuato. El subdistrito de El Cubo se caracteriza por vetas epitermales de baja sulfuración, normalmente de miles de metros de largo, de hasta 400 metros de profundidad y un rango de hasta 15 metros de grosor.

En la actualidad, El Cubo abarca cuatro operaciones mineras subterráneas que alimentan una planta central de 1,550 toneladas por día para producir concentrado de plata-oro de alta ley, brindando empleo a 600 trabajadores y 150 contratistas. Por lo que, el uso de la magnetometría en El Cubo resulta de gran utilidad, debido a que es una técnica geofísica utilizada en la actualidad en distintos ámbitos desde la exploración minera hasta en aplicaciones ambientales, debido a las facilidades que ésta ofrece en campo y a su capacidad para proveer información detallada de contrastes en propiedades magnéticas en estructuras del subsuelo.

En un principio la prospección magnetométrica se restringía a la exploración minera, aunque ahora se ha convertido en una herramienta clave para la exploración de hidrocarburos, agua subterránea y fuentes geotérmicas, así como en la exploración regional, donde las mediciones magnéticas han aportado valiosa información para el entendimiento del contexto tectónico a través de las anomalías del piso marino. Por esta razón la elegimos para nuestro estudio, ya que nos provee de gran información en la localización de las fallas presentes en el distrito.

Por otra parte, la percepción remota o teledetección, es una herramienta utilizada en distintos ámbitos, desde sus antiguas aplicaciones al espionaje militar hasta sus nuevas aplicaciones en la minería. Debido a las facilidades de cubrir un área muy grande sin la necesidad de estar en la zona nos ayuda a comprender áreas a cuyo acceso resulta complejo. También, debido a la aplicación de distintas herramientas para el procesado de imágenes nos ayuda a identificar zonas con la presencia de

algún tipo de alteración, que son utilizadas para identificar zonas con potencial geotérmico, mineralógico o de impacto ambiental.

En conjunto, la magnetometría y la percepción remota pueden ser una excelente herramienta para identificar distintos materiales, ya que se pueden comparar los resultados obtenidos para identificar la relación entre las fallas y su alteración en superficie. Por lo cual se puede identificar con mayor certeza las zonas en las que se deberá hacer trabajo de campo y posteriormente pruebas de producción en minería.

Objetivo

Caracterizar las alteraciones superficiales y las fallas encontradas en el distrito minero de Guanajuato, por medio del análisis de datos aeromagnéticos y de imágenes satelitales, para la localización de depósitos mineros potenciales en la zona, teniendo como referente, con estos datos, los rasgos de la mina El Cubo.

En cuanto al análisis de datos aeromagnéticos, se aplicará la Deconvolución de Euler para delimitar fallas hasta 400m de profundidad. Respecto a las imágenes satelitales, se determinarán firmas características con los métodos de composiciones en falso color y determinación de componentes principales en imágenes Lansat 5.

Los resultados obtenidos permitirán localizar y delimitar las zonas en donde pueden encontrarse depósitos minerales de interés económico, basados en rasgos similares a los determinados por estos métodos para la mina El Cubo.

Justificación

La elaboración de este trabajo se basa en encontrar rasgos a través de la información de imágenes satelitales y de datos aeromagnéticos, ya que estos métodos no son invasivos, permiten abarcar un área importante y tienen un bajo costo, y permiten un estudio en zonas con difícil acceso o en las cuales la exploración se vea afectada por la seguridad de la zona. Con base en los resultados se obtendrá una relación entre las alteraciones ubicadas en superficie y las fallas detectadas, por lo que se obtendrá más información al conjuntar los métodos.

Por otra parte, al ser métodos de bajo costo comparados con una exploración en sitio, reducen la inversión económica de la exploración y mejoran el resultado de esta, este trabajo contribuye a ubicar las zonas con mayor probabilidad de potencial económico minero. Por supuesto, será necesaria la verificación en campo antes de tomar una decisión.

Capítulo 1. Descripción del área de estudio

El distrito minero de Guanajuato es conocido por tener una larga historia en la minería, ya que este cuenta con una gran variedad de minas que desde sus inicios han sido de gran importancia económica debido a los acontecimientos geológicos ocurridos en la zona, en la cual se pueden visualizar las distintas formaciones que comprenden a este importante distrito minero.

El Cubo es actualmente una de las minas más importantes del Distrito Minero de Guanajuato, localizada a seis kilómetros al sureste de la Ciudad de Guanajuato, en el Estado de Guanajuato. Se tiene acceso a ella por carretera municipal y la infraestructura incluye red eléctrica estatal, mano de obra local, suministros y servicios en la Ciudad de Guanajuato. La propiedad abarca aproximadamente 8,150 hectáreas en el segundo distrito platero de tipo histórico más grande de México.

La historia de las minas que dan origen a esta ciudad comienza en 1548 cuando se empiezan a trabajar los primeros tiros de minas en Rayas y Mellado. Es en éste mismo año cuando a través de la Bocamina de San Ramón, se descubre la famosa veta madre de Guanajuato, que corre a lo largo de los cerros que limitan la cañada guanajuatense por el norte y el noreste, y se convierte en la más importante de Guanajuato durante todo el periodo virreinal.



Figura 1. Mapa de localización del distrito minero de Guanajuato. (tomada de: <https://www.geologyforinvestors.com/review-of-endeavour-silver-drilling-intersects-new-silver-gold-mineralization-near-historic-mine-workings-at-el-cubo-fast-track-mine-development-now-underway/>)

La minería en la propiedad El Cubo ha ocurrido desde el siglo XVII. La estructura de la sierra, que incluye la mina El Cubo y la mina vecina Peregrina (parte del complejo las torres), representa gran parte del oro producido en el distrito de Guanajuato, en el orden de 2 millones onzas de oro y 80 millones onzas de plata. El oro fue originalmente extraído de pozos poco profundos cerca de la veta San

Eusebio, uno de los de las concesiones de El Cubo que más tarde producían cantidades significativas de oro y plata.



Figura 2. Plano de la hacienda de El Cubo 1894.

En los siglos XIX y XX, la minería en el cubo se centró en las vetas del noroeste conocidas como Villalpando, dolores, la loca y la fortuna, y la producción se dividió entre muchos operadores. A comienzos del siglo XX se inició el túnel aventurero de San Felipe para conectar las vetas Pastora-fortuna, Villalpando y la loca. En el momento, los grados y las anchuras de la bonanza fueron encontrados en la veta Villalpando. Estas bonanzas eran de hasta 4 m de ancho y se obtuvieron cerca de 1 kg de plata por tonelada.

La mina El Cubo está ubicado en la parte oriental del distrito minero de Guanajuato, en la parte sureste de la Sierra de Guanajuato, una estructura anticlinal de unos 100 km de largo y 20 km de ancho. El Cubo está situado en el lado noreste de esta estructura donde las texturas típicas de las camas primarias se sumergen de 10° a 20° hacia el norte-noreste. Se sabe que la mineralización económica en el cubo se extiende tanto como 800 m verticalmente de 2650 m a 1850 m de elevación.

En 2016, El Cubo produjo 2.0 millones de onzas de plata y 21,327 onzas de oro, totalizando 3.6 millones de onzas de plata equivalente. La producción de plata y oro estuvieron por encima de los objetivos de la guía debido al alto rendimiento parcialmente compensado por el bajo mineral recuperado.

Las vetas que se forman en espacios relativamente abiertos son los principales objetivos para la minería. Algunos stockworks de diseminaciones débiles son objetivos viables, especialmente si están lo suficientemente cercanas a la superficie y pueden ser extraídos de un cielo abierto. Un corte histórico abierto existe en la veta de Dolores en las inmediaciones del molino de El Tajo.

Hay 41 vetas dentro del área de la mina de El Cubo, que se incluyen en la estimación de recursos minerales. Estas vetas mineralizadas son conocidas desde una altura de 2650 m hasta una altura de 1825 m. Villalpando y las vetas de Dolores han sido minadas activamente desde las primeras etapas de la minería en El Cubo.

Capítulo 2. Geología del Área de Estudio

Para el análisis de resultados, es importante conocer la geología superficial, ya que nos dará la información de cómo se distribuyen los materiales a lo largo del distrito. Con lo visualizado en la Figura 3, se observará la distribución de rocas en la zona, ya que se encuentran rocas sedimentarias, vulcano sedimentarias (rocas volcánicas que se comportan como sedimentaria), ígneas y metamórficas, las cuales se ven afectadas por la diversidad de las fallas que se encuentran en Guanajuato.

La mineralización está directamente relacionada con las fallas, la cual rellena los espacios abiertos en las zonas de fractura o impregnaciones en las partes porosas de pared de la roca. Desde 2009 hasta 2011, se realizó una perforación de prueba que muestra un posible desplazamiento de los cuerpos mineralizados de Dolores, sobre la falla de Capulín.

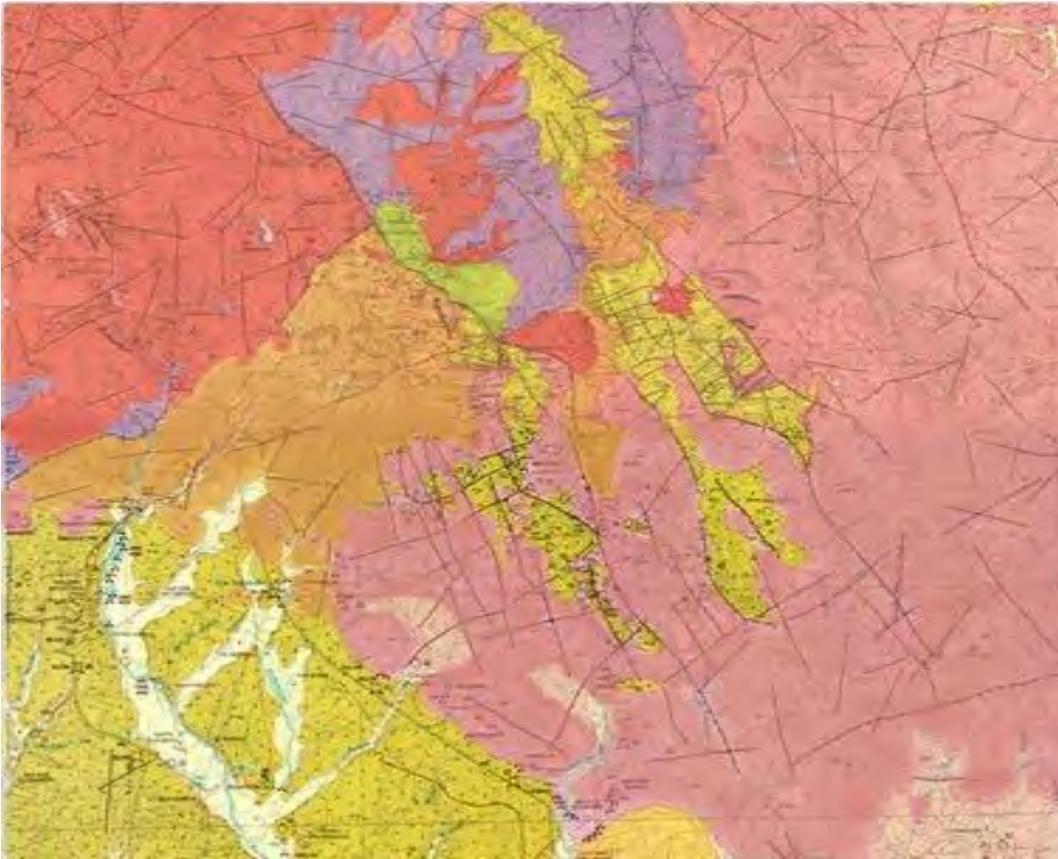
La veta de Dolores fue descubierta en el lado sur de la falla, la mineralización se produce también en la falla de Capulín y en varios agujeros superficiales que probaron parcialmente sus grados.

Las minas están alojadas en tres sistemas de vetas con tendencia NW:

- La Luz
- Veta Madre
- La Sierra.

La totalidad de los materiales alojados en las vetas tiene una ley promedio de 0.1 g/t de Au y 10 g/t de Ag (Gross, 1975), y menos del 20 % del volumen de los minerales puede encontrarse en concentraciones económicas, es decir, con más de 1 g /t de Au y más de 100 g/t de Ag en estructuras de clavos o bolsas de mineral (Mango, 1992).

Las formaciones geológicas asociadas con el distrito de Guanajuato ocurren en el área de la mina de El Cubo, excepto en la formación de la Esperanza y el granito Comanja. Las vetas mineralizadas en El Cubo ocurren en formaciones múltiples y son rocas no específicas. En las rocas huésped, las principales mineralizaciones económicas son los Conglomerados de la formación de Guanajuato y la formación La Bufa.



ROCAS IGNEAS		ROCAS METAMORFICAS		ROCAS SEDIMENTARIAS	
Igia	INTRUSIVA ACIDA	C	CUARCITA	cz	CALIZA
Gr	GRANITO	M	MARMOL	cz-lu	CALIZA-LUTITA
Igii	INTRUSIVA INTERMEDIA	P	PIZARRA	ma	MARGA
D	DIORITA	E	ESQUISTO	lu	LUTITA
Igib	INTRUSIVA BASICA	Gn	GNEIS	lu-ar	LUTITA-ARENISCA
Ga	GABRO			ar	ARENISCA
Igea	EXTRUSIVA ACIDA	SUELOS		abcg	ARENISCA-CONGLOMERADO
R	RIOLITA	re	RESIDUAL	cg	CONGLOMERADO
Igei	EXTRUSIVA INTERMEDIA	al	ALUVIAL	bs	BRECHA
A	ANDESITA	la	LACUSTRE	y	YESO
Igeb	EXTRUSIVA BASICA	pl	PIAMONTE	tr	TRAVERTINO
B	BASALTO	pa	PALUSTRE	ti	TILITA
T	TOBA	li	LITORAL		
Bv	BRECHA VOLCANICA	eo	EOLICO		
V	VITREA	gl	GLACIAL		

Figura 3. Mapa geológico del distrito minero de Guanajuato (tomado de las cartas F14-C43 y F14-C53 de INEGI, 1985).

2.1 Estratigrafía

De acuerdo con los estudios realizados (Ramos-Arroyo 2004), en la zona se pueden identificar las siguientes formaciones geológicas en el distrito minero.

Tonalita Cerro Pelón (Jtcp). Conjunto de rocas masivas cristalinas leucocráticas, cortado por numerosos diques doleríticos. Esta unidad tiene una edad entre el Jurásico Tardío y el Cretácico (Martínez-Reyes, 1992).

Diorita La Palma (Kdlp). Consiste en diversas facies cristalinas de rocas de composición principalmente diorítica, granítica y gabroica, que están cortadas por numerosos diques granofídicos, doleríticos y basálticos; su edad es del Cretácico Temprano (Martínez-Reyes, 1992).

Complejo volcánico-sedimentario Sierra de Guanajuato, CVSG, (Kcsg). Este complejo del Cretácico Temprano agrupa diversas facies volcánicas y sedimentarias marinas que alcanzan aproximadamente 600 m de espesor. Está compuesto por pizarras negras carbonáceas además de calcáreas, interestratificadas con areniscas, caliza y flujos de lava de composición andesítica a basáltica; todos se presentan débilmente metamorfizados a filitas y mármol y alterados por hidrotermalismo. Con el nombre de formación Esperanza, se conoce a un miembro de este complejo que constituye la única unidad compuesta por calizas en la zona.

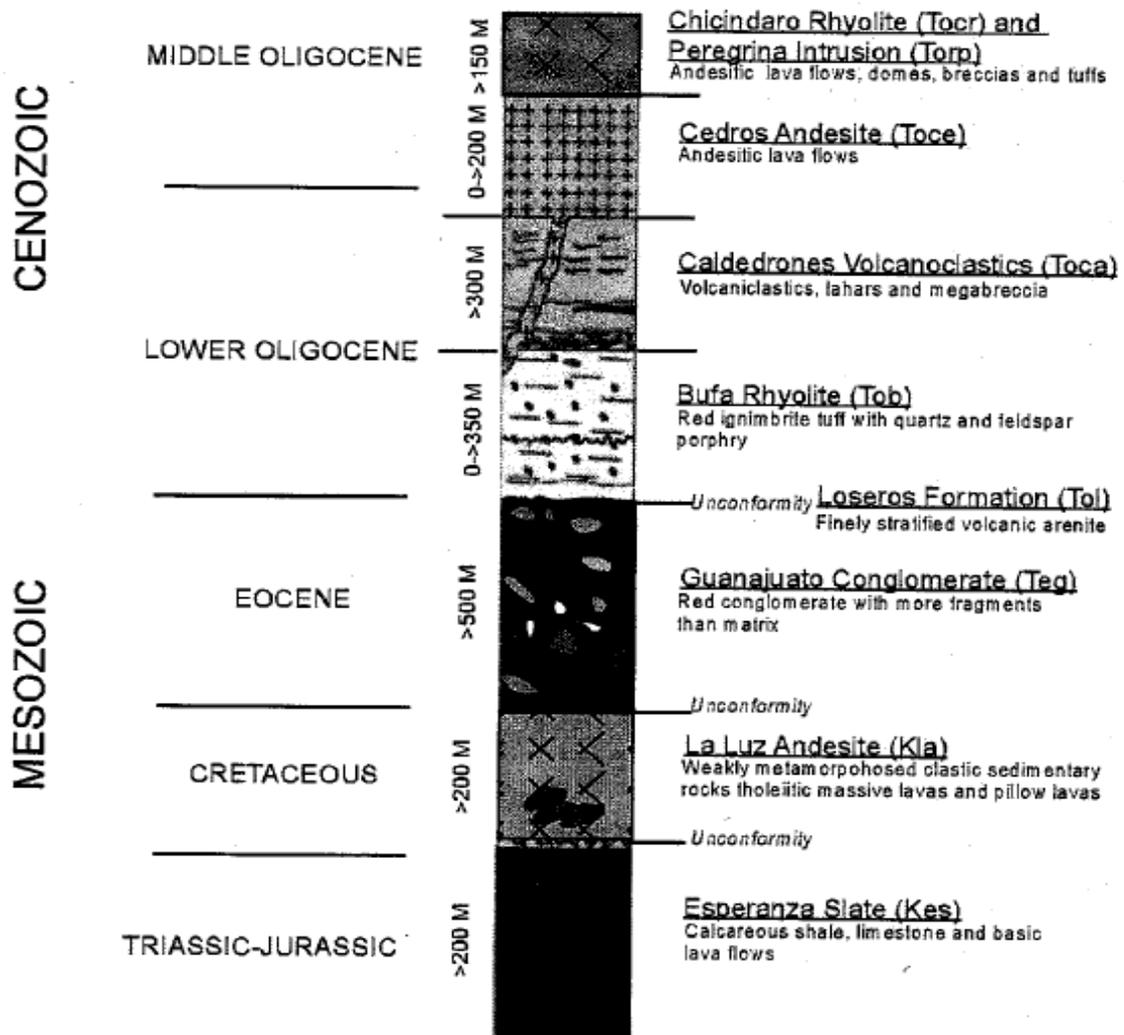


Figura 4. Columna estratigráfica del distrito minero de Guanajuato (Modificado por CIA MINERAL DEL CUBO SA DE C.V., 1999; Randall, Saldana y Clark, 1994).

Conglomerado Guanajuato (Tcgu). Formación de origen continental del Eoceno Medio que descansa discordantemente sobre el CVSG y tiene un grosor mínimo de 1,500 m (Gross, 1975). Consiste en un conglomerado mal clasificado con intercalaciones de areniscas, de estratificación delgada a gruesa; en la base están presentes arenitas volcánicas y lavas andesíticas. Cerca de zonas fracturadas presenta alteración propilítica y color verde por la presencia de clorita (Mango, 1992).

Conjunto volcánico del Terciario (Tv). Se agrupa con esta denominación a una secuencia volcánica del Eoceno tardío-Oligoceno, compuesta por las siguientes unidades:

Formación Loseros (Tol). Arenita volcánica verde cuando está cloritizada o violeta si se encuentra oxidada; de 10 a 52 m de grosor (promedio 30 m), formada en condiciones lacustres (Randall-Roberts *et al.*, 1994).

Riolita La Bufa (Trbu). Flujos piroclásticos de 360 m de espesor y una edad por K–Ar de 37 ± 3 Ma (Gross, 1975). Debido a que esta roca es muy quebradiza, durante el fallamiento y posterior paso de fluidos mineralizantes, se formaron yacimientos tipo *stockwork*, sobre todo en la estructura de la Veta Madre (Mango, 1992).

Arenisca Calderones (Taca). Con 200 a 250 m de grosor, sobreyace discordantemente a la Riolita La Bufa. Se trata de una unidad volcanoclástica verdosa, debido a cloritización, que incluye depósitos de láhar y una megabrecha compuesta de fragmentos de hasta 10 m de diámetro de las rocas mesozoicas y del Conglomerado Guanajuato (Randall-Roberts *et al.*, 1994).

Andesita El Cedro (Tace). Flujos de lava andesítica y tobas de composición dacítica a andesítica. Presenta un espesor de 250 a 640 m (Randall-Roberts *et al.*, 1994).

Riolita Chichindaro (Trch). Secuencia de domos y flujos de lava interestratificados con brechas y tobas volcánicas pobremente clasificadas, se aprecian texturas porfiríticas fluidales. Tiene una edad estimada por K–Ar de 32 ± 1 Ma (Gross, 1975).

En algunas zonas, a esta unidad se le conoce como intrusivo Peregrina (Tmp), inclusive existe en las zonas bajas de las minas de Rayas y Sirena un pórfido de monzonita el cual puede ser la base de esta unidad (Mango, 1992).

Basalto El Cubilete (Qbcu). Representa las últimas manifestaciones volcánicas en la región y consiste de basalto de olivino y andesita de augita con textura traquítica, se aprecia en los cerros El Gigante, el más alto de la región con 2,960m snm, y El Cubilete (Randall-Roberts *et al.*, 1994).

Grava El Capulín (Qgca). Aflora en las partes bajas del Sur del distrito, y está compuesto por material coluvial de arena tobácea y conglomerado (Martínez-Reyes, 1992).

Aluvión del Cuaternario (Qal). Esta unidad, junto con la anterior, conforma estructuras donde se encuentra el acuífero local. La estructura del distrito es muy compleja, encontrándose rocas cretácicas deformadas y metamorfozadas, fallas normales cenozoicas, y una posible caldera relacionada con el volcanismo del Terciario (Randall-Roberts *et al.*, 1994).

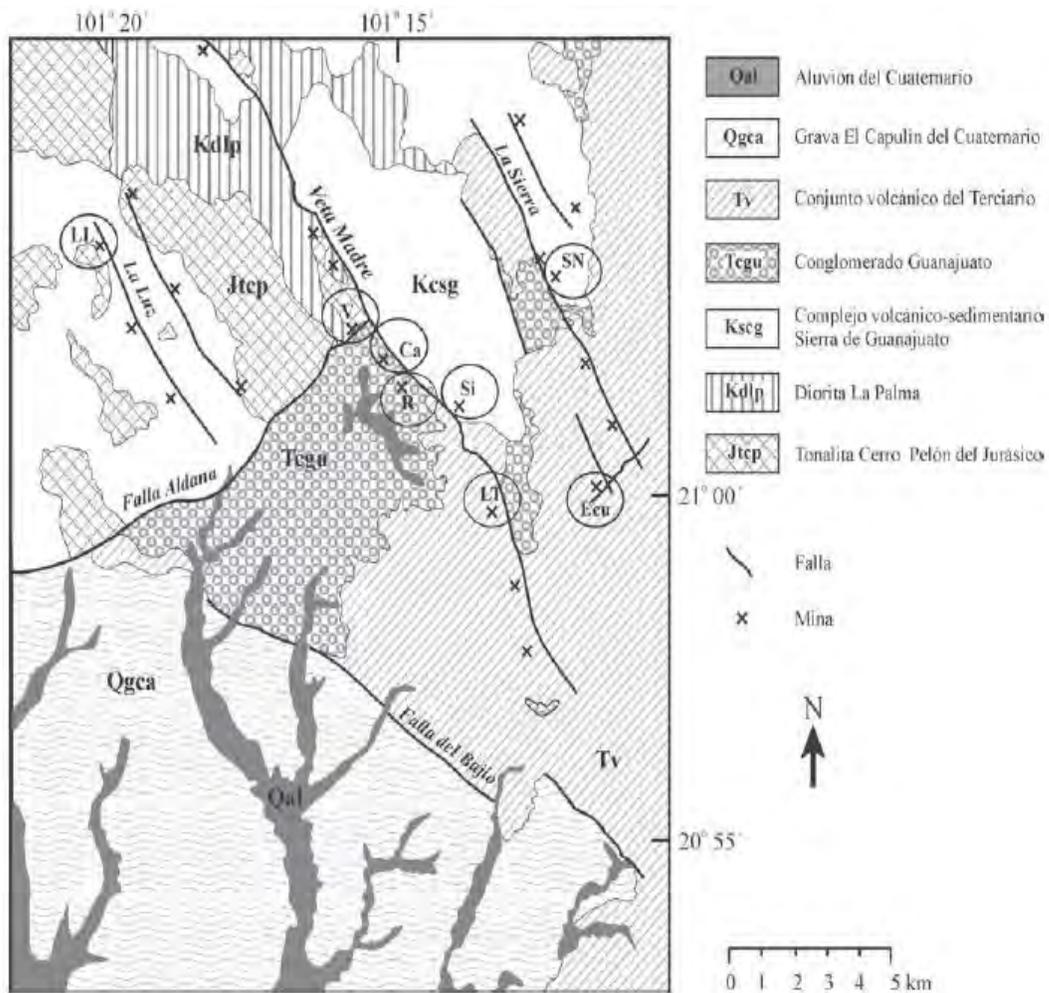


Figura 5. Mapa geológico del Distrito Minero de Guanajuato. Las principales minas del distrito están encerradas en un óvalo: LL: La Luz; V: La Valenciana; Ca: Cata; R: Rayas; Si: Sirena; LT: Las Torres; SN: San Nicolás; Ecu: El Cubo. (Ramos-Arroyo, 2004)

2.2 Estructuras geológicas

La Sierra de Guanajuato está ubicada en la parte noroccidental del estado de Guanajuato, tiene una forma alargada en dirección NW-SE y sus dimensiones aproximadas son 80 km de longitud y 30 de ancho. Se han reconocido en toda la región fallas de tipo normal. Las edades de estas estructuras han sido inferidas con base, fundamentalmente, en la presencia de fallas sepultadas por unidades litoestratigráficas (Nieto-Samaniego, 1990), por ello la edad del fallamiento abarca casi todo el Cenozoico.

Vasallo y colaboradores (Vassallo, 1996) publicaron una investigación sobre las estructuras circulares y lineales del Distrito Minero de Guanajuato, basados en el análisis de imágenes Spot, la descripción de estas estructuras para el graben Guanajuato-Quinteros, se encuentra sintetizada en la figura 6, en donde pueden apreciarse también las deformaciones de la imagen Spot.

El elemento estructural dominante en la Sierra de Guanajuato es la falla del Bajío. Esta es una falla normal con desplazamiento vertical de 500 m en su parte central y de 850 en su porción NW. En la parte sudoriental de este flanco, los bloques que conforman la sierra tengan una orientación NE-SW mostrando un arreglo de bloques hundidos y levantamientos cuyos límites son fallas conocidas, esto permite suponer una extensión con dirección NW-SE en esta parte de la sierra.

En el costado NE de la sierra, se observa un comportamiento lineal en el pie de la elevación, ni existe coincidencia entre los límites de los bloques y los de la sierra, por lo que se dice que no existe una estructura maestra. Esto se puede dividir en tres segmentos:

El segmento SE, que es el más recto, que contiene sus límites como fallas normales. Sus bloques contienen su dimensión mayor casi paralela a la sierra, por lo que su extensión es NE-SW.

El segmento NW presenta un basculamiento hacia NE y N en las ignimbritas que lo cubren (Aranda-Gómez, 1989; Quintero-Legorreta, 1989; Cervantes-Sánchez). Teniendo mayores hundimientos en las partes septentrional y nororiental.

(Gross, 1975), están alineados a lo largo de fracturas y fallas de rumbo predominante NW-SE (Nieto-Samaniego, 1985a).

Se cree que los límites de los bloques muestran un arreglo que se mueve de manera independiente. Se sabe que en las fallas no hubo un desplazamiento importante, por lo que se piensa que el estilo de la deformación era controlado por un sistema donde el esfuerzo compresivo máximo fue vertical. Los bloques que constituyen a la sierra, sufrieron movimientos principalmente verticales en etapas sucesivas a la deformación, de las cuales la sierra adoptó el estilo estructural de fosas y pilares, produciendo movimientos horizontales de ajuste en las fallas, lo que explica la existencia de estrías en las diferentes etapas de la deformación, y que a su vez puede explicar las relaciones de edades complejas que se tienen entre las fallas de la sierra (Nieto-Samaniego, García-Dobarganes Bueno, Aguirre-Maese, 1992).

Como se observa en la Figura 7, la mina de El Cubo se encuentra dentro del sistema de fallas de La Sierra, dentro de este se observan tres direcciones preferenciales:

- En el noroeste y el suroeste: Se encuentran fallas que son las principales estructuras que contienen a las muy importantes vetas: Villalpando, La Loca, Dolores y Pastora Fortuna.
- En la dirección Noreste: Las vetas transversales tienden a tener un mayor contenido de oro en comparación a las otras vetas. Estas vetas normalmente tienen una dirección hacia el sur; El Cubo, La Reina y Marmajas son ejemplos de esta serie. La dirección es comúnmente N85E N75W y se localizan cortando las estructuras del noroeste. Ejemplos de estas vetas, de este a oeste, son Alto de Villalpando, una rama de la veta de Villalpando, San Nicolás y San Eusebio.
- Vetas de norte a sur: Representan el conjunto más joven de fallas y se dirigen hacia el este o el oeste. Estas fallas en su mayoría contienen vetas con cortas longitudes que cortan a la serie transversal. Estas se han enriquecido en oro y plata, especialmente de oro cerca de la ensambladura de los sistemas de dos fallas. La falla de Cebolletas corre de norte a sur y se sumerge al este, y puede hospedar un importante yacimiento rico en oro, especialmente donde corta la veta Villalpando.

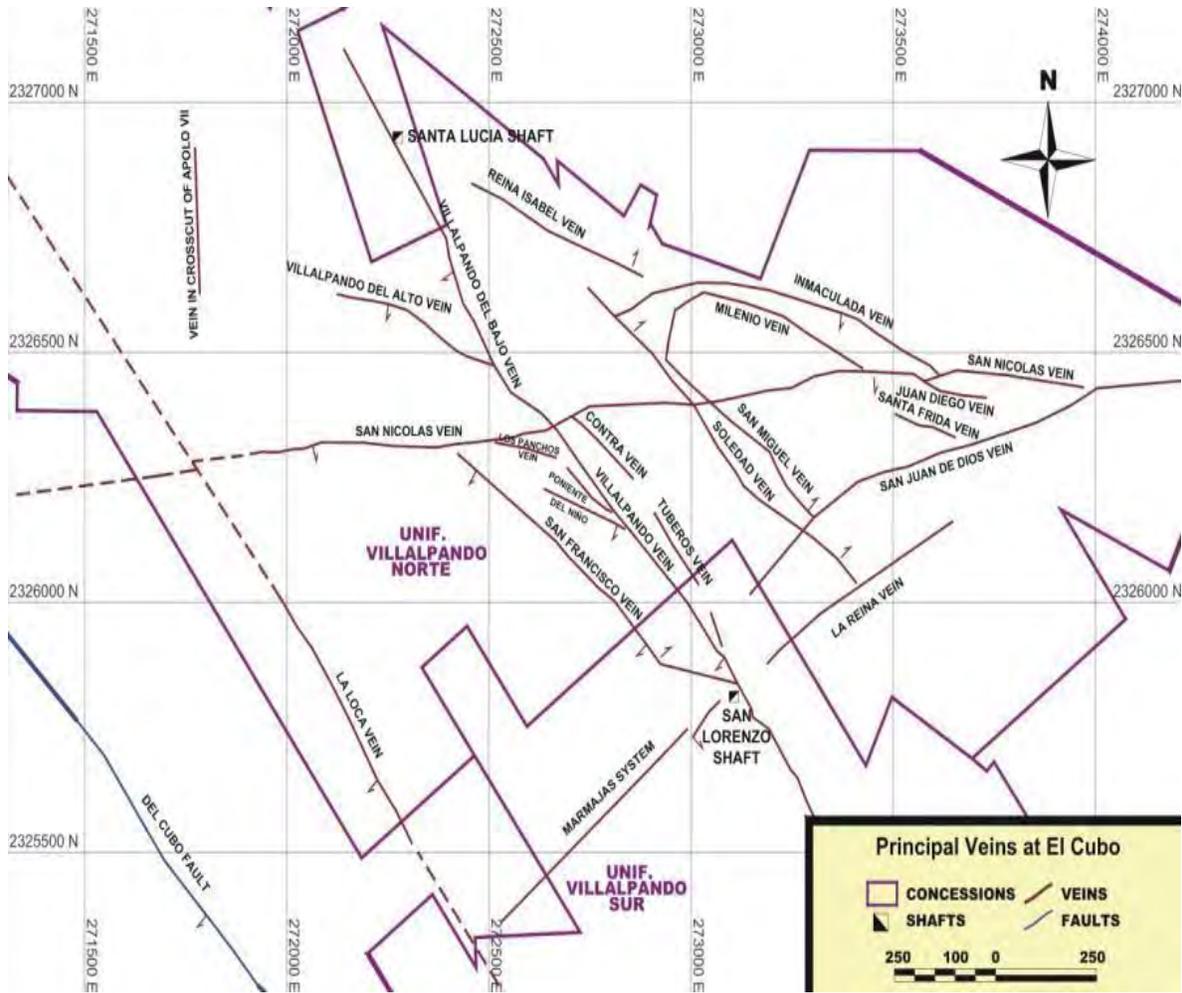


Figura 7. Distribución de fallas localizadas en el distrito de El Cubo.

2.3 Características del Depósito

El distrito minero de Guanajuato se caracteriza por depósitos de vetas epitermales (alto grado de oro y plata), con mineralización de baja sulfuración y alteración de adularia-sericite, con respecto a las rocas huésped volcánicas o sedimentarias y la paragénesis en tenor de la mineralización.

Los depósitos epitermales se forman en sistemas cerca de la superficie, generalmente en asociación con aguas termales y a profundidades del orden de unos cientos de metros. Los procesos hidrotermales son conducidos por el calor remanente de la actividad volcánica.

La circulación de aguas termales se eleva por fisuras que eventualmente llegan a un nivel, donde la presión hidrostática es lo suficientemente baja como para permitir que la ebullición se produzca. Esto puede limitar la extensión vertical de la mineralización, debido a la ebullición y la deposición de minerales, que se limita a un rango relativamente estrecho de condiciones térmicas e hidrostáticas. En muchos casos, se repitió la curación y reapertura del host, lo que se produce en estructuras, impartiendo un movimiento cíclico-vertical de la zona de ebullición y mineralización, que abarca una gama mucho más amplia de elevación.

Como el proceso de mineralización es impulsado por el relleno de espacios vacíos y fisuras, la geometría de la mineralización depende de la permeabilidad y la orientación de las estructuras, ya que tiende a favorecer las zonas dilatadas en áreas donde las fracturas ramifican o cambian de orientación, que pueden ser conducidas, a su vez, por la competencia de la roca de la pared o la dureza relativa de los estratos individuales.

Las vetas epitermales de baja sulfuración en México suelen tener un horizonte mineral sub-horizontal, definidas de unos 300 m a 500 m de extensión vertical, donde brotes de mineral de alto grado han sido depositados por fluidos hidrotermales. Las elevaciones máximas y mínimas de los horizontes mineralizados en la mina El Cubo aún no se han establecido con precisión, pero la historia y actualidad de la producción abarca un rango de elevación desde 1850 m a 2650 m.

Los depósitos de baja sulfuración se forman por la circulación de soluciones hidrotermales que se encuentran cerca de un neutro en el pH, lo que resulta en muy poca alteración ácida con las unidades de roca de host.

Los ensambles de alteración característicos incluyen: illita, agentes y adularia que normalmente se alojan en las vetas o en las rocas de la pared de la veta.

El fluido hidrotermal puede viajar a lo largo de fracturas discretas, creando depósitos de la veta, o bien, puede viajar a través de la litología permeable como flujos de ignimbrita mal soldada, donde puede depositar su carga de metales preciosos de manera diseminada, que en general, se encuentra a cierta distancia de la fuente de calor.

2.3.1 Alteración

Las vetas principales en El Cubo muestran halos con intensa silicificación en la pared de las rocas del sistema de las vetas de San Nicolás.

La mayoría de la riolita de Cubo-Peregrina tiene una anomalía de color, con la superficie gris decolorada a blanco. La presencia de abundantes minerales de la arcilla en los niveles superiores de El Cubo es constante con la alteración debido a la ebullición de ácido sulfato. La tonalidad gris de la alteración de sericite es más típica de halos más profundo. Esta alteración de sericite es especialmente notable en la veta de Villalpando, donde el conglomerado Guanajuato es gris pálido. La alteración gris contrasta con la alteración chlorítica, ya que es más sensible en la andesita donde oscurece. La adularia está presente en las vetas de El Cubo y es más común en el noroeste de las vetas.

2.3.2 Mineralización

Las vetas mineralizadas en El Cubo consisten en la variedad de bandas epitermales y brechoides. La plata se encuentra principalmente en oscuros ricos en sulfuro de bandas dentro de las vetas, con poca mineralización en las paredes de las rocas. Los principales minerales metálicos registrados incluyen pirita, Argentita, electrum y plata rubí, así como algunos galena y Esfalerita, generalmente a mayor profundidad en las vetas. La mineralización se asocia generalmente a alteración filítica (sericite) y alteración de silicificación que forma halos alrededor de las estructuras de la mineralización.

Las vetas ricas en plata, como en Villalpando, contienen cuarzo, adularia, pirita, acanthita, naumannite y oro nativo. La plata nativa está extendida en pequeñas cantidades, ya que gran parte de la plata nativa es supergénica. Las sulfosales de plata (Pyrargyrita y Polybasita) se encuentran comúnmente a profundidad. Las vetas ricas en oro, como San Nicolás, contienen cuarzo, pirita, calcopirita y esfalerita, electrum y aguilarite.

Una zonación mineralógica vertical ocurre en este sistema de vetas. Las plantas superiores son acanthita adularia, pirita, electrum, calcita, cuarzo y los más bajos niveles son calcopirita, galena, esfalerita, adularia, cuarzo y acanthita.

El balance de oro/plata en las vetas más ricas en oro, por lo general oscila entre 1:15 y 1:30. El balance de oro/plata en las ricas vetas de plata por lo general oscila entre 1: 60 1: 150, en ocasiones es mayor. La relación oro/plata de las 41 vetas en recursos y reservas, en general, es 1: 64. La zonificación de metal parece estar relacionado, al menos en partes, a la elevación. Los rangos para cocientes de oro/plata en El Cubo varían de 1:10 a 1:20 en los niveles más altos de la mina, desde 1:40 a 1:50 en los niveles medios de la mina; y 1: 100 a 1: 150 en profundidad. Las vetas son estériles por debajo de una elevación de unos 1800 m.

Con lo mencionado anteriormente, se obtuvo la información necesaria para conocer la geología en el Distrito minero de Guanajuato, con ello sabemos cuáles son las alteraciones que presenta y las fallas estructurales que están localizadas a lo largo de la zona de estudio. Esta información es de gran utilidad, ya que es la base con la que se analizarán los resultados obtenidos en este análisis, con Percepción Remota y con Magnetometría. Por lo tanto, los resultados que se encuentren de forma superficial y los que sean observados a profundidad podrán compararse y se podrá dar una interpretación correcta y coherente que se observa en el distrito minero.

Capítulo 3. Percepción Remota

Volar ha sido uno de los sueños más intensamente anhelados por la humanidad. A pesar de la persistencia, sólo en fechas recientes el hombre ha dispuesto de medios técnicos para hacer realizar este deseo. El ritmo de innovación tecnológica ha sido acelerado, lo que no ha permitido enriquecer notablemente nuestro conocimiento sobre el planeta y sus habitantes.

Es una técnica a través de la cual se obtiene información de un objeto sin tener contacto directo con él, lo cual es posible por la relación sensor-cobertura, la cual, en el caso de los barredores multiespectrales, se expresa a través de la radiación electromagnética.

La historia de la Percepción Remota comenzó hace 600 millones de años, cuando alguna forma inferior de vida animal diferenció algunas de sus células, volviéndolas fotosensibles. También, durante millones de años, dicho rudimento fotosensible evolucionó convirtiéndose en un poderoso y sofisticado sensor, el ojo humano. Este tuvo un imitador mecánico, la cámara fotográfica, que hizo su aparición hace algo más de un siglo y que fue mejorada durante la década de 30s para ser aplicada a la fotografía aérea. La segunda Guerra Mundial dio un gran impulso a la fotografía aérea, así como a otras formas de percepción remota. Sin embargo, el “salto cuántico” en esta disciplina se produjo en la década de 60s cuando las plataformas satelitales reemplazaron las cámaras fotográficas. Los objetos terrestres, iluminados por radiación solar, reflejan ésta luego de introducir modificaciones inducidas por la misma estructura y composición de los objetos. La radiación reflejada es capturada por los sensores del satélite, siendo parcialmente procesada y transmitida a estaciones receptoras terrestres para su posterior procesamiento y análisis.

La teledetección, como también se le conoce, no engloba solo los procesos que permiten obtener una imagen desde el aire o el espacio, sino que también su posterior tratamiento, en el contexto de una determinada aplicación.

Por lo que, se puede definir a la percepción remota como una técnica que permite elaborar levantamientos de altos volúmenes de información de la superficie terrestre, y sirve de apoyo a diversas ciencias para un conocimiento más avanzado de la zona de interés. Tiene como objetivo obtener información de un objeto, área o fenómeno por medio del comportamiento de la energía electromagnética de dicho objeto, área o fenómeno, y son adquiridos mediante sensores que no tienen contacto físico con el objeto (Lillesand y Kiefer, 1994)

Ocupa un lugar notable en la aplicación en distintas actividades agrícolas, de medio ambiente, catastrales, militares, industriales y de ordenamiento territorial; por lo que el interés es amplio para diferentes disciplinas.

3.1 Principio Físico

La propagación de la radiación electromagnética puede ser explicada mediante las ecuaciones de Maxwell en el vacío, las cuales se pueden escribir como:

$$\nabla \cdot E = 0$$

$$\nabla \cdot B = 0$$

$$\nabla \times E + \mu_0 \frac{\partial B}{\partial t} = 0$$

$$\nabla \times B - \varepsilon_0 \frac{\partial E}{\partial t} = 0$$

Donde:

E es el campo eléctrico

B es el campo magnético

μ_0 es la permeabilidad en el vacío ($4\pi \times 10^{-7}$ h/m)

ε_0 es la permitividad en el vacío (8.85×10^{-12} F/m)

La radiación electromagnética se presenta en un eje cartesiano de tres dimensiones. Dos de los ejes representan al campo magnético y eléctrico, y la propagación de las ondas es a través del otro eje que es la distancia. El espectro electromagnético abarca un amplio rango de diferentes longitudes de onda. Con esta representación se puede distinguir las radiaciones por su reflectancia o su longitud de onda.

Las ecuaciones de Maxwell fueron desarrolladas para la propagación de la radiación en el vacío, la información concerniente a la superficie de la Tierra se debe de transportar en un medio a través del vacío. Se requiere que dicha percepción del objetivo se pueda lograr en su ausencia de cualquier tipo de materia que intervenga en el espacio entre la superficie terrestre y el sensor.

Las ecuaciones de Maxwell fueron desarrolladas para la propagación de la radiación en el vacío. Teóricamente, la información concerniente a la superficie de la Tierra se debe de transportar en un medio a través del vacío. Este medio es la energía electromagnética y se requiere que dicha percepción del objeto se pueda lograr en ausencia de cualquier tipo de materia que intervenga en el espacio entre la superficie terrestre y el sensor.

Muy frecuentemente hay alguna materia física entre el objeto (superficie terrestre) y el observador (sensor). Los efectos de esta presencia son los de alterar la velocidad y dirección de propagación y atenuar la información contenida de la radiación debido a la interacción con la materia que se encuentra en su trayecto.

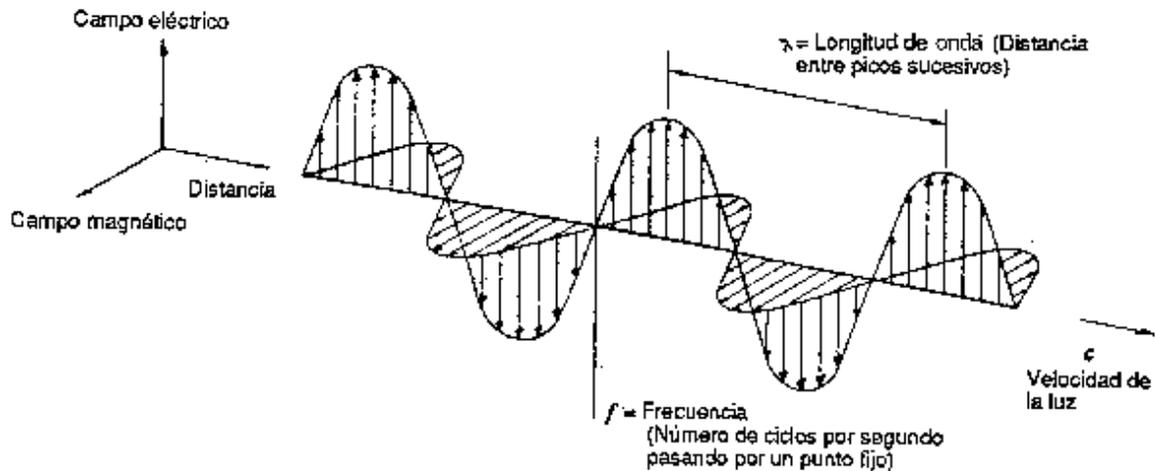


Figura 8. Visualización de la onda electromagnética

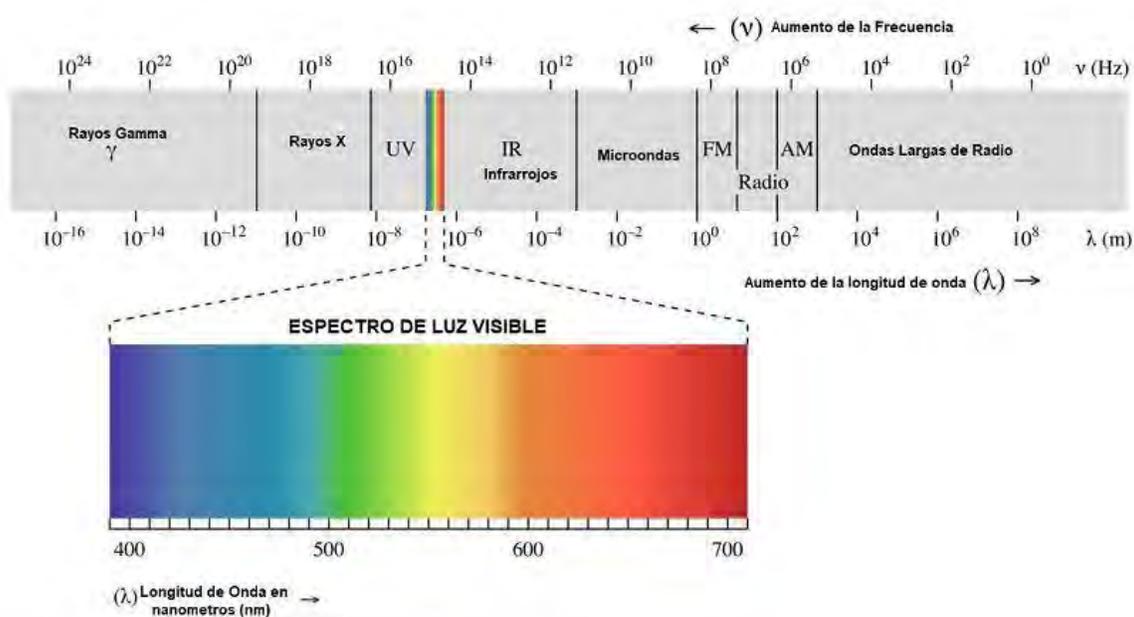


Figura 9. Visualización del espectro electromagnético.

Entonces, la radiación que es emitida por el sol como fuente de energía, entra a la atmósfera una parte es absorbida y otra reflejada. Al pasar por otro medio con diferente densidad varía el ángulo de reflexión y este cambia debido a las diferentes densidades en la atmósfera. Esta energía llega a la superficie terrestre y una parte es absorbida y otra reflejada. La energía que es reflejada vuelve a pasar por otras alteraciones hasta que el sensor en el satélite la capta. Algunos conceptos básicos

que toman en cuenta estas alteraciones entre la radiación y la materia son la reflectividad debida a la interacción de la radiación con una superficie rugosa (r) que es solamente función de la dirección de incidencia. Esta expresa la relación de radiación total, dispersa con la radiación total incidente. La reflectividad es también llamada albedo de la superficie (por espesor en latín) y se relaciona con la emisividad (ϵ) por $r = 1 - \epsilon$. Otro concepto importante es la reflectancia espectral de un objeto, que es la relación de la energía que es reflejada por un cuerpo. En general, se usa el término reflectancia que denota a la capacidad de reflejar bajo ciertas condiciones de ángulo de incidencia pero que no es especificado. Como se explicó, la radiación que proviene del sol debe por lo menos hacer un viaje a través de la atmósfera de la Tierra y esta sufre, además de absorción, difusión. La suma de estas dos formas de pérdida de energía es llamada atenuación. La atenuación se relaciona con la reflectancia de los materiales.

3.2 Firmas Espectrales

En las firmas espectrales se logran visualizar los rasgos terrestres estudiando la radiación reflejada por la superficie. En estas se observa la brillantez de los objetos sobre un rango de longitudes de onda, que incluye el espectro visible y el infrarrojo, con lo cual se logra hacer una comparación de dichos valores. La firma espectral de un material puede ser definida por su reflectancia como función de la longitud de onda medida en la resolución espectral apropiada.

3.3 Dispersión Atmosférica

Los sensores remotos tienen una interacción con la atmósfera, por lo cual, la radiación es afectada por diversos factores físicos como la dispersión, absorción y la refracción.

La dispersión es el fenómeno en el cual se redirecciona la energía electromagnética, cuando ésta choca con una partícula o molécula durante su trayecto. La intensidad de la dispersión atmosférica depende del tamaño de las partículas, su abundancia, la longitud de onda de la radiación y el espesor de la atmósfera que atraviese la energía. La dispersión produce que una parte de la energía incidente regrese al

espacio y que otra parte continúe en dirección hacia la superficie terrestre. Una forma de dispersión muy común es cuando existe la presencia de partículas en la atmosfera de diámetros grandes, esta es conocida como dispersión de Rayleigh.

3.4 Refracción

La refracción es el cambio en la dirección de un rayo cuando éste viaja de un medio a otro. Dicho fenómeno ocurre cuando la luz atraviesa las distintas capas de la atmosfera. El índice de refracción (n) se define como el cociente entre la velocidad de la luz en el vacío y la velocidad de la luz en el medio.

3.5 Absorción

La absorción de radiación ocurre cuando la atmosfera atenúa fuertemente la transmisión de la radiación, esto se produce por el ozono, el dióxido de carbono y el vapor de agua, siendo este último el más eficiente.

3.6 Reflexión

Es un fenómeno que ocurre cuando un rayo de luz impacta con una superficie no transparente y ésta lo redirige. Esta depende de la cantidad de las irregularidades de la superficie en relación con la longitud de onda de la radiación. Cuando la superficie es completamente plana, se produce una reflexión especular, que se refiere a la redirección de toda la radiación incidente en una sola dirección, siendo que el ángulo de incidencia es igual al de reflexión. Cuando se trata de una superficie rugosa, la energía se dispersa aproximadamente igual en todas las direcciones actuado como una reflexión difusa.

3.7 Transmisión

Ocurre cuando la radiación atraviesa una sustancia sin sufrir una atenuación significativa. La transmitancia (t) mide la capacidad de un medio para transmitir energía y varía con la longitud de onda. Esta es la relación entre la radiación transmitida y la radiación incidente.

3.8 Reflectancia

La brillantez de una superficie es mejor representada como reflectancia. La reflectancia (R) se expresa como la brillantez relativa de una superficie medida para un intervalo de longitudes de onda específico. Esta es un número adimensional que varía de 0 a 1, pero generalmente se expresa como porcentaje.

$R = \text{brillantez observada} / \text{irradiancia}$

3.9 Componentes Principales

Esta técnica está diseñada para remover la redundancia de los datos espectrales, basándose en una transformación lineal de un conjunto de correlaciones de datos multiespectrales, con lo cual obtiene otro conjunto de datos no correlacionados con varianzas ordenadas. Como las imágenes multiespectrales están altamente correlacionadas, los DNs no son independientes, por lo que es necesario medir su interacción mutua, con este fin se calcula la covarianza, que es la variación conjunta de las dos variables sobre su medida en común.

Entonces, el objetivo del análisis de componentes principales es rotar los ejes originales, de tal manera que los valores de los ejes X y Y estén proyectados en un nuevo conjunto de ejes X' y Y' . Con esto, la primera componente tiene la mayor cantidad de varianza en los valores de la dispersión, las siguientes componentes son ortogonales y van disminuyendo el valor de dicha varianza. Estas son llamadas componentes principales, que expresan la información contenida en los datos originales que son independientes, no están correlacionadas y sintetizan la máxima variabilidad residual en los datos.

Este análisis de componentes principales es una poderosa herramienta para el análisis de datos multiespectrales, debido a que permite eliminar el ruido y disminuir la redundancia de la información sin una pérdida importante de ella. También pueden ser de gran utilidad debido a que facilitan la interpretación de las imágenes resultantes, ya que estas contienen la mayor parte de la varianza distribuida en cada una de las componentes.

Para trabajar con esta información, es necesario tener claro cuál será el objeto de estudio, ya que cada componente contiene o resalta diferentes valores, por ejemplo, la primera componente principal, que es la que contiene más información, es de gran utilidad para la identificación de la topografía, esto en caso de que se busque alguna información de tipo estructural.

La mayoría de los trabajos de interpretación por medio de componentes principales siguen la metodología implementada por Fraser y por Crosta & Moore (1989). Estas utilizan el concepto de las componentes principales para resaltar los atributos buscados con este análisis. Estos estudios eliminan las bandas que podrían meter ruido, o simplemente las que no contengan información del material que estamos buscando en el estudio. Fraser y colaboradores indican que los radios de la distribución de los datos son más significativos en términos del reflejo de un pixel, ya que para el análisis dan una mejor iluminación de los valores correspondientes, por lo que resulta más fácil observar los valores de óxidos e hidroxilos, que a menudo son enmascarados en las imágenes. En este caso se propone aplicar componentes principales a los cocientes para resaltar los valores con brillantes alta de cada material.

Existen muchas propuestas dependiendo del material, utilizando únicamente los cocientes que contengan una mayor información con los que la hagan contrastar, es decir, el cociente con mayor absorbancia junto con el de mayor reflectancia. Crosta & Moore (1989) propone que la variación del método está basada en la decorrelación entre las bandas para resaltar los rasgos de la vegetación y de minerales o materiales de hierro. Este método es de gran utilidad cuando se requiera resaltar estos atributos en la imagen. De tal manera que, usando sólo las bandas que contengan información de reflectancia y absorbancia de los materiales que se desean resaltar, se obtiene la información deseada y se desprecian las bandas que agregan información no necesaria a las componentes.

3.10 Satélites Landsat

La constelación de satélites LANDSAT (LAND=tierra y SAT=satélite), que inicialmente se llamaron ERTS (Earth Resources Technology Satélites), fue la primera misión de los Estados Unidos para el monitoreo de los recursos terrestres. La forman 8 satélites de los cuales sólo se encuentran activos el 5 y el 8.

Su evolución siempre buscó captar más información de la superficie terrestre, con mayor precisión y detalle, de ahí las mejoras radiométricas, geométricas y espaciales que se incorporaron a los sensores pasivos. El primero, conocido como Multiespectral Scanner Sensor (MSS), el seguido de Thematic Mapper (TM) que tiene mayor sensibilidad radiométrica que su antecesor y, por último, Enhanced Thematic Mapper Plus (ETM+) que entre sus mejoras técnicas destaca una banda espectral (pancromática) con resolución de 15 metros.

La información que se requiere es obtenida por sistemas de percepción remota de tipo pasivo o activo. Los sensores pasivos graban la radiación electromagnética natural que es emitida o reflejada por el objeto de interés como son las cámaras y videograbadoras. Los sensores activos como el radar o el sonar emiten energía electromagnética y graban la radiación que regresa al sensor. Estos sensores remotos almacenan información de forma analógica y/o digital.

3.10.1 Característica de los satélites Landsat 4 y 5

Las características que proveen las bandas del sistema multiespectral de percepción remota Landsat Thematic Mapper (TM) o conocido también como Landsat 4 y 5 el cual pertenece a la segunda generación de una serie de satélites lanzados por la NASA desde 1972 y que cuenta con los sensores MSS (Multi-Spectral Scanner) y TM (Thematic Mapper). La órbita de estos satélites se ubica a una altura de 705 Km, con un ángulo de inclinación con respecto al ecuador de 98.2°, con una envergadura de 185 Km, recorriendo 14.5 órbitas por día y realizando un ciclo en 16 días.

Para el sensor MSS, este sistema capta el espectro electromagnético en un rango de entre 0.5 a 1.1 μm dividiendo en cuatro bandas. Las tres primeras de una longitud

constante de 0.1 μm y la banda 4 de mayor longitud. La luz reflejada por la superficie entra por un telescopio en el cual existen filtros con seis detectores electrónicos cada uno que detectan para los rangos de las diferentes longitudes de onda, generándose las cuatro bandas, de 0.5 a 0.6 verde, de 0.6 a 0.7 rojo, de 0.7 a 0.8 Foto-Infrarrojo y de Infrarrojo cercano. La banda 4 MSS de 0.8 a 1.1 μm es la más ampliamente usada para determinaciones geológicas.

Para TM, este sistema capta un rango el espectro electromagnético en un rango entre 0.45 a 2.35 μm dividiéndolo en siete bandas cuyas características, así como algunas de sus aplicaciones son las siguientes:

Banda 1 de 0.45 a 0.52 μm (azul): Provee aumento en la penetración de cuerpos de agua, sirve para análisis de uso de suelo y características en la vegetación. La longitud de onda corta termina justo abajo del pico de transmitancia del agua clara, mientras que la longitud de onda superior es el límite de la absorción de la clorofila azul para vegetación verde saludable. La longitud de onda cercana a 0.45 μm está sustancialmente influenciada por la absorción y difusión atmosférica.

Banda2 de 0.52 a 0.60 μm (verde): Esta banda abarca la región entre la banda de clorofila del azul y el rojo, y además corresponde a la reflectancia de la vegetación saludable.

Banda 3 de 0.63 a 0.69 μm (rojo): Es la banda de absorción de la clorofila roja de vegetación verde saludable y determina una de las bandas más importantes para discriminar vegetación. También se puede usar para delinear las fronteras entre suelos y contactos geológicos. Esta banda puede exhibir más contrastes que las bandas 1 y 2 porque el efecto de la atenuación atmosférica se reduce.

Banda 4 de 0.76 a 0.90 μm (infrarrojo reflectivo): Es especialmente útil en la caracterización de la cantidad de biomasa presente en el paisaje terrestre. Es utilizada para identificar diferentes tipos de cultivos e identificar tipos de suelos húmedos.

Banda 5 de 1.55 a 1.75 μm (infrarrojo medio): Esta banda es sensible a la cantidad de agua presente en las plantas. La información es utilizada en estudios de cultivos

en ambientes áridos, además es una de las bandas que puede ser usada para discriminar entre nubes, hielo y nieve.

Banda 6 de 10.4 a 12.5 μm (infrarrojo térmico): Mide la cantidad de radiación infrarroja emitida por las superficies. La temperatura aparente es una función de la emisión y de la temperatura cinética o verdadera de la superficie.

Banda 7 de 2.08 a 2.35 μm (infrarrojo lejano): Es una banda importante para la discriminación de formaciones geológicas. Permite la identificación efectiva de rocas alteradas por actividad hidrotermal.

Capítulo 4. Exploración Magnética

La Exploración Magnética se basa en evaluar la desigualdad de distribución de fuerzas magnéticas dentro de la corteza terrestre. Las anomalías magnéticas detectadas a través de estudios magnéticos en el terreno se explican con variaciones en las propiedades físicas de las rocas, como susceptibilidad magnética o la imantación remanente de las rocas. Dichas propiedades sólo existen por debajo de la temperatura de Curie. El científico alemán Georg Hartmann, en 1510, estudió la declinación y en 1544 la inclinación magnética, variables con las coordenadas. En el sistema CGS, su unidad de medida para el campo magnético es en Teslas [T]; para las anomalías estudiadas por la Exploración Magnética, se expresan en nano Teslas [nT].

El campo magnético varía con el tiempo. Sus variaciones más importantes son las siguientes:

- La variación secular de los componentes con un valor aproximado de algunas decenas de [nT] al año, y que en algunos sitios alcanza hasta 150 [nT/año] y de 6 hasta 10 minutos de arco/año para la declinación e inclinación. Esta variación está relacionada con los procesos que dan origen al campo interno.
- Las variaciones periódicas, con períodos de doce horas, un día, veintisiete días, seis meses y un año, originadas por el campo magnético externo, que pueden llegar a tener valores de hasta 100 [nT].
- Las variaciones no periódicas, las referenciadas tormentas magnéticas, con intensidades de hasta 500 [nT], también producidas por efectos externos.
- Las pulsaciones magnéticas o variaciones de periodo muy corto y pequeña amplitud.

Si dos polos de fuerza P_0 y P_1 respectivamente están separados por una distancia r , la fuerza F entre ellos será:

$$\mathbf{F} = \frac{1}{\mu} \frac{P_0 P_1}{r^2}$$

Ecuación 1

Dónde:

F = Fuerza de repulsión cuando los polos tengan la misma polaridad

μ = Permeabilidad que depende del medio en donde los polos están situados

Se define como unidad de intensidad magnética, unidad de polo, la intensidad de dos polos magnéticos que a distancia de 1 *cm* se repelen con la fuerza de una dina.

Un campo magnético existe en un punto, si se ejerce una fuerza producida por una carga en movimiento en dicho punto. La intensidad del campo magnético en un punto se define como la fuerza por unidad de polo que se ejercería cuando un pequeño polo de fuerza P_0 se colocara en dicho punto. Por lo tanto, la intensidad de campo H , debido al polo de fuerza P situado a una distancia r :

$$\mathbf{F} = \frac{F}{P_0} = \frac{P}{\mu r^2}$$

Ecuación 2

El campo geomagnético es de naturaleza vectorial y puede ser referenciado en un sistema de coordenadas. De esta referencia se pueden deducir sus componentes modulares y angulares (figura 10).

El punto de origen en un sistema de coordenadas cartesianas. Las tres componentes del vector F , el campo total son: X en la dirección norte, Y en la dirección este y Z hacia abajo. La inclinación es el ángulo I con respecto a la horizontal. La declinación D es el azimut de la proyección del vector F .

\vec{B} : Vector de campo geomagnético

F : módulo de \vec{B} , conocido como intensidad magnética total.

H : proyección del vector de campo geomagnético en el plano horizontal XY .

Las componentes modulares X , Y , Z y H son proyecciones del vector \vec{B} en las direcciones señaladas. F es el módulo de \vec{B} . Las componentes angulares son:

Declinación (D): es la diferencia angular entre el norte geográfico y el norte magnético.

Inclinación (I): es el ángulo formado por la componente H y el vector \vec{B} .

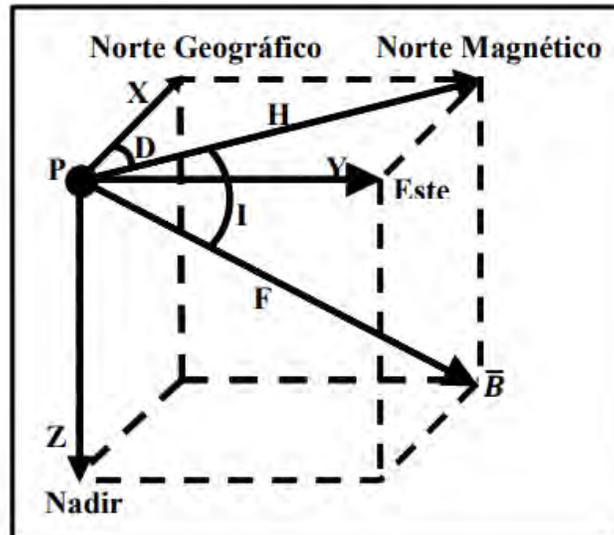


Figura 10. Componentes del vector campo magnético. (Modelado Magnético tridimensional de Estructuras Geológicas aplicado a la Exploración Minera, González de Lucio, 2015).

Para poder describir el campo geomagnético, no importando el sistema de coordenadas que se utilice, se deben de conocer al menos tres de sus siete componentes no coplanares, también, es posible ir de un sistema a otro con ayuda de algunas relaciones trigonométricas, que están basadas en la geometría del vector geomagnético.

Los polos magnéticos no se encuentran libres, siempre se encuentran en dipolos. Se define como momento magnético de un dipolo al vector

$$M = pr$$

Ecuación 3

Los materiales pueden clasificarse magnéticamente según el valor de la susceptibilidad magnética en tres grupos: diamagnetismo, paramagnetismo y ferromagnetismo (Figura 11).

El diamagnetismo es notable, principalmente en los materiales en los cuales el momento de spin y orbitales de los electrones se compensan, dando como resultado un momento magnético nulo. La susceptibilidad magnética de los materiales paramagnéticos depende de la temperatura. A temperatura ambiente y bajo un campo magnético, la polarización del material es relativamente pequeña. La susceptibilidad magnética de los materiales ferromagnéticos es mucho más alta que la de los paramagnéticos y además depende de la historia del material.

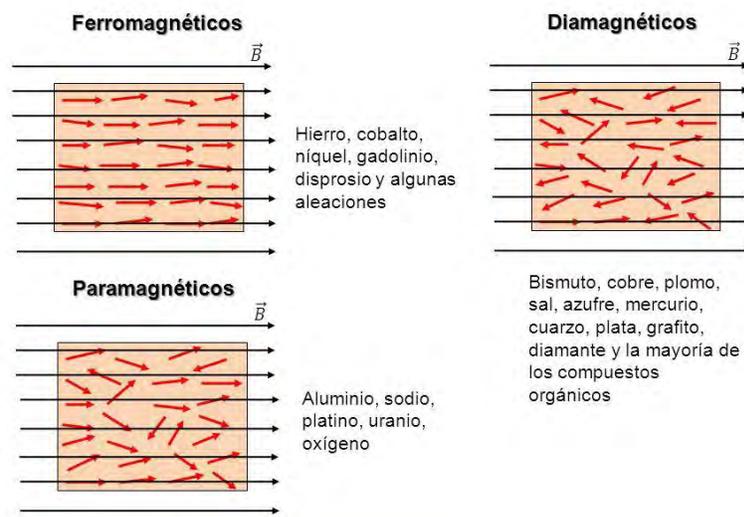


Figura 11. Clasificación de los materiales a partir de la susceptibilidad magnética.

(Sliderplayer, 2018)

La principal fuente de geomagnetismo es de origen interior a la Tierra y constituye un 90% del campo total. A este componente del campo se le conoce como componente Principal. Casi un 10% del campo magnético Terrestre se debe a la

actividad de la magnetósfera y de la ionósfera, muy influenciadas por la actividad solar. Por último, en medida mucho menor contribuye al campo magnético la geología local, denominadas anomalías magnéticas y estas no superan algunas centenas de [nT].

La prospección magnética se basa en el análisis de las anomalías magnéticas, que son aquellas debidas a la distorsión local del campo terrestre que modifica la dirección y magnitud del vector que representa localmente el campo, la presencia de minerales o cuerpos rocosos son los principales factores para hacer variar nuestro valor de campo magnético.

El campo magnético de la Tierra puede describirse de una manera muy simplificada, si consideramos que la Tierra funciona como una enorme barra imantada o como un dipolo magnético, que tiene su eje inclinado unos 11.5° en relación con el eje de rotación terrestre, su centro no coincide con el centro de la Tierra; se deben de considerar tres tipos de polos diferentes:

- Polos geográficos: las intersecciones del eje de rotación de la Tierra con su superficie.
- Polos magnéticos: son los dos puntos de la tierra en los cuales una aguja imantada es vertical. Esta línea es conocida como eje magnético de la Tierra.
- Polos geomagnéticos: son las dos intersecciones con la superficie terrestre de una línea imaginaria que puede ser asimilada al eje magnético de un dipolo definido por un modelo matemático. Por ejemplo, el Campo de Referencia Geomagnética Internacional (IGRF).

4.1 Corrección por Variación Diurna

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

Una manera de eliminar este efecto es obteniendo un modelo matemático lineal a partir de los datos de una estación base o bien de un magnetómetro fijo. El magnetómetro base es colocado en un sitio estratégico, donde las variaciones de campo magnético no se vean afectadas por la susceptibilidad de las rocas sobre las que se encuentra. Debe tomarse una lectura a un intervalo de tiempo determinado, por ejemplo, un minuto o bien cada 30 segundos, etc.

Se calculan las variaciones entre el modelo matemático y los datos de la base, para cada tiempo en que se realizó una medición del levantamiento magnético.

4.2 Corrección por IGRF

La corrección se hace mediante un modelo que aproxima matemáticamente al campo magnético de la Tierra (IGRF por sus siglas en inglés, Campo Geomagnético de Referencia Internacional), el cual expresa al campo geomagnético en término de un gran número de armónicos, e incluye términos temporales para corregir la variación secular.

Matemáticamente, el modelo IGRF consta de los coeficientes de Gauss que definen una expansión del armónico esférico del potencial escalar magnético. Una fácil evaluación del modelo IGRF de cualquier lugar y de cualquier momento está disponible en la página de la NOAA (Administración Nacional Oceánica y Atmosférica) el cual se describe como:

$$V(r, \theta, t) = R \sum_{n=1}^{n_{NOAA}} \left(\frac{R}{r}\right)^{n+1} \sum_{m=0}^n (g_n^m(t) \cos m\lambda + h_n^m(t) \sin m\lambda) P_n^m(\theta) \dots$$

Ecuación 4

Al eliminar la contribución del campo magnético del núcleo la información restante proporciona de manera aproximada la contribución del campo magnético de la corteza.

4.3 Anomalía magnética

Para producir un mapa de anomalía magnética de cierta región, los datos se deben corregir tomando en cuenta la variación diurna y el efecto de la latitud. Como la intensidad del campo geomagnético varía de 25,000 [nT] en el ecuador y 69,000 [nT] en los polos, es importante considerar este incremento con respecto a la latitud en estudios regionales.

La anomalía magnética se puede definir como:

$$\Delta F = F_{obs} - F_{IGRF} - \delta F \quad \text{Ecuación 5}$$

Donde:

F_{obs} Es el valor observado

F_{IGRF} Es el valor del IGRF, Campo Geomagnético de Referencia Internacional

δF Es la corrección por variación diurna.

4.4 Anomalía Regional y Residual

La separación de las anomalías magnéticas en anomalías regionales y anomalías residuales se realiza a través de distintos métodos, como el ajuste polinomial a la tendencia regional que es sustraída a la anomalía, dando como resultado la anomalía residual, y otros de mayor complejidad, como los filtros pasa-bandas a distintas frecuencias (Nabighian, 2005). La anomalía residual realza cuerpos someros que han sido enmascarados por los efectos regionales, en la anomalía magnética.

4.5 Reducción al Polo

Es una parte necesaria en el procesado de datos magnéticos, ya que tiene como objetivo ubicar las anomalías exactamente sobre las fuentes que la producen. El resultado es un conjunto de los datos de intensidad de campo magnético total, eso se hace considerando que es afectado por un vector de intensidad magnética con una inclinación perpendicular al campo. Debe eliminarse el efecto de la inclinación

y la declinación sobre los datos, para lo que se realiza con un vector con una inclinación de 90° y una declinación de 0° , estos resultados son una aproximación al valor real si se contara con los valores verticales. El proceso requiere conocer los valores de inclinación y declinación del campo magnético de la zona donde se tomaron los datos, y adicional la altura a la cual se hizo el levantamiento. El algoritmo asume que la magnetización y el campo regional son uniformes, además de que el vector de magnetización es paralelo al campo magnético de la tierra.

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

Ecuación 6

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

Donde:

I es la inclinación Geomagnética

I_a es la inclinación para la correlación de magnitud $I_a=20$ si $I>0$; $I_a = (-20)$ si $I<0$

D es la declinación Geomagnética

El método transforma anomalías dipolares a monopolares que se encuentran justo en el cuerpo que las origina, esto tiene como resultado la simplificación de los datos.

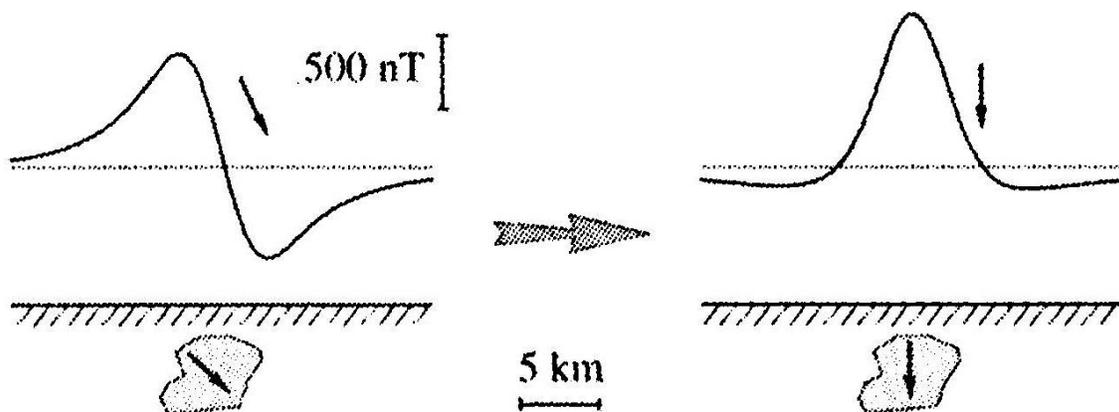


Figura 12. Representación de la reducción al polo.

4.6 Amplitud de la Señal Analítica

Método propuesto por Hsu y colaboradores en 1996, que ayuda a situar con mayor precisión los máximos de amplitud de la señal analítica, al mismo tiempo de mejorar la resolución en planta, a través de la disminución de los efectos de interferencia de fuentes.

La amplitud de la señal analítica mejorada de orden “n” se define como:

$$|A_n(x, y)| = \sqrt{\left(\frac{\partial^n}{\partial z^n} f_x\right)^2 + \left(\frac{\partial^n}{\partial z^n} f_y\right)^2 + \left(\frac{\partial^n}{\partial z^n} f_z\right)^2}$$

Ecuación 7

La importancia de la señal analítica radica en que su amplitud es teóricamente independiente, tanto del campo geomagnético como del vector magnetización, presentando una forma aproximada a la de una campana aguda, en la que el máximo se ubica directamente sobre los bordes de los cuerpos causantes de las anomalías, además de ser proporcional a su profundidad de sepultamiento (Nabighian, 1972).

4.7 Deconvolución de Euler

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

algoritmo de inversión tridimensional de donde se obtiene la susceptibilidad magnética y la intensidad y dirección de la magnetización remanente, el algoritmo necesita previa información del modelo y tiene una fuerte dependencia de un modelo inicial.

La deconvolución de Euler es un método propuesto por Thompson en 1982, como una técnica para determinar la posición espacial de fuentes de campo magnético, a partir de mediciones adquiridas sobre un perfil. El método fue extendido a 3D por Reid y colaboradores en 1990. Es un desarrollo numérico, el cual resuelve la relación de homogeneidad de Euler para estimaciones de profundidad basadas en un índice estructural. Las soluciones calculadas se pueden utilizar para la interpretación magnéticas sin la necesidad de tener un modelo geológico previo, tal y como se requiere en procesos no-lineales inversos (Reid, 1990).

Este método se basa en la ecuación de homogeneidad de Euler:

$$\vec{r} \cdot \nabla f = nf$$

Ecuación 8

Considerando una observación de anomalía de un campo potencial, Δf , en el punto P (x, y), situado sobre el plano $z=0$ y una fuente puntual en (x_0, y_0, z_0)

$$\begin{aligned} \vec{r} \cdot \nabla \Delta f &= n \Delta f \\ [(x - x_0)\hat{i} + (y - y_0)\hat{j} + (z - z_0)\hat{k}] \cdot \left(\frac{\partial \Delta f}{\partial x} \hat{i} + \frac{\partial \Delta f}{\partial y} \hat{j} + \frac{\partial \Delta f}{\partial z} \hat{k} \right) &= -N \Delta f \\ (x - x_0) \frac{\partial \Delta f}{\partial x} + (y - y_0) \frac{\partial \Delta f}{\partial y} + (-z_0) \frac{\partial \Delta f}{\partial z} &= -N \Delta f \end{aligned}$$

Ecuación 9

Donde x_0, y_0, z_0 son las incógnitas.

Seleccionando al menos cuatro puntos de observación, se puede resolver la ecuación de homogeneidad de Euler, pero:

- Las anomalías raramente se deben a fuentes puntuales.
- Las anomalías difícilmente se presentan en forma aislada. Pueden existir fuentes cercanas, cuyos efectos interfieren con las anomalías de interés.

El problema de interferencia se minimiza considerando que los datos de anomalía observada, Δf , están perturbados por un campo B, llamado campo ambiental, cuya amplitud es desconocida pero constante dentro de una ventana de lecturas:

$$f(x, y) = \Delta f(x, y) + B$$

Ecuación 10

Sustituyendo en la ecuación de homogeneidad desarrollada:

$$\begin{aligned} (x - x_0) \frac{\partial}{\partial x} f(x, y) + (y - y_0) \frac{\partial}{\partial y} f(x, y) + (-z_0) \frac{\partial}{\partial z} f(x, y) \\ = -N[f(x, y) - B] \end{aligned}$$

Ecuación 11

Cabe mencionar que el índice estructural es un indicador del grado con el que cambia el campo magnético según la distancia, e indica el tipo de fuente que representa mejor a la anomalía (**¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**).

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

N , similar a $-n$. Este índice puede verse como un indicador del grado con el que cambia un campo potencial según la distancia. Se le conoce a N como índice estructural, SI por sus siglas en inglés, e indica el tipo de fuente que representa mejor la anomalía. Este índice se puede observar en la Tabla 2, la cual muestra la variedad de índices estructuras para las distintas formas.

Tabla 1. Se resume la correspondencia que existe entre los modelos geológicos simples y el índice estructural N que mejor los representa.

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

Aplicando las derivadas y reacomodando términos:

$$x_0 \frac{\partial}{\partial x} + y_0 \frac{\partial}{\partial y} + z_0 \frac{\partial}{\partial z} + NB = x \frac{\partial}{\partial x} + y \frac{\partial}{\partial y} + Nf$$

Ecuación 12

Ahora, al sustituir los valores pertenecientes a la ventana mencionada en esta expresión, y al proponer un valor fijo para N , tendremos el siguiente sistema de ecuaciones:

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial x} & \cdots & N \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial f_v}{\partial x} & \cdots & N \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_0 \\ y_0 \\ z_0 \\ B \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_1 \frac{\partial f_1}{\partial x} + y_1 \frac{\partial f_1}{\partial y} + N f_1 \\ x_2 \frac{\partial f_2}{\partial x} + y_2 \frac{\partial f_2}{\partial y} + N f_2 \\ \vdots \\ x_v \frac{\partial f_v}{\partial x} + y_v \frac{\partial f_v}{\partial y} + N f_v \end{bmatrix}$$

Ecuación 13

Para el análisis del caso en 3D, se parte de la siguiente ecuación.

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

Ecuación 14

Debe tomarse en cuenta el nuevo término introducido, la ecuación queda como:

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

Ecuación 15

En este caso, es necesario calcular en primer lugar las derivadas en las tres direcciones del sistema de coordenadas directamente del tratamiento de los datos levantados en campo. En seguida, seleccionar el tamaño de una ventana con la cual será evaluada la malla para obtener las soluciones esperadas.

El método funciona de la siguiente forma. De la matriz principal se extrae una submatriz cuadrada de "nxn" elementos, los cuales serán evaluados cada uno. Por cada ventana, dentro de dicha matriz, se formará un sistema de ecuaciones del cual se obtendrá una solución, debido a esta razón el tamaño de la ventana deberá ser por lo menos de 3x3, así se obtendrá un sistema de ecuaciones de 9 ecuaciones y 4 incógnitas, un sistema de ecuaciones sobre determinado. Después de la

evaluación, la ventana deberá moverse una celda de la matriz para obtener otro sistema de ecuaciones. Es fácil observar que, en una nueva posición, la ventana presenta un traslape con respecto a la ventana en la posición anterior (Pacheco, 2008).

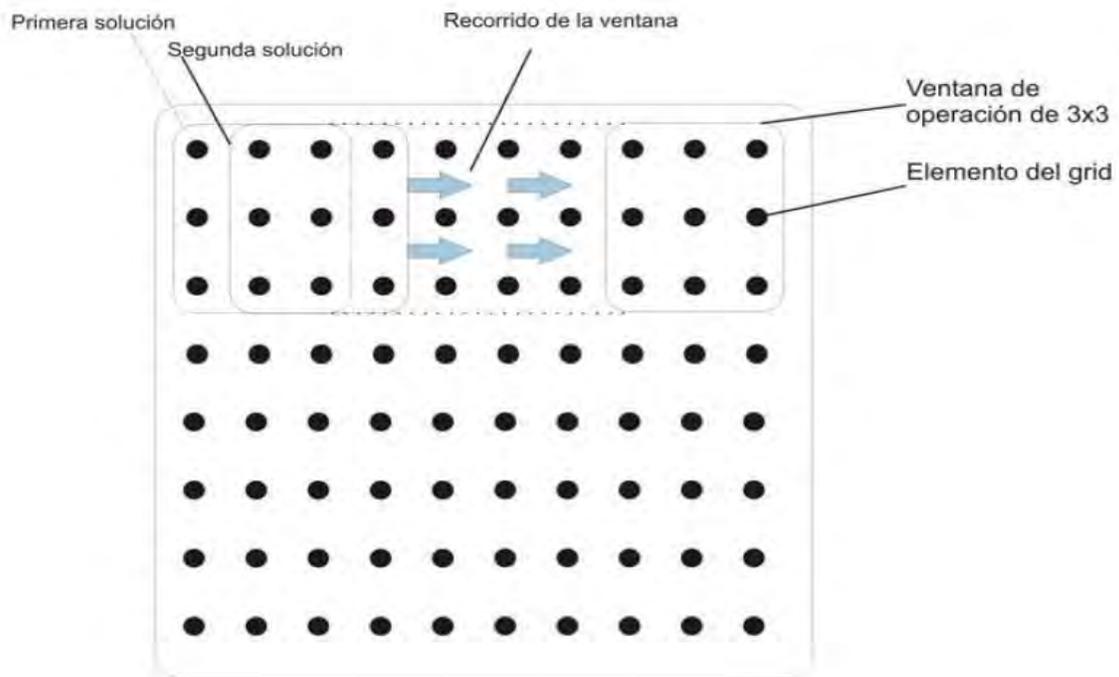


Figura 13. Ventana de operación de 3x3 unidades de matriz. En cada paso se avanza una unidad de la matriz, para generar otro sistema de ecuaciones, así hasta cubrir la matriz completa (Pacheco, 2008).

Capítulo 5. Procesamiento de Datos

En este capítulo se procesaron los datos aeromagnéticos y las imágenes satelitales, para los dos casos se aplicaron diversas técnicas de procesamiento, según las necesidades de los datos buscando encontrar los mejores resultados para una buena interpretación.

5.1 Percepción Remota

El procesamiento de imágenes satelitales se realizó considerando imágenes de tipo Landsat 5 tomadas el 16 de marzo de 1990, con una resolución espacial de 30x30 metros, por lo que las inferencias de tipo geológico que se realizarán serán a mayor escala.

Se buscó identificar elementos que nos den indicios de zonas en las que se pueden encontrar alteraciones que conduzcan a posibles yacimientos minerales. Para lo que se utilizaron diversas técnicas de procesamiento de imágenes. Antes de realizar el procesamiento se corrigieron las imágenes, dentro de este se incluye: el recorte de las imágenes, para solo visualizar la zona de interés, que coincide de la zona estudiada por anomalía magnética, imágenes ajustadas para que los valores del pixel se encuentren de 0 a 250. Las técnicas utilizadas se describen a continuación.

5.1.1 Composición en falso color

La combinación de bandas es una técnica útil y comúnmente usada para la interpretación geológica con imágenes de satélite. En este trabajo se realizaron distintas selecciones de bandas, con base en el conocimiento de las propiedades espectrales de cada banda, y las recomendaciones de trabajos previamente elaborados por distintos autores. Para este caso, utilizamos las bandas con mayor reflectancia y menor absorbancia de materiales que contienen óxidos e hidroxilos, por lo cual estos materiales serán resaltados en cada composición en falso color.

Las características son observadas en las firmas espectrales de cada uno de los materiales previamente mencionados, los cuales se pueden visualizar en las figuras 12, 13 y 14. Estas figuras son un apoyo para realizar el procesamiento y la interpretación de los resultados en la búsqueda de materiales de la zona de estudio.

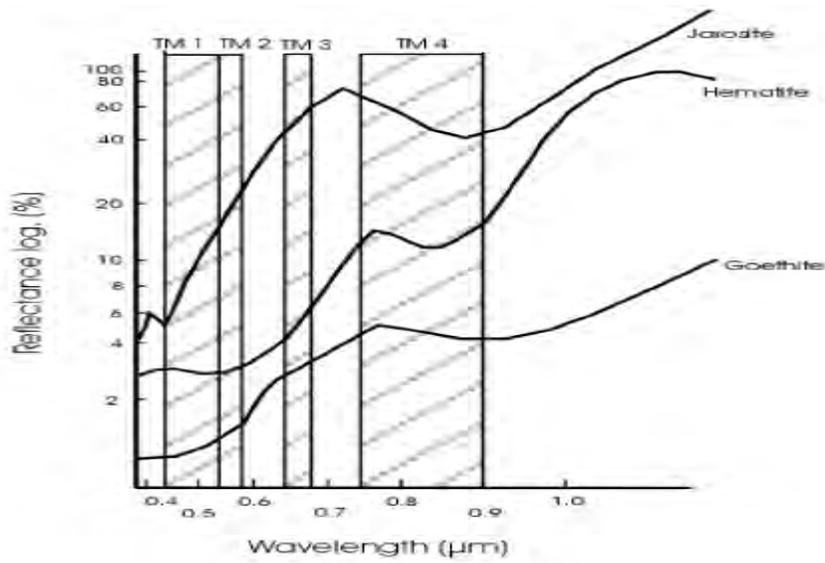


Figura 14. Firmas espectrales de minerales óxidos

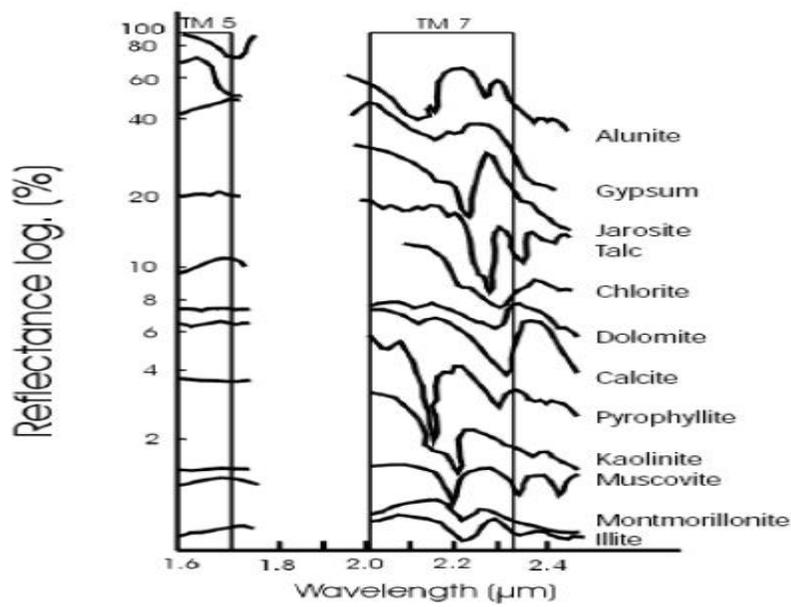


Figura 15. Firmas espectrales de minerales hidroxilos

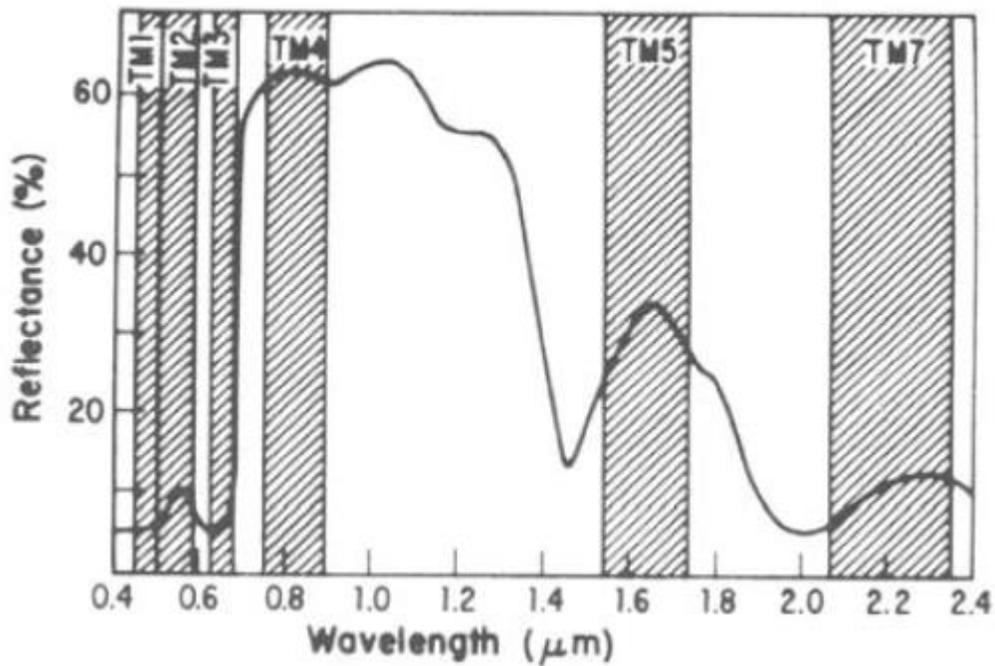


Figura 16. Firma espectral de la vegetación

Las firmas espectrales nos dan las características del comportamiento de los materiales dentro de las distintas bandas, con lo cual se observa las bandas con más información para las diferentes características de los materiales, para lo cual se elaboró la tabla 2, ya que con ayuda de esta se elaboraron las diferentes composiciones en falso color, y lograr obtener la mejor visualización de los materiales, ya que cada composición debe tener bandas en las que la absorbancia y la reflectancia de los materiales sea alta.

Tabla 2. Distribución de minerales según su reflectancia y absorción para cada material.

Materiales	Reflectancia	Absorción
Minerales Arcillosos, Carbonatos, Filosilicatos y Sulfuros	TM5	TM7
Hematita	TM3	TM72 y TM1
Geothita	TM3 y TM2	TM1
Jarosita	TM3, TM2 y TM1	
Vegetación	TM4, TM2, TM5 y TM7	TM3 y TM1

Los valores visualizados en la Tabla 2, fueron usados para realizar composiciones a falso color, la figura 17 muestra la imagen del distrito de Guanajuato a color real utilizando la composición en RGB 321, la cual se logra visualizar el distrito teniendo unas zonas con alta reflectancia, las cuales aparecen en color blanco, estas zonas están ligadas a la geología del distrito. Por otra parte, las zonas con presencia de actividad urbana aparecen de color cian, la cual en su mayoría abarca la ciudad de Guanajuato. También, se logran observar tonalidades amarillas en la parte norte, las cuales, de igual manera, son efecto de la geología del lugar.



Figura 17. Composición de falso color en RGB 321

La composición en falso color realizada en RGB 432, Figura 18, se logra visualizar la vegetación en color rojo, la cual está presente en la parte más elevada de la sierra, y en el rio que conecta a la presa. Por otra parte, se logran visualizar rocas con alta reflectancia, las cuales son las misma que se observan en la Figura 15, ya que en esta permanecen marcadas estas zonas, de la misma manera se observa el cambio en tonalidades de gris, lo cual está relacionado con el cambio de tipo de roca de la zona.

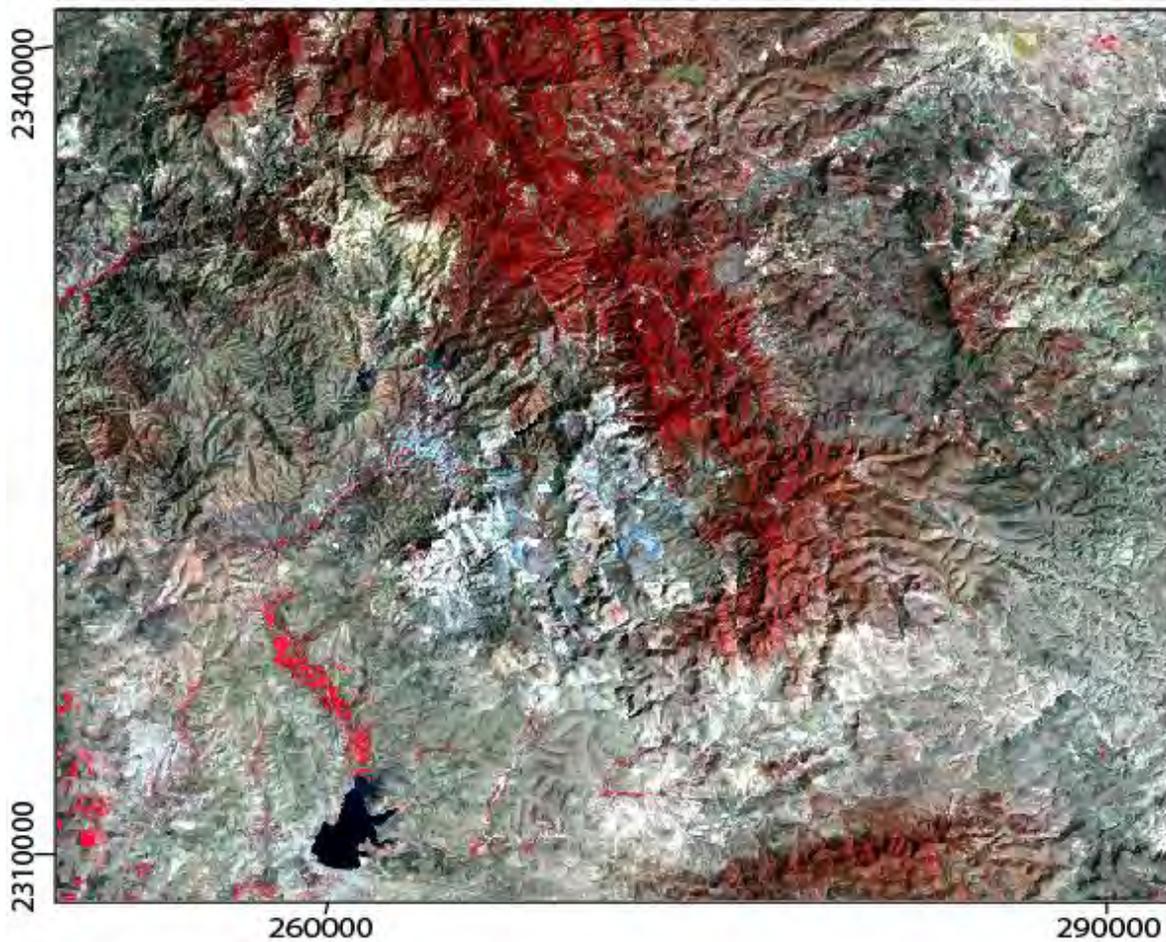


Figura 18. Composición de falso color en RGB 432

En la composición en RGB 742, Figura 19, se logran ver diferentes tonalidades de roca que se encuentran en valores de rojo, ya que sólo en la parte media de la sierra se visualiza una tonalidad morada, justo en la zona que se localiza la mina El Cubo, por lo cual puede estar ligada con alguna actividad o alteración en el área, por lo cual, puede estar asociada a un cuerpo mineralizado, o por la presencia de antiguas actividades de explotación minera de la zona. También, se logra observar tonalidades en color azul claro, las cuales podrían estar asociadas a una alteración.



Figura 19. Composición en falso color RGB 742

En la composición en RGB 751, Figura 20, se logra observar diferentes tonalidades, las cuales pueden estar asociadas al cambio de litología o alguna alteración, los colores morados están relatados en diferentes zonas, incluyendo en la Ciudad de Guanajuato, por lo que es complicado diferenciar a que pueden estar asociadas. De igual manera que en la figura anterior, se observan tonalidades en azul en las mismas zonas.



Figura 20. Composición en falso color RGB 751

5.1.2 Análisis de componentes principales

El análisis de componentes principales nos ayudó a identificar las zonas de óxidos, hidroxilos y vegetación, ya que caracteriza en grupos los distintos elementos de la imagen satelital, con lo que se busca resaltar las principales características de los

materiales utilizando, las bandas que contengan una alta reflectancia y baja absorbancia, es decir, información para diferenciar entre distintos materiales. Para el análisis de óxidos se utilizó la banda 1, la banda 3, la banda 5 y la banda 4. En el caso de los hidroxilos se visualizaron las bandas 5, banda 7, banda 3, y banda 4. Y de la para el caso de la vegetación se utilizaron las bandas 4 y banda 3.

El primer proceso que se utilizó fue componentes principales utilizando todas las bandas correspondientes a la imagen satelital Lansat 5, de las cuales las componentes 4, 5 y 2, fueron las elegidas para el análisis, debido a que la componente 4 (C4), Figura 22, es la que nos ofrece una mejor claridad en la información relacionada con los óxidos, la componente 5 (C5), la de los hidroxilos, fue multiplicada por -1, debido a que es necesario sacar la inversa de la información que contiene al salir del análisis, para resaltar los valores de hidroxilos (Figura 23), y la componente 2 (C2) para la vegetación (Figura 21).

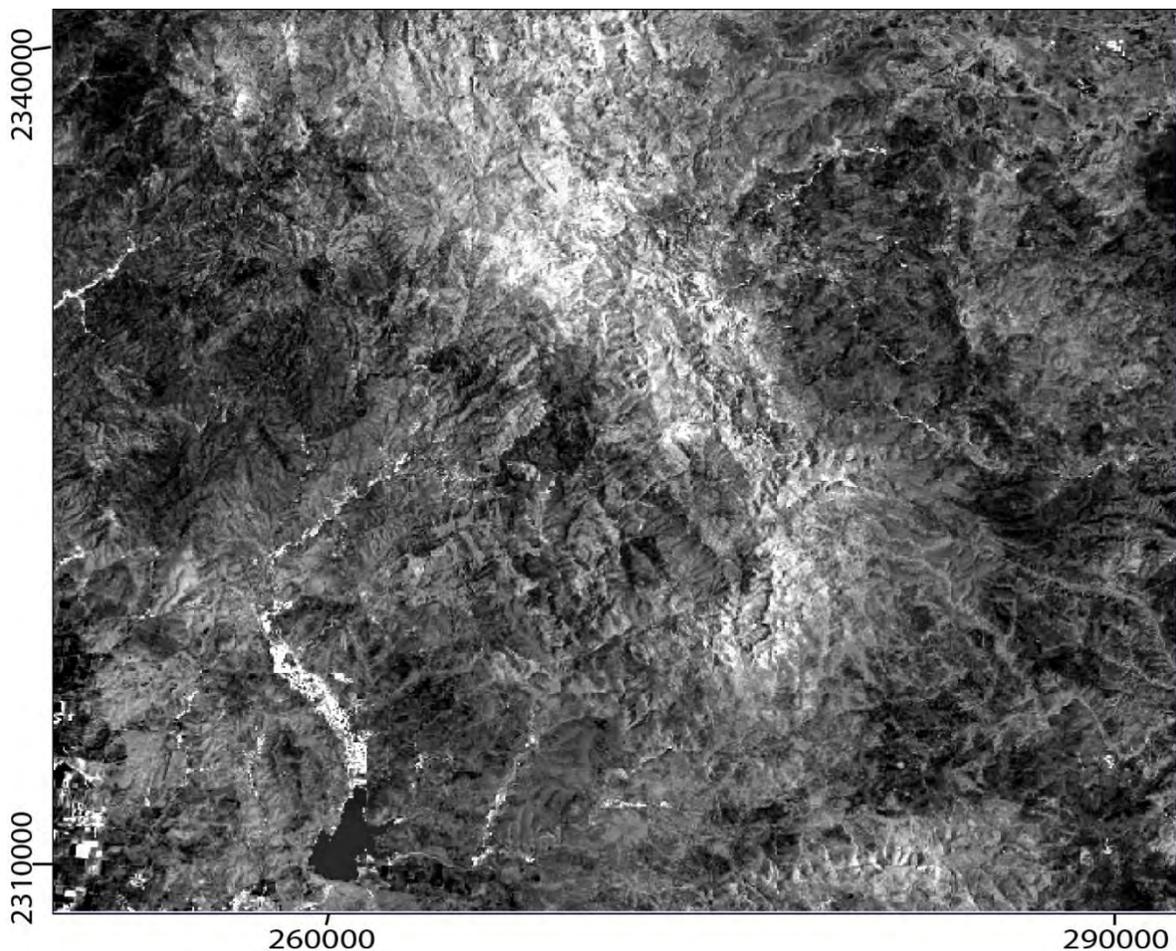


Figura 21. Componente 2. Se logra observar que los valores más brillantes corresponden a la vegetación.

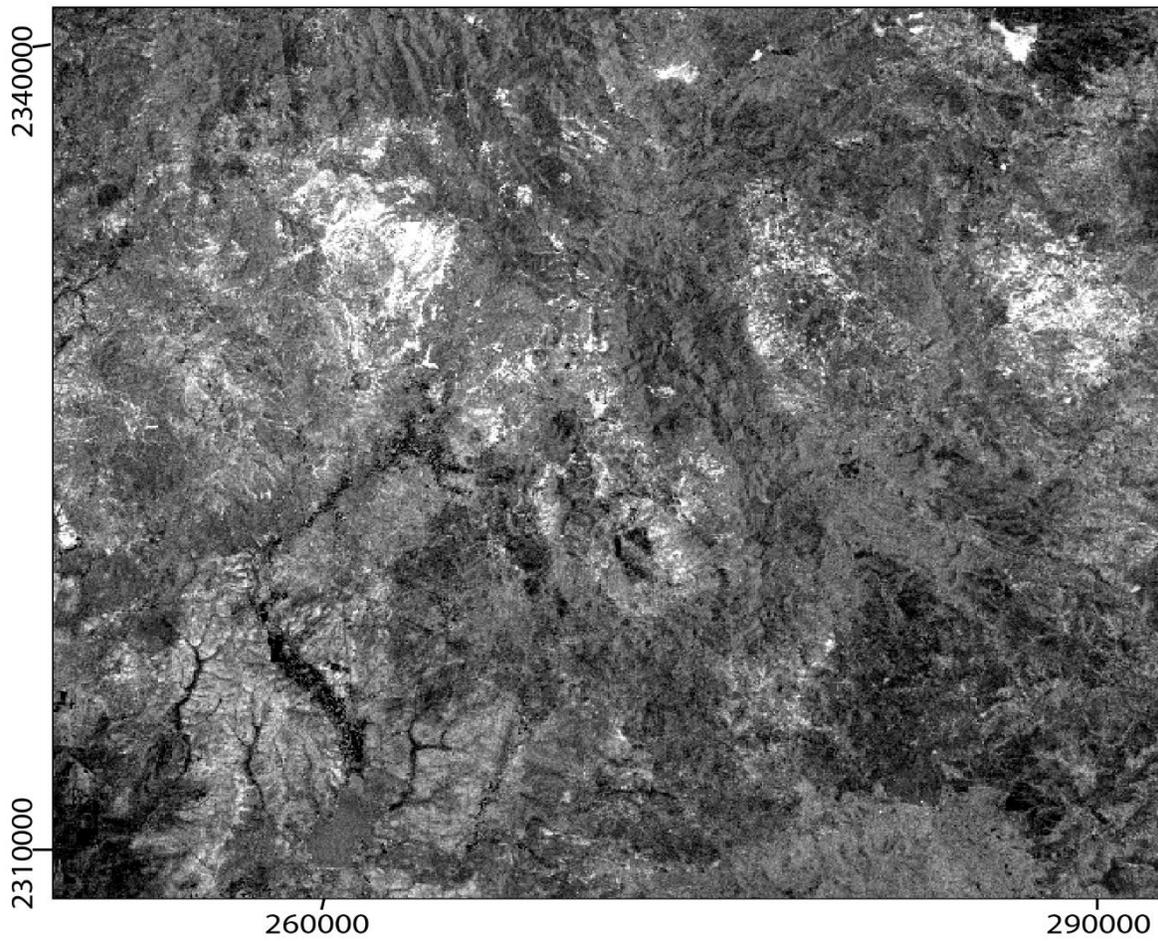


Figura 22. Componente 4, se observa valores de alta reflectancia en los óxidos.



Figura 23. Componente 5, se observa valores de alta reflectancia en los hidroxilos.

De la misma forma, se desarrolló componentes principales dirigidas en las que se utilizaron sólo las bandas que contienen información útil para identificar los distintos materiales, ya que se busca que el resultado de la separación no contenga información ajena a los materiales, es decir, sólo se juntara información que resalte los sitios en donde se encuentren ubicados óxidos e hidroxilos. Las componentes principales dirigidas propuestas se utilizan con las bandas antes mencionadas para cada caso, contienen los valores más significativos para cada material, las bandas en las cuales se resaltan los valores de reflectancia de cada material, por lo cual no se enmascararía ningún valor correspondiente a los óxidos y los hidroxilos, los cuales suelen enmascararse comúnmente con la vegetación, por lo cual saldrían a la luz sin confundirlos con pixeles de vegetación.

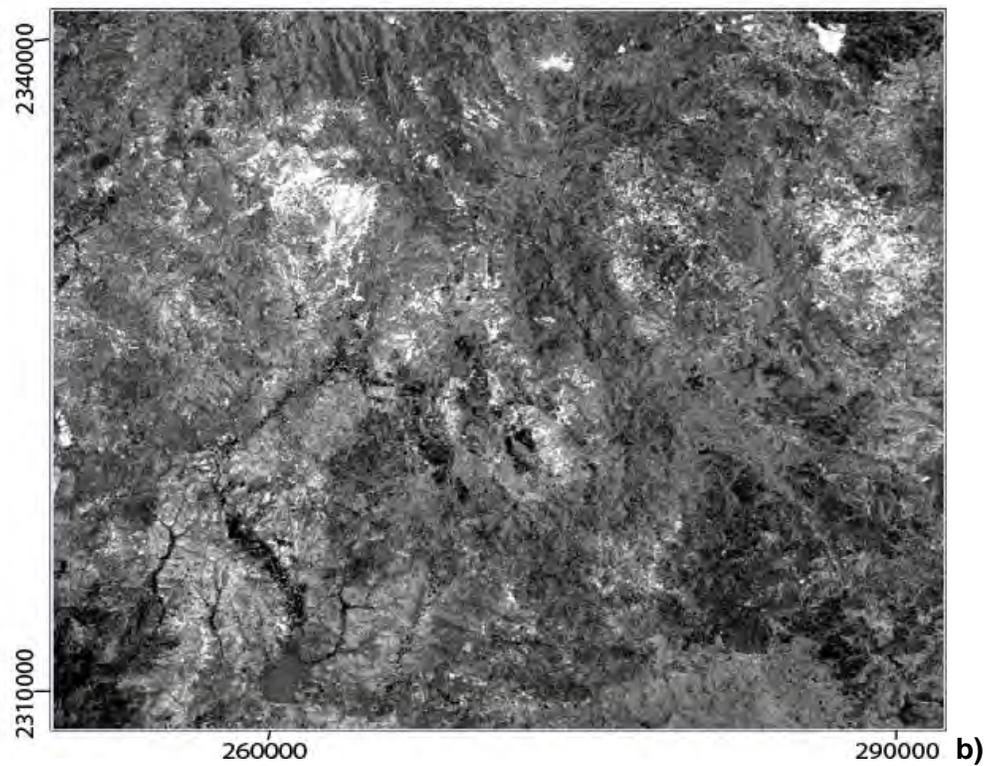
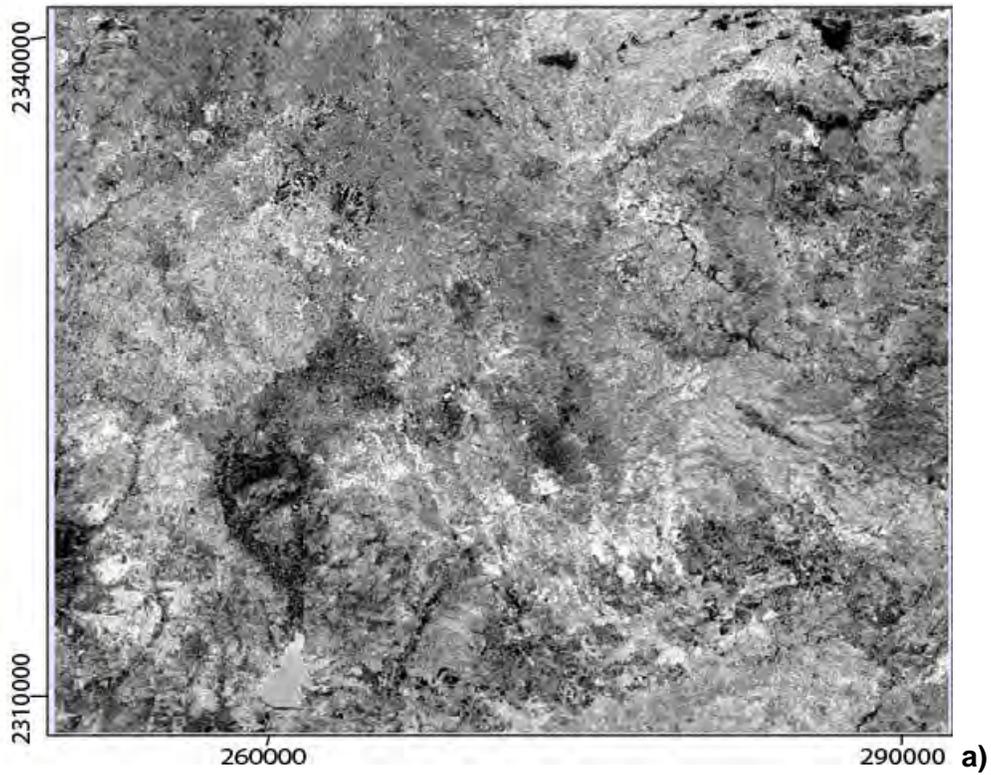


Figura 24. Se observan las componentes resultantes utilizando la técnica de componentes principales dirigidas. Para a) hidroxilos y b) óxidos

Al ver los resultados obtenidos por los dos procedimientos de componentes principales dirigidas, se observa que para el caso de los óxidos es mejor el resultado de componentes dirigidas, ya que las zonas que contienen este tipo de material se encuentran bien definidas, las cuales aparecen en color blanco. Para el caso de los hidroxilos, el resultado arrojado por la técnica da una mejor visualización del material al separarlo de los valores de vegetación, ya que como se observa en donde es probable se encuentre vegetación aparece en un color más oscuro.

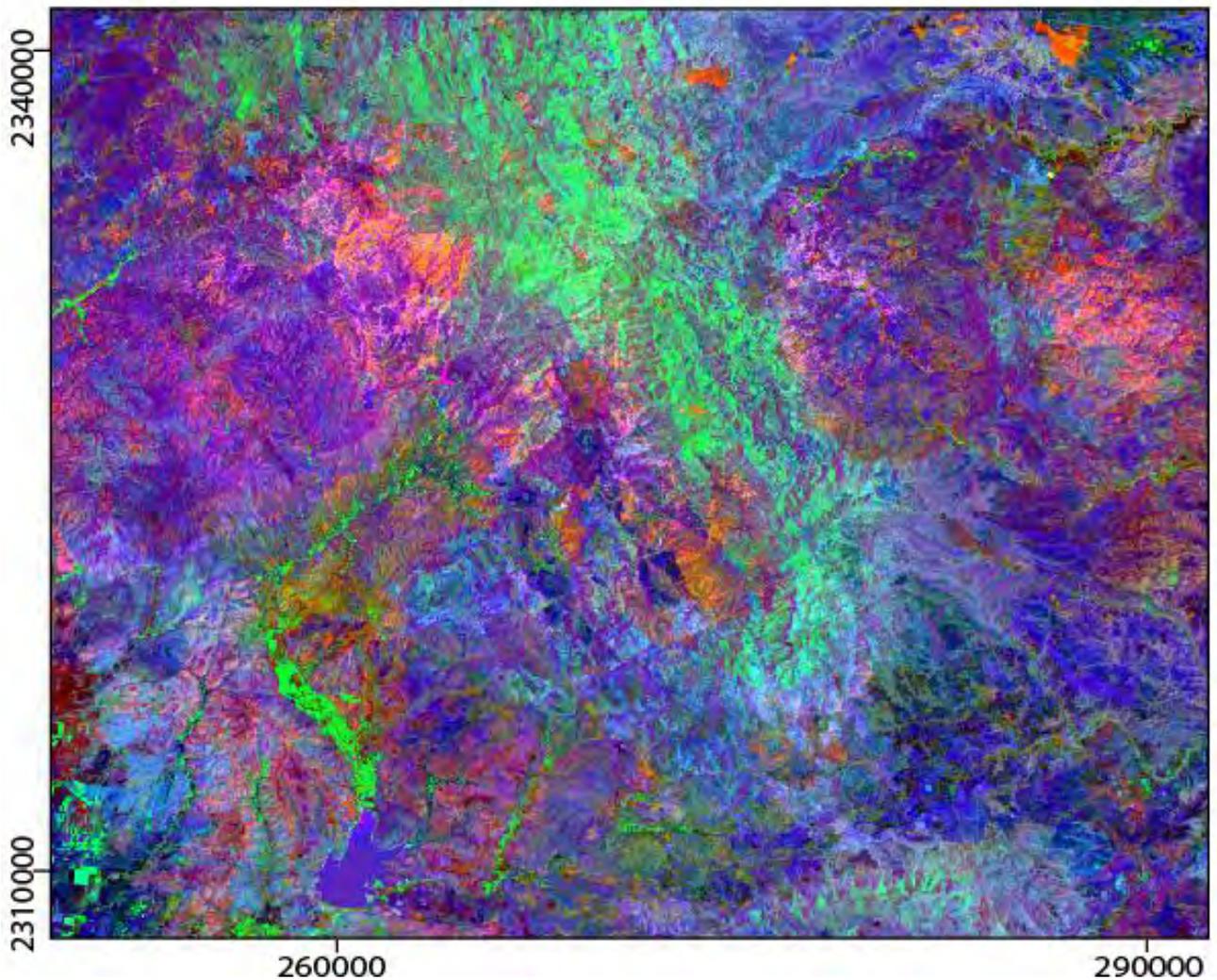


Figura 25. Composición a falso color en RGB 434.

Con los resultados obtenidos. se realizó una composición en falso color en RGB, para lo cual se utilizó la componente 2 de la vegetación en la banda del verde, la componente de óxidos para el caso de componentes dirigidas en la banda del rojo

y la componente de hidroxilos para el caso de componentes dirigidas en la banda del azul. Con lo que tenemos componente 4 en rojo, componente 2 en verde y componente 4 en azul. Con esta composición se logra observar la existencia de zonas en las que se juntan estos materiales dando una tonalidad morada, y otras en la combinación de materiales resalta alteraciones en superficie, como la tonalidad amarilla en la mina El Cubo.

5.2 Procesamiento de datos Aeromagnéticos

En este capítulo se desarrollan los filtros que se aplican en el procesamiento de datos aeromagnéticos. El procesamiento se realizó con la finalidad de localizar las fallas que están relacionadas con las alteraciones, para esto se elaboraron diversas técnicas de procesamiento de datos magnéticos.

5.2.1 Datos de Aeromagnéticos

Los datos fueron obtenidos de una base de datos que recopila una serie de levantamientos realizados con diferentes fechas en todo el territorio mexicano, la cual fue adquirida del Servicio Geológico Mexicano, proyectado en NAD27 en coordenadas UTM en la zona N14. Esta base de datos fue adquirida por el Instituto de Geofísica de la UNAM, el cual proporciona los datos para la realización de este estudio. Los datos fueron tomados a finales de los 80s, y fueron tomados cada 50m de separación entre cada dato, con una altura de vuelo de 100 m. Para realizar el procesamiento de los datos se utilizó el programa Oasis Montaj. Con ayuda de este se hacen varios ajustes a los datos. El cual se observa en la Figura 19, la cual se logra visualizar una buena resolución de los datos.

5.2.2 Reducción al Polo

Realizar una reducción al polo tiene como finalidad colocar la anomalía magnética en su lugar de origen, a partir de esto, se pretende llevar los valores magnéticos obtenidos en el distrito de Guanajuato a su lugar de origen. Para este procesamiento se requiere conocer la declinación 8.1049° y una inclinación 48.4781° , las cuales se

obtuvieron de la página de la NOAA. Al visualizar el mapa de anomalía magnética total (Figura 26), el mapa de Reducción al Polo visualizada en la Figura 27, se observa la anomalía magnética perpendicular a una fuente, es decir, en su lugar de origen, eliminando varios efectos que no son causados por fuentes externas.

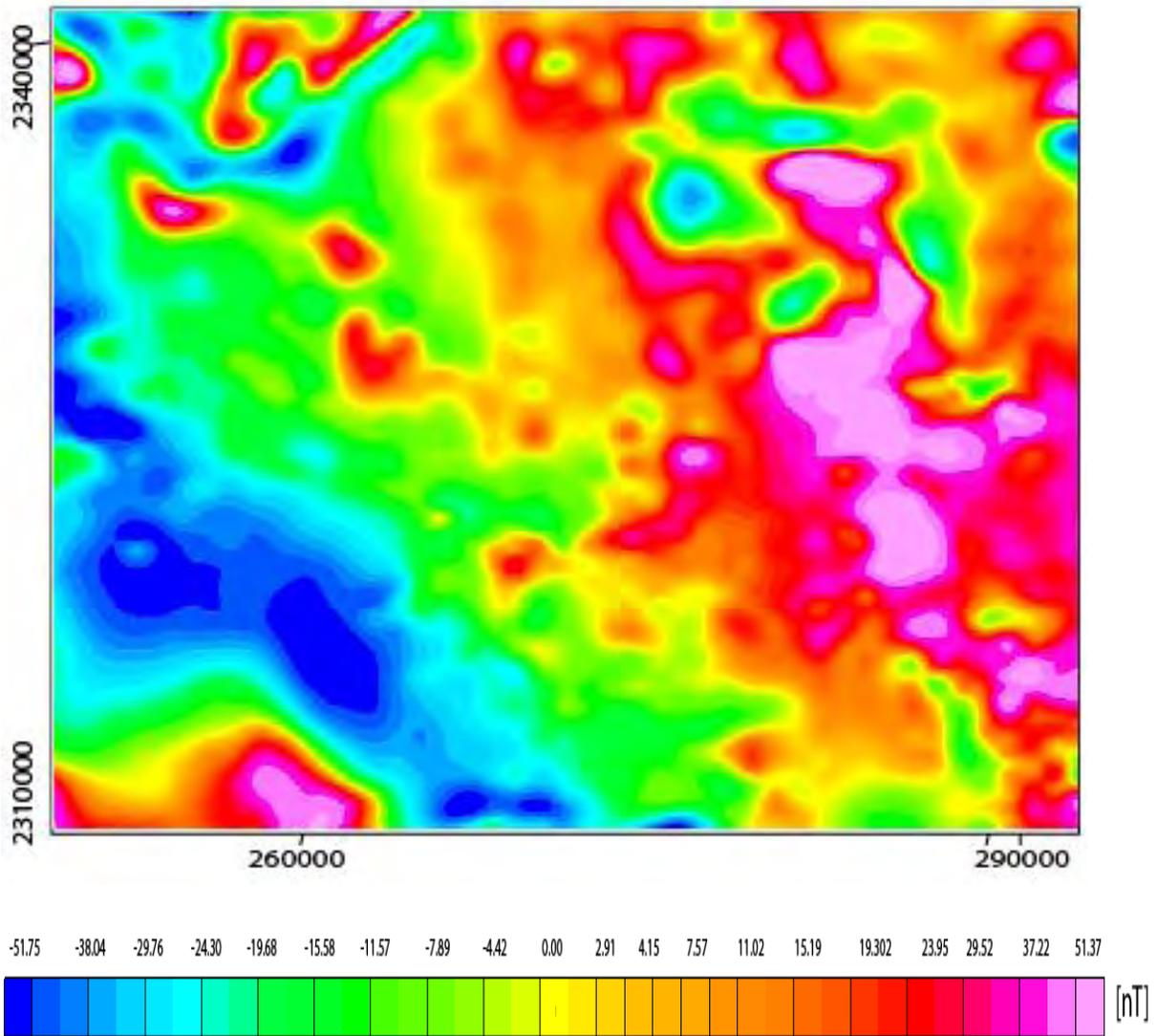


Figura 26. Mapa de anomalía magnética total del distrito minero de Guanajuato.

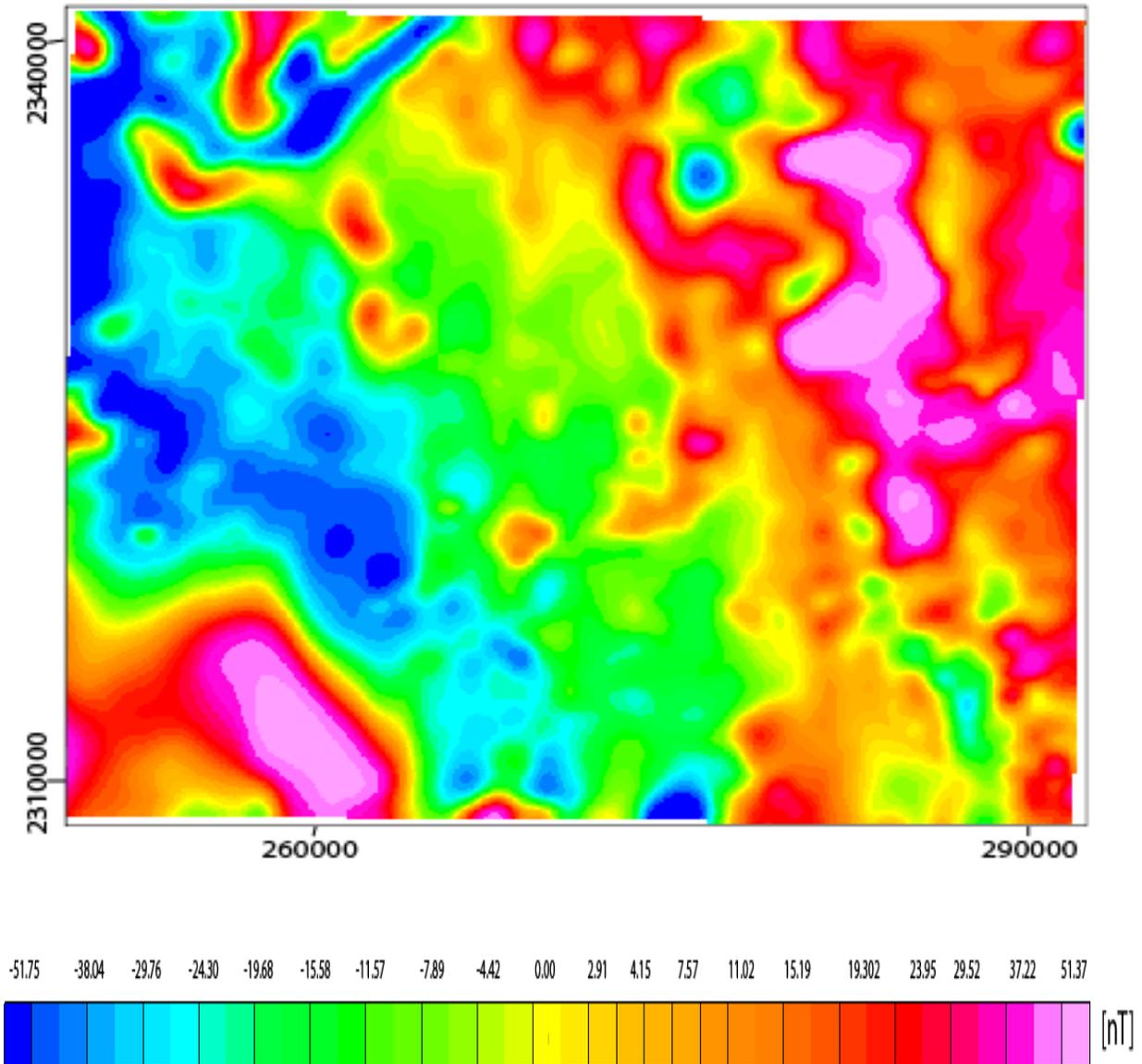


Figura 27. Reducción al Polo del Distrito Minero de Guanajuato.

5.2.3 Separación Regional-Residual

Se utilizó un filtro para bandas, en el espectro de potencias, como método para separar la parte residual y regional. Este se realizó con una longitud de onda de corte de 0.15 a 1.14. El resultado del filtro se queda con la parte del espectro que contiene los efectos locales, es decir, el mapa de anomalía residual, obteniendo la Figura 28. Con lo anterior se eliminó el efecto regional, por lo que se visualizan las estructuras más superficiales y de longitud de onda media. Esto nos brinda

información del comportamiento superficial de los materiales en la zona, y con esa información se ubicarán las fallas en donde están las vetas mineralizadas.

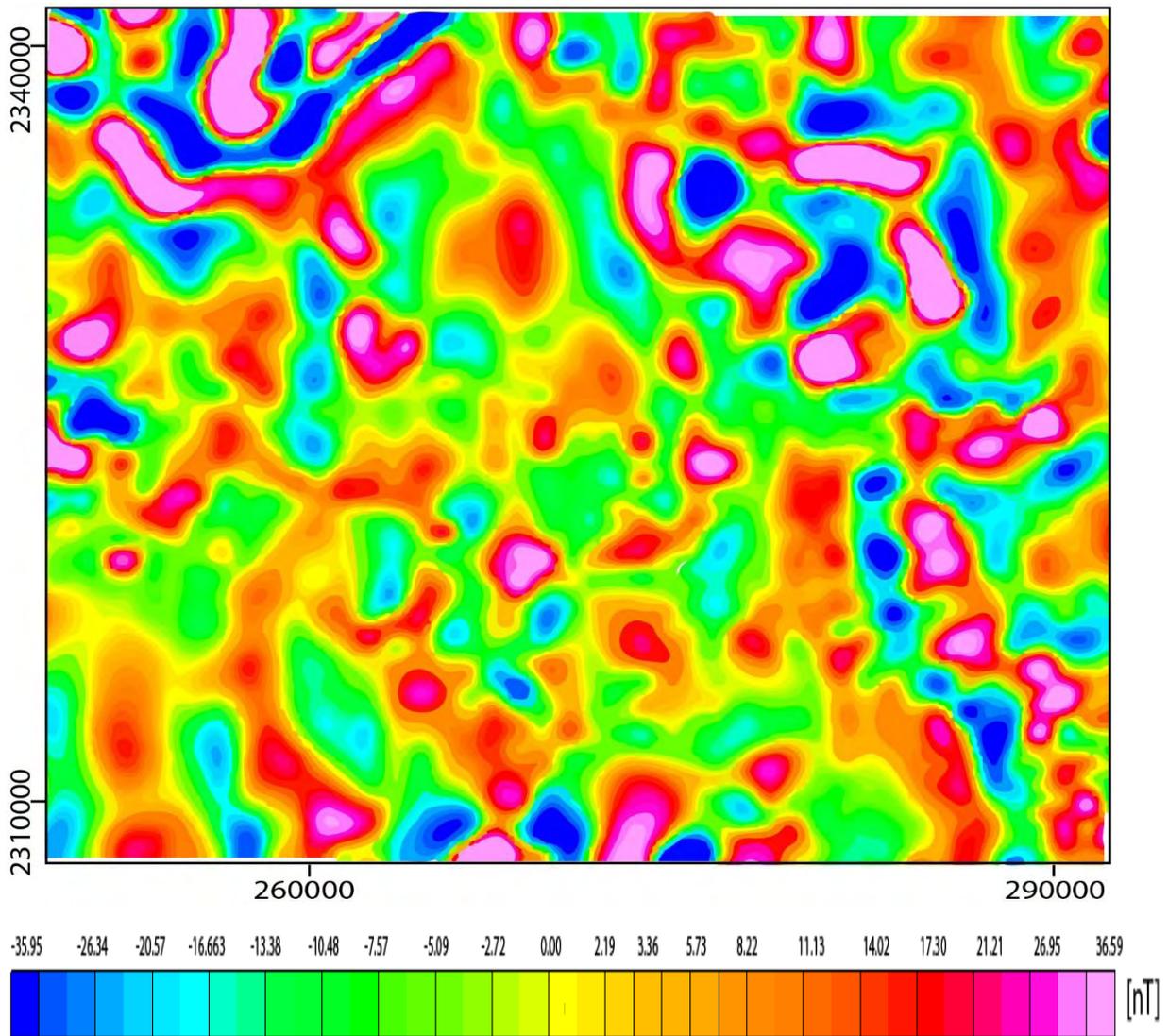


Figura 28. Mapa de anomalía residual del distrito minero de Guanajuato.

5.2.4 Deconvolución de Euler.

Para realizar el procesamiento de la Deconvolución de Euler la anomalía residual se dividió en cuatro ventanas, que devienen el distrito minero de Guanajuato. Estas fueron realizadas con la finalidad de aumentar la resolución de los resultados de la Deconvolución de Euler, debido a que la zona de estudio es extensa, esta división

proporcionara información que pudo ocultarse en un área mayor, facilitando la ubicación de zonas que contengan fallas representativas. Para estas se obtuvieron las derivadas direccionales de primer orden en dirección "X", "Y" y "Z". Estas se obtuvieron con la finalidad de suavizar y resaltar la anomalía en las diferentes direcciones ubicado distintos lineamientos horizontales y verticales. Las derivadas fueron utilizadas, principalmente, para elaborar la Deconvolución de Euler, ya que no se les hizo una interpretación a los resultados obtenidos.

Con los resultados obtenidos de las derivadas y la reducción al polo, se pueden observar distintas fallas, ya que las anomalías siguen una dirección y tienden a tener un bajo y un alto en los valores de intensidad magnética, lo cual puede indicar la presencia de algún lineamiento. En cada una de las ventanas se observan diferentes distribuciones de anomalías magnéticas, dando diferentes direcciones de fallas.

La Deconvolución de Euler conjunta los valores de las derivadas direccionales para ubicar profundidades y marcar la posición en la que se encuentra un generador de una anomalía magnética, la cual se asocia a una falla o algún rasgo estructural. Con esto, a cada una de las ventanas se aplicó la Deconvolución de Euler utilizando el índice estructural de 1 y 1.5 con la finalidad de ubicar fallas y vetas que estén relacionadas con actividad minera en la zona. Los índices mencionados se ven explicados en la tabla 1, lo cual indica que son las más apropiadas para la localización de vetas y fallas.

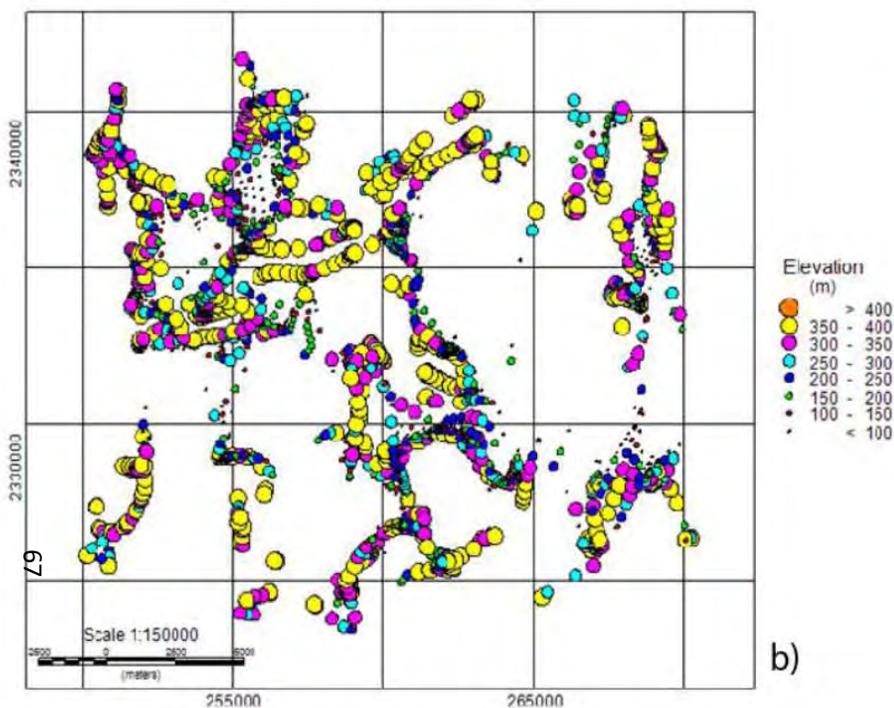
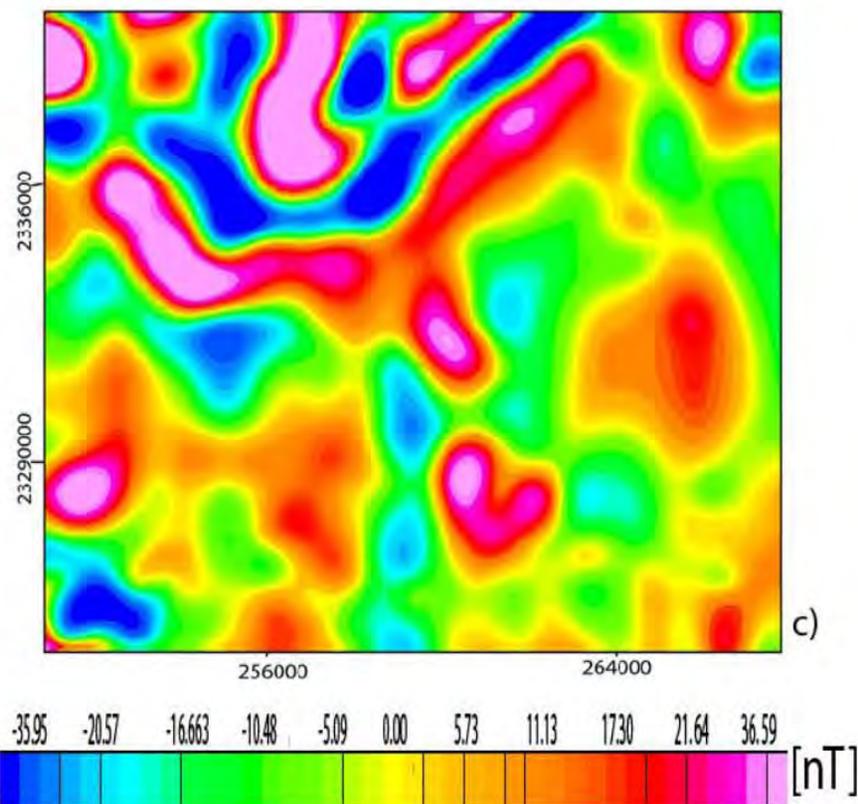
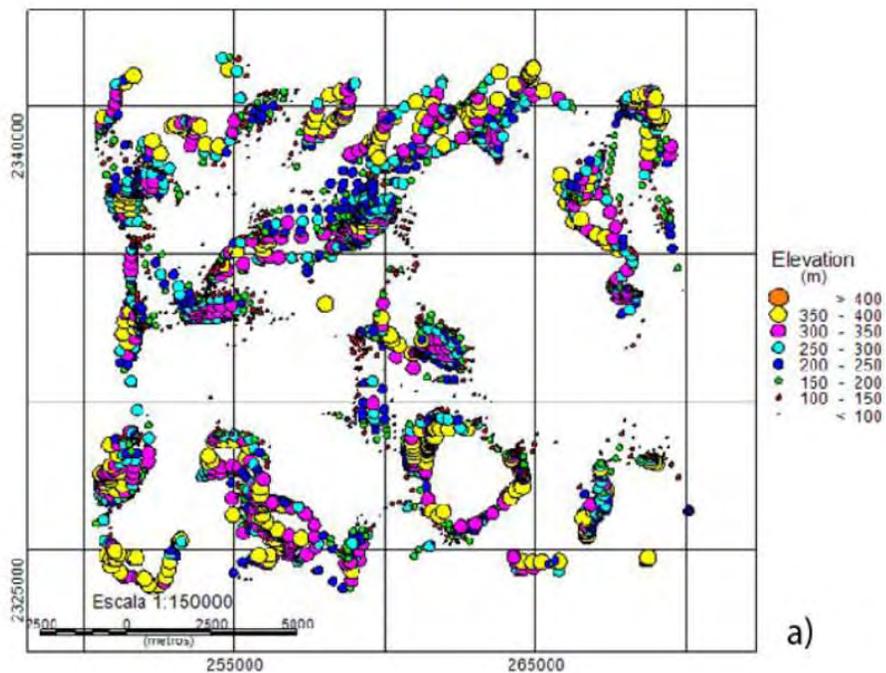


Figura 29.

- a) Resultado de la deconvolución de Euler para la ventana 1, con índice estructural de 1. b) Resultado de la deconvolución de Euler con índice estructural de 1.5. c) Mapa de anomalía residual para la ventana 1.

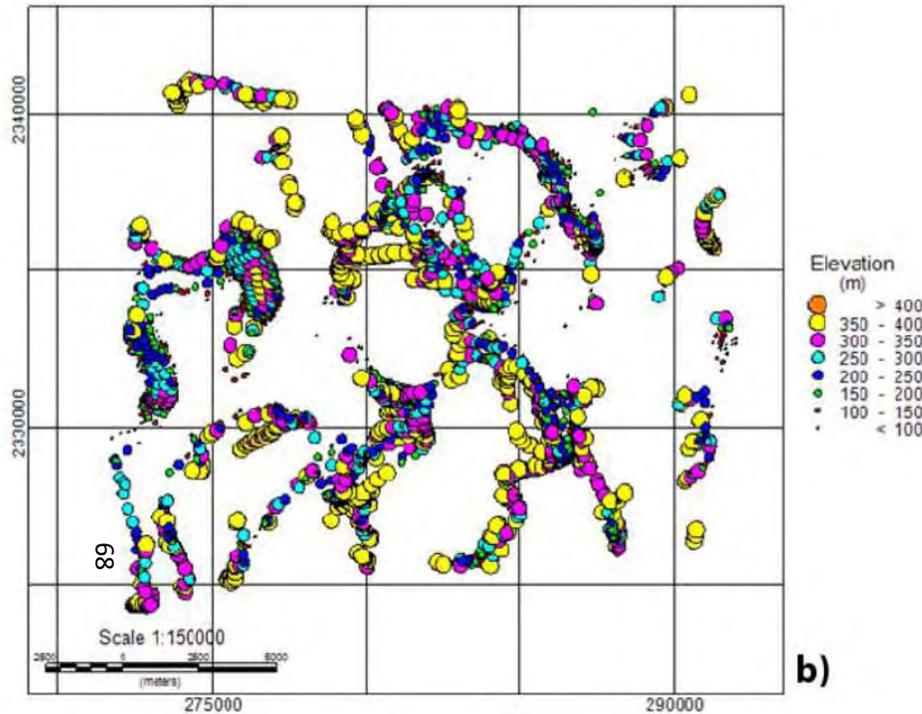
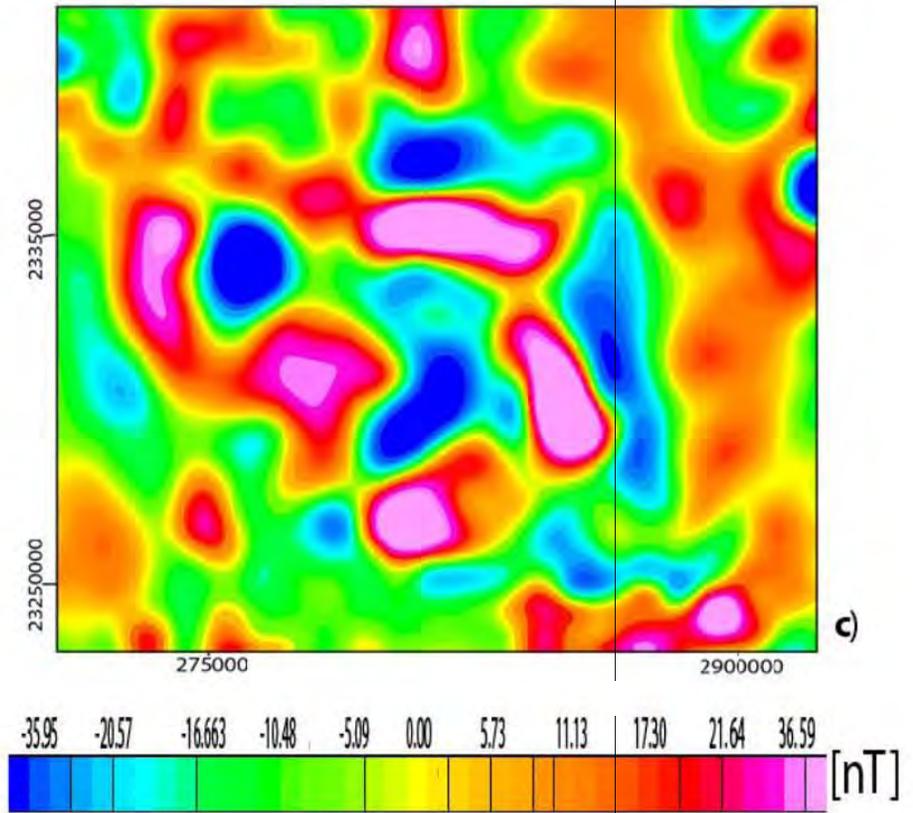
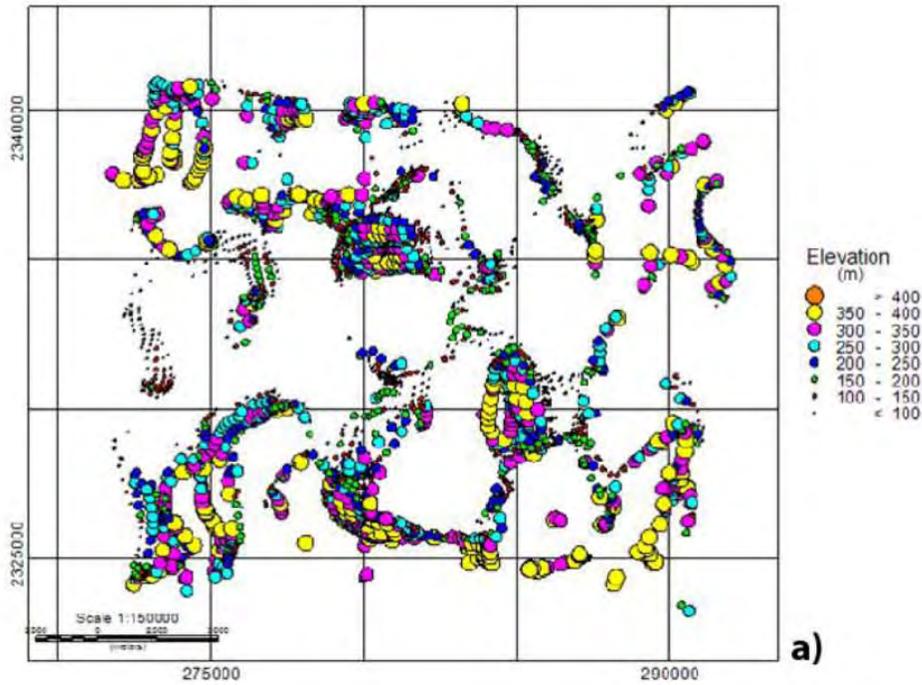


Figura 30.

- a) Resultado de la deconvolución de Euler para la ventana 2, con índice estructural de 1,
- b) con índice estructural de 1.5.
- c) Mapa de anomalía residual para la ventana 2.

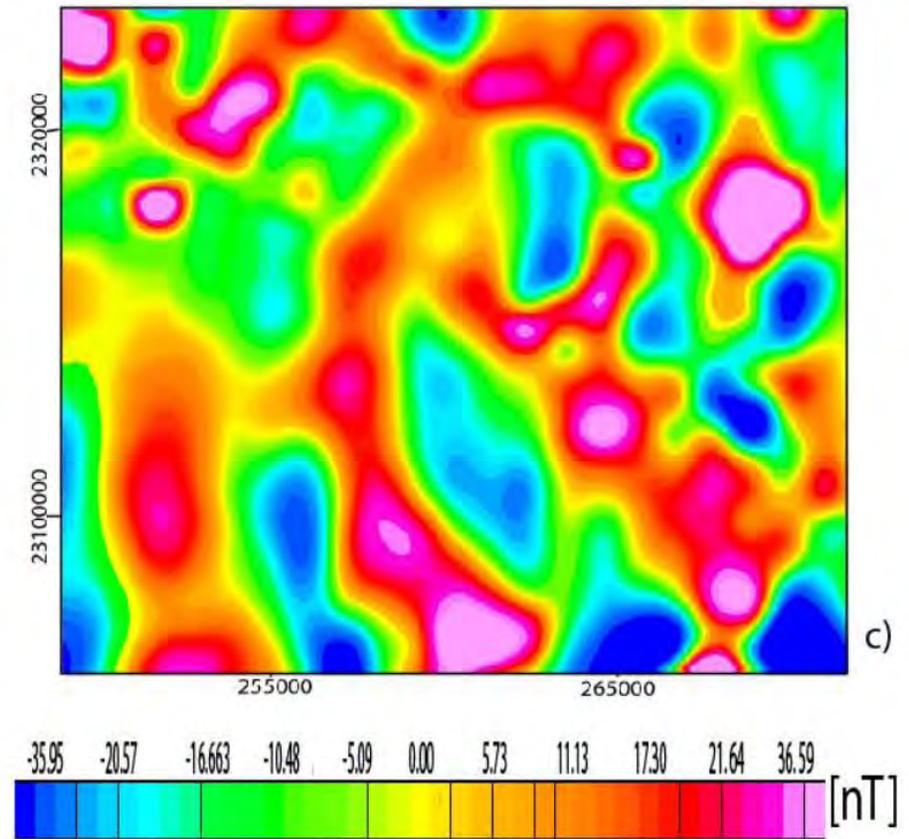
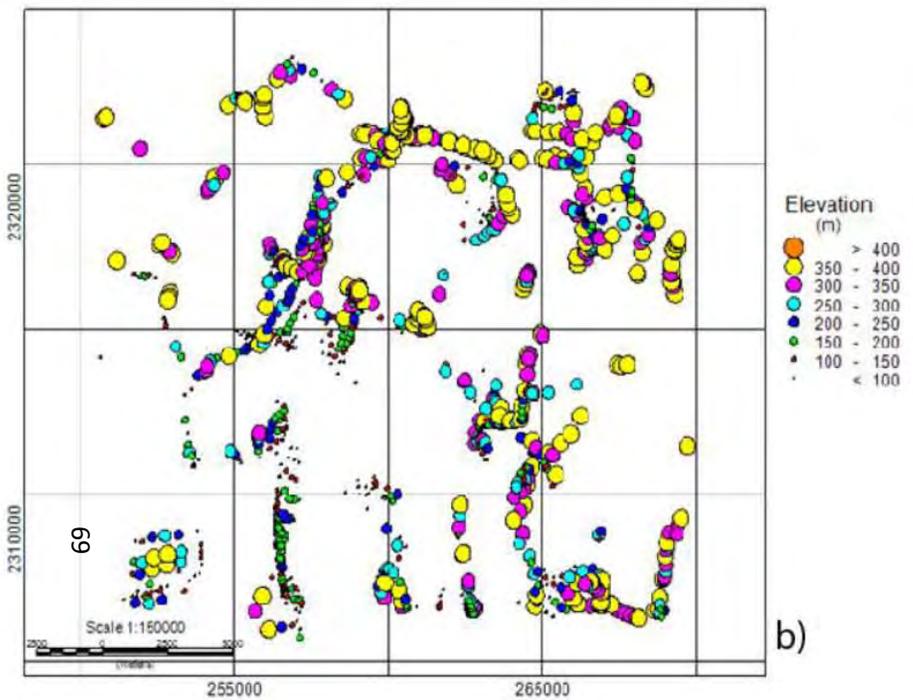
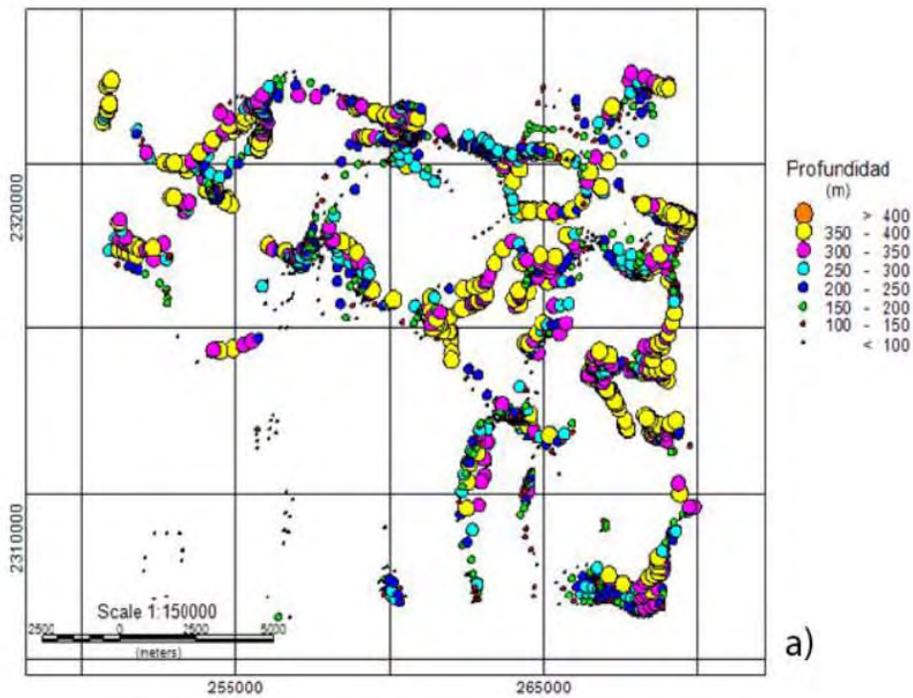


Figura 31

a) Resultado de la deconvolución de Euler para la ventana 3, con índice estructural de 1,
 b) con índice estructural de 1.5. c) Mapa de anomalía residual para la ventana 3

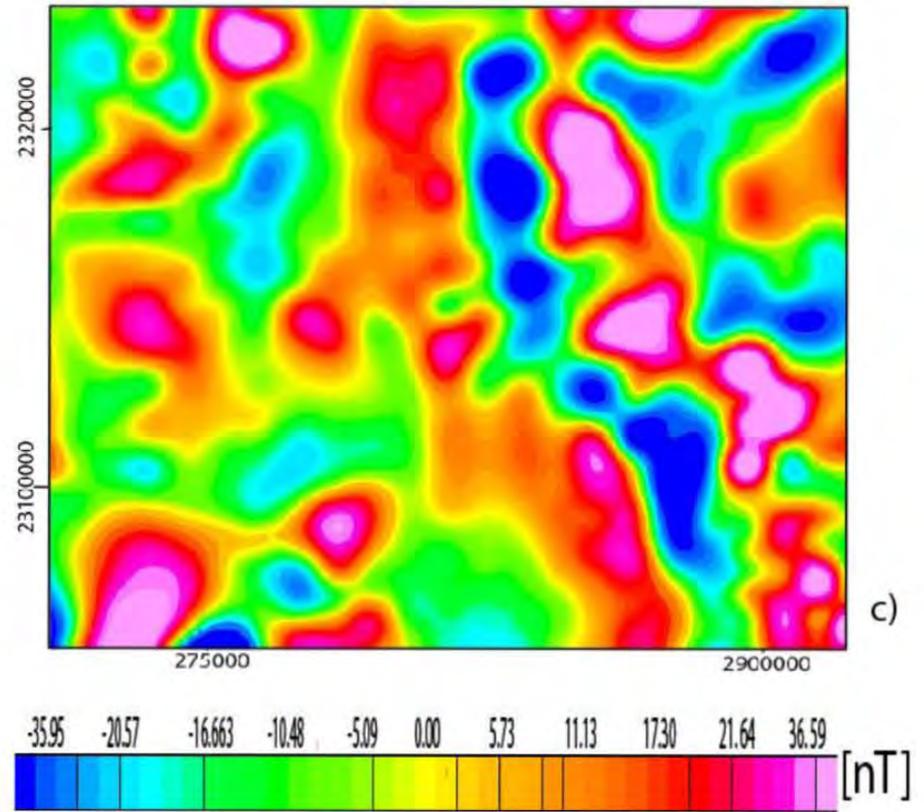
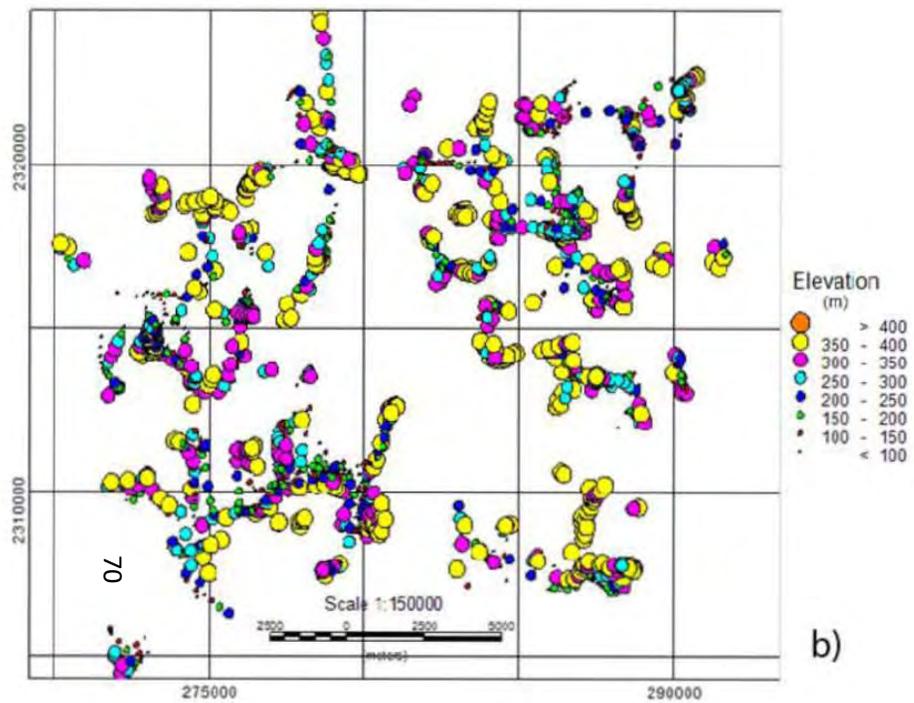
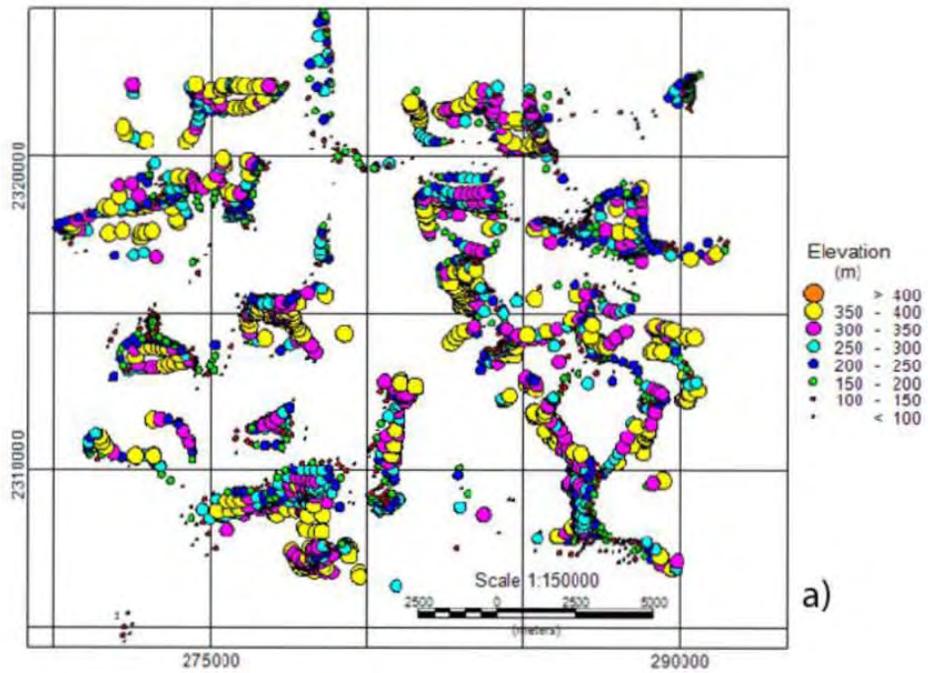


Figura 32

a) Resultado de la deconvolución de Euler para la ventana 4, con índice estructural de 1,
 b) con índice estructural de 1.5. c) Mapa de anomalía residual de la ventana 4

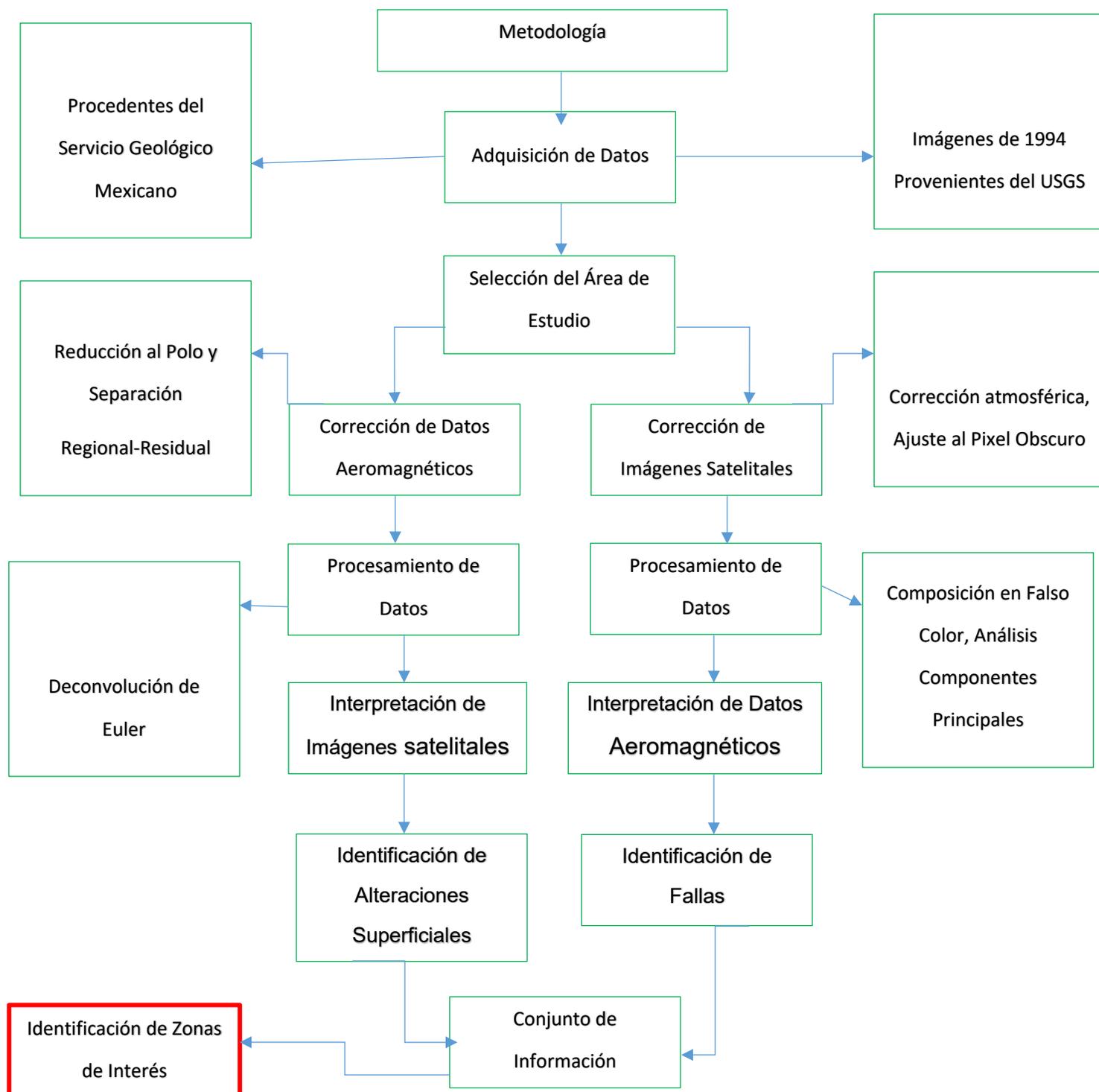
Como se puede observar en las Figuras 29, 30, 31, 32, los resultados de la Deconvolución de Euler, las profundidades no rebasan los 400 metros, esto debido a que las vetas que están en explotación o fueron explotadas por la industria minera tienen una profundidad no mayor a los 400 metros.

Los resultados observados muestran la existencia de distintas direcciones de las fallas, las cuales están distribuidas a lo largo del distrito minero, teniendo las direcciones N-S, NE-SW y NW-SE las cuales se encuentran a diferentes profundidades.

Con lo observado en deconvolución, se presentan varias fallas detectadas con los dos índices estructurales de 1 y 1.5, ambos índices en comparación resaltan las mismas fallas. Sin embargo, el índice de 1 resalta fallas más pequeñas y algunas con continuidad, y con el índice de 1.5 se observa una mayor continuidad en las fallas, esto debido a que también este índice detecta contactos, por lo que las fallas pequeñas no se observan con claridad.

6. Análisis de Resultados

En este capítulo se integraron los resultados de los capítulos anteriores correspondientes a la interpretación de las imágenes satelitales y de los datos aeromagnéticos. A continuación se muestra el flujo de trabajo realizado en esta tesis



6.1 Análisis de la Información Conjunta

Se utilizaron las Figuras 19, 20 y 25 del análisis de imágenes de satélite, y las Figuras 26, 31, 33, 35 y 37 correspondientes al análisis de datos magnetométricos. También, se insertó la síntesis de fallas realizada por (Vasallo et al 1996) de la figura 6.



Figura 33. Composición en falso color RGB 751(Fig. 20) con plantilla de fallas de Vasallo.

Como observamos en la Figura 33, las alteraciones superficiales que se presentan en el suelo están ligadas a la existencia de fallas expuestas, la técnica de la composición a falso color nos permite resaltarlas, representándolas en color morado.

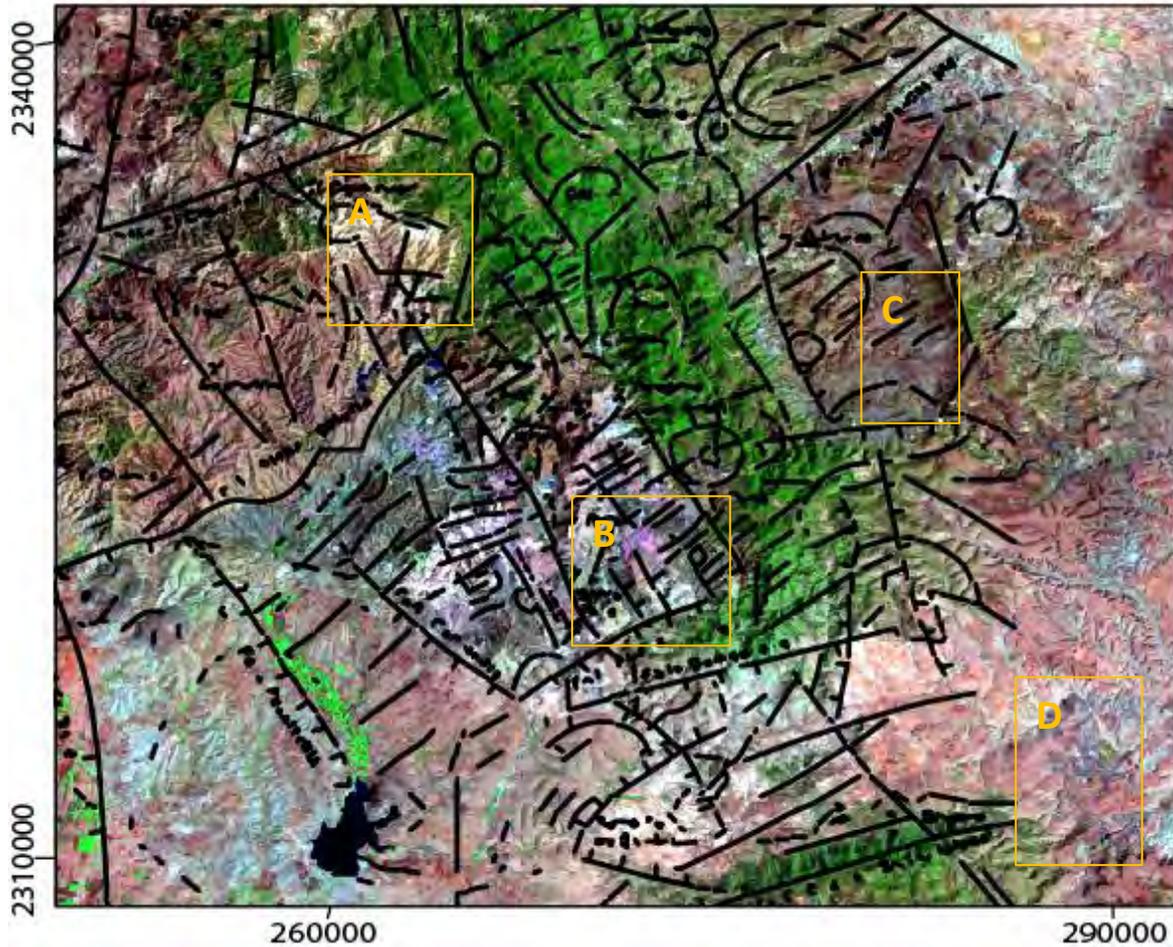


Figura 34. Composición en falso color RGB 742 (Fig. 19) con plantilla de fallas de Vasallo (ver Fig. 6).

De la misma forma, se puede observar la alteración en la Figura 34, que observamos alteraciones similares (resaltadas en los recuadros amarillos), aunque con valores diferentes en cada composición. Esto permite observar similitudes en los rasgos de las alteraciones vistas en cada composición a falso color, las que a su vez están situadas justo en los valores más significativos o de alta brillantez, tanto en óxidos e hidroxilos. Con lo anterior, deducimos que las composiciones en falso color resaltan zonas relacionadas con la alteración de la falla de la mina

El Cubo, por lo que estos valores de alteración y sus características estructurales serán las que consideremos para determinar zonas de interés para minería.

Las zonas que resaltan por la alteración mostrada en ambas composiciones en falso color son las A, B, C y D, marcadas en la Figura 34, las cuales presentan una tonalidad similar en B y C; en A se logra observar una tonalidad que resalta en ambas composiciones y que puede ser un indicio de concentración de materiales económicamente explotables, al igual que ocurre en la zona D.



Figura 35. Composición en falso color del análisis de componentes principales dirigidas para el caso de óxidos e hidroxilos (ver Fig.25). Esto en conjunto con la plantilla de fallas de Vassallo. Marcando las zonas con similitud en su composición o con un contraste llamativo.

Para observar mejor los valores en donde los materiales resaltan en superficie, una composición a falso color nos da una mejor relación con las fallas, que además fue

complementada con los resultados del análisis de componentes principales, utilizando las componentes obtenidas en la Figura 24, utilizando la componente 4, resultado del análisis de componentes dirigidas para óxidos, y la otra componente 4 del análisis de los hidroxilos y el componente 2 para la vegetación en verde, las cuales representan la mejor separación de óxidos e hidroxilos del análisis de componentes principales dirigidos, esto conjuntamente con la plantilla de fallas, obtenido de la Figura 35. En esta Figura, se observan las zonas que, debido a las tonalidades ya descritas y ubicadas, producen una alta probabilidad de localización de materiales potencialmente explotables, las cuales aparecen en tonalidades de naranja y morado. Las fallas se muestran en las cercanías de estas alteraciones.

Con lo anteriormente mencionado, se ubicaron zonas que presentan una tonalidad similar a la encontrada en la mina El Cubo, zona A, y otras en las que se observa un resalte considerable con los materiales ubicados en la zona. Las zonas D, F y G, son las que presentan una tonalidad similar a la observada en la mina El Cubo, por lo que pueden presentar alguna cantidad importante de material de importancia minera, aunque se observan en menor cantidad o diseminados.

Las zonas B, C y E, presentan un color que resalta como el observado en la Figura 35. Las zonas B y C, muestran una tonalidad similar, por lo que se puede pensar que contiene el mismo tipo de material, aunque se sabe que son dos tipos de roca distintos, éstas podrían tener una alteración similar la cual puede estar ligada a materiales explotables. Por otra parte, en el caso de la zona E, se observa una tonalidad anaranjada, la cual tiene una alta intensidad, por lo que se piensa que puede tener una gran cantidad de material concentrado en esa zona.

También, es importante mencionar que, en gran parte del área de estudio, se observa una tonalidad morada, que es producto de la combinación de materiales que contiene óxidos e hidroxilos (los cuales en la composición en falso color ocupan el color rojo y azul respectivamente), que, por lo observado en la literatura, estas zonas podrían tener materiales explotables.

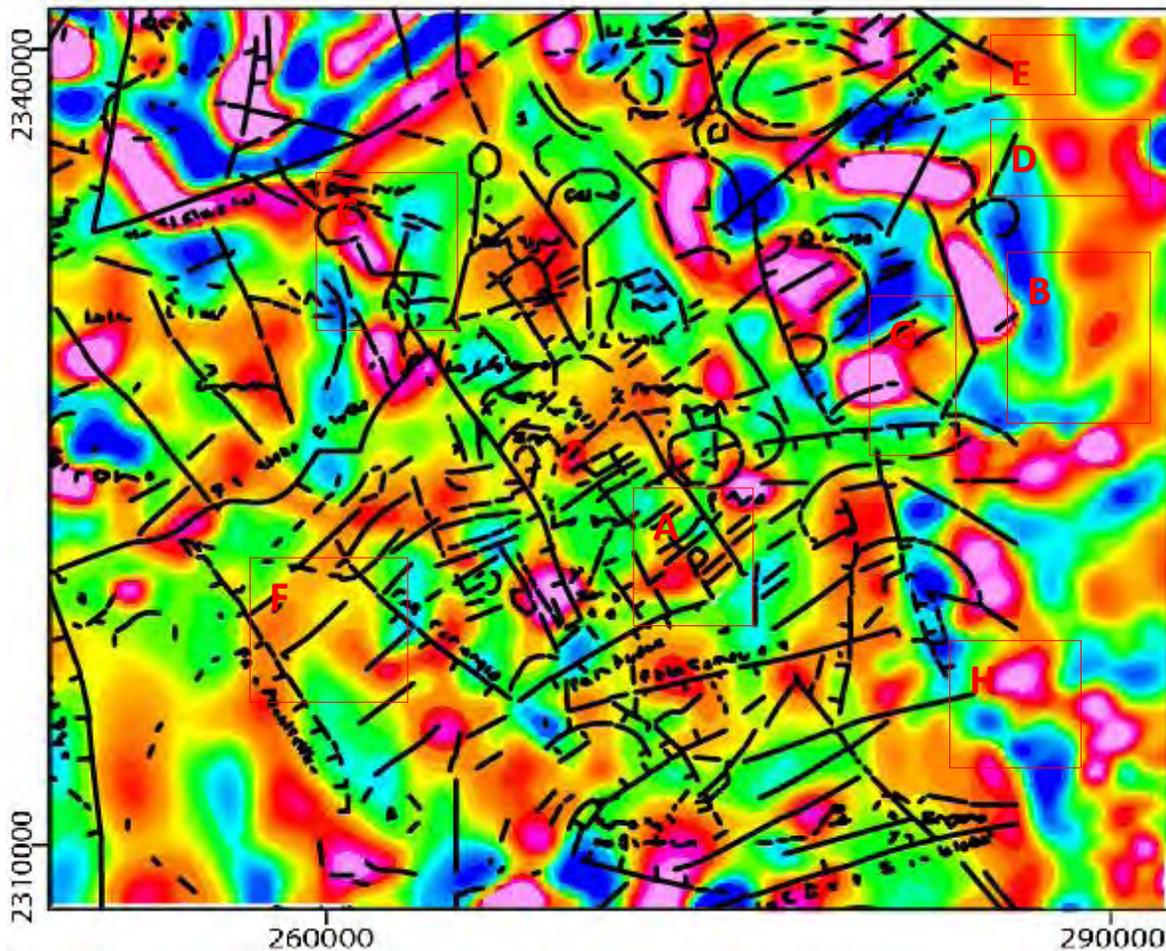


Figura 36. Mapa de anomalía residual con plantilla de fallas de Vasallo.

Al combinar la imagen satelital con la anomalía residual se pueden observar en la Figura 37, las fallas se distribuyen a lo largo de las anomalías en el distrito minero, estas tienden a marcar las direcciones preferenciales N-S, SE-NW y NE-SW, las cuales se muestran en la Figura 36, y en estas, las anomalías magnéticas muestran una coincidencia con la plantilla de fallas. También, se logra observar bajos y altos en los valores de la anomalía que se intercalan en el distrito minero, estos valores son más claros en las zonas más alejadas a la ciudad. Al comparar con la imagen satelital, se logra observar que las anomalías dibujan las fallas, las cuales coinciden con la plantilla y estas a su vez con la topografía de la zona, sin embargo, en las fallas centrales en donde se encuentra la conocida veta madre, el contraste no es tan marcado, y en la zona en que se encuentra la mina El Cubo se logra observar

de manera similar, ya que estas están relacionadas con fallas más pequeñas y superficiales.



Figura 37. Combinación de la anomalía residual con la imagen satelital y la plantilla de fallas.

En la Figura 38, se muestra la distribución de la deconvolución de Euler a lo largo del distrito, al encimar la plantilla de fallas superficiales detectadas (Vasallo. 1993), vemos que coincide con gran parte de las fallas localizadas por la deconvolución de Euler, las cuales alcanzan una profundidad máxima de 400 metros, es decir, son superficiales. También, se observan las direcciones preferenciales anteriormente mencionadas, así como pequeñas fallas perpendiculares a dichas direcciones. De la misma forma, los resultados muestran otras fallas que no estaban descritas en la platilla.

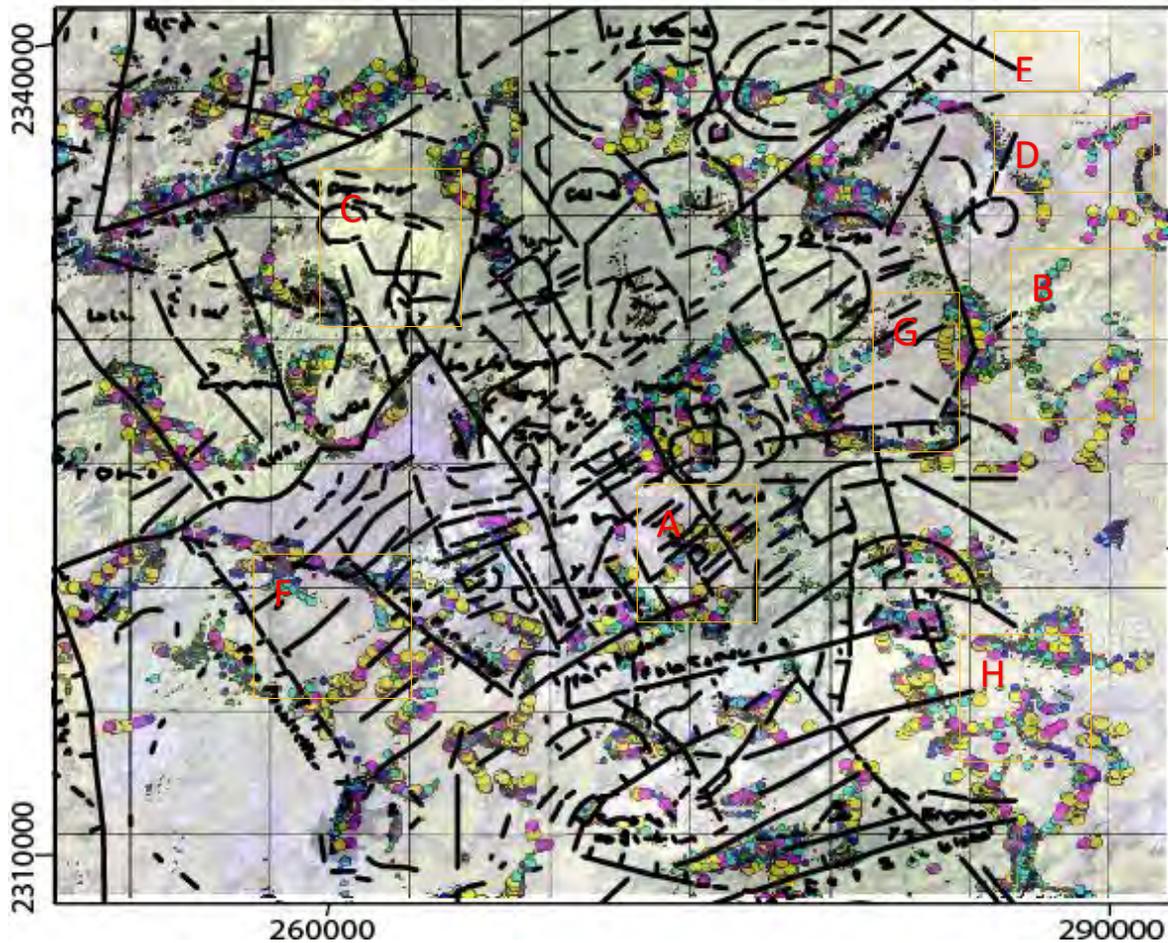


Figura 38. Conjunto de deconvolucion de Euler, plantilla de fallas e imagen satelital.

Las zonas marcadas en la Figura 35, fueron colocadas en la las Figuras 36, 37 y 38, con la finalidad de observar las zonas con presencia de alteraciones en los datos resultantes de la Deconvolución de Euler. Con lo anterior, se observan zonas que están ligadas las alteraciones con anomalías magnéticas, solo en la zona C y F se observan bajos magnéticos. Por otro lado, sólo en la zona E, no se encuentra una relación con las fallas detectadas, puesto que en las demás la deconvolución de Euler muestra fallas o la plantilla muestra la evidencia de fallas.

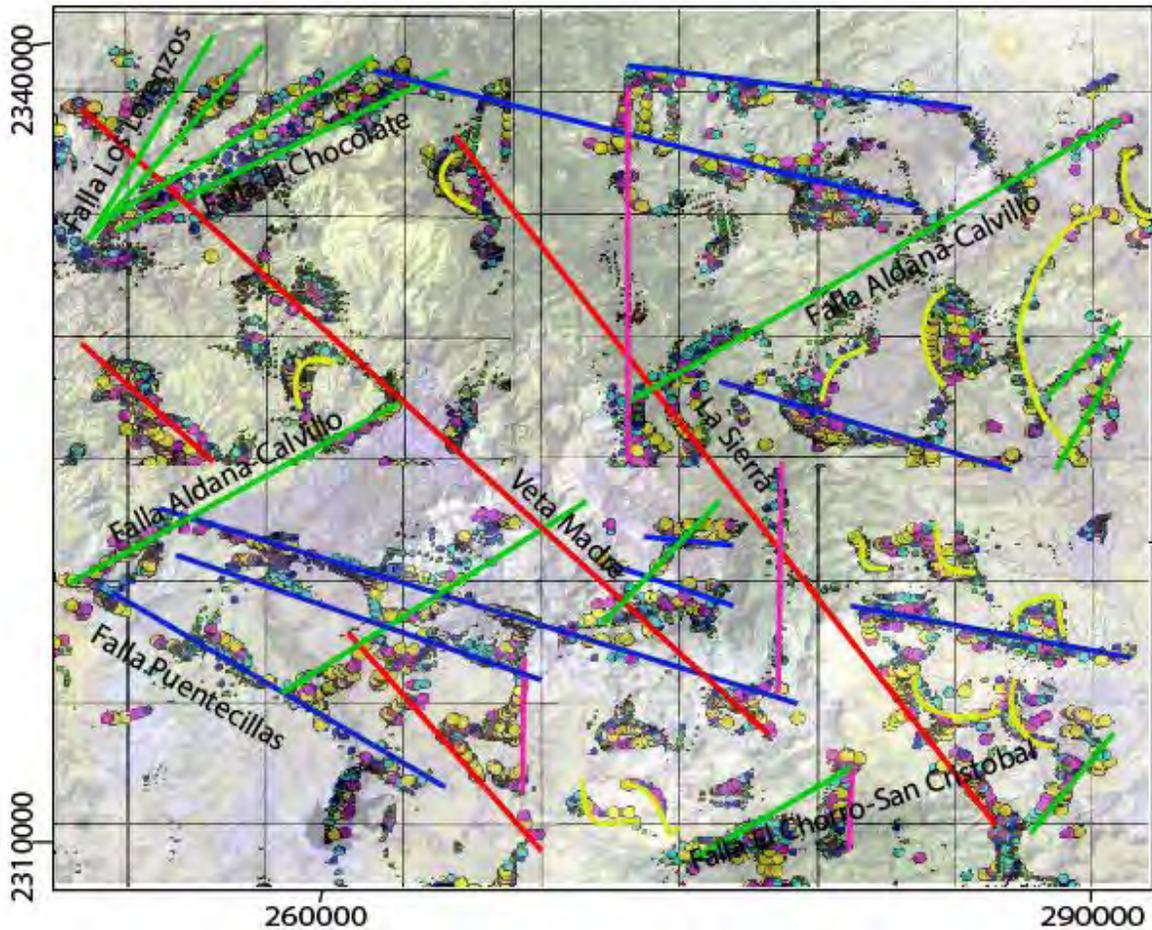


Figura 39. Conjunto de deconvolución de Euler, señalando fallas ubicadas en la zona de estudio: rosas verticales, amarillo circulares, rojo dirección NW, verde dirección NE y azul dirección SE

En la Figura 39, se marcan las direcciones preferenciales de las fallas ubicadas por la Deconvolución de Euler. Se observa que algunas coinciden con lo visto en la plantilla de Vassallo, sin embargo, la plantilla fue realizada con imágenes spot, por lo que sólo ve rasgos superficiales, y estas pueden tener alguna deformación debido a las características de esas imágenes. Las fallas encontradas en la Figura 39, son marcadas por anomalías magnéticas que pueden dar una mejor ubicación y encontrar fallas a distintas profundidades. Es importante señalar que sólo se ubican las fallas a un máximo de 400m, por lo que, en algunos casos se puede perder la continuidad, lo cual no quiere decir que estas no existan.

7. Conclusiones

Se realizó la caracterización de las alteraciones superficiales por medio de imágenes satelitales y se determinó la ubicación de fallas en el distrito minero de Guanajuato, por medio del análisis de datos aeromagnéticos usando deconvolución de Euler.

En cuanto a las imágenes satelitales se utilizaron imágenes Landsat 5, tomadas del sitio de internet del USGS (U.S. Geological Survey), debido a que están disponibles y sin costo. Estas imágenes fueron tratadas con los métodos: closterización, cociente de bandas, composiciones en falso color y análisis en componentes principales. Los resultados de los dos últimos métodos son los que permitieron ubicar las zonas con posibles alteraciones.

Los datos aeromagnéticos utilizados son de una base de datos del Servicio Geológico Mexicano adquirida por el IGF, estos datos fueron primero corregidos con reducción al polo, posteriormente se realizó una separación regional-residual, para posteriormente procesar la anomalía residual con el operador de deconvolución de Euler.

Las características de las fallas encontradas en las zonas con alteración tienden a ser perpendiculares a otra falla más representativas, es decir, tienden a estar en grupos de fallas las cuales están asociadas a la alteración.

Para poder señalar las zonas con características similares a las de la mina de El Cubo, se realizó la integración conjunta de los resultados obtenido de los métodos anteriores, de manera que las zonas con fallas y alteración superficial son las de posible interés.

De esta integración pueden señalarse cinco zonas que muestran las mismas características observadas para la mina el Cubo: zonas A, D, F G y H de la Figura 35.

Cabe señalar que los métodos utilizados en esta tesis son de bajo costo y no invasivos, además en su avance actual no requirieron corroboración en campo, aunque es recomendable hacerla para validar los resultados.

Para mejorar los resultados, es necesario utilizar imágenes con mejor resolución espectral y espacial, juntamente con un levantamiento de reflectancia de las formaciones geológicas superficiales, aunque estos procesos si involucran mayor inversión económica.

Referencias:

Abeyta, R.L., 2003, Epithermal gold mineralization of the San Nicolás Vein, El Cubo Mine, Guanajuato, Mexico: Trace element distribution, fluid inclusion micro thermometry and gas chemistry, New Mexico Institute of Mining and Technology, Socorro, NM, Unpublished Master's Thesis, 129 p.

Allrege, L. R., (1965), The Symposium on Magnetism of the Earth's Interior, J. Geomag. Geoelec., 17, 173-186.

Blakely, R. J. (1995). Potential Theory in Gravity and Magnetic Applications. Cambridge University Press.

Carreira A., Niell F., 1995, Análisis de Componentes Principales Sobre Datos Multiespectrales "Lansat-TM" e Interpretación de Cubiertas Vegetales en las Sierras de Tejeda y Almejara, Acta Botanica Malacitana, Malaga, pp 153-164.

Cátedra de Geofísica Aplicada. Tema 4. Prospección Magnetométrica. Rescatado desde: <http://www.unsa.edu.ar/geofisica-salta/Teorias/Unit12a.pdf>

Comisión Nacional del Agua, 2005, Fundamentos de Teledetección Espacial, Rescatado desde: <http://sigaconagua.gob.mx/SIGA/Percepcion/Fundamentos%20de%20teledeteccion%20de%20espacial.PDF>

Cordell, L., & Grauch, V. J. J. (1985). Mapping basement magnetization zones from aeromagnetic data. The utility of regional gravity and magnetic anomaly maps, 181.

Crósta, A. P. y McM Mooriz, J. (1989): «Enhancement of Landsat Thematic Mapper Imagery for Residual Soil Mapping in SW Minas Gerais State, Brazil: A Prospecting Case History in Greenstone Belt Terrain: Proceedins of <he Seventh Thematic Conference on Remote Sensing for Exploration Geology», Calgary, Alberta, Canadá, Oct. 2-6, pp. 1173-1187.

Fraser, 5. J. (1991): «Discrimination and Identification of Ferrie Oxides Using Satellite Thematic Mapper Data: A Newman Case Study». *Int. J Remote Sensing*, Vol. 12. No. 3, Pp. 635-641-

Geosoft. (n.d.). Tutorial de Euler 3D de Oasis Montaj 7.5. Retrieved from www.geosoft.com

Geosoft. (n.d.). Tutorial de Magmap de Oasis Montaj 7.5. Retrieved from www.geosoft.com

Geosoft. (n.d.). Tutorial de Oasis Montaj 7.5. Retrieved from www.geosoft.com

González de Lucio, G. d. (2013, Septiembre). Modelado magnético tridimensional de estructuras geológicas complejas con cómputo paralelo aplicado a la exploración minera. D.F., México. UNAM, Facultad de Ingeniería.

Grauch, V. J. S., & Cordell, L. (1987). Limitations of determining density or magnetic boundaries from the horizontal gradient of gravity or pseudogravity data. *Geophysics*, 52(1), 118-121.

Gross, W.H., 1975, New ore discovery and source of silver–gold veins, Guanajuato, México: *Economic Geology*, 70, 1175–1189.

Gunn, P. J., Maidment, D. and Milligan, P. R., (1997). Interpreting magnetic data in áreas of limited outcrop. *AGSO Journal of Geology and Geophysics*.

Gutierrez Nuñez, Deborah Valeria, et. Al. Interacciones y Materiales Magnéticos. [http://depa.fquim.unam.mx/amyd/archivero/Presentacion Materiales Magneticos_23635.pdf](http://depa.fquim.unam.mx/amyd/archivero/Presentacion_Materiales_Magneticos_23635.pdf)

Martinez-Reyes, 2015, Geochronology of Mexican mineral deposits. li: Veta Madre and Sierra Epithermal vein systems, Guanajuato district, *Boletin de la Sociedad Geológica Mexicana*, vol. 67, num. 2, p. 349-355.

Martín Moteiro. Geomagnetismo. L.A.F.E.. Rescatado desde:
<http://www.telmorehm.com/documentos/geomagnetismo.pdf>

Nieto–Samaniego, Barajas–Gea, Gómez–González, Rojas, Alaniz–Álvarez y Shunshan Xu. Geología, Evolución Estructural (Eoceno al actual) y Eventos Sísmicos del Graben de Santiaguillo, Durango, México. Universidad Autónoma de Mexico. Rescatado desde:

http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1026-87742012000100008

Noyola-Medrano, Hinojosa-Corona, Martín-Barajas, 2005. Caracterización Litológica de Regiones Deserticas Mediante Técnicas de Percepcion Remota: Un Ejemplo en la Franja Costera Central de Baja California, México, Revista Meicana de Ciencias Geologicas, v. 22 num. 2, p 229-245.

Ramos-Arroyo, Prol-Ledesma, Siebe-Grabach, 2004, Características geológicas y mineralógicas e historia de extracción del Distrito de Guanajuato, México. Posibles escenarios geoquímicos para los residuos mineros, Revista Mexicana de Ciencias Geologicas, v. 21, núm. 2, p. 268-284.

Randall-Roberts, J., 1990, Geology of El Cubo mine and area, Guanajuato, México, in Clark, K.F. (ed.), Mexican Silver Deposits, Guidebook: Society of Economic Geologists, SEG Guidebooks Series, 6, 213–227.

Reid, A. B., Allsop, J. M., Granser, H., Millett, A. J. Somerton, I. W., (1990). Magnetic interpretation in three dimensions using Euler deconvolution. Geophysics. Vol. 55, No 1, January 1990.

Ruiz-Armenta, Prol-Ledesma, 1995, Técnicas de Procesamiento de Imágenes en la Exploración de Yacimientos Minerales de Origen Hidrotermal, Física de la Tierra, n.7, Servicio de Publicaciones Universidad Complutense, pp105-137.

Saldaña-Alba, E., 1991, Evolución geológica y mineralización de la parte central de la Sierra de Guanajuato, in Convención sobre la evolución geológica de México,

Primer Congreso Mexicano de Mineralogía: México, D.F., Universidad Nacional Autónoma de México, 195–199.

A. Spector and F. S. Grant, 1970, Statistical Model for Interpreting Aeromagnetic Data, *Geophysics*, vol.35, No. 2, P. 293-302.

Thompson, D.T. (1982) EULDPH: A new technique for making depth estimates from magnetic data. *Geophysics*. Vol 47, No.1 (January 1982), p.31-37.

U.S. Geological Survey, Landsat 5 History, Retrieved from <https://landsat.usgs.gov/landsat-5-history>

Vasallo, 1996, Estructuras Circulares y Lineales en el Distrito Minero de Guanajuato, México, y su significado en la Prospección Minera, *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, vol, 13, num. 2, Universidad Autónoma de México, Instituto de Geología, p. 252-257.

Verduzco, B., Ferhead, J. D., Mackenzie, C., (2004). New insights into magnetic derivatives for structural mapping. *The Leading Edge*: 116-119.