



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

**Procesamiento de Datos
Aeromagnéticos mediante la
técnica "Tilt Derivative" en la
zona mineralizada de Buenavista
de Cuéllar, Guerrero**

TESIS

Que para obtener el título de
Ingeniero Geofísico

P R E S E N T A

González Bernal Abner David

DIRECTOR DE TESIS

M. en C. Juan Esteban Hernández Quintero



Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2019

Agradecimientos

A la Universidad Nacional Autónoma de México, mi alma mater, por brindarme la gran oportunidad para convertirme en ingeniero y sobre todo de alcanzar mis sueños. A la Facultad de Ingeniería por brindarme grandes experiencias que me fueron formando a lo largo de cinco años.

Al Servicio Magnético del Instituto de Geofísica que me proporcionó la información necesaria para la elaboración de este trabajo.

Al M. en C. Esteban Juan Esteban Hernández Quintero por su apoyo y confianza tanto en lo académico como en lo personal, por brindarme un lugar físico para investigar, hacer tarea o los pendientes que tuviera, por sus consejos y sobre todo por brindarme la oportunidad de involucrarme en su grupo de trabajo institucional y de exploración permitiéndome mejorar como profesionista y como persona. Seguiré intentando ser explorador pero la investigación ya forma parte importante de mi vida.

A mi familia por todo el apoyo que me brindaron, a mi madre especialmente, por tu esfuerzo y sacrificio, solo puedo decirte que siempre salimos adelante.

A Ofelia, por estar siempre en los momentos buenos como en los malos, por todas las risas y sobre todo por ser muy paciente.

A Lizbeth por ser una gran amiga, te agradezco tus consejos y sobre todo cada una de tus historias.

A mis amigos César, Diana, Villagrán, Isaac, Iván, Israel, Gus, Jesús, Díaz, Elizabeth, Reyna, Diego, Edwin, Fany. por hacer de cada día o de cada práctica algo especial.

A mis sinodales, en orden alfabético: Ing. Juan Pablo Aguirre Díaz, Dr. René Chávez Segura, M. en C. Gerardo Cifuentes Nava, M. en C. Juan Esteban Hernández Quintero, Mtro Daniel Armando Pérez Calderón. Por sus sabios consejos y aportaciones a este trabajo, por

su paciencia al resolver mis dudas, quedo infinitamente agradecido por haber tenido la oportunidad de trabajar en algún momento con ustedes.

A Laura y Linette por el tiempo que pasamos en el cubículo resolviendo cada duda o problema.

A todos los que conforman el Servicio Magnético: Marce, Antonio, Bianca, Gaby, Ana, Diego, por todos los festejos en el cubículo y permitirme integrarme a esta gran familia de trabajo.

Contenido

1. INTRODUCCIÓN	1
1.1. OBJETIVOS	4
1.2. JUSTIFICACIÓN DEL MÉTODO	5
2. MARCO TEÓRICO	6
2.2 POTENCIAL MAGNÉTICO	9
2.3 FUNDAMENTOS DE LA MAGNETOMETRÍA	10
2.3.1. <i>El Campo Geomagnético</i>	11
2.3.1.1. Origen del Campo Magnético	12
2.3.1.2. Componentes del Campo Magnético	15
2.4. VARIACIONES TEMPORALES DEL CAMPO MAGNÉTICO	17
2.4.1. <i>Variación Diurna</i>	17
2.4.2. <i>Variación Estacional</i>	18
2.4.3. <i>IGRF</i>	19
2.4.4. <i>Índices Geomagnéticos</i>	20
2.5. MAGNETIZACIÓN	23
3. ANTECEDENTES	25
3.1. LOCALIZACIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO	26
3.2. GEOLOGÍA	27
3.2.1. <i>Geología del Estado de Guerrero</i>	27
3.2.2. <i>Geología Local</i>	28
3.2.3. <i>Hidrografía</i>	31
3.2.4. <i>Tipo de Yacimiento</i>	31
3.2.5. <i>Regiones/Distritos mineros</i>	32
3.2.6. <i>Volumen de la producción minera</i>	33
3.3. ESTUDIOS PREVIOS	35

4. METODOLOGÍA	38
4.1. RECOPIACIÓN DE INFORMACIÓN MAGNETOMÉTRICA	38
4.2. AEROMAGNETOMETRÍA	39
4.3. PROCESAMIENTO	41
4.3.1. <i>Campo Total</i>	41
4.3.2. <i>Reducción al Polo</i>	41
4.3.3. <i>Regional y Residual</i>	43
4.3.4. <i>Tilt Derivatives</i>	43
4.3.5. <i>Gradiente Horizontal</i>	44
4.4. MODELADO MAGNÉTICO Y GEOLÓGICO	45
5. RESULTADOS E INTERPRETACIÓN	46
5.1. CARTA DE CAMPO TOTAL	46
5.2. CARTA DE REDUCCIÓN AL POLO	48
5.3. CARTA DE ANOMALÍA REGIONAL Y RESIDUAL	50
5.4. CARTA DE TILT DERIVATIVES	53
5.5. MODELADO MAGNÉTICO Y GEOLÓGICO	57
6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	67
6.1. DIAGNÓSTICO Y POTENCIAL MINERO	67
7. BIBLIOGRAFÍA	69

1. Introducción

Los proyectos de exploración con enfoque minero constan de varias etapas las cuales comprenden desde el reconocimiento regional luego el seguimiento semidetallado y de allí a la evaluación detallada. Esto se aprecia mejor al tomar en cuenta el modelo de Cadena de Valor de la minería tomada de Mineral Exploration, Moon (2006) en donde se muestra brevemente el proceso mencionado (Figura 1).



Figura 1: Cadena de Valor de la Minería modelo canadiense, se muestran las distintas etapas de exploración y costos de esta hasta llegar a obtener una reserva mineral.

La mayor parte de la exploración minera es llevada a cabo por empresas (pueden oscilar entre empresas mineras multinacionales o pequeñas empresas generalmente conocidas como empresas junior) con una base de capital sustancial general ya sea por la producción de minerales existente o de inversiones en mercados bursátiles. Es por ello por lo que uno de los principales objetivos al momento de hacer una inversión para el desarrollo de una mina sea reducir el riesgo a partir de la exploración y recopilación de información (Figura 2).

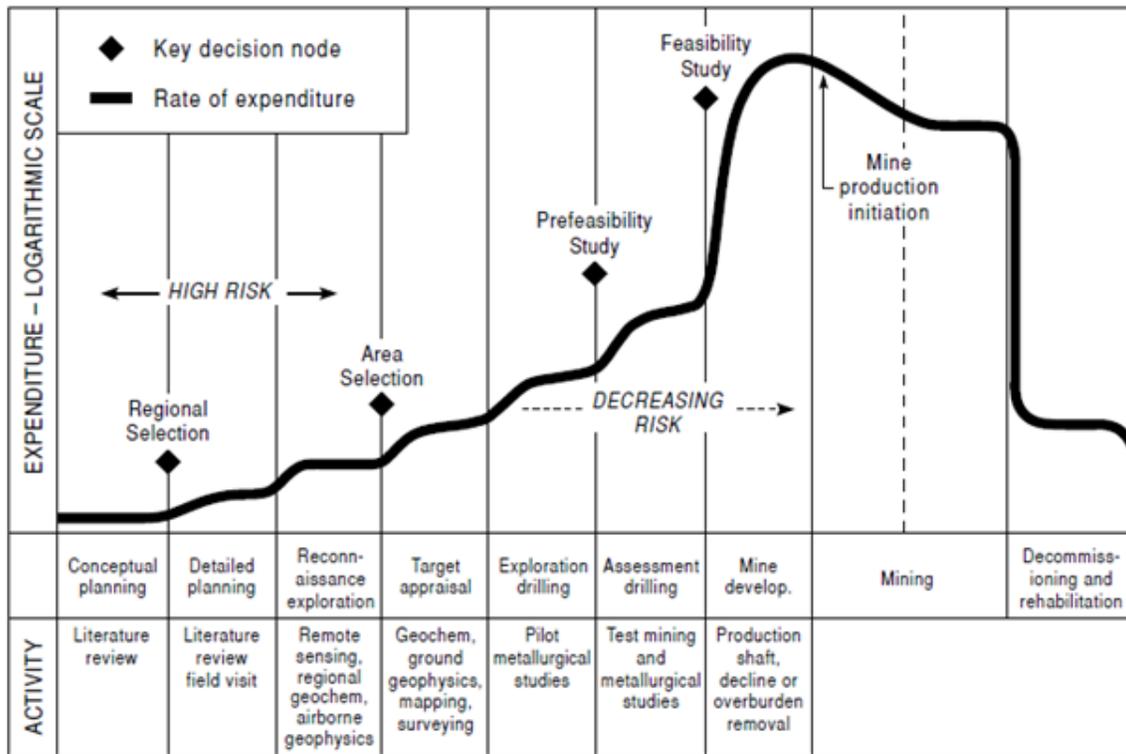


Figura 2: Fases de un proyecto de Exploración Modelo canadiense (Moon, 2006); conforme más información se va obteniendo de una zona el riesgo de la inversión va disminuyendo convirtiéndose en un proyecto factible.

El papel que desempeña la Geofísica en la exploración minera depende principalmente de la fase de exploración en que se encuentre el proyecto, así como del objetivo a prospectar. Para esto se tiene una amplia variedad de métodos, cuyo uso dependerá principalmente de la propiedad física a identificar de los minerales de interés, y de acuerdo con Moon (2006) algunas aplicaciones de los métodos Geofísicos en la exploración minera son las siguientes:

Gravimétrico: Muchas menas, particularmente de sulfuros metálicos y óxidos, son mucho más densos que los minerales que componen la mayor parte de las rocas, y por lo tanto los yacimientos son a menudo más densos que sus alrededores, por lo tanto, una forma efectiva de identificarlos es mediante gravimetría puesto que los equipos deben ser extremadamente sensibles a estos cambios de densidad.

Radiométrico: Los métodos radiométricos emplean mediciones de tasas de recuento de decaimiento radioactivo natural de partículas alfa, beta y gama sujetas a reglas estadísticas. Las radiaciones alfa y beta se examinan con uno o dos centímetros de roca sólida, e incluso un poco de suelo transportado puede ocultar los efectos alfa y beta de la mineralización. Los rayos gamma son más útiles en la

exploración, pero incluso tienen rangos de sólo uno o dos metros en materia sólida.

Sin embargo, los estudios de rayos gamma tienen aplicaciones geológicas en la ubicación de zonas de alteración en intrusiones ácidas e intermedias y en la búsqueda y evaluación de fosfatos y algunos depósitos de placer.

Resistivo: Algunos minerales tales como el grafito y los sulfuros metálicos (excepto la Esfalerita), conducen el flujo de electrones y pueden reducir la resistividad de la roca a valores muy bajos si están presentes en cantidades significativas. Este método se utiliza para estimar las extensiones de depósitos de varios minerales.

Polarización Inducida (IP): Los factores metálicos enfatizan las regiones que son cargables y conductoras y por lo tanto pueden ser útiles para detectar sulfuros masivos, pero pueden ocultar muy eficazmente los cuerpos de mineral de otros tipos

Polarización Espontánea (SP): Los yacimientos de sulfuros particularmente pueden producir anomalías negativas de varios cientos de milivoltios. Originalmente se pensó que estos potenciales se mantenían por oxidación del propio mineral, pero ahora se acepta generalmente que el mineral actúa como un conductor pasivo, centrándose las corrientes producidas por las reacciones de oxido-reducción.

Transitorio Electromagnético (TEM): Las corrientes inducidas se atenúan muy rápidamente en la roca, pero pueden persistir durante periodos considerables en yacimientos de sulfuros masivos (y a menudo en esquistos grafiticos).

Métodos de origen remoto (VLF, MT): Cuando se utiliza la radiación VLF (Very Low Frequency), los componentes magnéticos son generalmente los más importantes si los conductores se profundizan abruptamente, mientras que los componentes eléctricos proporcionan información sobre las conductividades de las capas planas de superficie cercana. Debido a las bajas frecuencias usadas, es especialmente útil en la localización de zonas con fracturas. Las señales Magnetoteléuricas ofrecen una amplia gama de frecuencias, pero una mala consistencia en la dirección y la potencia de la fuente.

Sísmico: Son relativamente poco utilizados en la exploración de minerales, en parte debido a su alto costo, pero más especialmente porque la mayoría de los cuerpos de mineral en rocas ígneas y metamórficas carecen de capas coherentes.

Radar (GPR): Los resultados de GPR se muestran como imágenes muy similares a las utilizadas para el trabajo de reflexión sísmica, pero la penetración se limita a

unas pocas decenas de metros. Se puede utilizar en tierra para ubicar los paleocanales de un río y para definir lugares favorables dentro de ellos para los depósitos de placer.

Magnético: Los levantamientos magnéticos son la forma más rápida y más económica de la geofísica puesto que puede proporcionar información útil de exploración al obtener respuestas de algunos minerales los cuales producen anomalías fácilmente detectables en el campo magnético de la Tierra.

Actualmente, se cuenta con la tecnología suficiente para emplear drones y aeronaves que recopilen datos los cuales pueden ser adquiridos en áreas remotas, accidentadas y con cobertura vegetal densa, así también pueden sobrevolar regiones hostiles, en las que existe un riesgo real para la vida, por ejemplo, zonas próximas a condiciones meteorológicas adversas (riesgos naturales o zonas catastróficas), o incluso zonas con fuertes influencia humana (conflictos bélicos, contaminación).

1.1. Objetivos

El presente trabajo se enfoca al análisis de un proyecto minero en tres líneas principales:

- a) El uso de nuevas metodologías del procesamiento de datos aeromagnéticos basados en la derivada del ángulo de inclinación en la búsqueda de cuerpos o estructuras mineralizadas.
- b) El acceso a información nueva del área de estudio, tal y como las cartas geoquímicas, cartas mineras de México y la actividad minera de la zona (Yacimientos minerales conocidos, Empresas mineras, Rocas dimensionables).
- c) Se combinan los procesos ya conocidos para estimar y correlacionar las propiedades geométricas, estructurales, geológicas, geoquímicas y magnéticas para obtener más información en zonas de alto potencial minero.

1.2. Justificación del Método

Los levantamientos geofísicos aéreos proporcionan las formas más rápidas y rentables de obtener información geológica sobre grandes áreas. Para que una técnica geofísica sea útil en la exploración minera, deben existir contrastes en las propiedades físicas de las rocas afectadas que se relacionan, directa o indirectamente, con la presencia de minerales económicamente significativos.

Los métodos magnéticos, electromagnéticos, rayos gamma y más recientemente gravimétricos no requieren ser realizados a nivel topográfico, por lo que se ha logrado colocarlos sobre un aeroplano y así adquirir mediciones, las cuales inevitablemente presentarían una menor sensibilidad, debido a que se encuentran más lejanas a la fuente; sin embargo, su principal virtud es la velocidad con la que se pueden cubrir grandes áreas.

Algunos minerales producen anomalías que son fácilmente detectables en el campo magnético de la Tierra porque las rocas que los contienen se magnetizan. La magnetización puede ser del tipo temporal (inducida) y en la misma dirección que el campo de la Tierra o permanente (remanente) y fija en la dirección con respecto a la roca.

Los levantamientos magnéticos no sólo están entre los más útiles en geofísica aérea, sino que también, debido al bajo peso y la simplicidad del equipo, es más barato. El instrumento estándar es ahora el magnetómetro de vapor de cesio de alta sensibilidad. Los magnetómetros de protones todavía se utilizan de vez en cuando pero el magnetómetro del cesio resulta ser cientos de veces más sensible.

Los cuerpos magnetizados producen distintas anomalías en diferentes latitudes magnéticas, y los cambios regionales en la inmersión son mucho más importantes desde un punto de vista de interpretación que los cambios regionales en magnitud absoluta, por ejemplo, las distorsiones que cubren áreas de cientos de kilómetros de ancho pueden considerarse como debidas a un pequeño número de dipolos ubicados en el límite de la base-manto.

Las anomalías magnéticas son causadas por rocas con minerales Ferromagnéticos en general (hematita con la forma cristalina de magnetita). Debido a que la magnetita es un mineral accesorio muy común, tiende a concentrarse en tipos específicos de rocas, los mapas magnéticos contienen una gran cantidad de información sobre los tipos de rocas y las tendencias estructurales que se pueden interpretar cualitativamente.

Se eligió trabajar principalmente la zona de Buenavista de Cuellar puesto que cuenta con bastantes estudios geológicos y recientemente distintas disciplinas han

sumado estudios que permiten comprender mejor dicha zona tal que, futuros proyectos mineros sean factibles, además la presencia de actividad minera (ya sea activa o inactiva) dentro de la zona permite correlacionar la mayor parte de la información.

El trabajo comprende un análisis de campo magnético total mediante las técnicas de reducción al polo, anomalía regional, anomalía residual, y derivada de ángulo de fase (Tilt Derivative) para los datos aeromagnéticos proporcionados por el Servicio Geológico Mexicano.

2. Marco Teórico

La magnetometría es uno de los métodos geofísicos más antiguos empleados en la exploración geofísica puesto que estudia las variaciones en la intensidad del campo magnético producido por los cuerpos y/o estructuras en el subsuelo. Además, se usa muy probablemente por su bajo costo, así como su facilidad en la adquisición de datos.

Forma parte de los métodos potenciales que son una aplicación práctica de la Teoría del Potencial, la cual busca describir diversos fenómenos físicos de la Tierra como lo son la atracción gravitacional, campos magnéticos de la corteza y la litosfera, etc. (Blakely, 1996).

Fue en 1687 que surgieron los primeros destellos de la teoría del potencial gracias a Sir. Isaac Newton quien propuso la Ley de Gravitación Universal la cual analiza como cada partícula de materia en el universo atrae a todos los demás con una fuerza directamente proporcional a su masa e inversamente proporcional al cuadrado de su distancia de separación y casi un siglo después, Pierre-Simon, Marqués de Laplace, demostró que la atracción gravitacional obedece a una ecuación diferencial simple.

El desarrollo matemático de ambas aportaciones describe no sólo la atracción gravitacional sino también una gran clase de fenómenos, incluyendo campos magnetostáticos y electrostáticos, campos generados por corrientes eléctricas uniformes, transferencia constante del calor a través de medios homogéneos, flujo constante de fluidos ideales, el comportamiento de sólidos elásticos, densidad de probabilidad en problemas de caminata aleatoria, movimiento inestable de la onda de agua, y la teoría de funciones complejas (Blakely, 1996).

La atracción gravitacional de la Tierra y el campo magnético inducido por las corrientes eléctricas son ejemplos de campos vectoriales, es decir pueden caracterizarse por sus líneas de campo (líneas de flujo o líneas de fuerza).

El campo de fuerza F se describe por medio del campo escalar W el cual se define como la función trabajo (potencial ϕ del campo vectorial F) o como su negativa dependiendo de la convención que se tome, es decir, si las partículas de signos iguales se atraen entonces usaremos $F = \nabla\phi$. Si por otro lado las partículas del mismo signo se repelen entonces usamos $F = -\nabla\phi$ (Kellog, 1953).

El teorema de Helmholtz muestra que un campo vectorial que desaparece en el infinito está completamente especificado por su divergencia y su curvatura si son conocidos en todo el espacio, es decir, cualquier campo vectorial F que sea continuo y que sea cero al infinito se puede expresar como el gradiente de un escalar y el rotacional de un vector; donde ϕ y A son el potencial escalar y vectorial respectivamente (Blakely, 1996), es decir, comprende dos regiones principales: la región en la que se encuentra la fuente, y una segunda región donde no hay una fuente, pero puede existir un campo.

$$\mathbf{F} = \nabla\phi + \nabla \times \mathbf{A} \quad 1$$

El Teorema de Gauss o Teorema de la Divergencia ocurre cuando F es armónico, limitado por una superficie S de una esfera, y el punto P está en el centro de la esfera. Si P , Q y R son funciones continuamente derivables entonces:

$$\int_V \nabla \cdot \mathbf{F} \, dv = \oint_S \mathbf{F} \cdot d\mathbf{S} \quad 2$$

Si expresamos la divergencia de la Ecuación 2 en sus componentes vectoriales i , j , k la ecuación queda de la siguiente forma:

$$\mathbf{F}(x, y, z) = \int_V \left[\frac{\delta P(x,y,z)}{\delta x} \mathbf{i} + \frac{\delta Q(x,y,z)}{\delta y} \mathbf{j} + \frac{\delta R(x,y,z)}{\delta z} \mathbf{k} \right] dv \quad 3$$

Asumiendo que $Z=F(x,y)$ y separando la superficie con el fin de tener la proyección sobre el volumen de la función R reescribimos la ecuación 3:

$$\int \frac{\delta R}{\delta z} dv = \int_D [R(x, y, f_2) - R(x, y, f_1)] dx dy \quad 4$$

Por lo tanto, el valor de una función armónica en cualquier punto es simplemente el promedio de la función armónica sobre cualquier esfera concéntrica sobre el punto, siempre y cuando la función sea armónica en toda la esfera.

De acuerdo con la teoría del potencial, existen dos tipos de campo, los campos materiales que describen alguna propiedad física de un material en un determinado tiempo y los campos de fuerza los cuales describen las fuerzas que actúan en cada punto del espacio en un tiempo determinado. Los campos físicos (Eléctricos, Magnéticos, Gravitacionales, Electromagnéticos) se pueden generar debido a sus propiedades físicas (masas, cargas o corrientes).

Desde el punto de vista matemático, podemos generar campos potenciales al tomar en cuenta las ecuaciones 5 y 6:

$$\nabla \cdot \mathbf{F} = \mathbf{S} \quad 5$$

De la cual la componente normal de un campo conservativo debe promediar a cero en el contorno cerrado de una región en la que su potencial es armónico, por lo que el flujo de \mathbf{F} en la región equivale exactamente al flujo que sale de la región, lo que implica que no existen fuentes de \mathbf{F} en dicha región.

$$\nabla \times \mathbf{F} = \mathbf{C} \quad 6$$

Esta ecuación define un campo vectorial como irrotacional en una región si su curvatura se desvanece en cada punto es decir el campo no tienen vorticidad. Si matemáticamente alguna de las ecuaciones o ambas es diferente de cero, cambiaría el campo en el que se está trabajando, es decir, dejaría de ser un campo armónico y podría ser un campo conservativo, solenoidal o complejo.

Teniendo esto en cuenta podemos clasificar los distintos campos potenciales a partir de estas ecuaciones, quedando de la siguiente forma:

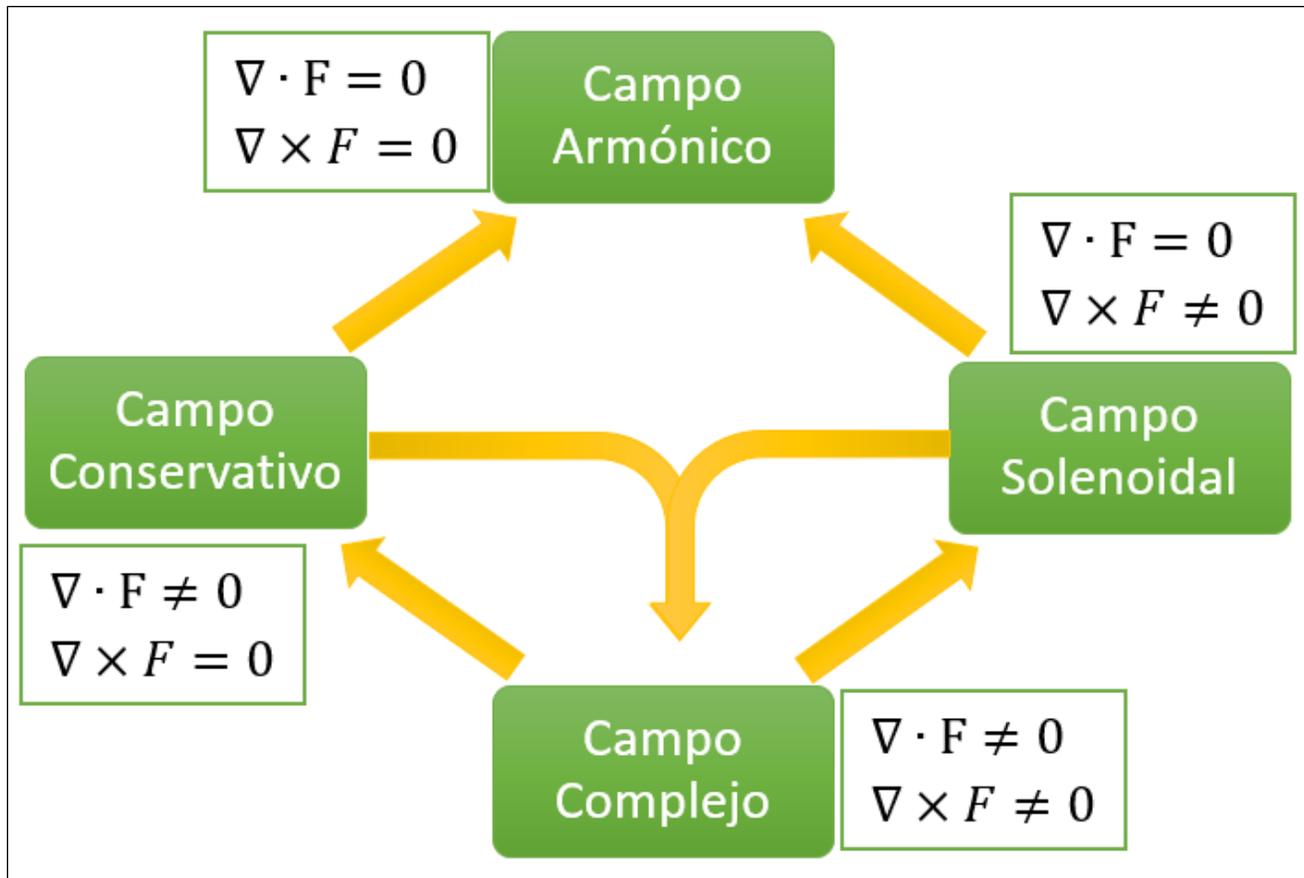


Figura 3: Clasificación de los campos en función de sus ecuaciones de campo

2.2 Potencial Magnético

Conceptualmente el potencial escalar magnético A en el punto P es el trabajo realizado en un polo positivo desde el infinito por cualquier camino contra un campo magnético $F(r)$. (Telford 1990). Esta fuerza actúa sobre un pequeño diferencial dl_a originado por la corriente eléctrica en el elemento dl_b dado por la fuerza de Lorentz.

$$df_a = C_m I_a I_b \frac{dl_a \times (dl_b \times r)}{r^2} \quad 7$$

Integrando la ecuación 7 y cumpliendo la ley de Biot-Savart:

$$B = C_m I_b \oint \frac{dl_b \times r}{r^2} \quad 8$$

La corriente eléctrica induce una fuerza en una carga móvil; la fuerza es el producto vectorial del campo de inducción magnética y la velocidad de la carga.

La ley de Gauss aplicada a campos magnéticos nos dice que la Inducción Magnética (B ; también llamado Campo Magnético) no diverge, esto es:

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0 \quad 9$$

De la misma forma, de acuerdo con el teorema de Helmholtz, existe un potencial vectorial A tal que:

$$\mathbf{B} = \nabla \times \mathbf{A} \quad 10$$

Sabemos que para el campo magnético (B) el potencial vectorial siempre existe, pero un potencial escalar también existe bajo ciertas circunstancias las cuales se demuestran a partir de las ecuaciones de Maxwell las cuales afirman que el campo magnético B es igual a la suma vectorial de las diversas formas de carga que se mueven en la región.

$$\nabla \times \mathbf{B} = 4\pi C_m \left(\mathbf{I}_m + \nabla \times \mathbf{M} + \frac{\delta D}{\delta t} \right) \quad 11$$

Donde:

I_m : Corrientes macroscópicas

M : Magnetización

$\frac{\delta D}{\delta t}$: Corrientes de Desplazamiento

Si no existen corrientes en la región de estudio, entonces $\nabla \times B = 0$ y se considera al campo B como un campo armónico.

2.3 Fundamentos de la Magnetometría

Las primeras observaciones sobre el magnetismo se remontan a la cultura china la cual había descubierto el efecto orientador de la magnetita a principios del siglo IV a.C. ya que sus buques habían llegado a la costa este de la India por primera vez en 101 a.C. utilizando una brújula navegacional (Nabighian, 2005).

Medio siglo después Sir William Gilbert realizó la primera investigación del magnetismo terrestre demostrando que el campo magnético de la tierra se puede

aproximar por el campo de un imán permanente que se extiende en una dirección norte-sur general cerca del eje rotatorio de la tierra (Telford, 1990).

Ya en la segunda guerra mundial se realizaron adaptaciones de la brújula creando instrumentos basados en los inductores de bobina rotatorios los cuales también fueron desarrollados y empleados después de la guerra para levantamientos terrestres y aéreos tanto para la industria de la exploración como para los esfuerzos del gobierno para mapear la geología regional a escalas nacionales (Nabighian, 2005).

2.3.1. El Campo Geomagnético

El modelo físico que mejor representa al campo magnético es el de un dipolo magnético; el cual es un sistema compuesto por dos cargas magnéticas de misma intensidad, pero de signo contrario (Figura 4)

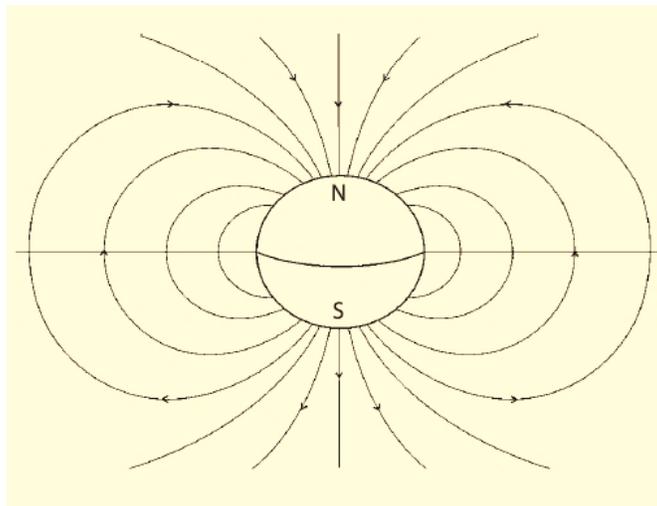


Figura 4: Vista idealizada del modelo dipolar de campo magnético y las líneas de campo. Imagen tomada de Lanza y Meloni (2006)

De acuerdo con Lanza y Meloni (2006), el campo Geomagnético se compone de cuatro aportaciones fundamentales. Cada una de las aportaciones puede separarse de la siguiente manera:

- El campo principal \mathbf{B}_0 , generado en el núcleo externo por un mecanismo de geodinamo debido a las corrientes de convección; esto genera aproximadamente el 90% del campo total.
- El campo cortical \mathbf{B}_c , generado por rocas magnetizadas en la corteza terrestre en donde las temperaturas son menores a la temperatura de

Curie, es un campo más estable con variaciones en periodos de miles de años.

- El campo externo B_t , producido por corrientes eléctricas que fluyen en la ionosfera y en la magnetosfera, debido a la interacción de la radiación electromagnética solar y el viento solar con el campo magnético de la tierra.
- El campo residual B_r , resultante de un proceso de inducción electromagnética generado por las corrientes eléctricas inducidas en la corteza y el manto superior por las variaciones de tiempo del campo magnético externo.

El campo total (B) se compone de la suma de las cuatro contribuciones, quedando expresado de la siguiente manera:

$$B = B_0 + B_c + B_t + B_r \quad 12$$

En donde:

B : Valor de campo magnético medido en la superficie de la Tierra

B_0 : Campo principal

B_c : Campo cortical

B_t : Campo externo

B_r : Campo residual

2.3.1.1. Origen del Campo Magnético

Partiendo de la ecuación 12, conocemos las principales contribuciones del campo magnético, siendo la más destacada aquella que genera el campo principal B_0 . Las primeras ideas que sugerían el comportamiento magnético de la Tierra como un gran imán partieron de la abundancia del hierro y sus propiedades magnéticas sin embargo esta hipótesis se deshecho al considerar que los materiales pierden su magnetismo estando a temperaturas elevadas.

Tomando en consideración estudios sísmicos que buscaban detallar el interior de la Tierra, sabemos hoy en día que la Tierra se conforma por capas con diferentes espesores. (Campbell 2003)

Con el fin de relacionar los procesos físicos que actúan en la generación del campo magnético terrestre analizaremos el modelo de capas que componen a la Tierra (*Figura 5*) desde la más superficial hasta la de mayor profundidad. Primeramente, tenemos la corteza la cual es de unos 5 Km de espesor por debajo de los océanos, pero alrededor de 30 Km en la mayoría de las regiones continentales; y es en esta capa donde se tiene la presencia de rocas magnetizadas las cuales generan un campo de menor intensidad llamado campo cortical.

El manto superior (Astenosfera) se extiende a una zona de transición cerca de una profundidad de 600 km a 700 km, donde comienza el manto inferior, cabe resaltar que presenta un comportamiento dúctil en la que existen pequeños movimientos de convección los cuales permiten la actividad volcánica, la expansión constante del piso oceánico así como una aportación al campo magnético al considerarse un campo residual B_r debido al proceso de inducción electromagnética ocasionado por corrientes eléctricas que circulan en esta capa.

La frontera entre el manto y el núcleo externo se encuentra a unos 2890 Km siendo este último el que se extiende hasta los 5150 Km rodeando al núcleo interno sólido.

Es la relación entre los núcleos aquella que sostiene la teoría más aceptada que explica el origen del campo principal como la diferencia entre la rotación del núcleo interno y el núcleo externo (Dínamo autosostenido), esto genera corrientes de convección las cuales junto a la rotación de la Tierra originan más del 90% del campo magnético terrestre.

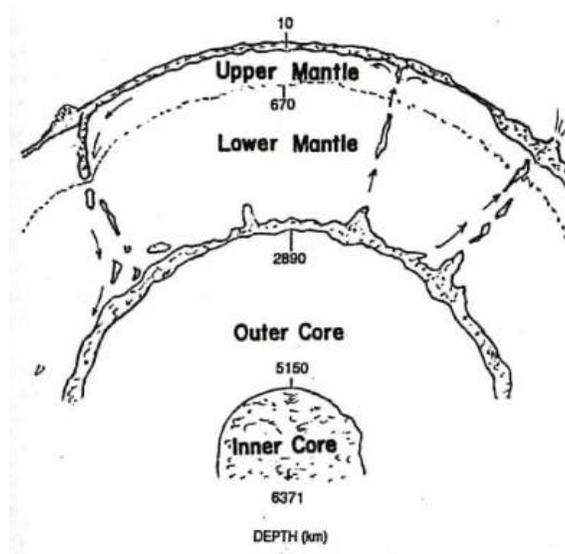


Figura 5: Esquema de las capas que conforman la Tierra, Tomado de Campbell, Wallace (2003)

Retomando el modelo de dipolo magnético, así como las observaciones del magnetismo, se definieron coordenadas geomagnéticas empleando colatitudes y longitudes. Las Colatitudes Θ , son ángulos definidos con respecto al eje del dipolo geomagnético, en lugar del norte geográfico; mientras que la longitud geomagnética se define con respecto a una nueva línea de meridiano cero.

Esto nos permite identificar la posición de los puntos en la superficie de la Tierra con respecto a un marco geomagnético de referencia además es posible identificar polos geomagnéticos Norte y sur como los puntos donde el eje del dipolo central intersecta la superficie.

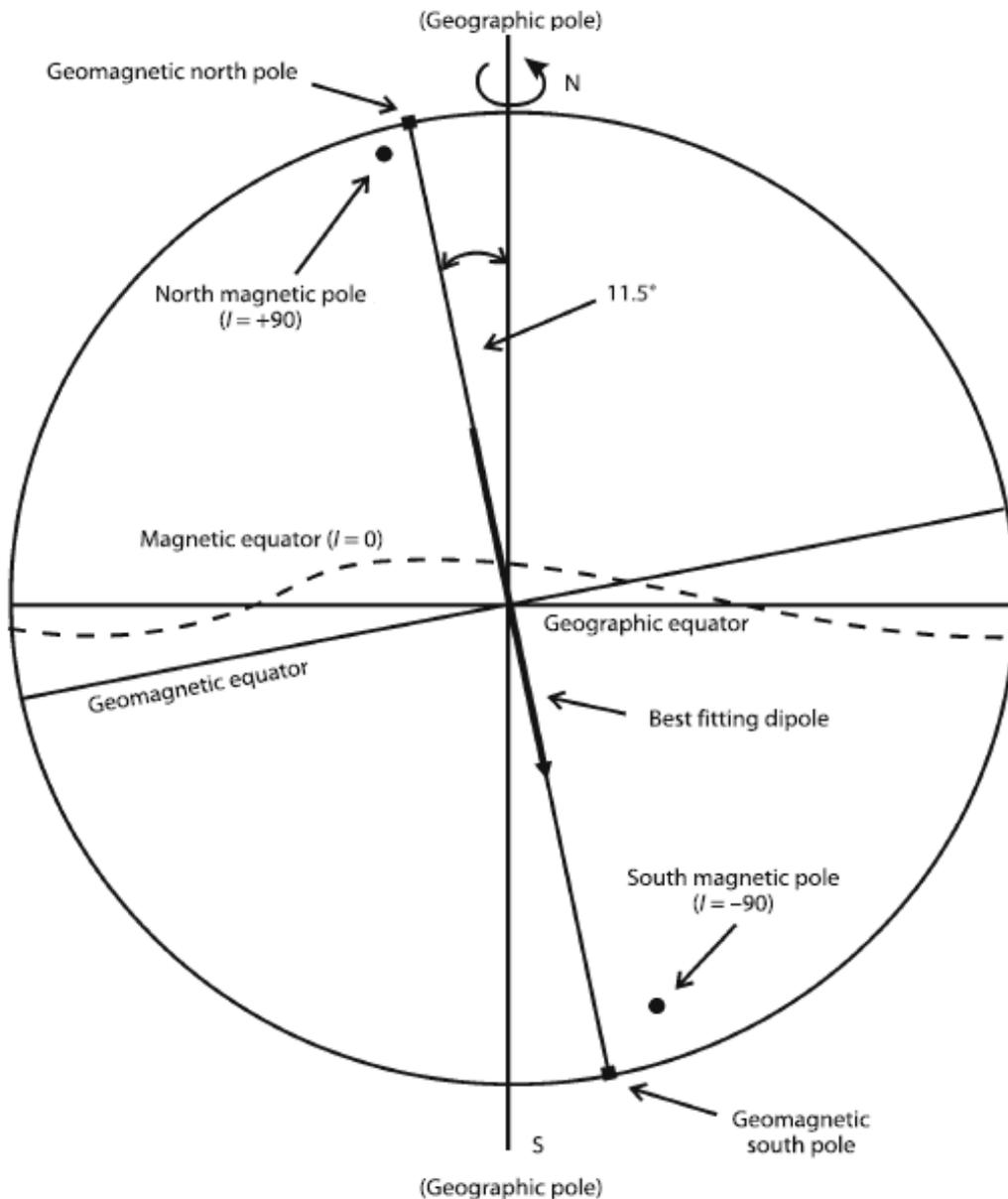


Figura 6: Coordenadas Geomagnéticas. Tomado de Lanza y Meloni (2006)

2.3.1.2. Componentes del Campo Magnético

El campo magnético se puede descomponer en siete elementos distintos a lo largo de tres direcciones teniendo en cuenta el punto de medición como el origen de un sistema cartesiano de referencia.

El eje X corresponde al meridiano geográfico dirigido al norte, el eje Y corresponde al paralelo geográfico dirigido al este y el eje Z paralelo a la vertical en el punto siendo positivo hacia el centro de la Tierra.

El módulo del vector de campo magnético también llamado Intensidad Total está representada por el vector F mientras que la proyección sobre el plano horizontal se denomina componente horizontal H.

Para describir el campo empleamos elementos angulares, es decir, la inclinación I del vector F con respecto al plano horizontal, y la declinación D, el ángulo entre H, la componente horizontal de F y el componente X.

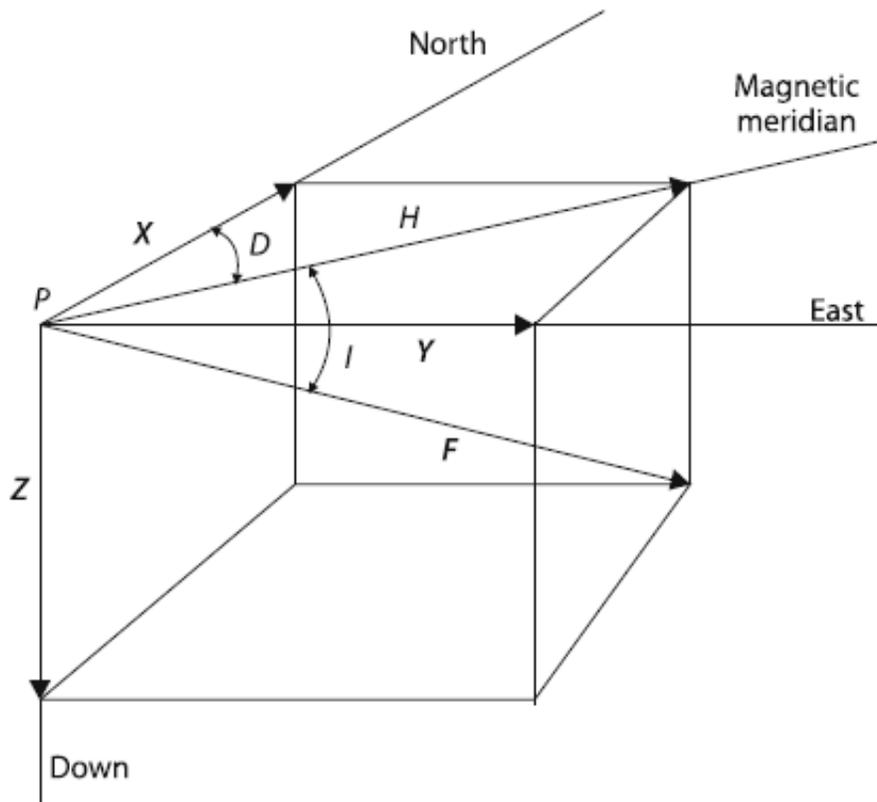


Figura 7: Diagrama de componentes del Campo Magnético tomado de Lanza y Meloni (2006)

De la misma forma que tenemos estas componentes tenemos relaciones matemáticas entre cada una de ellas, como se muestra en la Tabla 1 a continuación:

Sistema de Referencia	Componentes Magnéticas utilizadas	Ecuaciones de Transformación	Ecuaciones de Transformación
Coordenadas Cartesianas	X, Y, Z	$H = \sqrt{X^2 + Y^2}$ $D = \tan^{-1} \frac{Y}{X}$ $Z = Z$	$F = \sqrt{X^2 + Y^2 + Z^2}$ $D = \tan^{-1} \frac{Y}{X}$ $I = \tan^{-1} \frac{Z}{\sqrt{X^2 + Y^2}}$
Coordenadas Cilíndricas	H, D, Z	$X = H * \cos D$ $Y = H * \sin D$ $Z = Z$	$F = \sqrt{H^2 + Z^2}$ $D = D$ $I = \tan^{-1} \frac{Z}{H}$
Coordenadas Esféricas	F, D, I	$X = F * \cos I * \cos D$ $Y = F * \cos I * \sin D$ $Z = F * \sin I$	$H = F * \cos I$ $D = D$ $Z = F * \sin I$

Tabla 1: Componentes magnéticas y ecuaciones de transformación entre sistemas, Barreto (1997)

2.4. Variaciones Temporales del Campo Magnético

Las variaciones presentes en el campo magnético de la Tierra se pueden clasificar de acuerdo con su origen ya sea interno o externo con respecto a la superficie de la Tierra, por ejemplo, las variaciones en las escalas de tiempo de más de cinco años llamadas Variación Secular son de origen interno mientras que las variaciones relacionadas al ciclo solar (11 años aproximadamente) son un ejemplo de variaciones de origen externo.

2.4.1. Variación Diurna

Las variaciones regulares del campo magnético están relacionadas con la rotación de la Tierra, Sol y Luna. El más prominente es la variación diurna teniendo una amplitud del orden de 10-100 nT.

La radiación solar ioniza la atmósfera siendo mayor durante las horas de luz del día por lo que el gas ionizado en la ionosfera se mueve en el campo magnético de la Tierra, creando corrientes eléctricas que se ven como variaciones diarias en las mediciones magnéticas. La variación del campo magnético en días magnéticamente tranquilos se llama variación sq. (IAGA, 1996)

Esta variación toma gran importancia en la exploración geofísica puesto que nos ayuda a generar la anomalía magnética para los datos que se estén trabajando. Para esto se debe asignar un magnetómetro con el fin de adquirir datos en un solo punto (Base magnética) durante un tiempo mayor al levantamiento de los datos de campo; o de igual manera, se puede hacer uso de los datos que reportan los observatorios magnéticos; tal es el caso de México que cuenta con el Observatorio Magnético de Teoloyucan, Estado de México.

Posteriormente de los valores del campo magnético que se registraron en la Base, se calcula una regresión lineal con el método de mínimos cuadrados; finalmente a los valores de la base se le sustrae el valor encontrado con el modelo matemático (*Ecuación 13*) para el tiempo que duro el estudio.

$$\delta F = F_{BASE} - F_{LINEAL}$$

13

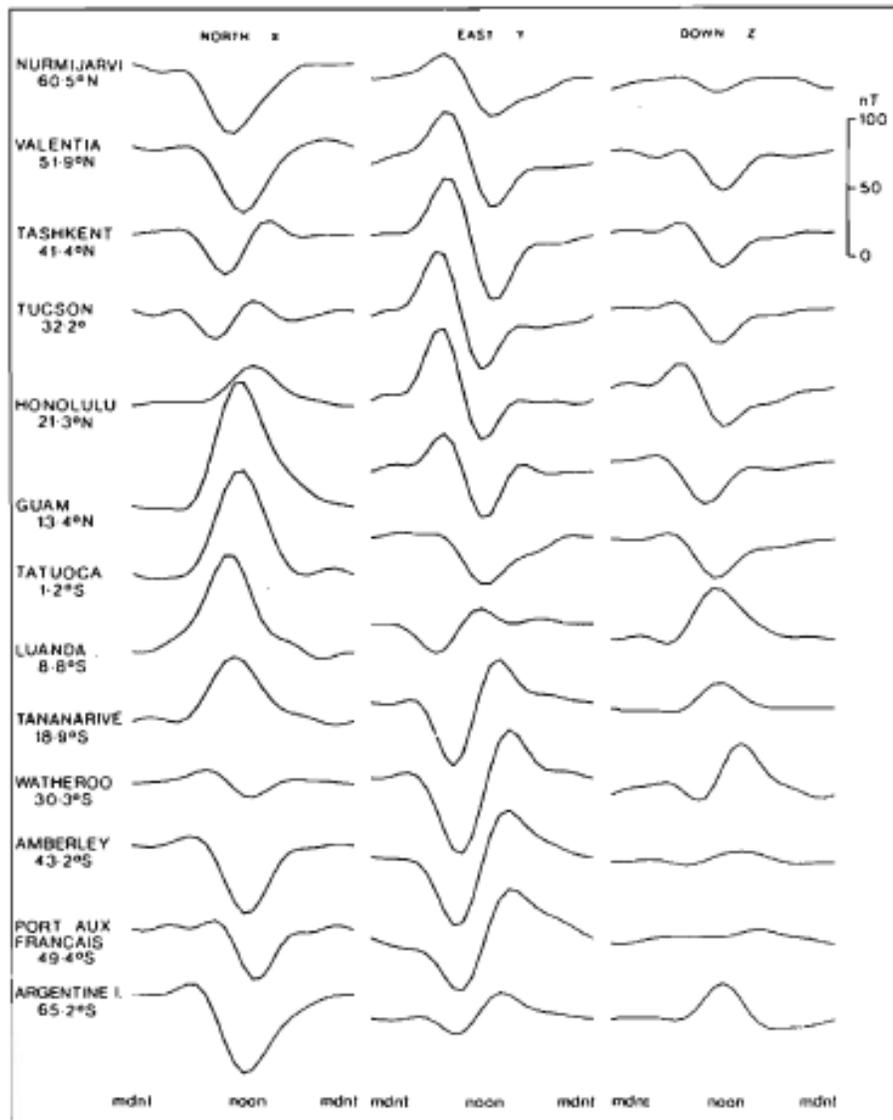


Figura 8: Variación diaria del campo magnético a diferentes latitudes en un día tranquilo (1983), tomado de IAGA

2.4.2. Variación Estacional

Otra variación periódica observada en los datos magnéticos es la variación estacional la cual posee una pequeña amplitud (del orden de unos pocos nT). Una posible explicación para esta variación es el movimiento orbital de la Tierra alrededor del Sol y la inclinación de la Tierra con el plano ecuatorial del Sol para que la radiación sea mayor durante algunas épocas del año comparado con otras.

Una forma de poder observar estas pequeñas variaciones sería tomando en cuenta las variaciones entre dos equipos que se encuentren midiendo la misma componente de campo magnético.

Recientemente se efectuó un estudio similar en el Servicio Magnético del Instituto de Geofísica de la Universidad Nacional Autónoma de México. El estudio consistió en obtener la variación para el campo total (F) del año 2016 a partir de los datos del magnetómetro GSM 90 desarrollado por GemSystems (magnetómetro escalar de alta precisión absoluta (0.2nT) previsto para Observatorios magnéticos, a largo plazo, monitoreo de matrices en volcanología y áreas donde la estabilidad a largo plazo y la precisión son necesarias) y de los datos del Variógrafo Fluxgate de 3 componentes.

Se escogieron días que se encontraran dentro de los periodos estacionales considerando que ambos registros estuviesen completos y que fueran días magnéticamente quietos (sq). Los resultados muestran una ligera variación (entre 2 y 3 nT); los cuales se asociaron al este tipo de influencia estacional puesto que la firma magnética se conservaba.

2.4.3. IGRF

El IGRF (Campo de Referencia Geomagnético Internacional) es el modelo global aceptado del campo geomagnético dado en forma de conjuntos de coeficientes de armónicos esféricos.

Cada modelo consiste en un conjunto de coeficientes armónicos esféricos denominados coeficientes de Gauss (g_n^m, h_n^m) los cuales se utilizan en una serie truncada de la expansión en armónicos esféricos de la función potencial geomagnética para fuentes de origen interno.

$$V = a \sum_{n=1}^N \left(\frac{a}{r}\right)^{n+1} \sum_{m=0}^n (g_n^m \cos m\phi + h_n^m \sin m\phi) P_n^m(\Theta) \quad 14$$

Este modelo toma gran importancia en la exploración geofísica puesto que nos ayuda a generar la anomalía magnética para los datos que se estén trabajando. Para poder calcular el valor de campo del IGRF la NOAA (National Centers for Environmental Information) pone a disposición la calculadora de campo magnético (*Figura 9*).

Para poder usarla se requiere conocer las coordenadas en las que se encuentra la zona de estudio, la elevación (nivel medio del mar o GPS) y la fecha para la que se necesita generar dicho valor.

Finalmente, para obtener la anomalía magnética se realiza la operación de la ecuación 15, tomando en cuenta el valor generado del IGRF así como el valor de variación diurna, en donde se indica que se sustraerán estos valores a los valores de campo, es decir:

$$\Delta F = F_{obs} - F_{IGRF} - \delta F \quad 15$$

Calculate Magnetic Field

Latitude: S N

Longitude: W E

Elevation: GPS Mean sea level

Model: WMM (2014-2019) IGRF (1690-2019)

Start Date: Year Month Day

End Date: Year Month Day

Step size:

Result format: HTML XML CSV

Figura 9: Calculadora de Campo Magnético, tomado de la página oficial de la NOAA

2.4.4. Índices Geomagnéticos

La actividad magnética se refiere a la variabilidad de amplitud de las variaciones de tiempo magnéticas asociadas con campos de origen externo, para ello se emplean índices que cuantifiquen la actividad magnética empleando un ajuste

predeterminado para que coincida con las incidencias estadísticas de los niveles de actividad entre las estaciones. (Campbell, Wallace; 2003).

Indices K, Kp, ap, Ap

El índice **K** resume la actividad geomagnética generada por la radiación solar en la magnetosfera la cual se expresa asignando un código, un número entero en el rango de 0 a 9 a cada 3 horas (UTC). Se determina a partir de los rangos en H y D (nT), generando la conversión de un rango a un índice de valor numérico utilizando una escala logarítmica. El índice **Ap** se obtiene promediando los ocho valores de **ap** para cada día (Tabla 2).

<i>Índice Kp</i>	<i>Índice ap</i>
0	0
0+	2
1-	3
1	4
1+	5
2-	6
2	7
2+	9
3-	12
3	15
3+	18
4-	22
4	27
4+	32
5-	39
5	48
5+	56
6-	67
6	80
6+	94
7-	111
7	132
7+	154
8-	179
8	207
8+	236
9-	300
9	400

Tabla 2: Conversión de índice Kp a índice ap

Índices AE, Au

El índice AE es un índice de inyección eléctrica auroral en la región de latitud típica de la zona auroral del hemisferio norte, esto nos permite obtener un límite inferior de la componente H el cual proporciona una medida de la fuerza actual; del mismo modo, se determina un límite superior de la componente H; al que denominaremos índice AU el cual da una medida de las fuerzas individuales hacia el este y oeste.

Índice Dst (Tiempo de alteración por tormenta)

Busca medir las perturbaciones planetarias caracterizadas por una marcada disminución en la componente H (tormentas magnéticas).

Las grandes perturbaciones en H son indicativas de un aumento en la intensidad de la corriente del anillo y típicamente aparecen en escalas de tiempo de alrededor de una hora.

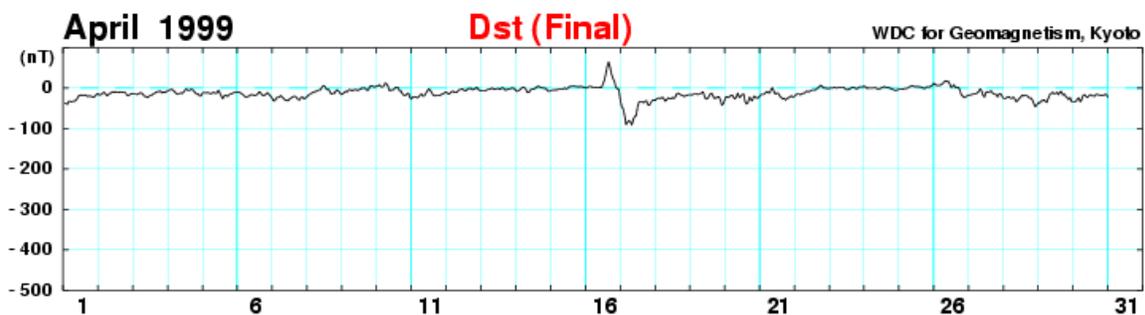


Figura 10: Gráfico de Índice Dst para el mes de adquisición de los datos magnéticos por el SGM, en el gráfico se logra apreciar una tormenta magnética el 17 de Abril.



Figura 11: Gráfico de Índice Dst para los últimos días de adquisición de los datos magnéticos por el SGM a principios de Mayo.

2.5. Magnetización

De acuerdo con Blakely (1996), las propiedades magnéticas de un volumen de material pueden considerarse en términos del efecto magnético neto de todos los dipolos dentro del volumen. Para ello podemos definir una cantidad vectorial (M) como la suma vectorial de todos los momentos dipolares individuales m_i dividido por el volumen, es decir:

$$M = \frac{1}{V} \sum_i m_i \quad 16$$

El momento magnético de un cuerpo con extensión finita está dado por la suma vectorial de los momentos magnéticos de sus átomos. Si el momento de los átomos es $m = 0$, entonces el momento total de la muestra también es nulo. Las vibraciones causadas por la energía térmica causan la orientación del momento magnético de un átomo para cambiar su dirección continuamente.

En las rocas y minerales las anomalías magnéticas dependen de la magnetización, esta última se puede dividir en tres categorías: Diamagnética, Paramagnética y Ferromagnética.

- **Diamagnetismo:** Un material es diamagnético si su campo está dominado por átomos con electrones orbitales orientados a oponerse a un campo externo, es decir, si exhibe una susceptibilidad negativa. Sumado a esto, si todos los orbitales en una molécula están completos, los momentos magnéticos de los electrones se cancelan entre sí y el momento total es nulo. Algunos ejemplos de minerales que presentan este tipo de magnetización son el Grafito, Mármol, Cuarzo y la Sal.
- **Paramagnetismo:** Las sustancias paramagnéticas son aquellas cuyas moléculas tienen su propio momento magnético (no todos los orbitales están completos, y los electrones no emparejados tienen un spin).
- **Ferromagnetismo:** En el caso de algunos minerales que contienen elementos de transición (Fe, Co, Ni, Gd, Dy), se genera una superposición parcial entre los orbitales de los iones contiguos y por lo tanto el reparto de sus electrones. Las fuerzas de la interacción se originan así que alinean los

momentos magnéticos del giro de los electrones. Dentro de un dominio, los momentos de giro son mutuamente paralelos y producen un momento magnético espontáneo. Ejemplos distintivos de minerales Ferromagnéticos son la Magnetita, Pirrotita, Titanomagnetita, Minerales y Óxidos de hierro y titanio.

Es importante conocer las propiedades magnéticas de los minerales ya que estos nos generan una respuesta magnética debido a la susceptibilidad magnética (sensibilidad a la magnetización).

La susceptibilidad magnética es la variable significativa del magnetismo, los instrumentos disponibles (magnetómetros) miden la susceptibilidad en el campo, sin embargo, tales mediciones no necesariamente dan la susceptibilidad de la formación.

Dado que los minerales ferromagnéticos, particularmente magnetita, son la fuente principal de campo magnético local, las anomalías tienen una relación cuantitativa entre la susceptibilidad de la roca y la concentración de óxidos de hierro.

Tipo de roca	Susceptibilidad $\times 10^{-3}$ (SI)	
	Rango	Promedio
Sedimentaria		
Dolomía	0 – 0.9	0.1
Caliza	0 – 3	0.3
Arenisca	0 – 20	0.4
Lutita	0.01 – 15	0.6
Metamórficas		
Anfibolita		0.7
Esquisto	0.3 – 3	1.4
Filita		1.5
Gneiss	0.1 – 25	
Cuarcita		4
Serpentina	3 – 17	
Pizarra	0 – 35	6
Ígneas		
Granito	0 – 50	2.5
Riolita	0.2 – 35	
Augita-Sienita	30 – 40	
Olivino		25
Pórfido	0.3 – 200	60
Gabro	1 – 90	70
Diorita	0.6 – 120	85
Piroxenita		125
Peridotita	90 – 200	150
Andesita		160

Basalto	0.2 – 175	70
Minerales		
Grafito		0.1
Cuarzo		-0.01
Calcita	-0.001 -- -0.01	
Pirita	0.05 – 5	1.5
Arsenopirita		3
Hematita	0.5 – 35	6.5
Pirrotita	1 – 6000	1500
Ilmenita	300 – 3500	1800
Magnetita	1200 – 19200	6000

Tabla 3: Tabla de susceptibilidades magnéticas de varias rocas y minerales, Tomado de Telford (1990)

3. Antecedentes

El estado de Guerrero cuenta con una superficie de 63,596 km², abarca 3.24% del territorio nacional y ocupa el 14° lugar en relación con las demás entidades federativas. Fisiográficamente, el Estado pertenece a la Provincia Sierra Madre del Sur y, a su vez, se divide en cinco subprovincias bien definidas. (SGM, 2017)

- Las partes altas están constituidas por las Sierras del Norte y la Cordillera Costera del Sur con una altura máxima de 3,550 m.s.n.m.
- Las laderas de las cordilleras las forman las subprovincias de la Depresión del Balsas.
- Los Lomeríos de la Vertiente Pacífica, que aproximadamente a 200 m.s.n.m. se convierten en las Planicies Litorales.
- El Cinturón Volcánico Transmexicano

Colinda al norte con los estados de México y Morelos, al noreste con el estado de Puebla, al este con el estado de Oaxaca, al noroeste y oeste con el estado de Michoacán y al sur con el Océano Pacífico.



Figura 12: Ubicación geográfica del estado de Guerrero, imagen tomada de INEGI

De acuerdo con el Panorama minero dado por el Servicio Geológico Mexicano (SGM, 2017) es evidente que el potencial geológico-minero del estado de Guerrero sigue siendo muy amplio y favorable, considerando que cuenta con grandes posibilidades para la localización de nuevos yacimientos de interés económico, en zonas geológicamente prospectivas con evidencias de mineralización, que justifican trabajos exploratorios de mayor detalle, y que representan un gran atractivo para la inversión nacional y extranjera.

3.1. Localización del Área de Estudio

El área de estudio se encuentra localizada al NE del estado de Guerrero cerca del límite con el estado de Morelos y a unos minutos de la ciudad de Iguala. Sus coordenadas geográficas comprenden los paralelos 18°30' y 18°21' latitud Norte, así como los meridianos 99°30' y 99°20' longitud Oeste.

Dentro de los límites de nuestro estudio comprendemos una zona de fallas, así como una variedad de distritos mineros, de los cuales destacan Cristo Rey, Rey de Plata, Buenavista de Cuellar y la Zona mineralizada de Buenavista de Cuellar.

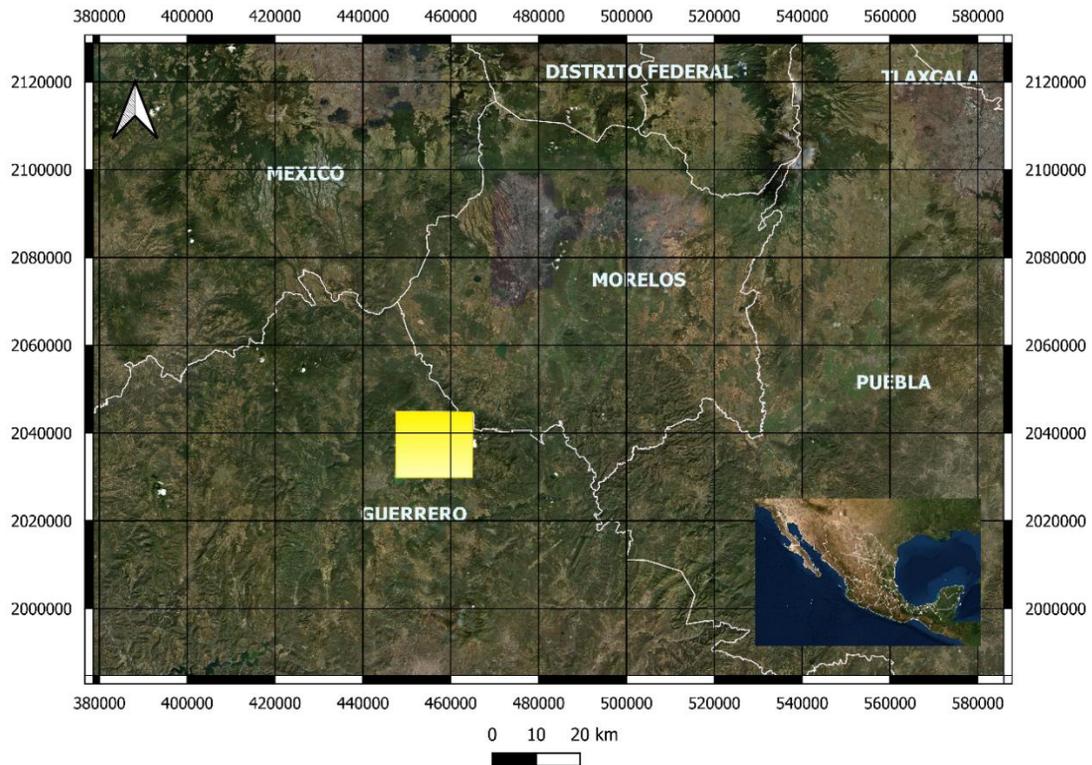


Figura 13: Se presenta la Zona de Estudio resaltada en el recuadro amarillo, de igual forma se aprecia el límite con el estado de Morelos, Puebla y Estado de México.

3.2. Geología

3.2.1. Geología del Estado de Guerrero

De acuerdo con la historia geológica del estado de Guerrero descrita por Carl Fries (1960), la unidad litológica más antigua encontrada en la región es el Esquisto Taxco del Paleozoico superior la cual fue plegada, metamorfozada, foliada, e intrusionada por diques antes de que depositara la siguiente unidad estratigráfica.

La siguiente unidad recibe su nombre por el afloramiento sobre la falda situada directamente al Oriente del pueblo de Taxco viejo, dicha unidad se conoce como Rocaverde Taxco Viejo, pertenece al periodo del Triásico superior y está compuesta principalmente por una interestratificación de tobas, brechas y en menor cantidad corrientes lávicas, casi todas andesíticas.

A esta unidad le sobreyace la formación Xochicalco de litología dominante calizas. Posteriormente se depositó la formación Morelos en el Albiano temprano, compuesta por capas basales de anhidrita en la parte oriental de la región, pero en otros lugares constan de Caliza y Dolomita siendo esto ocasionado por un hundimiento de la corteza continental, es decir, un periodo de transgresión.

A finales del Turoniano, un cambio drástico en la sedimentación calcárea da origen al depósito de la formación Mexcala, esta unidad se encuentra constituida principalmente por lodo, limo, arena y conglomerado de grano fino lo que implica una elevación en la corteza continental, es decir, un periodo de regresión.

El Terciario está representado por tres unidades principales:

- El grupo Balsas que sobreyace a la formación Mexcala; se conforma por conglomerados calcáreos y volcánicos, areniscas, limos y tobas.
- El grupo Buenavista situada al sur del río Amacuzac y al oriente de la carretera entre Amacuzac y Buenavista de Cuéllar. Se compone de una sucesión de brechas, tobas andesíticas y derrames lávicos, sin embargo en zonas más superficiales su composición varía entre basaltos y dacitas.
- La formación Cuernavaca, la unidad más joven del terciario representada por aluvión del Pleistoceno tardío y del Reciente.

3.2.2. Geología Local

De acuerdo con la carta geológica minera del SGM, se definieron estructuras representativas de regímenes de deformación dúctil. Dentro de la zona de estudio destacan estructuras originadas por procesos compresivos regionales (pliegues y cabalgaduras con rumbos N-S e inclinaciones de 20° a 65° en las estructuras de Taxco). Las fallas relacionadas a procesos distensivos post orogénicos son de tipo normal (Figura 14) las cuales cortan las secuencias estratigráficas del mesozoico y terciario resaltando las fallas de Taxco El Viejo, El Aguacate, Iguala, Cerro Alto, Atexca y la Barranca de Xihuatotla. De la misma forma presentan emplazamientos volcánicos de los cuales se infiere un proceso de vulcanismo fisural.

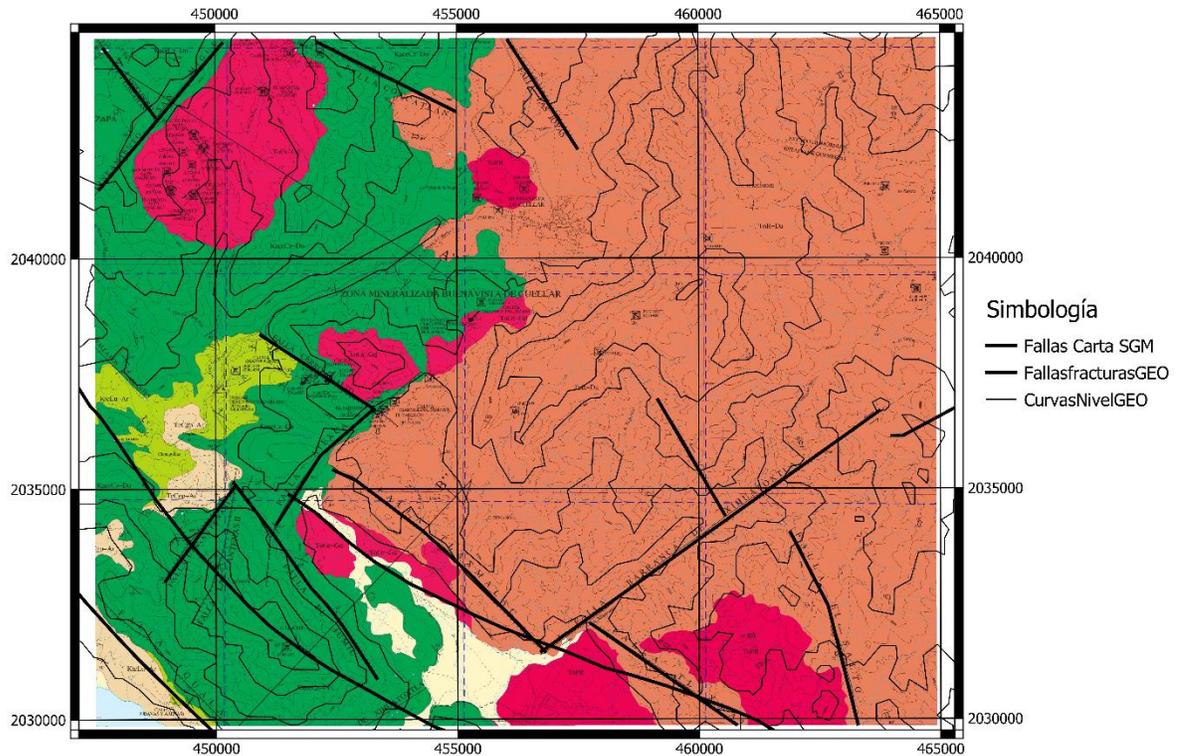


Figura 14: Mapa de Fallas y fracturas en la zona de estudio.

Los yacimientos minerales dentro del distrito minero Taxco se dividen en tres zonas mineralizadas principales: Huahuaxtla, Coxcatlan-Tlamacazapa y Buenavista de Cuéllar. De las cuales Buenavista de Cuéllar y una pequeña parte de Coxcatlan-Tlamacazapa se encuentran comprendidas en la zona de estudio. La zona mineralizada Coxcatlán-Tlamacazapa se caracteriza por una aureola de metamorfismo de contacto producido por el emplazamiento de un cuerpo granítico en la caliza de la Formación Morelos; la mena mineralizada corresponde a sulfuros representados por Galena argentífera, oro y plata asociados a minerales de ganga de Piritita, Cuarzo y Calcita. Las minas localizadas en esta zona son: El apóstol, El Arroyo, Cristo Rey, Real de Plata, Cabrigoo y Salitre (Figura 15). SGM (2004).

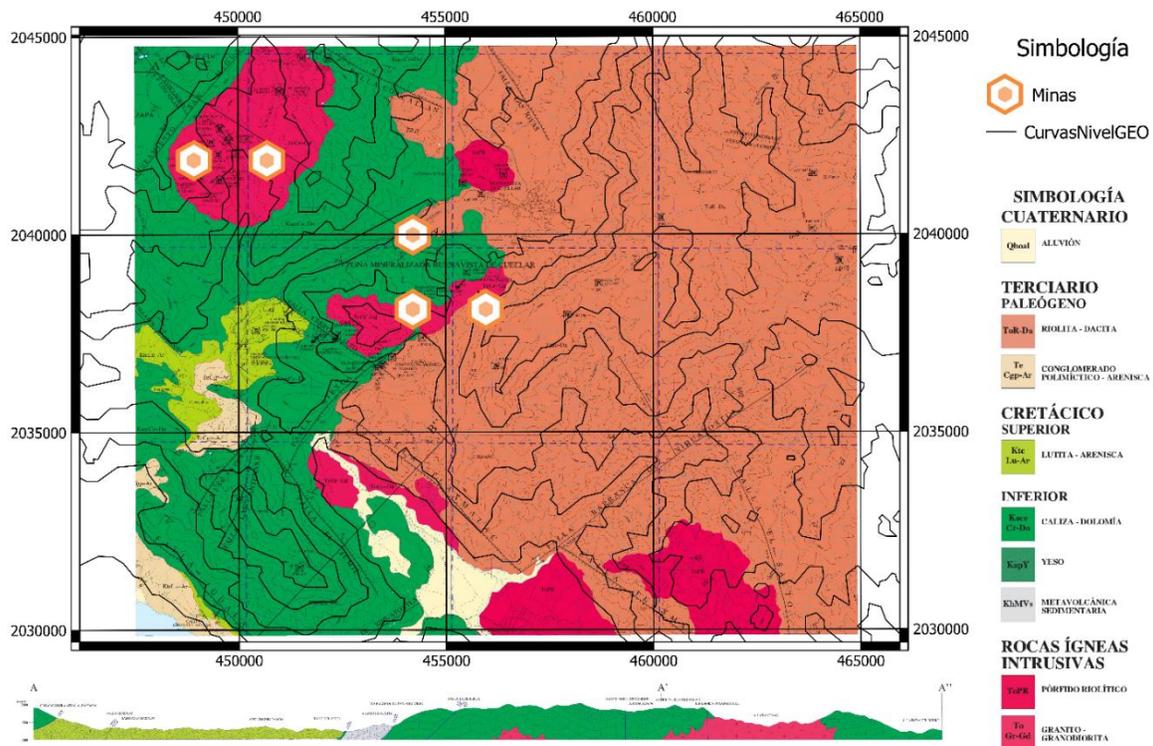


Figura 15: Zona de estudio de acuerdo con la carta Geológico-minera, SGM (2015).

En la zona mineralizada Buenavista de Cuellar la mineralización está controlada por el contacto de la caliza con la cuarzomonzonita en forma de mantos. La principal alteración es la marmolización y posiblemente granitización, esta última observada en sus variedades de grosularia y andradita, evidencia de metasomatismo de contacto, al cual se le atribuye el origen de los yacimientos de hierro de la zona.

Los minerales presentes están constituidos por óxidos de hierro (magnetita, hematita y limonita), asociados a minerales de ganga (calcita, cuarzo, pirita, grosularia y andradita). Las minas conocidas en la zona consisten en dos tajos a los que se les denomina El Paredón y El Paredón I. Con respecto a los yacimientos de minerales no metálicos se tienen los depósitos de yeso en sus variedades de selenita y alabastro acompañados de anhidrita, azufre, calcita y pirita (Figura 15). SGM (2004).

3.2.3. Hidrografía

Los recursos hídricos subterráneos, en el área de estudio, se aprovechan de los acuíferos Buenavista de Cuéllar (de 3 Km²) e Iguala-Cocula (de 70 Km²), ambos de la zona geohidrológica Iguala, perteneciente a la Cuenca Río Balsas-Mezcala, de la Región Hidrológica Río Balsas RH-18 (Figura 16).

El drenaje superficial, es de carácter dendrítico e intermitente con corriente divergente. Estas mismas características se presentan en torno al Lago Tuxpan, sólo que con corriente convergente y con una dimensión menor que la correspondiente a las montañas (Estrada, 2006).

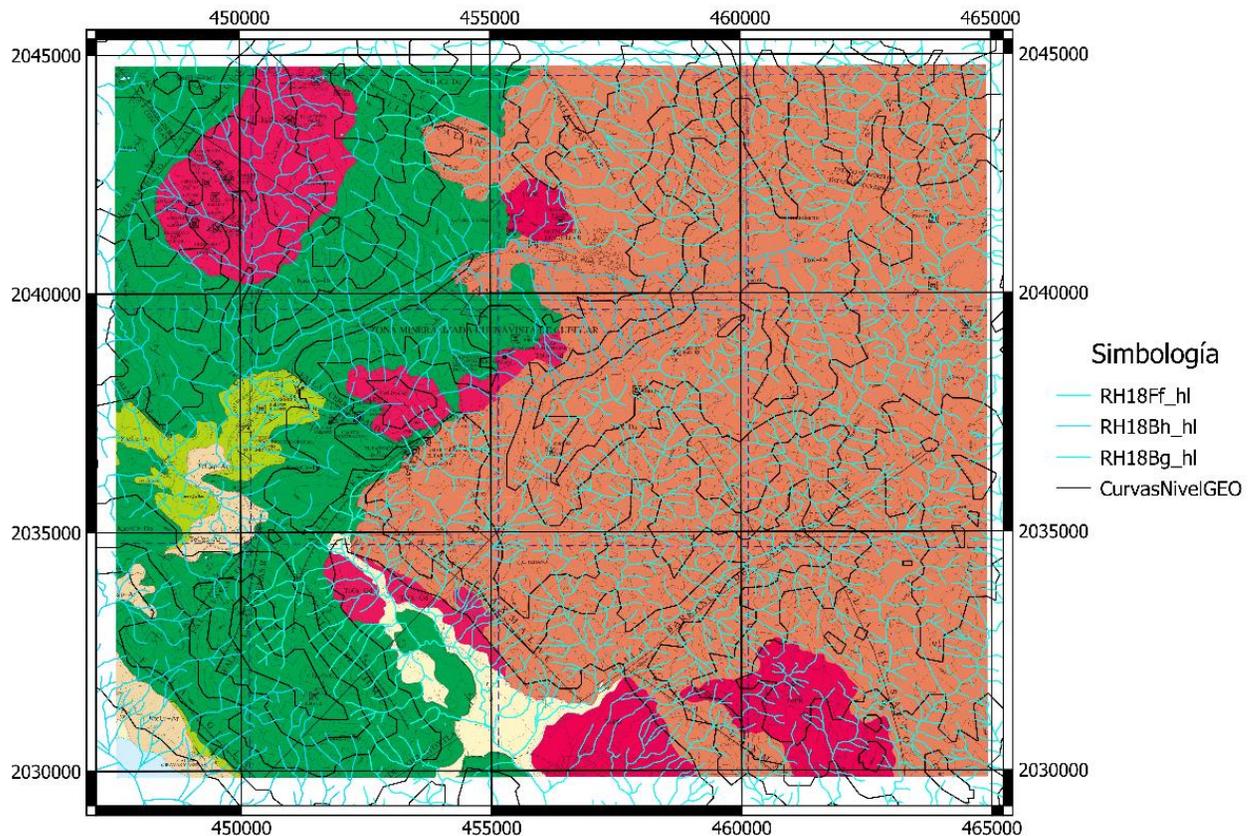


Figura 16: Hidrografía de la zona de estudio

3.2.4. Tipo de Yacimiento

Los yacimientos tipo Skarns son yacimientos de rocas metamórficas de grano grueso compuestas de minerales de silicato de calcio, hierro, magnesio, manganeso y aluminio los cuales se forman mediante el reemplazo de rocas carbonatadas durante el metamorfismo regional y metasomatismo. Los skarns

pueden ser estériles o contener metales con valor económico y son fuentes importantes de metales base y preciosos, así como de estaño, tungsteno y hierro. (Hammarstrom, et. al. 1986)

Los procesos que conducen a la formación de todos los tipos de depósitos skarn incluyen:

1. Metamorfismo de contacto durante la intrusión del Plutón
2. Desarrollo del fluido mineral a partir del enfriamiento del Plutón
3. Alteración retrógrada de minerales formados anteriormente.

Los depósitos de skarn también se asocian con muchos otros tipos de depósitos magmáticos-hidrotermales por lo que diferenciarlos no siempre es posible puesto que forman una zona intermedia entre los depósitos de pórfidos y vetas polimetálicas, así como depósitos de reemplazamiento y diseminados distales.

Se clasifican como cálcicos si el protolito era caliza o como magnesiano si era dolomita; también se clasifican por su contenido mineral metálico de mayor importancia económica (cobre, hierro, plomo-zinc, oro, estaño, tungsteno, etc.).

3.2.5. Regiones/Distritos mineros

El estado de Guerrero muestra mineralización en prácticamente todo su territorio; y junto con un contexto geológico-regional que ha sido modificado por importantes eventos tectónicos, dan origen a las condiciones necesarias para el emplazamiento de importantes yacimientos minerales SGM (2017).

Debido a esta mineralización el estado se divide en doce regiones mineras principalmente (*Figura 17*):

- | | |
|-------------------------|------------------------------|
| 1. Coyuca-Zirándaro | 7. Papanoa |
| 2. Cutzamala | 8. Buenavista de Cuéllar |
| 3. Tlapehuala | 9. Mezcala |
| 4. San Miguel Totolapan | 10. Mochitlán-Quechultenango |
| 5. Arcelia-Teloloapan | 11. La Montaña |
| 6. La Unión | 12. La Dicha |

Retomando los fines de este trabajo, la zona de estudio comprende la región minera de Buenavista de Cuéllar, que a su vez contiene al distrito minero de Taxco; distrito minero que presenta zonas mineralizadas de Au, Ag, Pb, Zn, Cu, Pb.

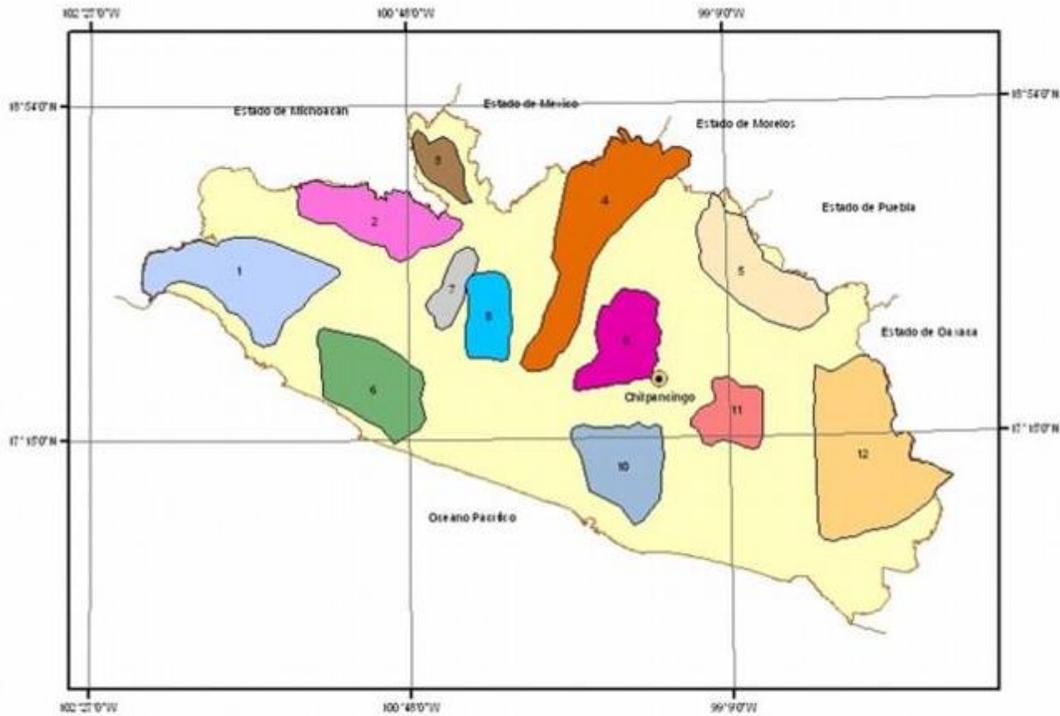


Figura 17: Regiones Mineras del Estado de Guerrero, Imagen tomada de Panorama Minero del Estado de Guerrero, muestra en naranja la región minera de Buenavista de Cuéllar, SGM (2017)

3.2.6. Volumen de la producción minera

En los últimos años se aprecia un incremento en el volumen de extracción de metales preciosos y dimensionables (Materiales de cantera para construcción); mientras que para minerales base disminuyó considerablemente. El Servicio Geológico Mexicano presenta en su informe “Panorama minero del Estado de Guerrero” (2017-2018), el valor de la producción minera estatal (Toneladas y Moneda Nacional) correspondientes al 2012-2016 y 2013-2017.

Tabla 4: Volumen de la Producción Minera de minerales metálicos en el periodo 2012-2017 en Toneladas

Minerales Metálicos	2012	2013	2014	2015	2016	2017
Oro (Kg)	11,186.80	11,136.10	8,550.90	8,972.90	15,214.90	15,143.20
Plata (Kg)	62,364	41,313	31,732	6,105	8,783	26,992.00
Cobre	6,601	5,454	4,499	70	-	-
Fierro	214,639	674,512	614,391	-	52,000	-
Plomo	5,041	2,829	2,913	-	-	-
Zinc	43,103	27,254	24,495	495	-	-

Tabla 5: Volumen de la Producción Minera de minerales no metálicos y dimensionables en el periodo 2012-2017 en Toneladas

Minerales No Metálicos	2012	2013	2014	2015	2016	2017
Agregados Pétreos	580,074	666,969.66	8,769,874.30	5,593,214.52	5,996,316.38	44,353,806.03
Arcillas	180,000	153,000	165,780	165,750	169,879.66	174,169.55
Arena	1,416,010	1,208,409.52	1,520,032	1,331,317.60	1,358,231.90	1,466,344.16
Caliza	960,000	816,000	7,462,660	10,545,600	7,008,614.86	5,459,794.28
Grava	1,889,276.45	1,613,835.99	2,466,926	2,435,258.18	2,203,328.68	2,264,226.77
Roca	3,016	2,900	43,500	48.33	-	25,075.00
Dimensionable						
Yeso	27,290	55,080	13,000	8,000	56,626.55	58,056.52
Sal	-	-	-	-	-	69,000.00

Tabla 6: Volumen de la Producción Minera de minerales metálicos en el periodo 2012-2017 en Millones de Pesos Mexicanos

Minerales Metálicos	2012	2013	2014	2015	2016	2017
Oro (Kg)	7,900.152	6,456.116	4,628.094	5,298.382	11,407.230	11,599.392
Plata (Kg)	821.683	402.562	258.174	48.744	90.244	280.803
Cobre	690.019	590.438	409.991	6.076	-	-
Fierro	125.231	395.457	360.858	-	30.817	-
Plomo	136.851	77.391	81.146	-	-	-
Zinc	1,104.620	664.931	704.836	15.092	-	-

Tabla 7: Volumen de la Producción Minera de minerales no metálicos y dimensionables en el periodo 2012-2017 en Millones de Pesos Mexicanos

Minerales No Metálicos	2012	2013	2014	2015	2016	2017
Agregados Pétreos	63.456	75.625	1,034.955	674.129	746.996	5,899.486
Arcillas	20.142	17.730	19.995	12.016	12.729	13.934
Arena	156.494	138.305	181.069	117.058	135.209	155.854
Caliza	69.150	60.870	579.397	820.348	563.523	494.734
Grava	215.220	190.388	302.903	136.968	128.087	194.760
Roca	3.447	3.428	46.421	0.058	-	32.167
Dimensionable						
Yeso	2.782	5.673	1.486	1.192	9.349	9.795

3.3. Estudios Previos

La zona mineralizada de Buenavista de Cuéllar sigue siendo de gran interés en la industria minera; es por ello que distintas disciplinas han logrado aportar diferentes estudios ya sea provenientes de empresas públicas, privadas o de igual forma provenientes de universidades públicas.

De acuerdo con la información geoquímica proporcionada por el Servicio Geológico Mexicano (2015), el mapeo de la zona de estudio presentó altas concentraciones de Oro, Arsénico, Cobre, Plomo, Plata y Zinc (Figura 18).

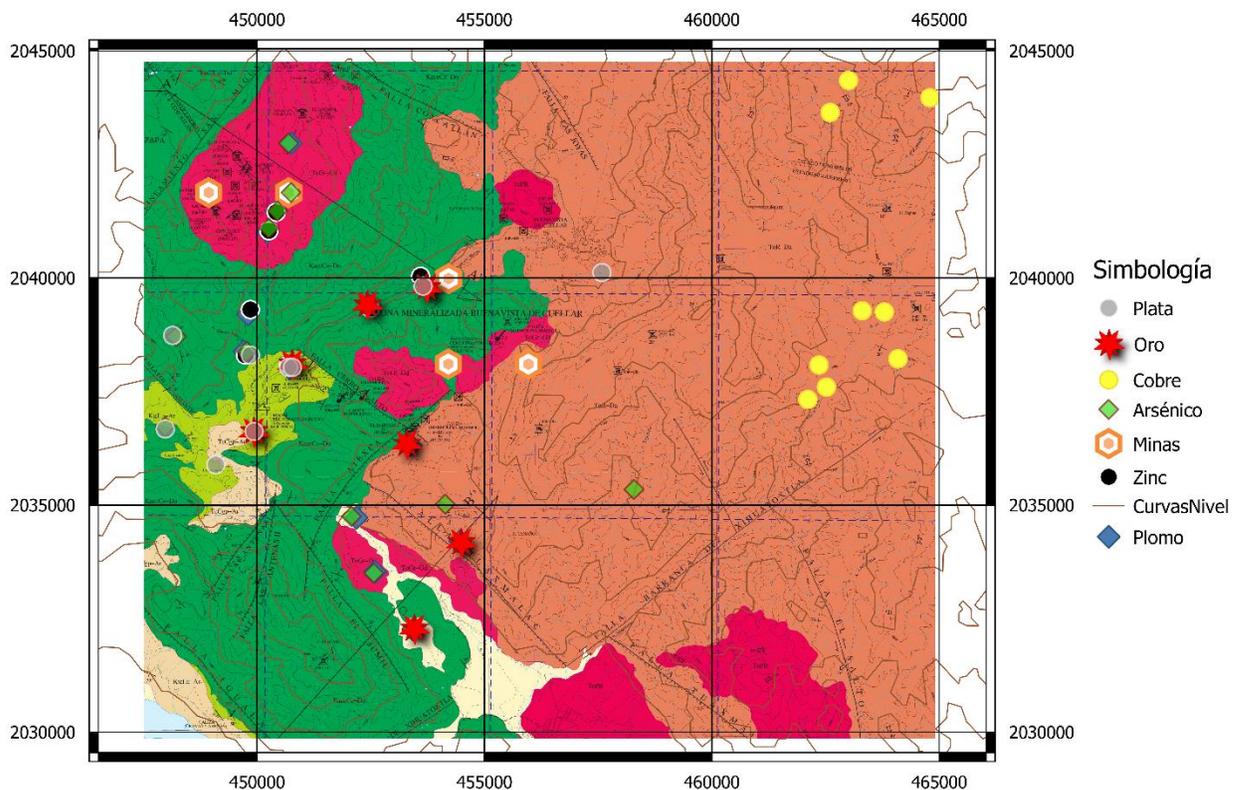


Figura 18: Se presenta el mapa geoquímico de los seis tipos de elementos presentes en la zona

Correlacionando la información de las distintas cartas geoquímicas se logran distinguir tres zonas de gran interés:

1. La primera ubicada al NW con altas concentraciones de Oro, Arsénico, Plomo y Zinc (280 ppb, 192.8 ppm, 412 ppm, 1410 ppm).

2. La segunda ubicada al centro en dirección E-W, presenta concentraciones altas a medias de Plomo, Plata, Zinc, Oro y Arsénico a lo largo de la zona mineralizada Buenavista de Cuéllar (412-11.59 ppm, 28.6-0.9 ppm, 1410-59.6 ppm, 280-4.09 ppb, 192.8-12.44 ppm).
3. La tercera zona de interés se ubica a lo largo de la Falla Barranca de Xihuatotxtla con niveles de concentraciones medios a bajos de Zinc, Plomo, Plata, Arsénico y Oro (59.6-14 ppm, 11.59-4 ppm, 0.9-0.8 ppm, 12.44-0.9 ppm, 4.09-1.0 ppb).

De la misma forma el Servicio Geológico Mexicano cuenta con información de las cartas geofísicas de Campo Magnético Total y de Reducción al Polo, si enmarcamos las anomalías de ambas cartas (Reducción al Polo en particular) podemos observar una correlación directa con algunas de las zonas anteriormente descritas a partir de la geoquímica (*Figura 19 y 20*).

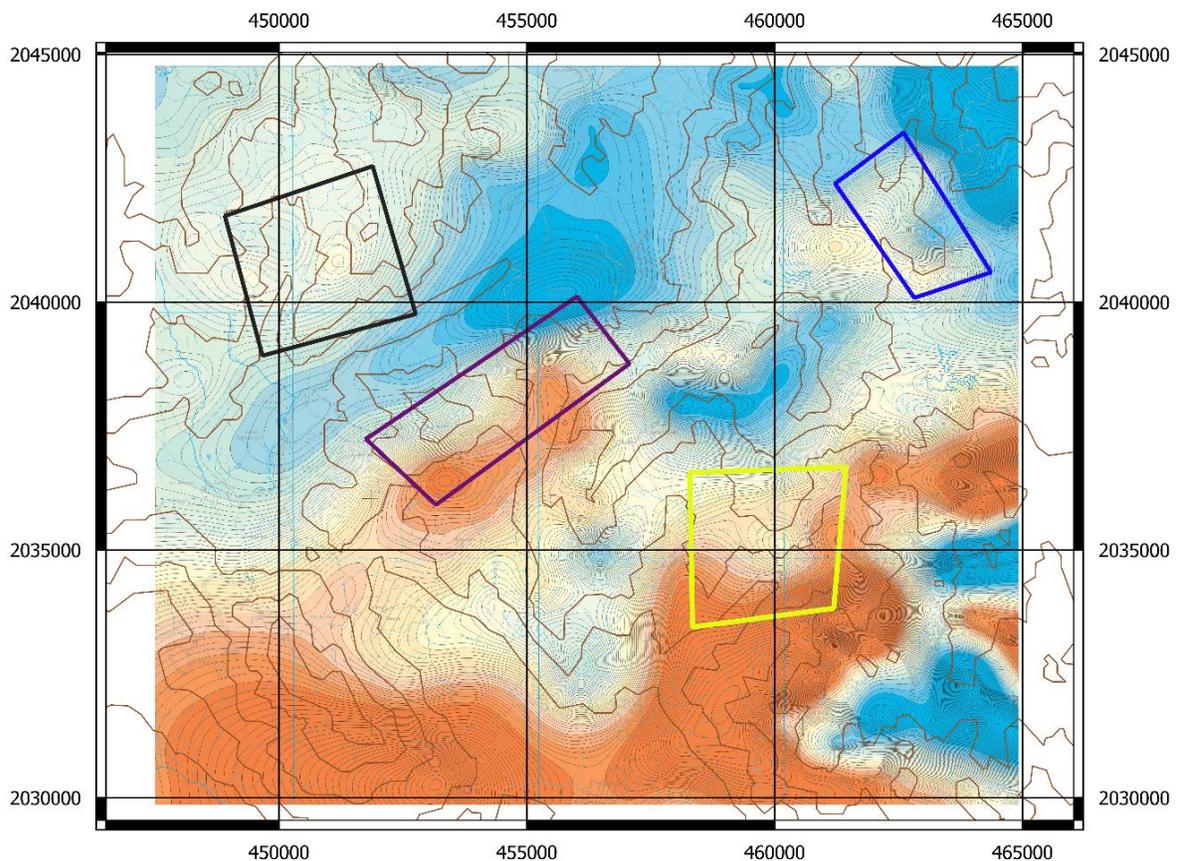


Figura 19: Carta de Campo Total, SGM (2015).

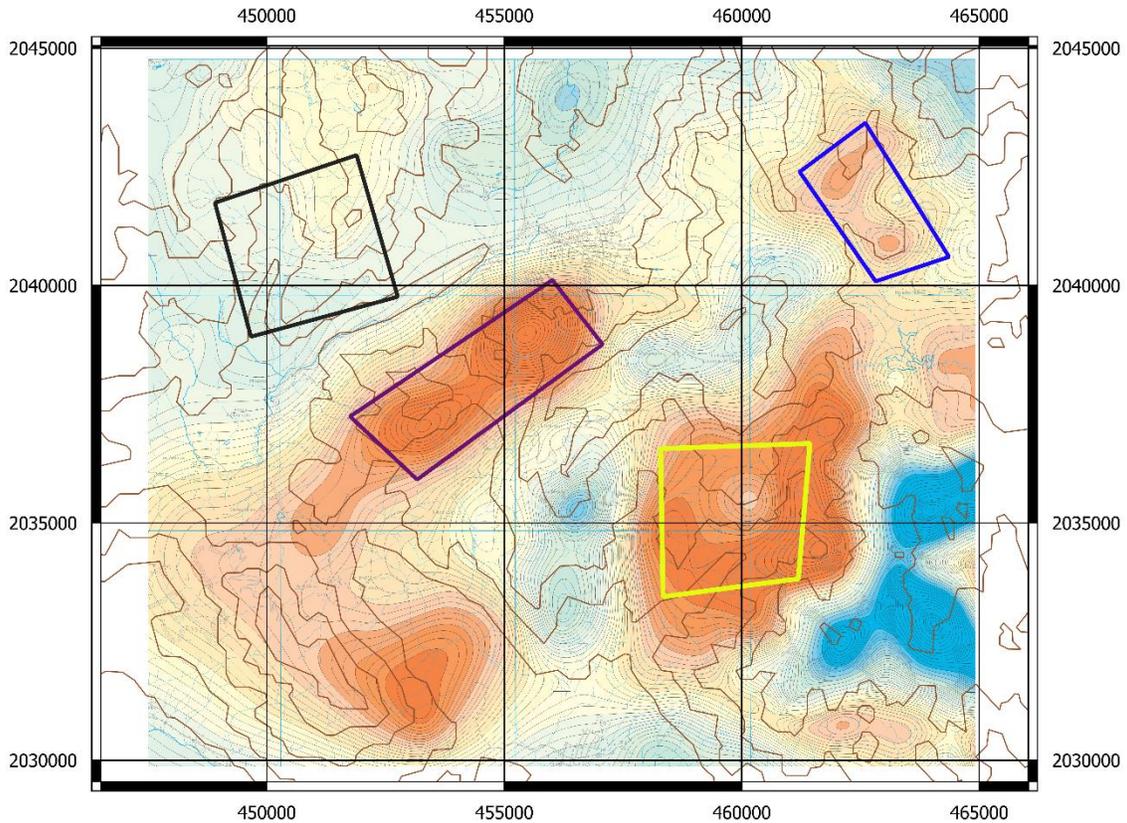


Figura 20: Carta de Reducción al Polo, SGM (2015)

En el caso particular de las anomalías reducidas al polo observamos una serie de cuatro monopolos magnéticos, esta respuesta no necesariamente corresponde a los minerales mencionados en la geoquímica, pero si a una ganga asociada a dicha mineralización:

1. Se enmarca en azul la zona con presencia de cobre en altas concentraciones
2. Se enmarca la Falla Barranca de Xihuatotxtla en amarillo (concentraciones medias a bajos de Zinc, Plomo, Plata, Arsénico y Oro)
3. La anomalía enmarcada en violeta corresponde a la zona mineralizada de Buenavista de Cuéllar (concentraciones medias a bajos de Zinc, Plomo, Plata, Arsénico y Oro)
4. Finalmente, la zona enmarcada en negro presenta altas concentraciones de Plomo y Oro.

Cabe resaltar que se aprecia una respuesta magnética intermedia para la zona propuesta al NW (altas concentraciones de Oro, Arsénico, Plomo y Zinc).

4. Metodología

4.1. Recopilación de Información magnetométrica

Los datos magnetométricos que se trabajaron fueron adquiridos por el Servicio Geológico Mexicano, específicamente por el Departamento de Geofísica como parte del proyecto 165 para la elaboración de la Carta Magnética Cuernavaca E14-5 escala 1:250000 con fechas de inicio y termino del 5 de Abril de 1999 y 2 de Mayo de 1999 respectivamente. El proyecto dio parte a la publicación de cartas con una escala menor (1:50000), quedando como resultado la publicación de la Carta Magnética de Campo Total Iguala E14-A78, Guerrero, Escala 1:50000 el día 26 de Febrero del 2001.

Para llevar a cabo la adquisición de la información se empleó un avión ISLANDER BN2-A21 con sistema de navegación ASHTECH GG24 (GPS y GLONASS) 16 m, así como un magnetómetro Geometrics G822A de bombeo óptico de vapor de Cesio con una sensibilidad de 0.001 nT y como estación base un magnetómetro GEM-SYSTEMS GSM-19 de efecto OVERHAUSER con una sensibilidad de 0.01 nT.

El levantamiento se efectuó en dirección Norte-Sur con una distancia entre líneas de vuelo de 1000 m y entre líneas de control de 10000 m; todo a una altura de vuelo sobre el nivel del terreno de 300 m. Los procesos efectuados por el Servicio Geológico Mexicano a los datos adquiridos parten de una compilación digital, que a su vez es sometida a una serie de correcciones como lo son:

- Corrección por Compensación Magnética (Movimiento del avión)
- Corrección por Variación Diurna
- Corrección por Heading
- Sustracción del Campo Geomagnético Internacional de Referencia (IGRF)
- Nivelación por líneas de control
- Micronivelación

De igual forma se conoce el comportamiento del campo geomagnético para el centro del proyecto el cual posee las siguientes características:

- Fecha: 18 de Abril de 1999
- Altura: 1500 m
- Inclinación: 46° 18'
- Declinación: 6° 28'
- Intensidad de Campo Magnético (F): 41582 nT
- Proyección UTM, Datum NAD 27; Esferoide CLARKE 186

Actualmente, el comportamiento del campo geomagnético ha ido variando, es por ello por lo que los datos adquiridos se han ido actualizando por parte del SGM, de las actualizaciones y revisiones destacan principalmente 2:

- Actualización de la Carta de Campo Total Cuernavaca E14-5, Escala 1:250000; el 19 de Julio de 2002 a cargo de Alejandro Cuevas Covarrubias.
- Actualización de la Carta de Campo Total Iguala E14-A78, Guerrero, Escala 1:50000, el día 20 de Marzo del 2015 a cargo del Ingeniero Bernardino Delgado Granados.

Para los fines de este trabajo conocemos de igual forma el comportamiento del campo geomagnético:

- Fecha: 14 de Marzo de 2019
- Inclinação: 45° 48'
- Declinación: 4° 42'
- Intensidad de Campo Total (F): 39602 nT
- Proyección UTM, Datum: NAD27

4.2. Aeromagnetometría

El análisis de las variaciones locales en la intensidad del campo magnético total nos brinda información sobre los cambios laterales en las propiedades magnéticas de las rocas, esto nos permite identificar diferentes unidades litológicas y estructuras. Sumado a esto, la alteración hidrotermal también puede causar variaciones laterales en la intensidad del campo magnético, como consecuencia de la variación en el contenido de magnetita.

La sensibilidad del magnetómetro empleado en levantamientos aéreos es generalmente mayor que la empleada en la exploración terrestre. Debido al gran costo inicial de la aeronave y la disponibilidad de espacio, es práctico utilizar equipos más sofisticados por su mayor sensibilidad, resultado útil en mediciones de varios cientos de metros por encima de la superficie del suelo.

Estas mediciones deben someterse a una serie de correcciones que nos permitan conocer la respuesta magnética verdadera; algunas de estas correcciones ya se habían tratado anteriormente (Variación Diurna e IGRF) sin embargo, en el caso de levantamientos aéreos es necesario agregar correcciones debido al movimiento

del avión (Compensación Magnética), Nivelación por líneas de control, Micronivelación y finalmente una corrección por sección (Heading).

Correcciones

Compensación Magnética: La compensación magnética debe realizarse al inicio de un levantamiento y después de que se haya realizado cualquier modificación o mantenimiento en el avión o sistema. Se debe cumplir con un conjunto estándar de procedimientos para lograr la mejor compensación. Un procedimiento típico es el siguiente (FitzGerald y Perrin, 2015):

1. La aeronave debe estar en modo de funcionamiento normal
2. Todos los equipos en funcionamiento
3. Todo el equipo para el levantamiento a bordo
4. Para la eficiencia, el área donde la compensación debe realizarse debe estar cerca
5. Realizar la compensación a una altitud de 2500m por encima del nivel del suelo o superior, en una región de bajo gradiente magnético
6. Realizar una serie de maniobras (+/- 10 grados de despliegue, +/- 5 grados de inclinación y +/- 5 grados de desvío para cada una de las 4 direcciones cardinales)
7. Realizar un segundo conjunto de maniobras de verificación para verificar la calidad de los datos se pueden lograr

Nivelación por líneas de Control: Al piloto se le pueden dar ciertas líneas de control para volar, por ello, puede considerar las distancias y grados que permiten que las líneas se vuelen más eficientemente; los vuelos normales siguen estándares predeterminados, como la velocidad de adquisición necesaria para preservar la resolución de datos. Exceder este límite lateral puede causar una superposición de la línea perpendicular, creando así un hueco en el mapa.

Heading: Con el fin de asegurar la correcta medición del rumbo magnético, es necesario estabilizar los ejes de los sensores magnéticos en el plano horizontal. Esto por lo general no es posible en las brújulas de giroscopios analógicos comunes, ya que los sensores magnéticos se colocan en una base suspendida que se estabiliza horizontalmente debido a la gravedad de la Tierra. Esta estabilización gravitacional es correcta sólo en caso de movimiento direccional y uniforme. Si la aeronave está acelerando o girando la base con sensores magnéticos, se desvía de la posición horizontal y la señal medida del Heading magnético es incorrecta, en consecuencia, la proyección de la componente vertical del campo geomagnético sería incorrecta.

Micronivelación: Una definición de "Micronivelación" podría ser "filtrar un conjunto de datos cuadrillado para reducir o eliminar los efectos no geológicos causados por el ruido de longitud de onda larga a lo largo de las líneas topográficas". Dicho ruido se manifiesta como datos aparentes los cuales se desplazan de una línea de adquisición a la siguiente, creando imágenes intercaladas. Normalmente, la Micronivelación se aplica sólo después de que se hayan aplicado a los datos otras correcciones, como la variación diurna y la nivelación de la línea de amarre.

4.3. Procesamiento

Para el procesamiento de los datos aeromagnéticos se hará uso del software Oasis Montaje de Geosoft con serial 10816, por lo cual, los métodos empleados serán descritos de acuerdo con la forma en que se programaron en el software.

4.3.1. Campo Total

Como se mencionó en el capítulo anterior, la anomalía de Campo Total la obtendremos al sustraer los valores de variación diurna e IGRF 1995 a los valores adquiridos; esto es:

$$\Delta F = F_{obs} - F_{IGRF} - \delta F \quad 17$$

4.3.2. Reducción al Polo

El objetivo de la reducción al polo es tomar un mapa de campo magnético total observado y producir un mapa magnético considerando que se adquirió sobre un área en el polo magnético, suponiendo que todos los campos magnéticos observados de un área de estudio se deban a efectos magnéticos inducidos, la reducción al polo se puede calcular en el dominio de frecuencia utilizando el siguiente operador (MacLeod et. al. 1993)

$$\mathbf{L}(\theta) = \frac{1}{(\sin I + i \cos I \cos(D - \theta))^2} \quad 18$$

Dónde

θ es la dirección del número onda

I es la inclinación magnética

D es la declinación magnética.

Las correcciones por amplitudes muy grandes son requeridas para las características norte-sur en latitudes bajas; también amplifica los componentes norte-sur del ruido y los efectos magnéticos de los cuerpos magnetizados en direcciones diferentes del campo inductor.

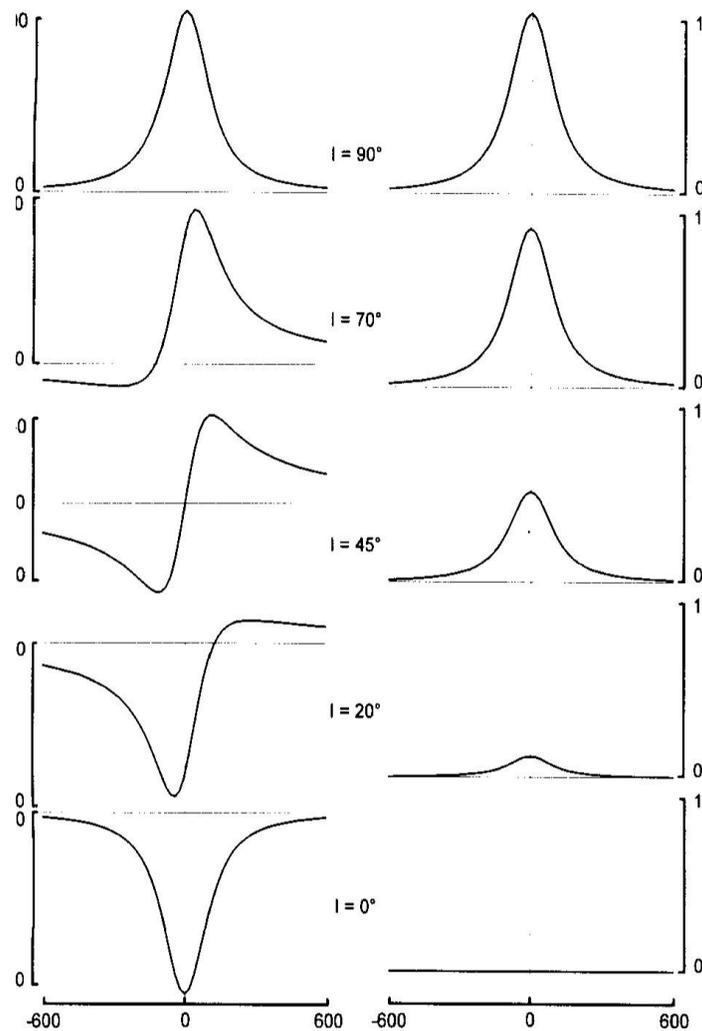


Figura 21: La forma de los perfiles de campo magnético total sobre un dique de inmersión vertical depende de la dirección del dique. A la izquierda, se muestran los perfiles para un dique de rumbo este-oeste, y en los perfiles correctos se muestran para un dique de rumbo norte-sur. Reducción al polo; imagen tomada de 3-D Analytic Signal in the Interpretation of Total Magnetic Field, (MacLeod et al., 1993)

4.3.3. Regional y Residual

La separación del campo medido en sus componentes regional (Anomalía regional) y residual (Anomalía residual) se logra utilizando técnicas de filtrado. No siempre se puede aseverar cuál es el mejor resultado, por ello, esto último logra reducirse si se aplican varias técnicas de filtrado.

Por lo general, el objetivo es llegar a separar e identificar los efectos relacionados a las estructuras de la corteza superior mediante un mapa de Anomalías residuales como resultado. Por lo tanto, si se cuenta con un mapa de anomalías regionales, puede determinarse a partir de la respectiva carta de anomalía medida dicha incógnita. (Marcos A. Sánchez et al., 2011)

El filtro Butterworth es excelente para aplicar filtros de pasa alta y pasa bajas para los datos, ya que puede controlar fácilmente el grado de roll-off del filtro al dejar el número onda central fijo.

$$L(k) = \frac{1}{\left[1 + \left(\frac{k}{k_c}\right)^n\right]} \quad 19$$

Donde:

K es el número onda central del filtro.

n es el grado de la función de filtro Butterworth; por defecto se asume un grado de $n = 8$.

Se debe especificar qué tipo de filtro es requerido para poder obtener la anomalía Regional/Residual, sin embargo, el sistema aplica por defecto el filtro Regional.

4.3.4. Tilt Derivatives

Las derivadas del ángulo de inclinación, nos proporciona una ecuación lineal simple, similar a la ecuación de Euler 3D. Dicho método estima tanto la ubicación horizontal como la profundidad de los cuerpos magnéticos, pero sin especificar información previa sobre la naturaleza del índice estructural de las fuentes. El ángulo de inclinación θ de una anomalía magnética (A) es equivalente a la fase local y está dada por la siguiente expresión:

$$\theta = \tan^{-1} \left(\frac{\frac{\partial A}{\partial z}}{\frac{\partial A}{\partial h}} \right) \quad 20$$

donde el numerador y el denominador son derivadas verticales y horizontales de la anomalía respectivamente, esta última dado por:

$$\frac{\delta A}{\delta h} = \sqrt{\left(\frac{\partial A}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial A}{\partial y}\right)^2} \quad 21$$

Este proceso ofrece varias ventajas en la interpretación de anomalías magnéticas; en primer lugar, la dependencia de θ en la magnetización es la misma que en las derivadas horizontales y verticales, por lo que los cuerpos paramagnéticos son tratados con el mismo peso que los cuerpos ferromagnéticos.

En segundo lugar, θ tiene una forma muy simple sobre cuerpos simples; por ejemplo, para un contacto vertical la forma del contorno cero indica la forma asignada de la fuente, y la distancia horizontal entre los contornos cero y $\pi/4$ proporciona una estimación de la profundidad del cuerpo debajo del contorno cero. (Blakely et al., 2016).

$$\theta = \tan^{-1} \left(\frac{x}{z} \right) \quad 22$$

Donde

θ : es el Ángulo de Inclinación

X: es la distancia horizontal del contacto

Z: es la profundidad

4.3.5. Gradiente Horizontal

Cada una de las medidas descritas anteriormente equivale a estimar el gradiente horizontal de θ en $x = 0$. A partir de la ecuación 6, el gradiente horizontal se encuentra dado por:

$$\frac{\partial \theta}{\partial h} = \frac{z}{(x^2+z^2)} \quad 23$$

Y, para $x = 0$:

$$Z = \left(\frac{\partial \theta}{\partial h} \right)^{-1} \quad 24$$

Esto nos proporciona una forma muy sencilla de mapear tanto los bordes como las profundidades de las fuentes de las anomalías magnéticas reducidas al polo sin necesidad de métodos gráficos, simplemente se le asignan valores a lo largo del contorno cero de θ .

4.4. Modelado Magnético y Geológico

Para generar el modelo tridimensional de la anomalía de campo magnético se hace uso de la paquetería Voxler 4 de Golden Software. Esta paquetería nos permite visualizar la representación volumétrica haciendo énfasis en los datos tridimensionales.

Los módulos computacionales que incluye el programa nos permiten realizar cuadrículas tridimensionales, re-muestreos, numerosas operaciones aplicadas a una malla, así como procesamiento de imágenes. Voxler está diseñado para mostrar datos XYZC, donde C es una variable de componente en cada dirección X, Y, Z. El programa selecciona automáticamente la configuración predeterminada que sea razonable en la salida de los gráficos

Para realizar las estimaciones de profundidad se utilizó la paquetería GM-SYS de Geosoft la cual nos permite crear un modelo geológico y probar su precisión comparando la respuesta magnética del modelo con las mediciones observadas.

Para ello se requiere conocer un poco sobre la geología de la zona de estudio ya sea por el trabajo de campo o por reportes geológicos, así como las susceptibilidades magnéticas asociadas al material geológico presente. Posteriormente se crea un modelo de capas de acuerdo con la geología presente y se ajusta cada capa de tal forma que la respuesta magnética sea similar a la generada por los datos observados.

5. Resultados e Interpretación

5.1. Carta de Campo Total

La Figura 22 muestra dos zonas de alta susceptibilidad magnética ubicadas al sur de la carta, entre las coordenadas Este 448,000 y 462,500 y las coordenadas Norte 2,034,800 y 2,030,000; con longitudes aproximadas entre los 8,170 m para la anomalía ubicada al SW y los 6,500 m que corresponde con la anomalía ubicada al SE, ambas con valores de susceptibilidad que rondan entre los 120 a 213 nT. De igual forma se tiene al norte de la carta dos zonas de baja susceptibilidad magnética entre las coordenadas Norte 2,039,500 y 2,045,000; y entre las coordenadas Este 452,700 y 465,000 respectivamente; con una longitud aproximada de 6,124 m para la zona ubicada al N, y 4,250 m para la zona ubicada al NE de la zona de estudio, ambas presentan valores de susceptibilidad magnética que van de los -190 a -98.21 nT.

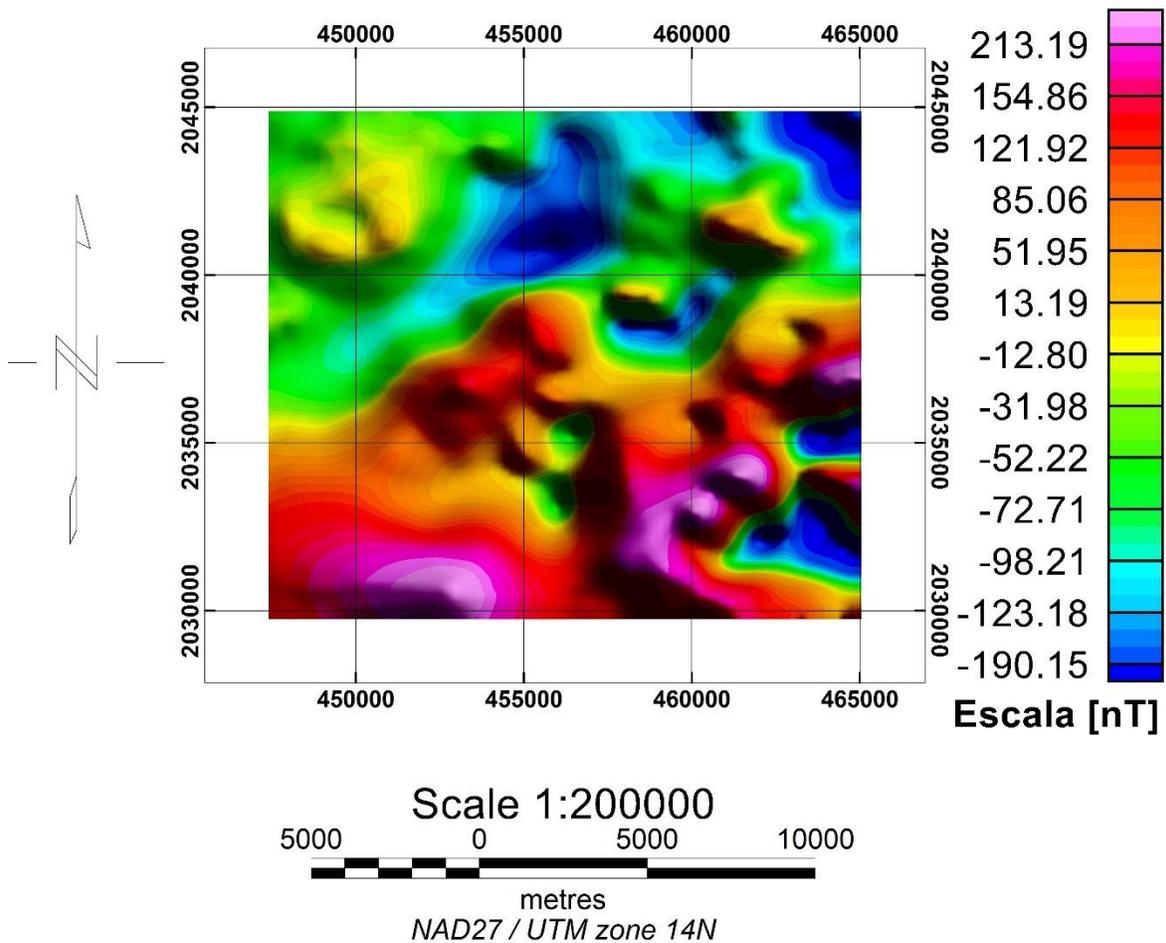


Figura 22: Mapa de Anomalía de Campo Total

De estas anomalías se puede apreciar una correlación con la Geoquímica descrita por el Servicio Geológico Mexicano al reflejarnos una alta susceptibilidad magnética al SW asociada posiblemente a la mineralización de Óxidos de Hierro y Magnetita en zonas con altas concentraciones de Plomo. De la misma forma se refleja una baja susceptibilidad magnética al N-NE que se correlaciona con las zonas que poseen altas concentraciones de Cobre. Al NW se presenta una zona de susceptibilidad magnética intermedia; dicha zona presenta operaciones mineras por Zinc, Plomo, Oro y Plata (Figura 23).

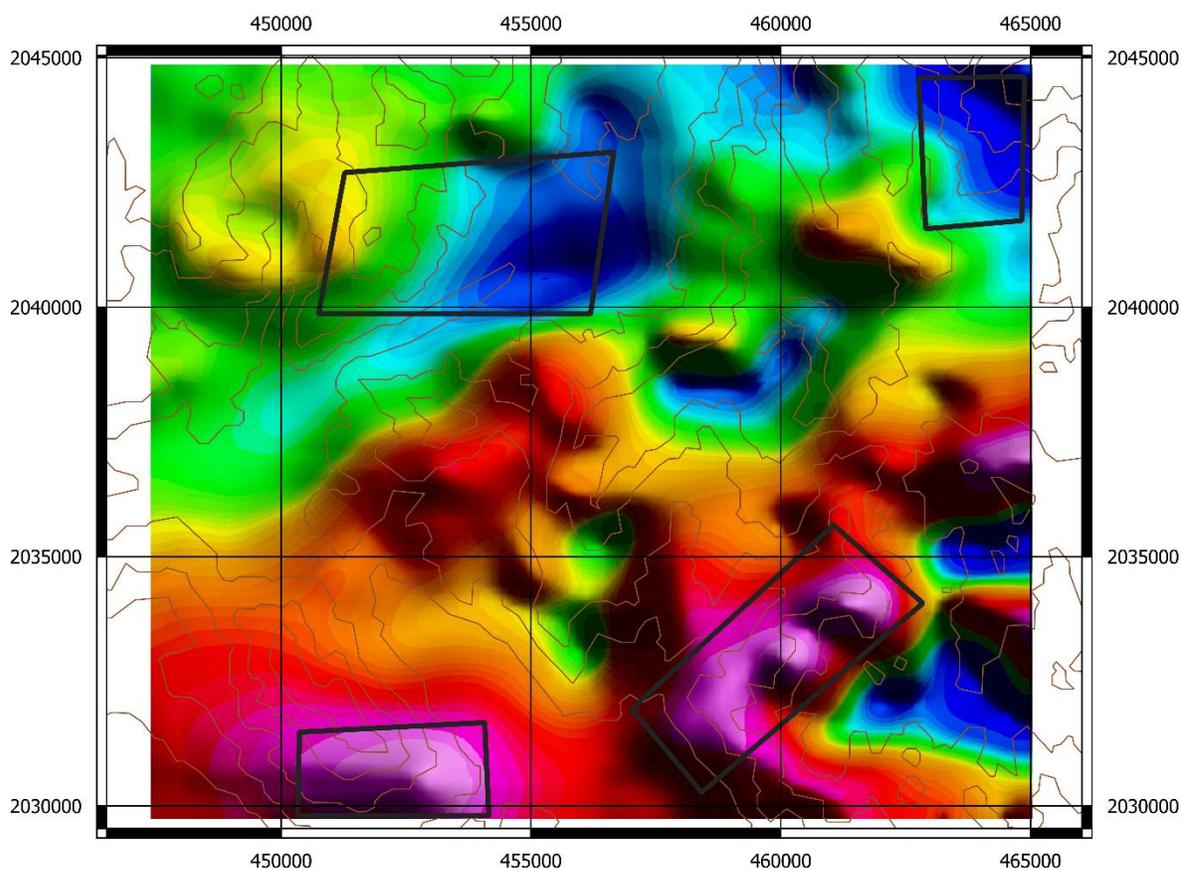


Figura 23: Análisis e Interpretación de la Carta de Campo Total

5.2. Carta de Reducción al Polo

Al eliminar el efecto dipolar de campo apreciamos como se focalizan mejor las anomalías ya sean altos o bajos magnéticos. Esto nos permite indicar una mejor geolocalización de los posibles cuerpos que originen dicho efecto al haber aplicado este proceso con una Inclinación de 45.7 y una declinación de 4.68 (Figura 24).

Para las anomalías de altos magnéticos anteriormente descritos se aprecia una mejor geolocalización de la respuesta magnética, generando así cuatro zonas con valores de susceptibilidad magnética entre 185 a 239 nT ubicadas al SW, Centro y SE de la zona de estudio, con longitudes aproximadas de 5,670 m para la anomalía encerrada entre las coordenadas Norte 2,034,000 y 2,030,000 y las coordenadas Este 449,400 y 455,164.

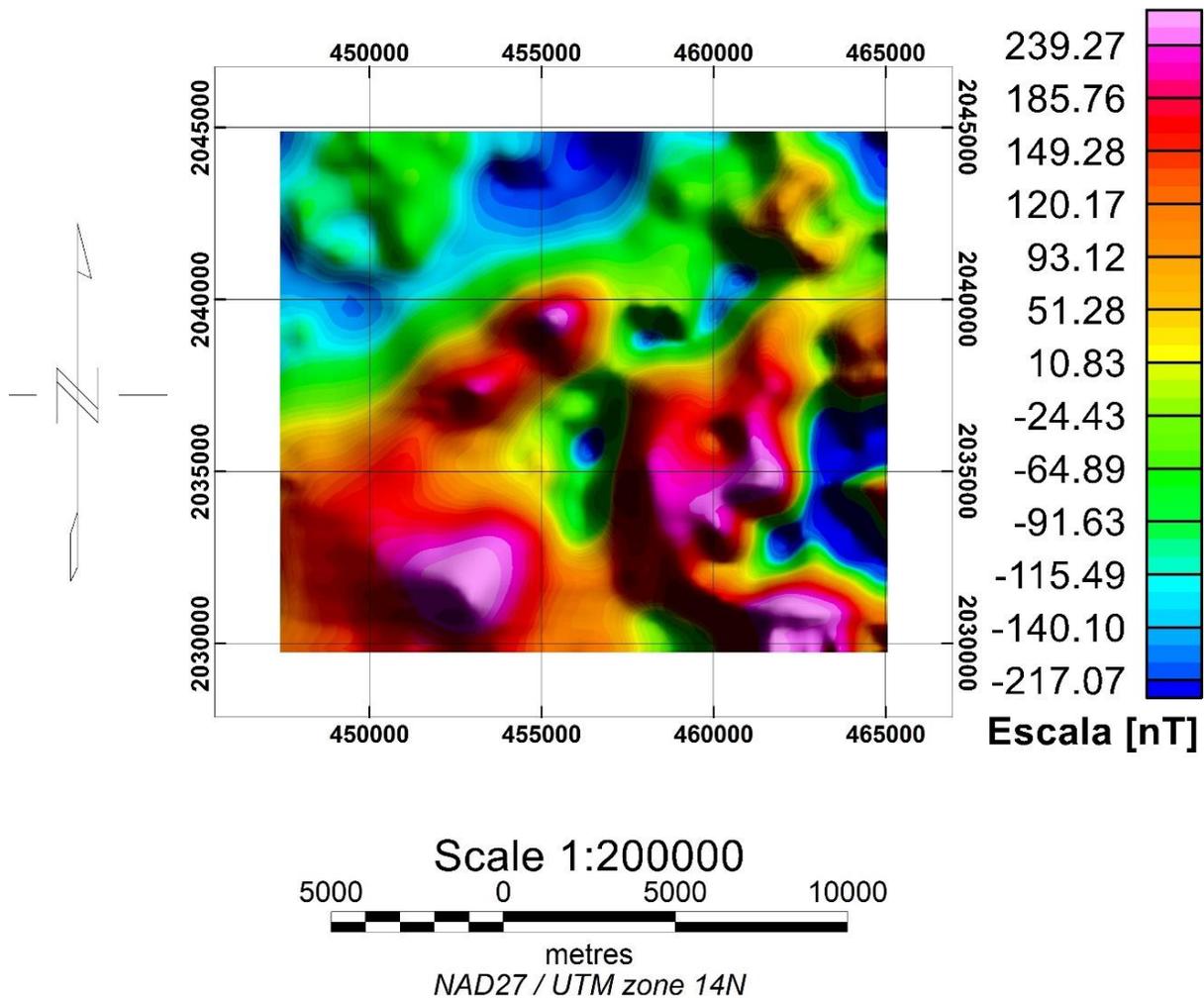


Figura 24: Carta de Reducción al Polo

La anomalía ubicada al centro se encuentra delimitada por las coordenadas Este 452,000 y 456,350 así como por las coordenadas Norte 2,036,763 y 2,040,200; tiene una longitud aproximada de 5,223 m. Finalmente, las anomalías ubicadas al SE de la zona de estudio se encuentran delimitadas por las coordenadas Este 457,500 y 464,185 así como por las coordenadas Norte 2,037,570 y 2,030,000; dichas anomalías tienen una longitud aproximada de 5,830 m y 3,050 m respectivamente.

De igual forma, las zonas con baja susceptibilidad magnética presentan una separación y realce de tres zonas ubicadas al N, NE y SE de la carta delimitadas por las coordenadas Este 453,000 y 458,300 con coordenadas Norte 2,045,000 y 2,041,600 respectivamente; mientras que las anomalías ubicadas al NE y SE se encuentran encerradas por las coordenadas Este 462,500 y 465,000 así como por las coordenadas Norte 2045000 y 2042800; 2,037,000 y 2,031,500 respectivamente. Dichas anomalías tienen una longitud aproximada de 6,200 m, 1,600 m y 4,300 m mutuamente.

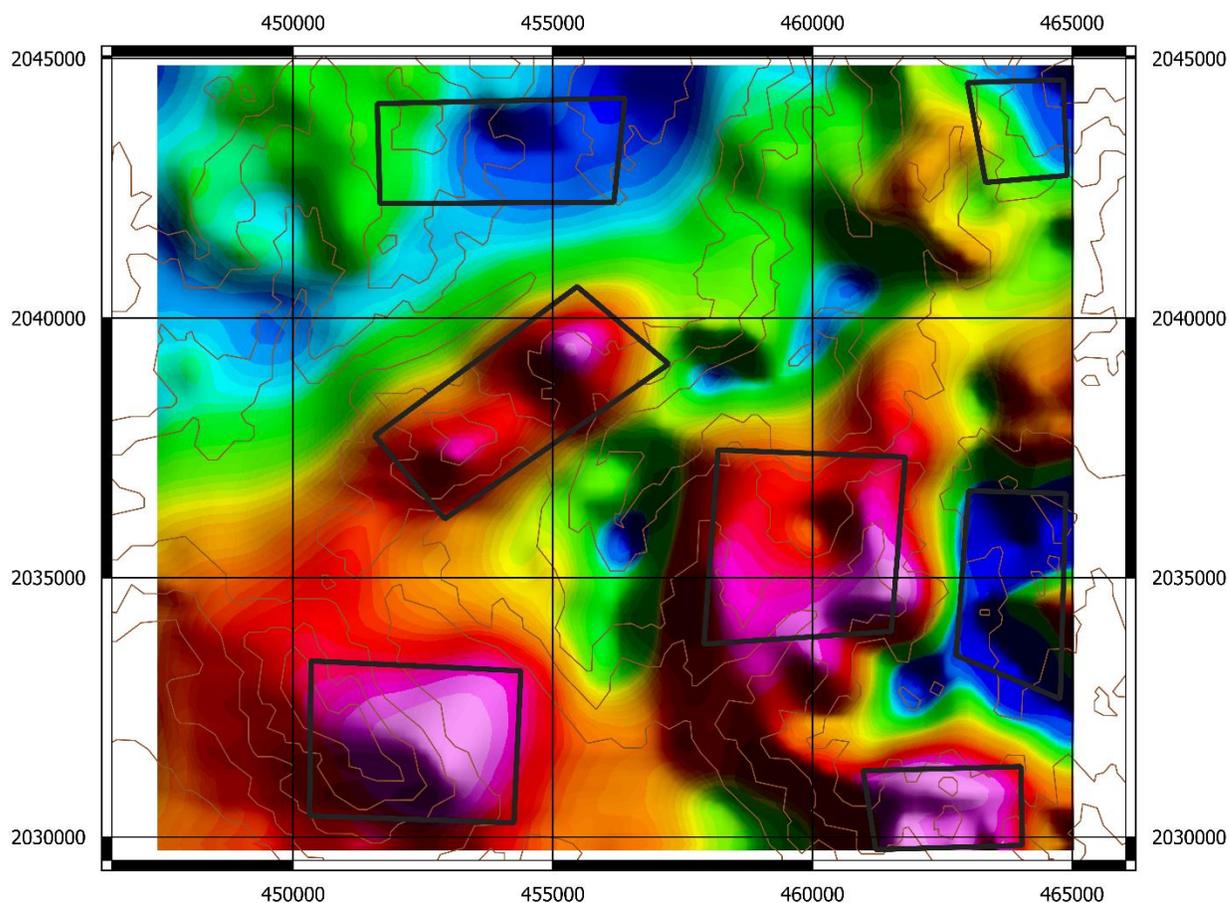


Figura 25: Análisis e Interpretación de la Carta de Reducción al Polo

5.3. Carta de Anomalia Regional y Residual

Despues de sustraer la anomalia Regional (Figura 26) al mapa de Campo Total podemos observar el efecto residual (Figura 27) del campo que corresponde con estructuras en la corteza de acuerdo con la definicion previa del capitulo anterior.

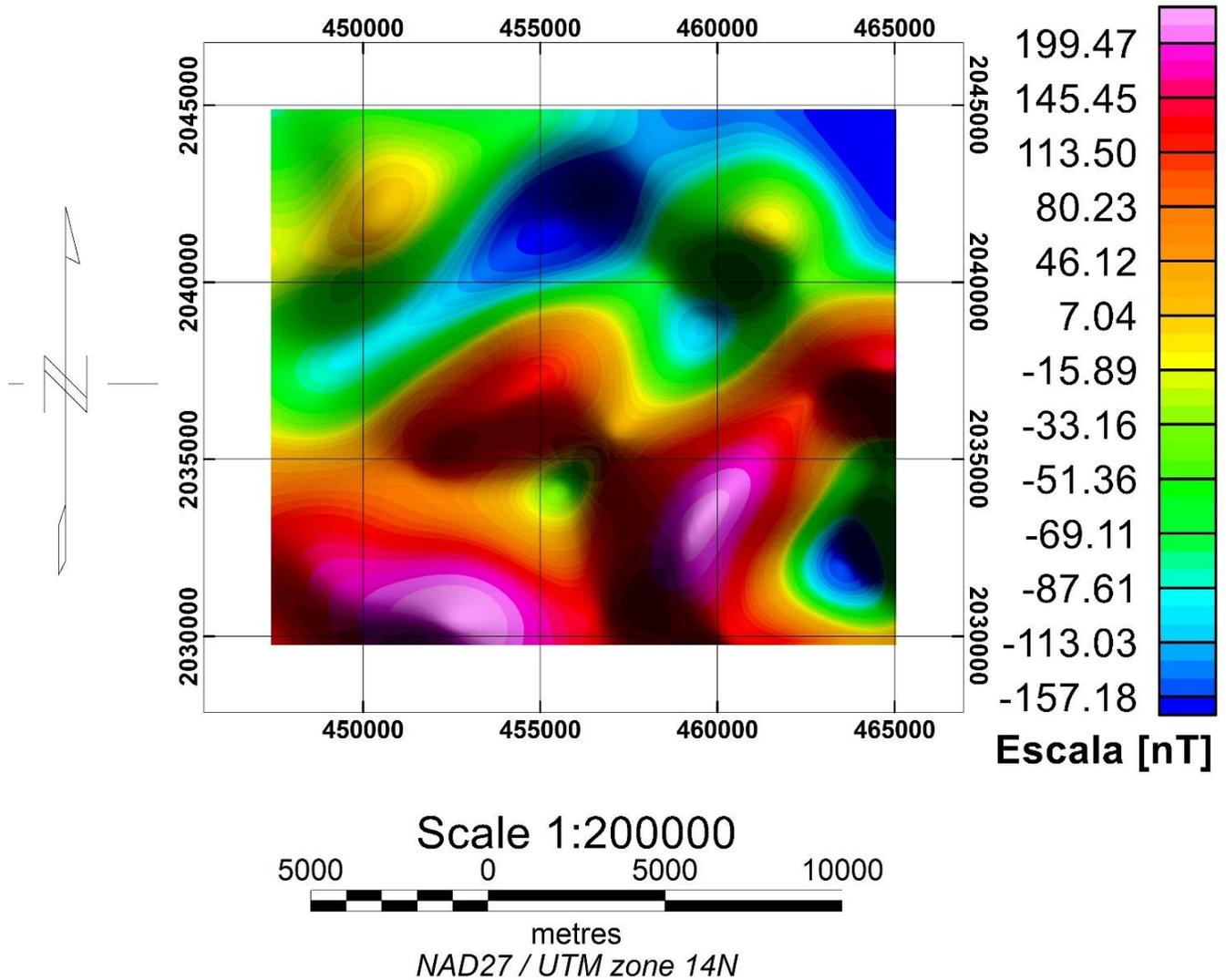


Figura 26: Carta de Anomalia Regional

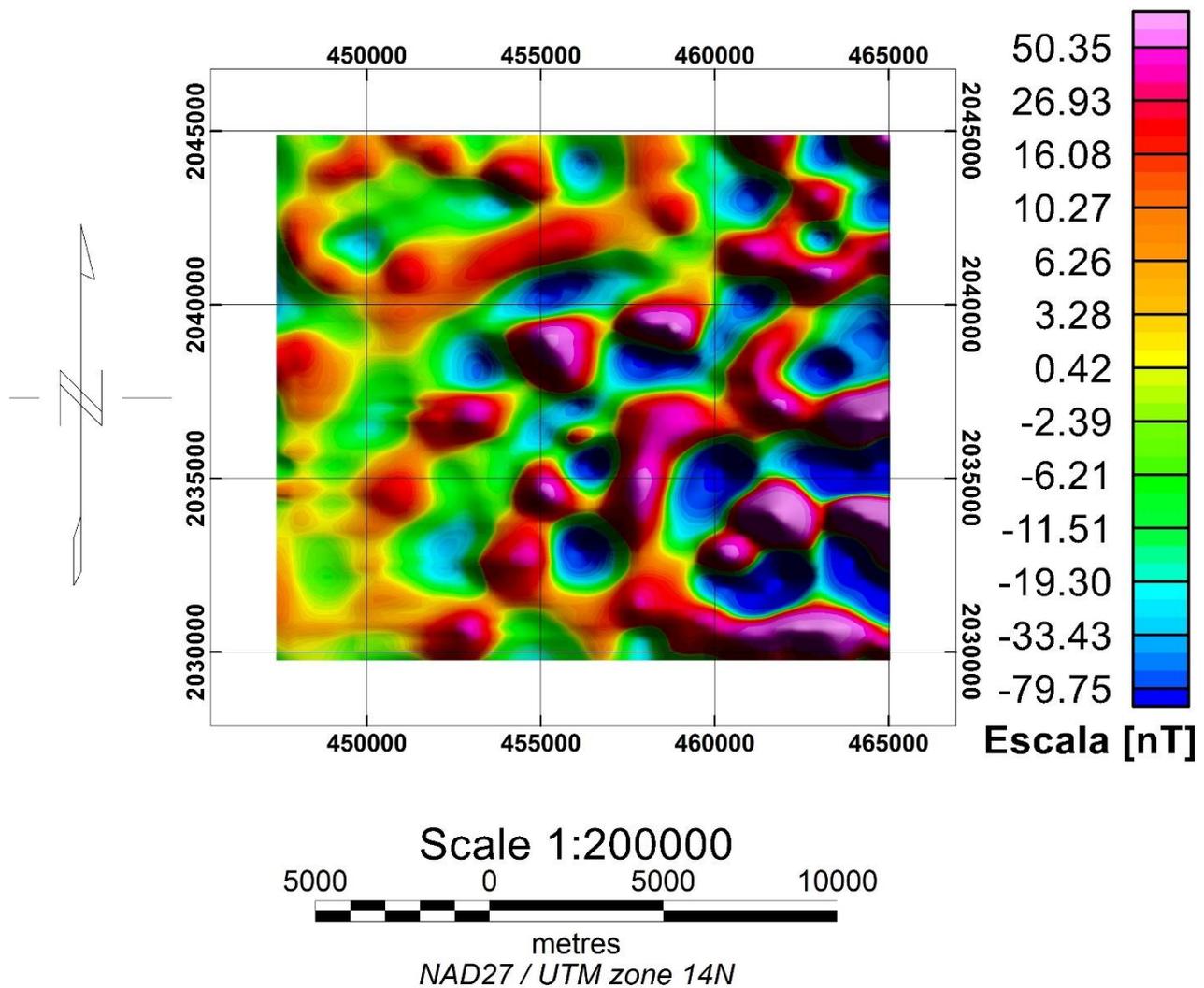


Figura 27: Carta de Anomalía Residual

Sin embargo se observa un comportamiento interesante al SE-E de la carta generado principalmente por un conjunto de anomalías delimitadas por las coordenadas Este 457,000 y 465,000 así como por las coordenadas Norte 2,040,000 y 2,031,400 (Figura 28).

De las tres anomalías presentes, dos presentan un comportamiento similar al ser una baja susceptibilidad magnética al centro semi rodeada por altos magnéticos de aproximadamente 3,670m y 3,160 m de longitud total respectivamente; es probable que pueda ser una respuesta generada por concentraciones de Cobre, Plata, Zinc, Plomo y Arsénico como muestra la carta geoquímica, es importante tener en cuenta la presencia de Arsénico debido a su estrecha relación con el Oro al momento del depósito, por otro lado la anomalía restante es una zona con alta

susceptibilidad magnética rodeado por bajos magnéticos haciendo una especie de flor de aproximadamente 5,590 m, posiblemente pueda ser un efecto geológico ya que no se tiene información de geoquímica en esa zona sin embargo no se descarta del todo puesto que la geología muestra una intrusión en esa zona lo que permitiría el depósito de minerales de interés.

Al NE de la zona de estudio se tiene un comportamiento similar al ser una zona de alta susceptibilidad magnética rodeando a un bajo magnético, con 3,000 m de longitud total aproximadamente y delimitada por las coordenadas Este 460,000 y 465,000 así como por las coordenadas Norte 2,043,700 y 2,040,000; en esta zona el efecto puede deberse a posibles zonas con Cobre de acuerdo a la carta geoquímica. Más al centro y sur de la carta tenemos dos zonas similares al ser dipolos marcados con centro en la coordenada Este 455000, de los cuales el que se presenta más al Norte corresponde con la zona mineralizada de Buenavista de Cuéllar donde se tiene presencia de Plomo, Plata, Zinc, Oro y Arsénico en Altas concentraciones (412 ppm, 28.6 ppm, 1410 ppm, 280 ppb, 192.8 ppm).

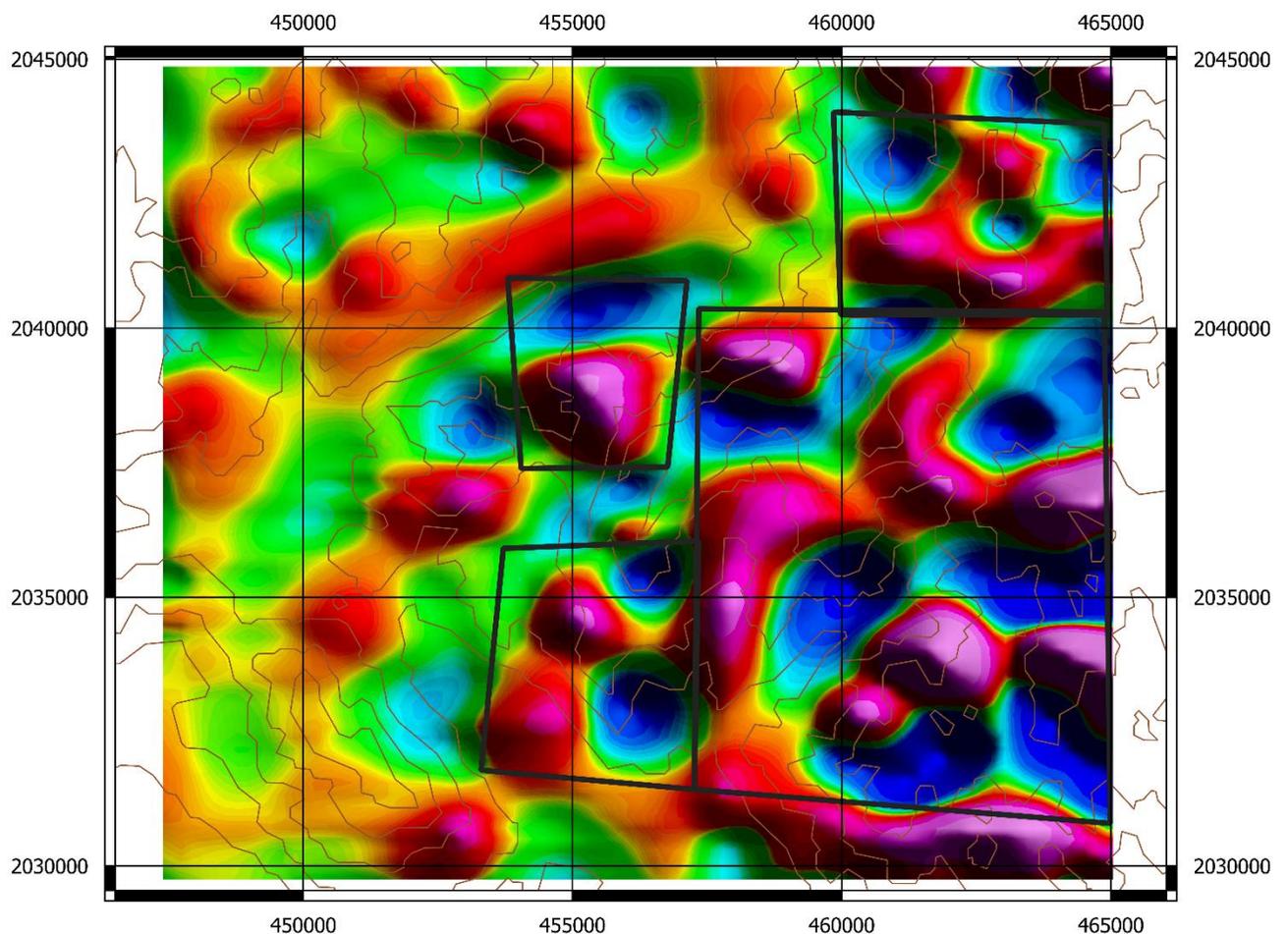


Figura 28: Análisis e Interpretación de la Carta de Anomalía Residual

5.4. Carta de Tilt Derivatives

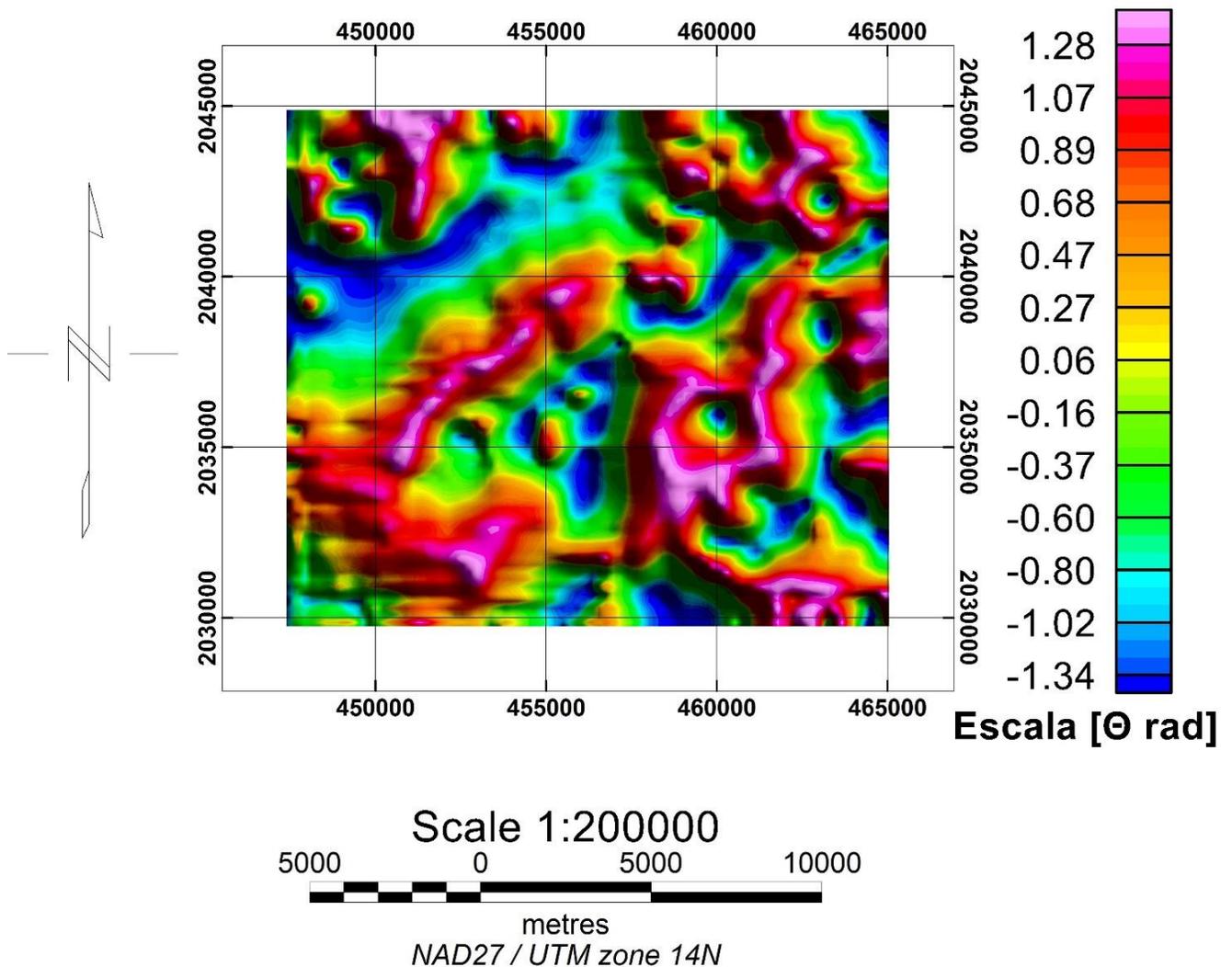


Figura 29: Carta de Tilt Derivative

A partir del análisis de la Tilt Derivative se definen cinco zonas de interés las cuales se describirán a continuación partiendo de Este a Oeste (Figura 30):

La primera zona de interés se encuentra al NE de la carta entre las coordenadas Este 461,700 y 464,400 así como las coordenadas Norte 2,041,000 y 2,043,700. Se presenta sobre depósitos intrusivos Riolítico-Dacíticos en el límite estatal Morelos-Guerrero. Tiene una longitud aproximada de 1500 m; y es justo en esta zona donde se presentan altas concentraciones de Cobre (29 - 42 ppm) y de Zinc (55 - 79 ppm), concentraciones intermedias de Plomo (10 - 13 ppm) (Figura 32); de acuerdo con las profundidades generadas se estima que los cuerpos

mineralizados que generan dicha anomalía se encuentran entre 1 a 3 Km de profundidad (Figura 33).

La segunda zona de interés se encuentra al Este de la carta, entre las coordenadas Este 461,000 y 463,800 así como las coordenadas Norte 2,037,300 y 2,039,700. Tiene una longitud aproximada de 2200 m y se ubica sobre depósitos Riolítico-Dacíticos con presencia de altas concentraciones de Cobre (27 - 38 ppm) y Zinc (50 – 67 ppm), así como concentraciones intermedias de Plomo (9 – 12 ppm) (Figura 32); de acuerdo con las profundidades generadas se estima que los cuerpos mineralizados que generan dicha anomalía se encuentran entre 900 m de profundidad hasta 700 m en superficie (Figura 33).

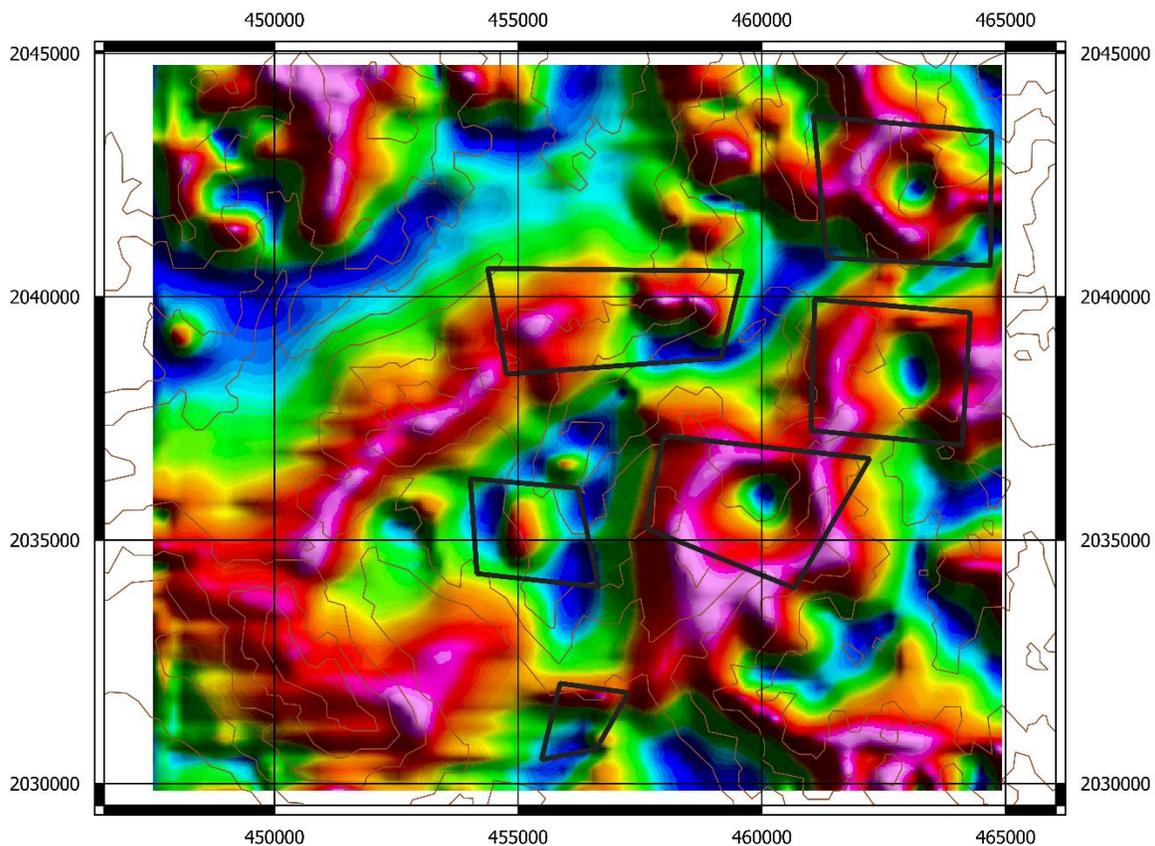


Figura 30: Análisis e Interpretación de la carta Tilt Derivative

La tercera zona se ubica sobre una serie de fallas laterales pertenecientes a la Falla de la Barranca Xihuatotla, ligeramente al SE de la carta (Figura 31) , entre las coordenadas Este 457,800 y 461,800 así como las coordenadas Norte 2,033,100 y 2,037,300. Tiene una longitud aproximada de 2290 m y al igual que las zonas anteriores se ubica sobre depósitos Riolítico-Dacíticos con presencia de

altas concentraciones de Arsénico (13 - 86 ppm) y Zinc (37 – 77 ppm), así como concentraciones intermedias de Plomo (6 – 14 ppm) y Cobre (6 – 21 ppm) (Figura 32); de acuerdo con las profundidades generadas se estima que los cuerpos mineralizados que generan dicha anomalía se encuentran entre 1 a 1.55 Km de profundidad (Figura 33).

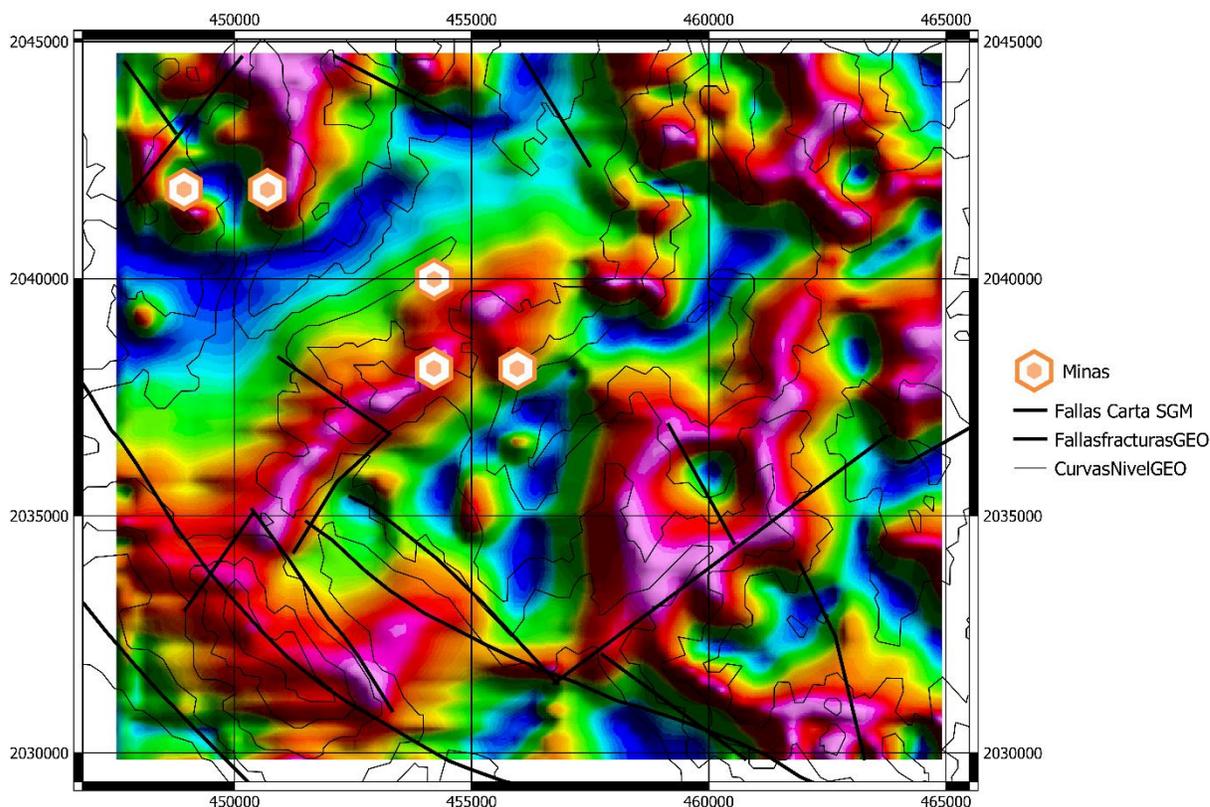


Figura 31: Análisis de fallas y fracturas en la carta Tilt derivative

La cuarta zona de interés corresponde a la zona mineralizada Buenavista de Cuéllar (Centro de la carta), ubicada entre las coordenadas Este 454,100 y 456,600 así como las coordenadas Norte 2,038,300 y 2,040,700. Dicha zona se encuentra sobre una serie de depósitos intrusivos Riolítico-Dacíticos y Granito-Granodioríticos que tienen su correspondiente contacto con depósitos de Caliza-Dolomía. Tiene una longitud de 2000 m y presenta altas concentraciones de Oro (2 – 12 ppb), Plata (0.8 – 2.8 ppm), Zinc (28 – 108 ppm), Plomo (11 – 49 ppm) y Arsénico (19 – 62 ppm) (Figura 32).

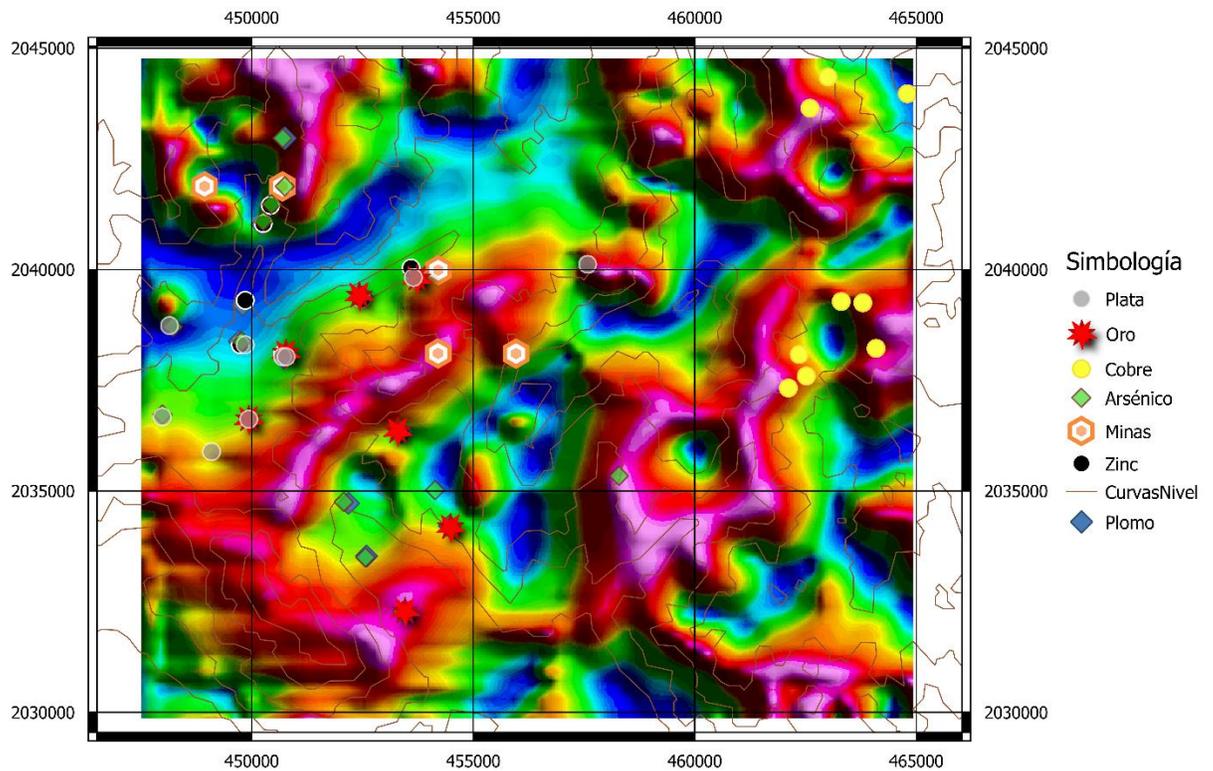


Figura 32: Análisis Geoquímico en la carta Tilt Derivative

Finalmente, la quinta zona de interés tiene lugar en la Falla Tlaxmalac (al Centro de la carta) sobre una serie de depósitos intrusivos Riolítico-Dacíticos y Granito-Granodioríticos entre las coordenadas Este 454,100 y 456,800 así como las coordenadas Norte 2,038,300 y 2,040,500. Se tiene presencia de altas concentraciones de Oro (2 – 11 ppb) y Arsénico (12 – 29 ppm), así como concentraciones intermedias de Zinc (48 – 54 ppm) y Plomo (14 – 17 ppm) (Figura 32) ; de acuerdo con las profundidades generadas se estima que los cuerpos mineralizados que generan dicha anomalía se encuentran entre 1 Km de profundidad hasta 700 m en superficie (Figura 33).

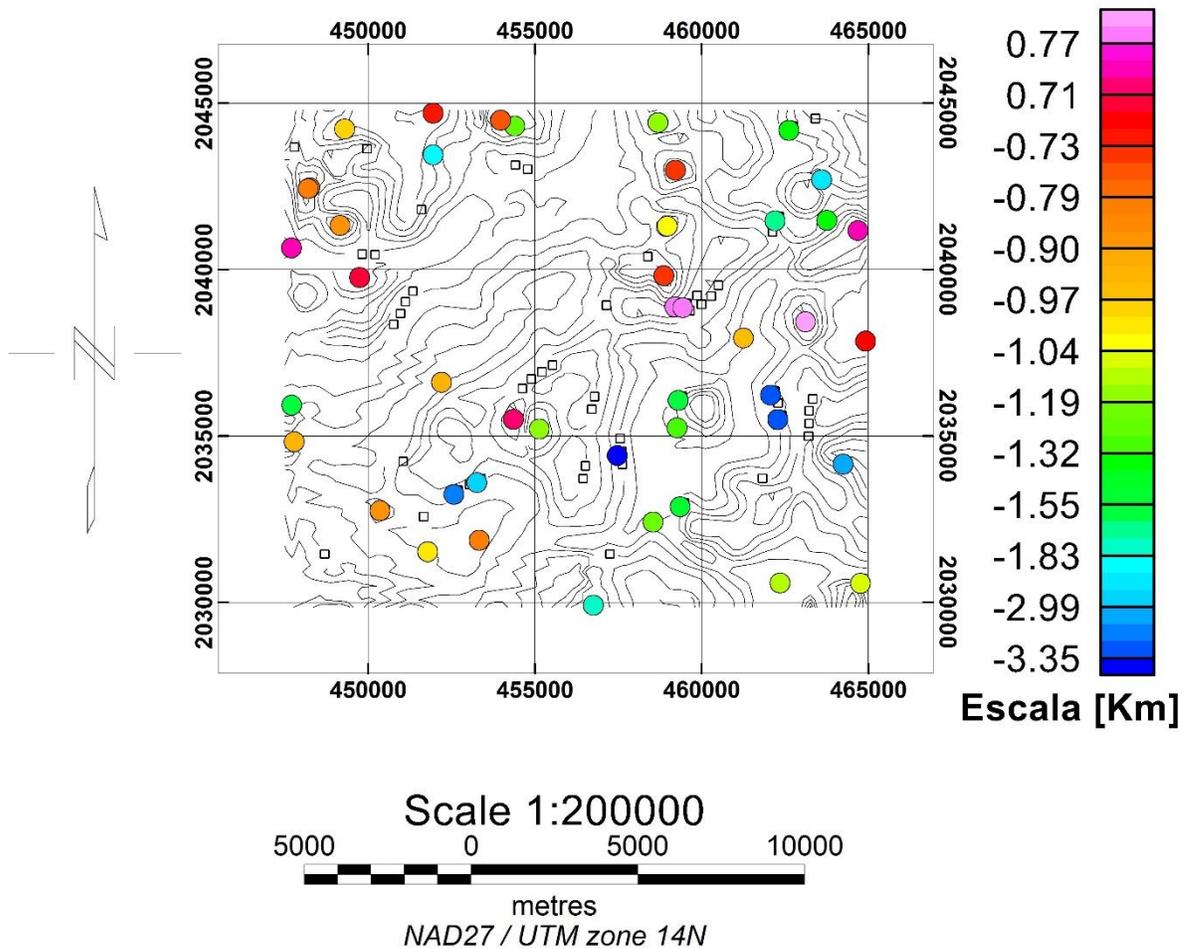


Figura 33: Análisis e Interpretación de la carta de Tilt Derivative (Estimación de Profundidad)

5.5. Modelado Magnético y Geológico

Para lograr el modelado magnético, se exportaron los archivos grid de Geosoft al igual que el modelo digital de elevación de la zona de estudio como archivos XYZ para poder importarlos en Surfer y con ayuda de su correspondiente paquetería generar un grid con un suavizado no tan brusco como el generado por Geosoft para posteriormente emplear la paquetería de Voxler y obtener los resultados que se muestran a continuación.

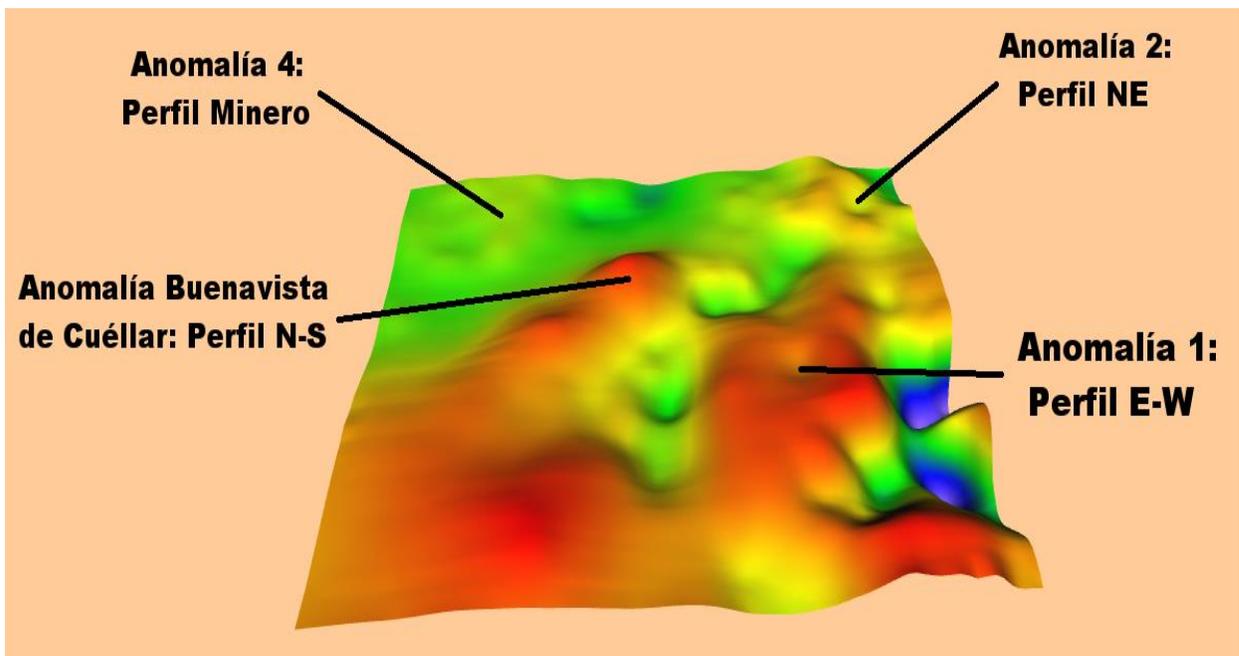


Figura 34: Modelo 3D de la carta Reducción al Polo

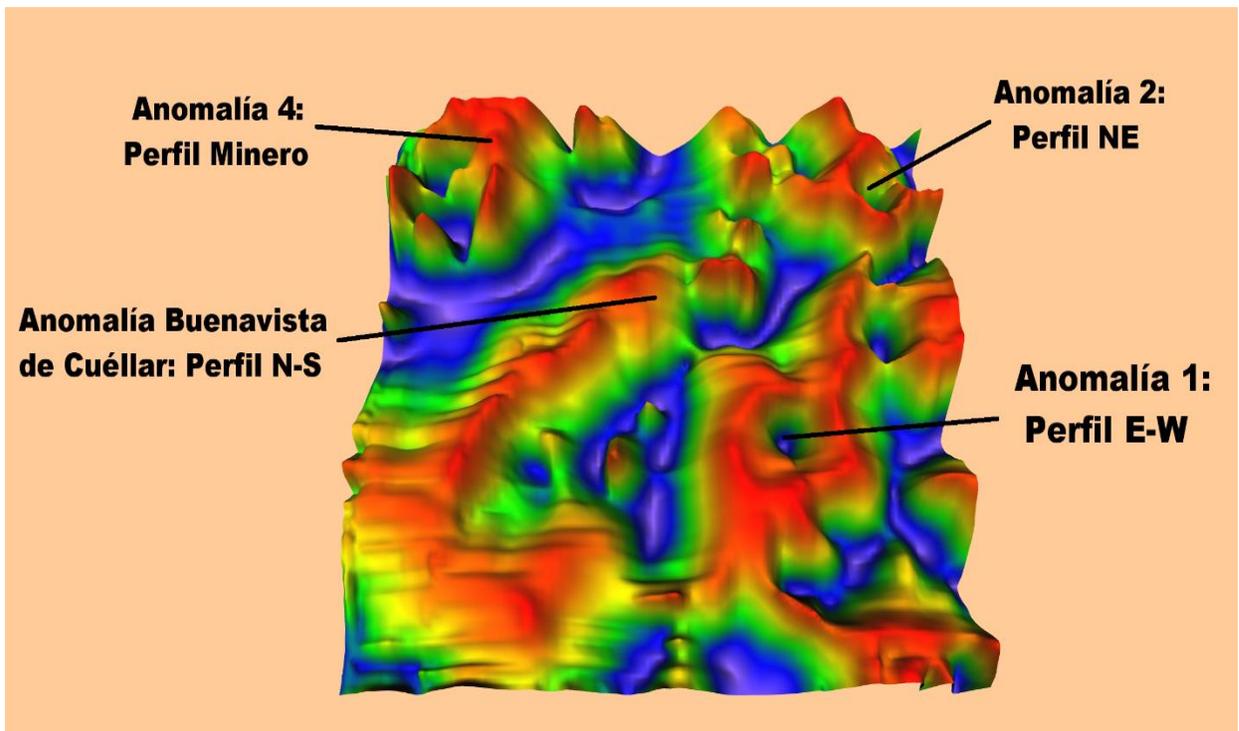


Figura 35: Modelo 3D de la carta Tilt Derivative

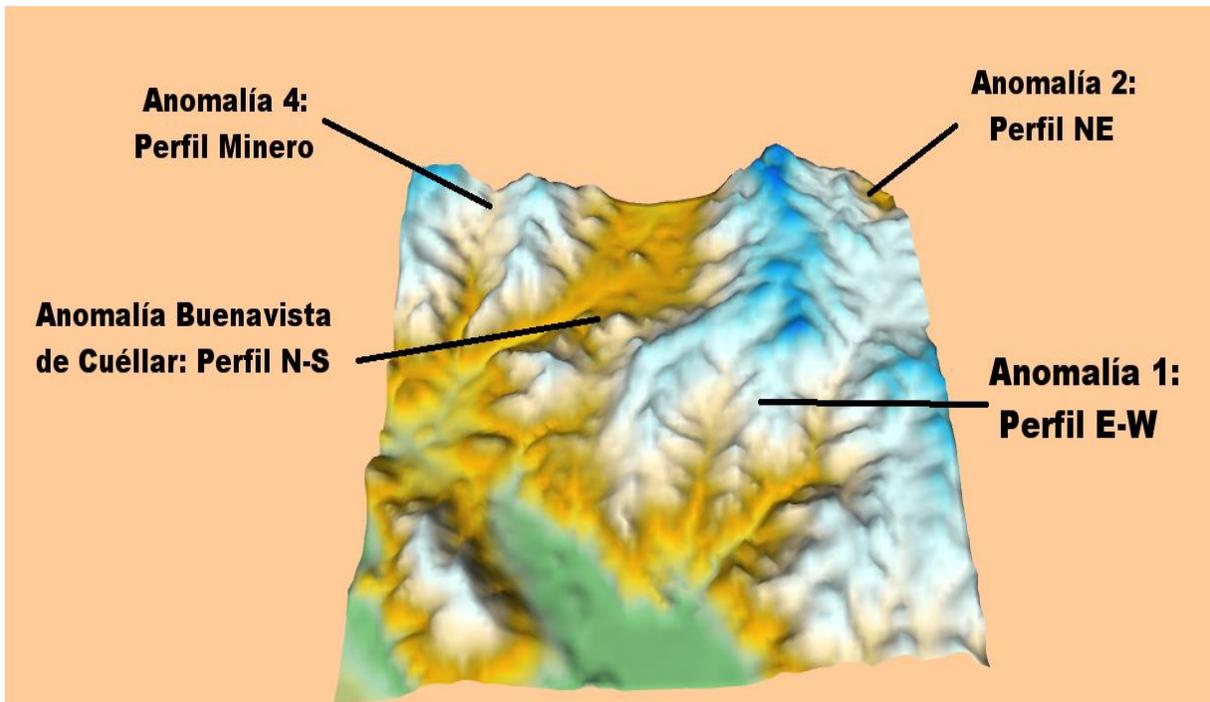


Figura 36: Modelo de elevación digital de la zona de estudio

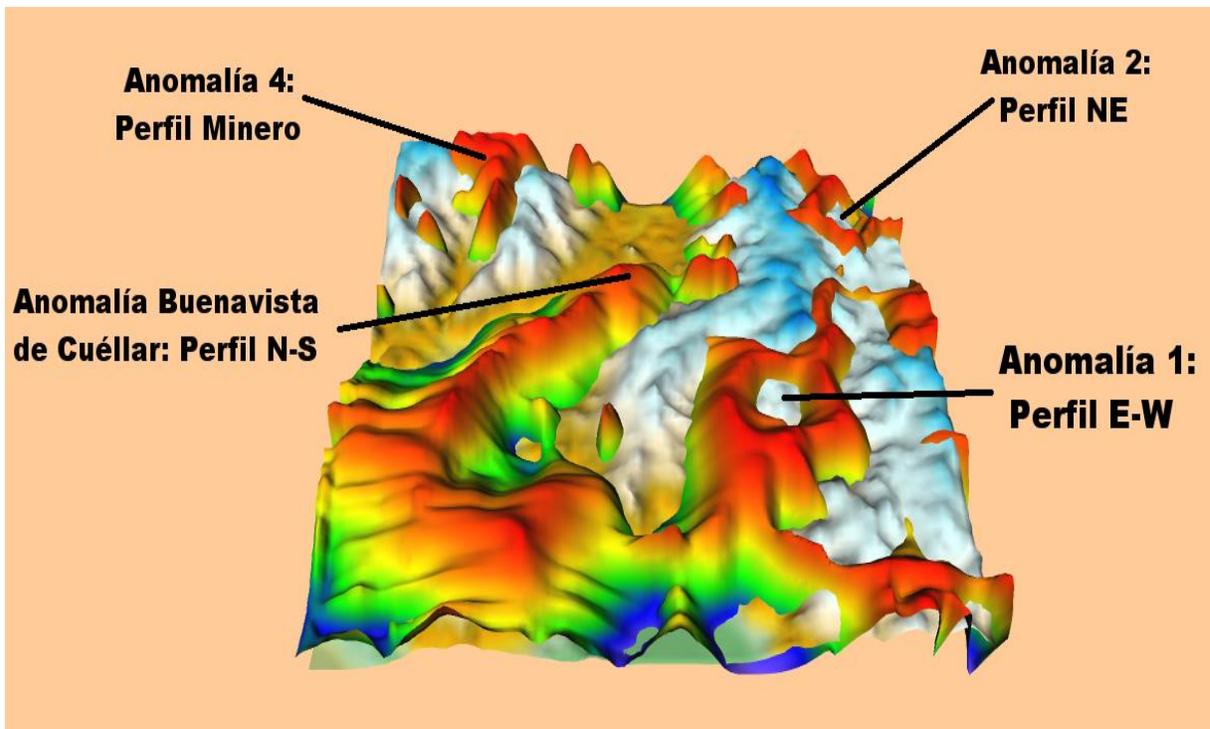


Figura 37: Modelo superpuesto de la carta Tilt Derivative con el modelo digital de elevación

Al hacer la superposición de ambos modelos podemos observar la correlación de las anomalías indicadas con la topografía

Con el fin de correlacionar las profundidades obtenidas a partir de la Tilt Derivative con el proceso de gradiente horizontal se plantearon 6 perfiles a lo largo de la carta reducción al polo de tal forma que crucen por zonas de interés definidas a partir de los resultados aportados por la carta de Tilt Derivative (Figura 38).

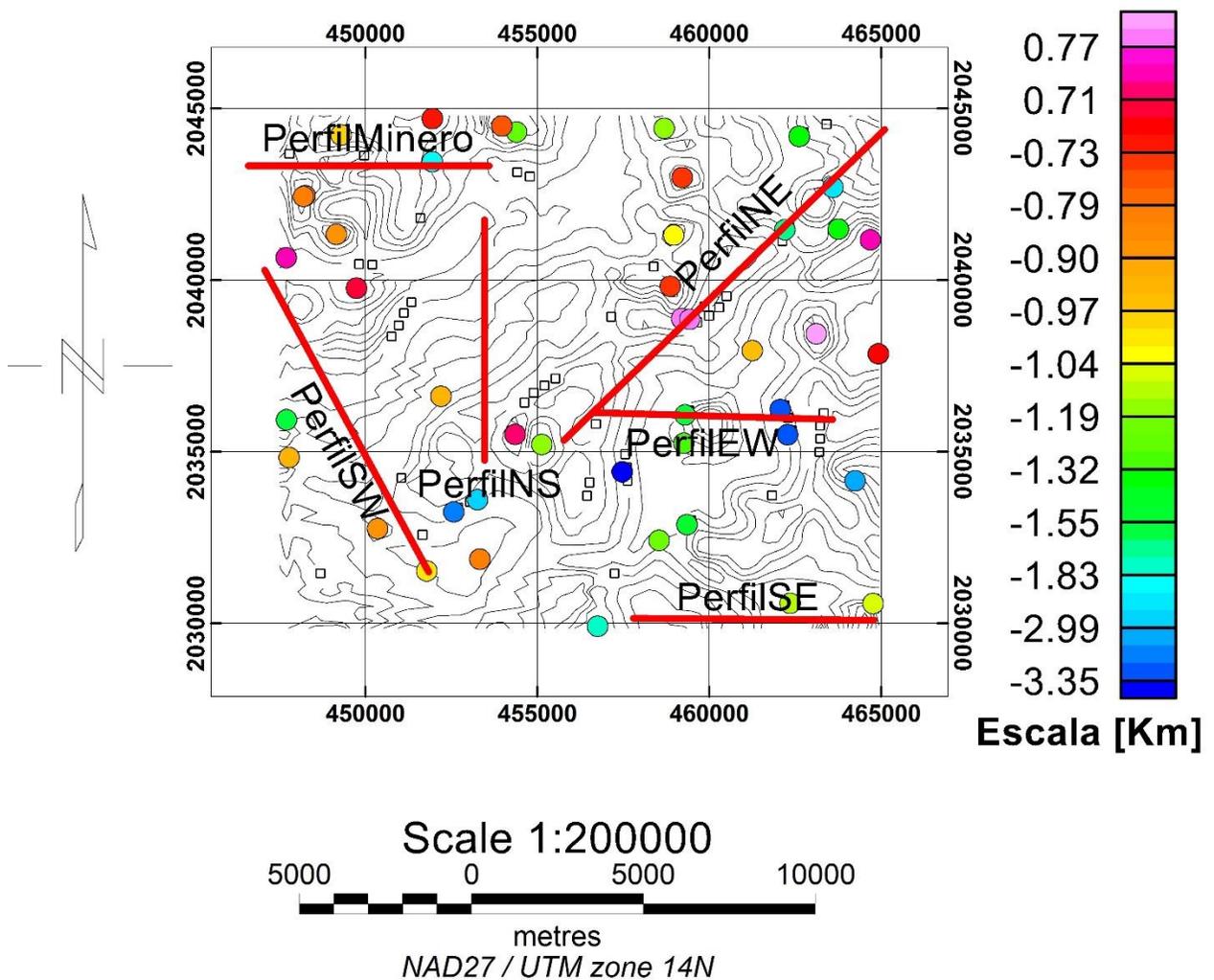


Figura 38: Perfiles modelados en GM-SYS sobrepuestos en la carta de Estimaciones de profundidad Tilt Derivative, escala 1:20000.

A continuación, se presentan los resultados del modelado junto con los valores de susceptibilidad resultantes para cada perfil:

Perfil NE: Cruza cuatro puntos de profundidad estimados entre los 700 metros en superficie hasta aproximadamente 2 kilómetros en profundidad. Se infiere que uno de los puntos nos indica una continuación del contacto entre la capa de caliza, riolita y granito a una profundidad estimada de 1.83 kilómetros; sin embargo, en el modelo se aprecia este contacto entre los 800 metros a 1.2 kilómetros de profundidad.

Geología Perfil NE	Susceptibilidad Magnética (SI)
Riolita-Dacita	0.00005027
Caliza-Dolomía	0.02499452
Granito-Granodiorita	0.09742709

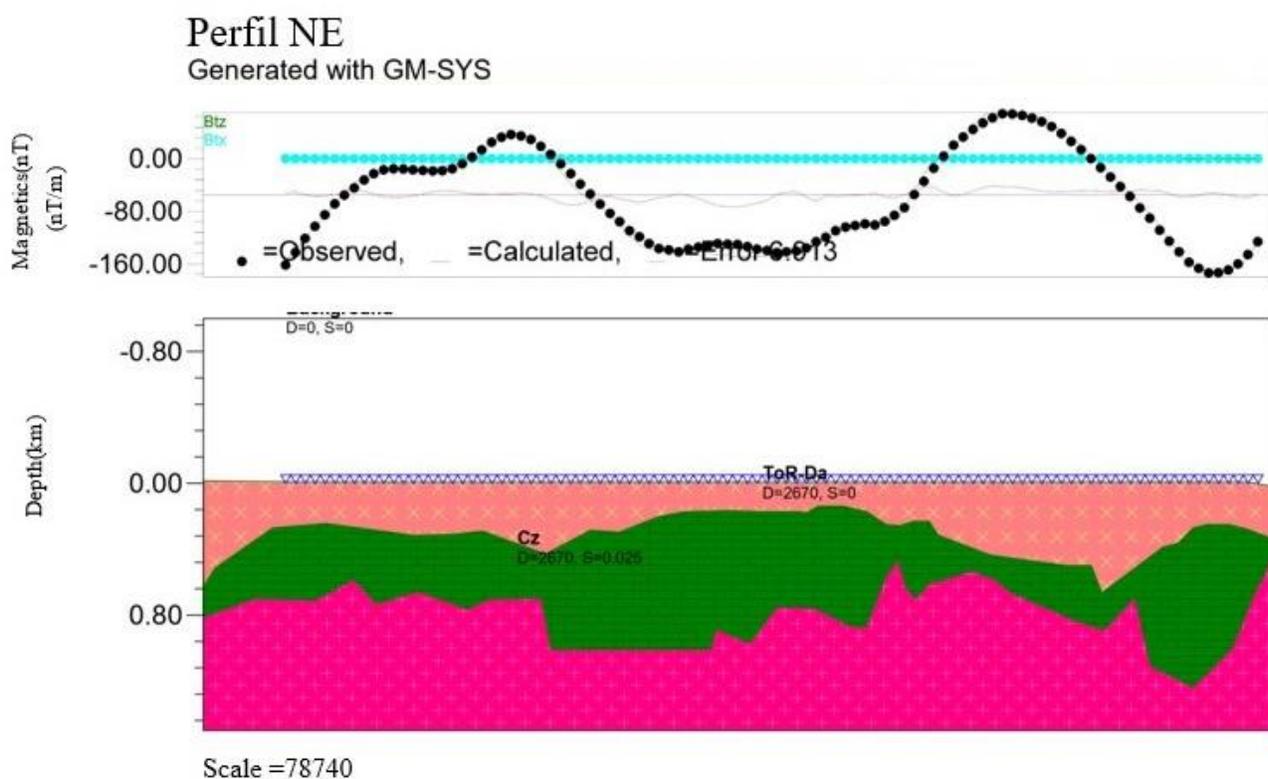


Figura 39: Estimación geológica Perfil NE, con una distancia total de 13 Km y una exageración vertical de 2

Perfil E-W: Cruza cuatro puntos de profundidad estimados entre los 1.2 hasta 3.32 kilómetros en profundidad aproximadamente de los cuales en el modelo representan el contacto entre el intrusivo granito-granodiorítico con la caliza a un kilómetro de profundidad.

Geología Perfil E-W	Susceptibilidad Magnética (SI)
Riolita-Dacita	0.01000283
Caliza-Dolomía	0.02499452
Granito-Granodiorita	0.10000319

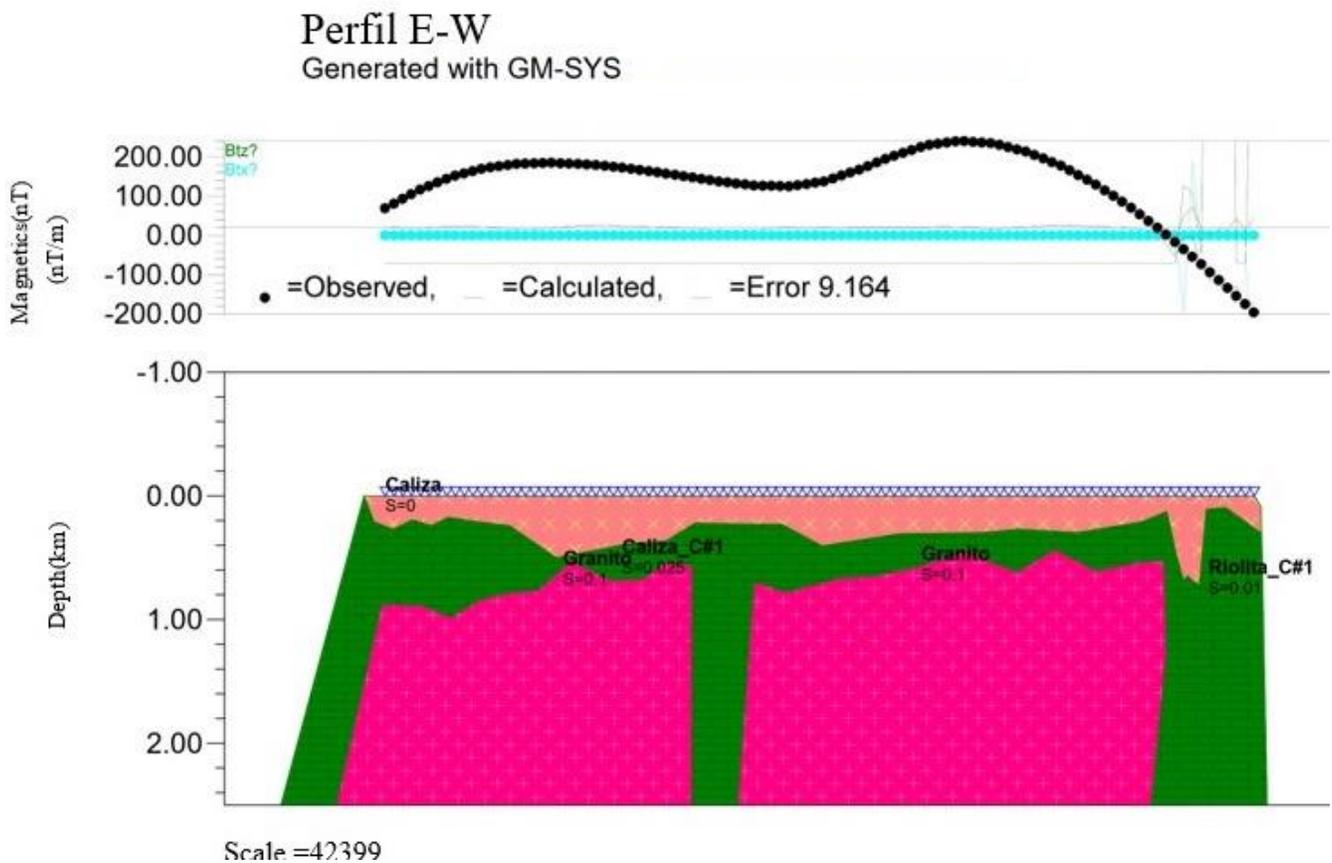


Figura 40: Estimación geológica Perfil E-W, con una distancia total de 7 Km y una exageración vertical de 0.77

Perfil E-W SE: Se encuentra rodeado por tres puntos de profundidad estimados entre 1 hasta 1.83 kilómetros en profundidad aproximadamente los cuales corresponden perfectamente con el contacto entre el intrusivo granítico con la caliza.

Geología Perfil E-W SE	Susceptibilidad Magnética (SI)
Riolita-Dacita	0.00880903
Caliza-Dolomía	0.01509221
Granito-Granodiorita	0.15000479

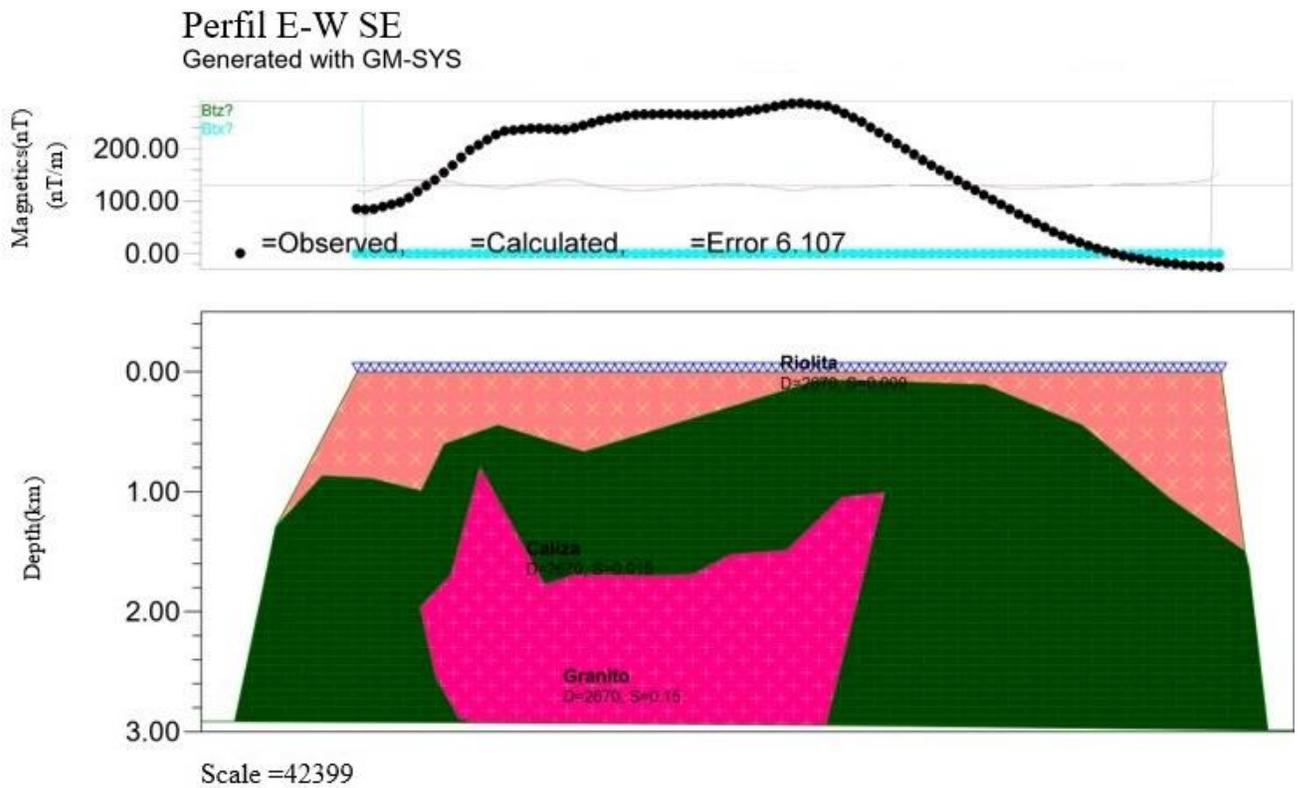


Figura 41: Estimación geológica Perfil SE, con una distancia total de 13 Km y una exageración vertical de 0.77

Perfil SW: Se encuentra rodeado por cinco puntos de profundidad estimados entre los 700 metros en superficie hasta 1 kilómetro en profundidad aproximadamente, comparando con el modelo, los valores en profundidad corresponden con el contacto entre la caliza y el intrusivo granítico.

Geología Perfil SW	Susceptibilidad Magnética (SI)
Lutita-Arena	0.00199805
Caliza-Dolomía	0.00100531
Granito-Granodiorita	0.0500016

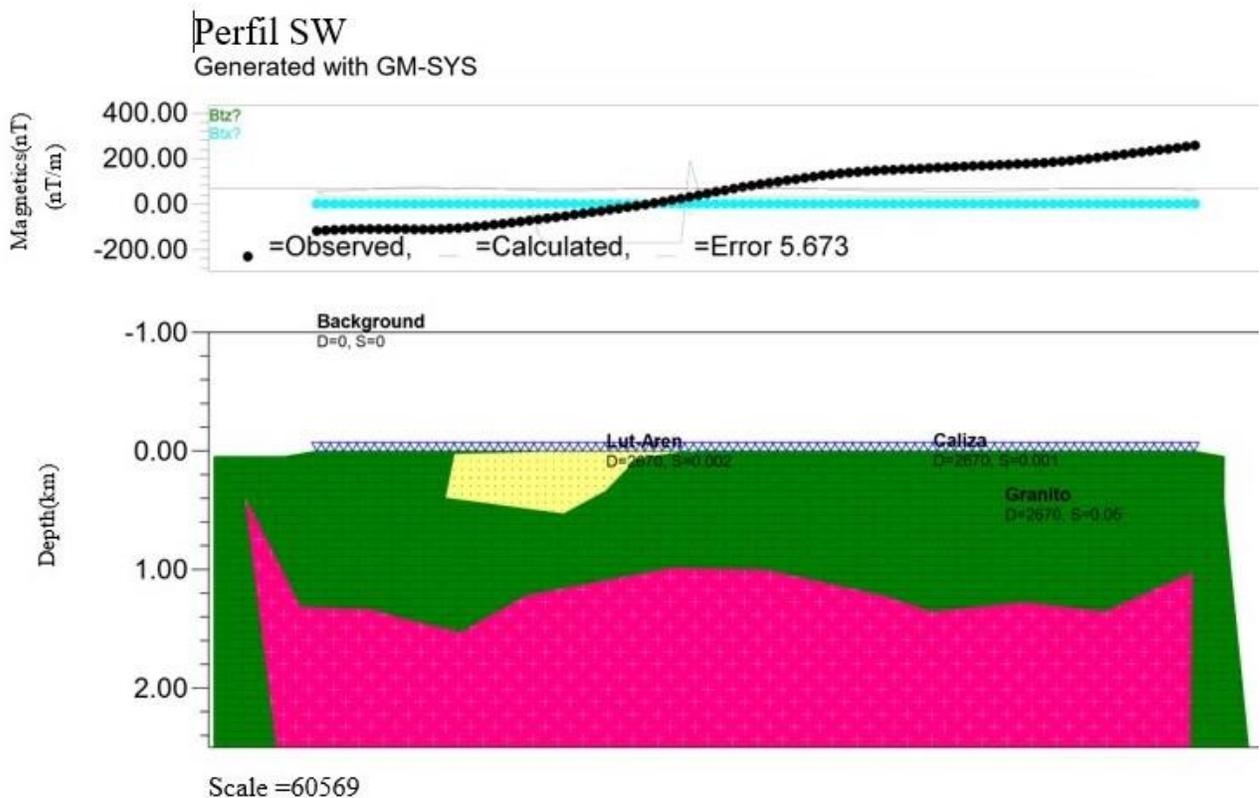


Figura 42: Estimación geológica Perfil SW, con una distancia total de 10 Km y una exageración vertical de 1.1

Perfil N-S: Se encuentra rodeado por dos puntos de profundidad estimados entre los 900 metros hasta 3 kilómetros en profundidad aproximadamente, el modelo presenta contactos entre la caliza y el intrusivo en un rango entre 1 a 2.5 kilómetros de profundidad, de igual forma se presenta un relleno de material riolítico el cual se adentra hasta los 2 kilómetros de profundidad.

Geología Perfil N-S	Susceptibilidad Magnética (SI)
Riolita-Dacita	0.00001257
Caliza-Dolomía	0.01006566
Granito-Granodiorita	0.03017186

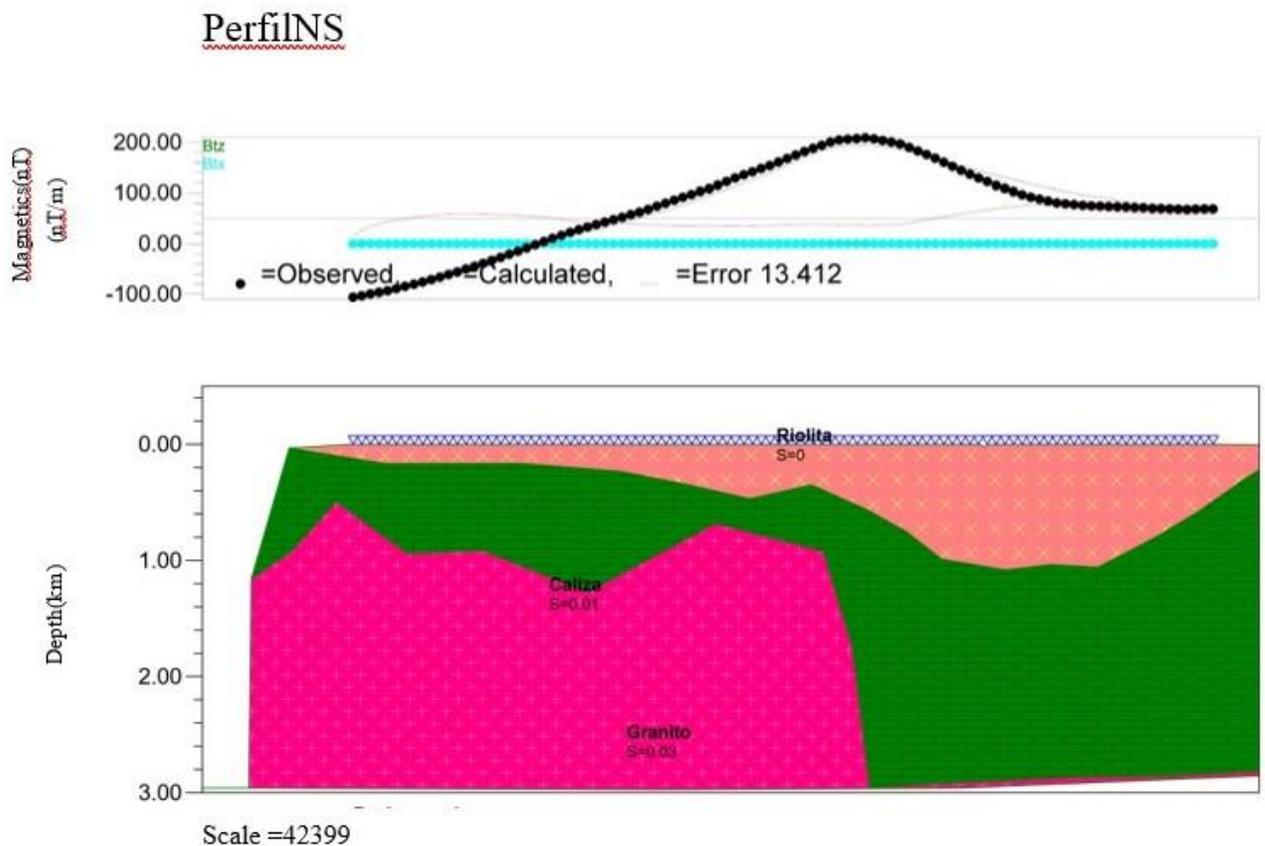


Figura 43: Estimación geológica Perfil N-S, con una distancia total de 6.8 Km y una exageración vertical de 0.77

Perfil Minero: Recibe dicho nombre debido a que este perfil cruza la región minera Coxcatlán la cual no toda se encuentra activa ya que varias de las minas reportadas por el Servicio Geológico Mexicano se encuentran abandonadas. Se encuentra rodeado por tres puntos de profundidad estimados entre los 800 metros hasta 3 kilómetros en profundidad aproximadamente que corresponden con zonas de contacto entre la caliza y el intrusivo ya que este último se presenta en superficie.

Geología Perfil Minero	Susceptibilidad Magnética (SI)
Caliza-Dolomía	0.00100531
Granito-Granodiorita	0.00770319

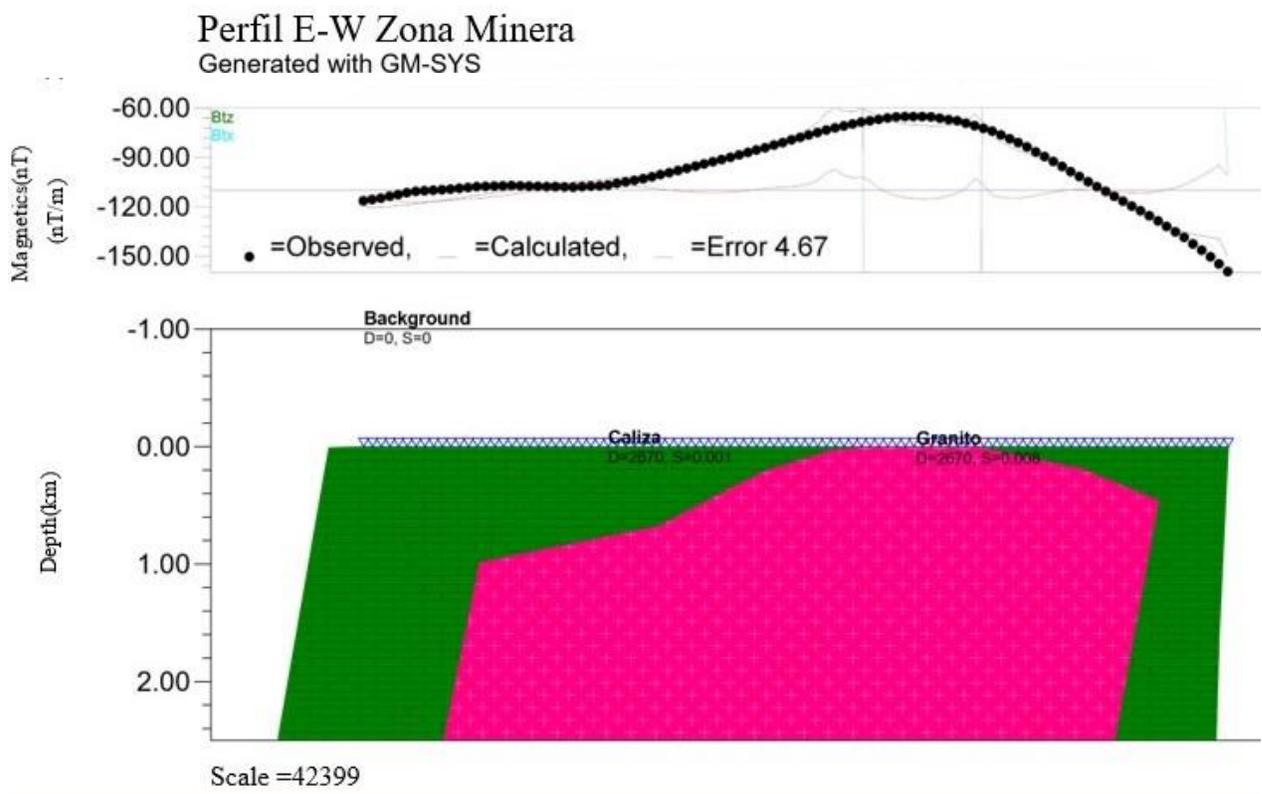


Figura 44: Estimación geológica Perfil Minero, con una distancia total de 7 Km y una exageración vertical de 0.77

6. Conclusiones y Recomendaciones

6.1. Diagnóstico y Potencial minero

Después de realizar un análisis de la información; los resultados basados en el desarrollo de la tecnología para adquisición de datos en los levantamientos geofísicos aéreos, así como en los procesos que se aplican a los datos obtenidos, la cual permite obtener un volumen mucho mayor de información para interpretarse sobre grandes áreas se establecieron las siguientes conclusiones y recomendaciones:

- Después de aplicar los procesos mencionados se logra identificar principalmente seis zonas con un potencial minero elevado al coincidir con zonas geoquímicamente muestreadas por oro, plata, cobre, plomo y zinc, a su vez se logra correlacionar algunas anomalías a zonas con minería activa e inactiva (minas abandonadas). Por su parte la técnica derivada de ángulo de fase nos permite identificar los contactos geológicos entre la caliza y la riolita-dacítica junto con una estimación a profundidad ya sea por el contacto entre ambas litologías o debido a cuerpos mineralizados.
- Se puede concluir que los datos que se generaron mediante magnetometría hace unos años, pueden ser procesados nuevamente mediante metodologías novedosas y hacer una correlación con datos reportados más recientes tales como los estudios electromagnéticos, de rayos gamma, gravimétricos y/o geoquímicos.
- Se demostró que la derivada del ángulo de inclinación en la búsqueda de cuerpos o estructuras mineralizadas es una herramienta útil para su correlación con información adicional para confirmar y reconocer zonas de interés minero.
- Una recomendación como experiencia durante el desarrollo de este trabajo, es el uso y aprovechamiento de la proliferación de la información actualizada en el área de estudio, tal y como cartas geoquímicas, cartas mineras de México y la actividad minera de la zona (Yacimientos minerales conocidos, Empresas mineras, Rocas dimensionables, etc).

- Este trabajo permite concluir que la metodología de la “Tilt Derivative” posee muchos recursos de visualización, realce, y enfoque sobre los datos para describir adecuadamente las características que pueden asociarse con la geometría, estructura, geología, y geoquímica para obtener más información en zonas de alto potencial minero.
- Existen tres fuentes en la actualidad para desarrollar un proyecto minero en donde se puede recomendar enfocarse para obtener resultados satisfactorios: la disponibilidad de la información geofísica ha mostrado un desarrollo muy importante y posible a través de las bases de datos de las instituciones como INEGI. La literatura confiable y sólida de procesamiento de datos geofísicos en general, se encuentra en un paradigma, pues ya no es una metodología específica de procesamiento de datos la que actualmente asegura resultados satisfactorios. Finalmente, la información novedosa tal como la geoquímica apoya la metodología para estimar las profundidades de los objetivos; pues es bien sabido que el método magnetométrico requiere de información dura y metodologías sólidas para estimar profundidades, que son de gran importancia en los proyectos mineros.

7. Bibliografía

- Ahmed Salem et. al. (2008), Interpretation of Magnetic Data using Tilt-angle Derivatives, *Geophysics*, Vol. 73, No. 1 (January-February 2008), 1–10.
- Richard J. Blakely, Gerald G. Connard, Julia B. Curto (2016), Tilt Derivative Made Easy, Geosoft Technical note.
- Ian N. MacLeod, Keith Jones, Ting Fan Dai (1993), 3-D Analytic Signal in the Interpretation of Total Magnetic Field Data at Low Magnetic Latitudes, *Exploration Geophysics* (1993) 24, 679-688.
- J. Cizmar (2008), Magnetic Correction of Aircraft Navigation Instruments, *AiMT* Vol. 3, No. 1 September 2008.
- de Barros Camara, E. and Guimarães, S. N. P.: Magnetic airborne survey – geophysical flight, *Geosci. Instrum. Method. Data Syst.*, 5, 181-192, <https://doi.org/10.5194/gi-5-181-2016> , 2016.
- Marcos A. Sánchez et. al. (2011), Análisis de Campo Magnético mediante métodos de filtrado de anomalías en la Sierra Pampeana de Velasco, *Latinmag Letters*, Vol. 1, Especial Issue (2011) Proceedings Tandil, Argentina, 1-7.
- D.J.FitzGerald, J.Perrin (2015), Magnetic Compensation of Survey Aircraft; a poor man's approach and some re-imagination, *Sociedade Brasileira de Geofísica (SBGF)*, Fourteenth International Congress of the Brazilian Geophysical Society.
- Geosoft, Microlevelling Using FFT Decorrugation, Geosoft Technical note.
- Charles J. Moon, Michael E.G. Whateley, Anthony M. Evans (2006) *Introduction to Mineral Exploration*, Blackwell Publishing, 11-12, 52-69, 127-150.
- González B. Abner, Caccavari G. Ana, Hernández Q. Esteban (2018) Análisis estadístico de la base de datos de Intensidad Total del Observatorio Magnético de Teoloyucan de los años 2000-2017, *Instituto de Geofísica*, 2-3.
- Telford W.M., Geldart L.P., Sheriff R.E. & Keys D.A. (1990) *Applied Geophysics*, 2nd ed. Cambridge University Press, Cambridge, 62-123
- Richard J. Blakely (1996) *Potential Theory in Gravity and Magnetic Applications*, Cambridge University Press, Cambridge, 1-16, 24-31, 65-93, 154-178.
- Wallace H. Campbell (2003) *Introduction to Geomagnetic Fields*, 2nd ed, Cambridge University Press, Cambridge
- Jerzy Jankowski and Christian Sucksdorff (1996), *Guide for magnetic measurements and observatory practice*, IAGA, 15-33.
- García S. Alejandro et. al. (2017) *Prospección Magnetométrica, Instrumentación y Correcciones*, Departamento de Ingeniería Geofísica, Facultad de Ingeniería, UNAM

- M. N. Nabighian et. al. (2005) The historical development of the magnetic method in exploration, *Geophysycs*, Vol. 70, No. 6 (November-December 2005)
- Roberto Lanza, Antonio Meloni (2006), *The Earth's Magnetism An Introduction for Geologists*, Springer Ed., 1-97
- Karla R. Juárez López (2017), *Prospección Geofísica del sitio Arqueológico de Xalasco, Noreste de Tlaxcala*, Tesis Geofísica, Facultad de Ingeniería, UNAM, 19-20.
- Juan Sebastián Cervantes V. (2014), *Estudio del origen e influencia de las perturbaciones externas del Campo Geomagnético a partir de mediciones en Observatorios y Satélites*, Tesis Geofísica, Facultad de Ingeniería, UNAM, 4-5.
- Nidia Hilario Huerta (2017), *Prospección Magnetométrica en la zona de Plazuelas, Guanajuato*, Tesis Geofísica, Facultad de Ingeniería, UNAM, 30-34.
- Correa Pérez Genaro, Niño Gutiérrez Naú (2011), *Geografía física e historia geológica del estado de guerrero, México*. *Revista Geográfica de América Central* [en línea] 2011, 2 (Julio-Diciembre): [Fecha de consulta: 6 de marzo de 2019] Disponible en: <<http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=451744820605>> ISSN 1011-484X
- Fries Carl Jr. (1960), *Geología del Estado de Morelos y partes adyacentes de México y Guerrero, región central meridional de México*, Boletín del Instituto de Geología UNAM No. 60.
- SGM (2017), *Panorama Minero del Estado de Guerrero*, Servicio Geológico Mexicano, Documento libre <http://www.sgm.gob.mx/pdfs/GUERRERO.pdf> , 2-28
- SGM (2015), *Carta Geoquímica por Arsénico Iguala E14-A78 Guerrero y Morelos Escala 1:50000*, Servicio Geológico Mexicano.
- SGM (2015), *Carta Geoquímica por Cobre Iguala E14-A78 Guerrero y Morelos Escala 1:50000*, Servicio Geológico Mexicano.
- SGM (2015), *Carta Geoquímica por Oro Iguala E14-A78 Guerrero y Morelos Escala 1:50000*, Servicio Geológico Mexicano.
- SGM (2015), *Carta Geoquímica por Plata Iguala E14-A78 Guerrero y Morelos Escala 1:50000*, Servicio Geológico Mexicano.
- SGM (2015), *Carta Geoquímica por Plomo Iguala E14-A78 Guerrero y Morelos Escala 1:50000*, Servicio Geológico Mexicano.
- SGM (2015), *Carta Geoquímica por Zinc Iguala E14-A78 Guerrero y Morelos Escala 1:50000*, Servicio Geológico Mexicano.
- SGM (2015), *Carta Geológico-Minera Iguala E14-A78 Guerrero y Morelos Escala 1:50000*, Servicio Geológico Mexicano.
- SGM (2015), *Carta Magnética de Campo Total E14-A78 Estado de Guerrero Escala 1:50000*, Servicio Geológico Mexicano.

- SGM (2015), Carta Magnética de Campo Total Reducido al Polo E14-A78 Estado de Guerrero Escala 1:50000, Servicio Geológico Mexicano.