



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

**Geofísica en etapa de Prospección Minera.
Identificación de zonas de interés exploratorio
mediante el procesamiento de imágenes satelitales
ASTER en las inmediaciones del Yacimiento aurífero
de "La Herradura", Sonora, México**

TESIS

Que para obtener el título de
Ingeniero Geofísico

P R E S E N T A

Roberto Benjamín De la Peña Flores

DIRECTOR DE TESIS

Ing. Marco Antonio Rubio Ramos



Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2023

**GEOFÍSICA EN ETAPA DE PROSPECCIÓN
MINERA.**

**IDENTIFICACIÓN DE ZONAS DE INTERÉS
EXPLORATORIO MEDIANTE EL
PROCESAMIENTO DE IMÁGENES SATELITALES
ASTER EN LAS INMEDIACIONES DEL
YACIMIENTO AURÍFERO DE “LA HERRADURA”,
SONORA, MÉXICO.**

ROBERTO BENJAMÍN DE LA PEÑA FLORES

A mi mamá y mi hermana, les agradezco su eterno amor, cariño y apoyo.

Papá, me hubiera encantado que hubieras alcanzado a ver nuestros logros.

A mi abuelo, por haberme motivado a elegir esta carrera.

Agradecimientos

“Ambicioso, jueces, reunir en mi todas las virtudes; pero prefiero a todas el merito de ser agradecido y de parecerlo. El agradecimiento es, no solo la mayor virtud, sino también la madre de todas las virtudes.”

—Marco Tulio Cicerón

La culminación y entrega de este trabajo representa el final de una etapa importante de mi vida, etapa que no hubiera sido posible sin el apoyo de varias personas que me han acompañado a lo largo de este proceso, a las cuales les agradezco completamente su compañía y apoyo durante de estos años.

Le agradezco a mi mamá y mi hermana por todo el amor, cariño, motivación y ayuda que me han proporcionando hasta el día de hoy y desde que salí de mi casa para estudiar la universidad.

Le agradezco a mi abuelo quien me fue guiando, asesorando y motivando a lo largo de los años, llevándome a conocer el mundo de las ciencias de la tierra y finalmente a elegir la carrera de ingeniería geofísica.

Le agradezco a mi tío y a mi primo por libremente haberme proporcionado un lugar para vivir durante mis años universitarios.

Aunque quizás no mencione a todos directamente, le agradezco de manera general a mis diversos familiares, quienes de diversas maneras me fueron apoyando y ayudando durante estos años.

Le agradezco así mismo a Camila, Raul, Estefania, Zarate, Charly y otros compañeros y amigos de la facultad, por su compañía y por las gratas experiencias que fuimos disfrutando a lo largo de nuestra vida universitaria.

Aunque la mayor parte del tiempo vivimos en ciudades diferentes, igualmente le agradezco a mis amigos de Villahermosa por haber estado presentes en diversas maneras a lo largo de estos años.

Le agradezco a mi asesor, el Ing. Marco Antonio Rubio, por su apoyo y su guía durante la realización de este trabajo. Así como a mis sinodales por apoyar en la revisión y corrección de este trabajo escrito.

Y finalmente, le agradezco a la Universidad Nacional Autónoma de México y a la Facultad de Ingeniería por el conocimiento y las oportunidades que me proporcionaron a lo largo de mis estudios.

Índice

Resumen	VIII
Abstract	IX
1. Introducción	1
2. Objetivos	2
3. Marco Teórico	5
3.1. Percepción Remota	5
3.1.1. Radiación electromagnética	6
3.1.2. Interacción de la radiación electromagnética con el medio	7
3.1.3. Espectro electromagnético	10
3.1.4. Especificaciones del sensor ASTER	12
3.2. Geoquímica	16
3.2.1. Estudios de geoquímica de sedimento de arroyo	17
3.3. Prospección Magnética	18
3.3.1. Reducción al Polo Magnético	18
3.3.2. Gradiente Horizontal	19
3.3.3. Derivada de Tilt (Tilt Derivative o Tilt Angle)	20
3.3.4. FSED	21
3.4. Yacimientos de Oro Orogénico	22
4. Área de estudio y Tipología de Yacimiento	23
4.1. Localización	23
4.2. Fisiografía	25
4.3. Terrenos Tectonoestratigráficos	25
4.3.1. Terreno Caborca	25
4.3.2. Cratón de Norteamérica	26
4.4. Geología regional	30
4.4.1. Proterozoico	30
4.4.2. Paleozoico	30
4.4.3. Mesozoico	31
4.4.4. Cenozoico	31
4.5. Geología local	34
4.6. Antecedentes mineros en el área de estudio	40
4.6.1. Cinturón de Au orogénico de Caborca	40
4.6.2. Proyecto Minero La Herradura	42
4.6.3. Otros Proyectos Mineros	44
4.7. Geofísica	45
4.8. Geoquímica	58
4.8.1. Arsénico (As)	61
4.8.2. Oro (Au)	62
4.8.3. Berilio (Be)	62
4.8.4. Cobre (Cu)	62

4.8.5. Hierro (Fe)	63
4.8.6. Potasio (K)	63
4.8.7. Molibdeno (Mo)	64
4.8.8. Niquel (Ni)	64
4.8.9. Plomo (Pb)	64
4.8.10. Antimonio (Sb)	65
4.8.11. Zinc (Zn)	65
5. Metodología	78
5.1. Materiales	78
5.1.1. Software	78
5.1.2. Imágenes satelitales	78
5.2. Preprocesamiento	79
5.2.1. Calibración radiométrica	80
5.2.2. Remuestreo de capas	80
5.2.3. Corrección atmosférica	81
5.3. Procesamiento	81
5.3.1. Enmascaramiento de vegetación	81
5.3.2. Cocientes de bandas	82
5.3.3. Composición a falso color	83
5.3.4. Índices mineralógicos	83
5.3.5. Filtrado emparejado (Matched Filtering)	84
6. Resultados	86
6.1. Resultados del análisis espectral en el área de estudio	86
6.1.1. Composición a falso color	86
6.1.2. Índice mineralógico	90
6.1.3. Filtrado emparejado (Matched Filtering)	92
6.2. Integración de información	96
6.2.1. Fusificación	97
6.2.2. Motor de Inferencia	100
6.2.3. Defusificación	104
7. Conclusiones y recomendaciones	109
8. Bibliografía y Referencias	114

Índice de figuras

1.	Diagrama del proceso de percepción remota, de la adquisición al análisis y a la implementación. (Lillesand et al., 2015)	6
2.	Longitudes de onda del espectro electromagnético con la señalización de las regiones afectadas por la absorción atmosférica en color gris y las ventanas atmosféricas en blanco. (Lillesand et al., 2015)	8
3.	Diagrama de la interacción entre la energía incidente y la superficie, donde se muestra la separación en energía absorbida, reflectada y transmitida. (Lillesand et al., 2015)	9
4.	Firmas espectrales de vegetación, vegetación seca, nieve y caolinita. (Con información de Kokaly et al., 2017)	10
5.	Espectro electromagnético indicando las subdivisiones en regiones principales, con énfasis en el ultravioleta (UV), el espectro visible (V) y el infrarrojo (IR). Se muestran las frecuencias en megahertz [MHz] y las longitudes de onda en ángstrom [Å], micrometros [μm], centímetros [cm] y metros [m]. (Chuvieco, 2016)	11
6.	Respuesta espectral de ASTER comparada con Landsat 7. (Pieri & Abrams, 2004)	13
7.	Bandas espectrales ASTER en VNIR y SWIR, y las firmas espectrales de minerales y vegetación común: a) Vegetación, b) Calcita c) Alunita, d) Montmorillonita, e) Caolinita.	15
8.	Ejemplo de una anomalía resultante de una fuente magnetizada en una región no polar (lado izquierdo) y su conversión a una región polar con la reducción al polo (RTP, por sus siglas en inglés)(lado derecho). (Gubbins & Herrero-Bervera, 2007)	19
9.	Ubicación de la zona de estudio mostrando progresivamente el área de trabajo a escalas requeridas en etapa de Greenfields.	24
10.	Provincias fisiográficas del estado de Sonora con la ubicación del área de estudio.	27
11.	Subprovincias fisiográficas del estado de Sonora con la ubicación del área de estudio.	28
12.	Terrenos Tectono-estratigráficos del norte de México (Centeno-García, 2005)	29
13.	Mapa geológico regional con propuestas de la ubicación de la Megacizalla Mojave - Sonora (Quintanar Ruiz, 2008)	32
14.	Mapa geológico regional del NW de México.	33
15.	Mapa geológico del área de estudio.	36
16.	Ampliación del mapa geológico del área de estudio.	37
17.	Ampliación del mapa geológico del área de estudio.	38
18.	Ampliación del mapa geológico del área de estudio.	39
19.	Ubicación y distribución del Cinturón de Oro orogénico de Caborca (Izaguirre et al., 2017).	41
20.	Ubicación aproximada de depósitos de Oro orogénico al norte-noroeste del estado de Sonora. (Ochoa Landin et al., 2011)	42

21.	Diagrama de rosas con las direcciones preferenciales de los lineamientos aeromagnéticos.	48
22.	Anomalía magnética de campo total.	50
23.	Anomalía magnética de campo total reducida al polo.	51
24.	Anomalía magnética residual reducida al polo.	52
25.	Anomalía magnética residual reducida al polo con la identificación de zonas magnéticas.	53
26.	Derivada de Tilt (Tilt derivative) de la anomalía magnética residual reducida al polo.	54
27.	Estimación de profundidad de los bordes de las anomalías magnéticas, proveniente del tilt depth.	55
28.	FSED de la anomalía magnética residual reducida al polo.	56
29.	Lineamientos magnéticos identificados con el método de FSED.	57
30.	Ubicación de las muestras de sedimento de arroyo tomadas por el Servicio Geológico Mexicano.	58
31.	Mapa de la distribución del Arsénico en los sedimentos de arroyo del área de estudio.	67
32.	Mapa de la distribución del Oro en los sedimentos de arroyo del área de estudio.	68
33.	Mapa de la distribución del Berilio en los sedimentos de arroyo del área de estudio.	69
34.	Mapa de la distribución del Cobre en los sedimentos de arroyo del área de estudio.	70
35.	Mapa de la distribución del Hierro en los sedimentos de arroyo del área de estudio.	71
36.	Mapa de la distribución del Potasio en los sedimentos de arroyo del área de estudio.	72
37.	Mapa de la distribución del Molibdeno en los sedimentos de arroyo del área de estudio.	73
38.	Mapa de la distribución del Níquel en los sedimentos de arroyo del área de estudio.	74
39.	Mapa de la distribución del Plomo en los sedimentos de arroyo del área de estudio.	75
40.	Mapa de la distribución del Antimonio en los sedimentos de arroyo del área de estudio.	76
41.	Mapa de la distribución del Zinc en los sedimentos de arroyo del área de estudio.	77
42.	Composición a falso color con la alteración argílica en el rojo (R), la alteración propilítica en el verde (G) y la alteración fílica en el azul (B).	88
43.	Composición a falso color con la alteración argílica en el rojo (R), la alteración propilítica en el verde (G) y la alteración fílica en el azul (B), a la cual se le aplico un estiramiento de decorrelación.	89
44.	Identificación de minerales de interés mediante índices mineralógicos.	91
45.	Identificación de alteraciones minerales mediante el método <i>Matched Filtering</i>	94
46.	Acercamiento a las alteraciones minerales identificadas mediante el método <i>Matched Filtering</i>	95

47.	Capas de evidencia transformadas a valores difusos entre 0 y 1, estas capas se utilizaran en el método de integración.	99
48.	Diagrama del motor de inferencia utilizado.	100
49.	Mapa resultante del motor de inferencia con el operador gamma difusa. . . .	101
50.	Ubicación de los depósitos y/o prospectos de oro reportados por el Servicio Geológico Mexicano (2012a, 2012b, 2015a, 2015b, 2015c).	103
51.	Gráfico de predicción-área del mapa de integración resultante con el operador gamma difuso.	103
52.	Gráfico de concentración-área del mapa de integración resultante con el operador gamma difuso.	105
53.	Mapa resultante del proceso de defusificación.	107
54.	Zonas designadas para exploración, obtenidas con el sistema difuso y el operador gamma.	108
55.	Concesiones mineras vigentes sobre las zonas propuestas para campañas de exploración, con información de la Dirección General de Minas (DGM). . . .	112

Resumen

Debido al potencial geológico-minero existente en el estado de Sonora, aun con los niveles actuales de producción, se tienen posibilidades favorables de localizar nuevos yacimientos de interés económico a partir de indicios de alteración mineral y/o elemental.

En este trabajo se buscó determinar la presencia de paragénesis minerales específicas en el municipio de Caborca, en un área objetivo que cubre la región cercana a la Unidad Minera “La Herradura”; a esta nueva investigación se le integra información geológica, geofísica y geoquímica preexistente con la finalidad de proponer zonas acotadas para futuras campañas de exploración minera a mayor detalle.

Se utilizaron imágenes satelitales provenientes del sensor ASTER y los métodos de procesado espectral de composición a falso color con cocientes de bandas, índices mineralógicos y *matched filtering* para la identificación de alteraciones minerales en superficie. Con el análisis de la información geológica, geofísica y geoquímica se delimitaron lineamientos magnéticos, las anomalías geoquímicas y las principales rocas encajonantes de la mineralización. La integración de la información espectral con la información preexistente se realizó mediante un operador gamma en un sistema de inferencia difusa.

Con los métodos de percepción remota se identificó la presencia de alteración argílica, argílica avanzada y propilítica tanto en las inmediaciones de la unidad minera “La Herradura” como en la porción este de la zona de estudio. Con la integración de información se determinó un área de 532.20 [km²] como zonas meritorias de exploración. Las áreas propuestas se designan con diferentes valores de prospectividad acorde al nivel de coexistencia de los criterios de interés como lo son: las alteraciones minerales identificadas; los lineamientos magnéticos; las anomalías geoquímicas elementales y las litologías encajonantes asociadas a la mineralización.

Abstract

Due to the existing geological and mining potential in the state of Sonora, even with current production levels, there are favorable possibilities of locating new deposits of economic interest based on indications of mineral alteration.

In this work we sought to determine the presence of specific mineral paragenesis in the municipality of Caborca, in an area that covers the region near the “La Herradura” mining unit; preexisting geological, geophysical and geochemical information is integrated into this new research in order to propose delimited areas for future mining exploration campaigns in greater detail.

In order to identify superficial mineral alterations satellite images from the ASTER sensor were used alongside spectral processing methods such as false color composites, band ratios, mineralogical indices and matched filtering. With the analysis of the preexisting information magnetic lineaments, geochemical anomalies and the main host rocks of the region were delimited. The integration of the spectral information with the preexisting information was carried out using a fuzzy inference system with a fuzzy gamma operator.

The presence of argillic, advanced argillic and propylitic alteration was identified both in the vicinity of the “La Herradura” mining unit and in the eastern portion of the study area using remote sensing methods. With the integration of all the information, an area of 532.20 [km^2] was determined as meritorious for future exploration campaigns. The proposed areas are designated with different prospectivity values according to the level of coexistence of the criteria of interest, such as: the identified mineral alterations; the magnetic lineaments; the geochemical anomalies and the host rocks.

1. Introducción

La minería mexicana se ha posicionado históricamente en los primeros lugares en la producción mundial de metales preciosos (Au-Ag) y base (Cu-Pb-Zn), entre otros tantos productos de la minería nacional; ocupando en el año 2019 el 7^o lugar a nivel mundial, con de 4.5 millones de onzas de Au. Aunque se reportó un aumento del 11.3% en el año 2017 respecto al 2016, para el 2018 hubo un descenso en la producción del 1.4% respecto al 2017. Independientemente de estas cifras, México se mantiene entre los principales países productores de oro en el mundo (SGM, 2019).

La posición privilegiada en la distribución y explotación de un metal tan valioso como el oro está asociada a la evolución tectónica y el desarrollo de arcos magmáticos de México y, en consecuencia, a la gama de tipologías de yacimientos minerales auríferos del país. Destacan por su frecuencia y distribución geográfica los sistemas de vetas mineralizados del Altiplano Mexicano, así como el borde poniente de la Sierra Madre Occidental, donde Distritos Mineros como Tayoltita, Topia, San Dimas o Cosalá, Concordia y San José de Gracia son referentes nacionales. En el caso de estudio del presente manuscrito, la mineralización está predominantemente asociada a sistemas de pórfidos cupro-auríferos, resaltando las dos unidades mineras cupro-auríferas más grandes del NW del país, Cananea y La Caridad. Otras zonas de interés incluyen las áreas mineralizadas de La Colorada, Lluvia de Oro y La Herradura, entre otros de menores dimensiones.

En el informe del Panorama Minero de Sonora (SGM, 2020) se indica que la entidad sonorenses es la de mayor importancia en la producción cuprífera, ocupando el primer lugar a nivel nacional con una producción total anual de 595,200.88 ton, representando el 83.40% del total nacional. En el caso de la producción aurífera estatal se reportan marcadas variaciones, con una producción de 35 364.10 [kg] en el año 2003; retomando valores importantes con 53 964.13 [kg] producidos en el 2018 y un descenso en la producción, con

46 111.04 [kg] producidos en el 2019, ocupando el primer lugar (34.43 %) de aportación nacional aurífera (SGM, 2020).

Aun con los niveles actuales de producción y con los yacimientos ya explorados, pero no explotados, el potencial geológico-minero de Sonora sigue siendo favorable, existiendo la posibilidad de localizar nuevos yacimientos de interés económico. Sin embargo, el SGM (2020) indica que en los últimos años se ha tenido un decremento en las actividades de exploración realizadas en el estado. Con base en lo anterior se vuelve esencial establecer metodologías que, mediante la integración de diversa información ya existente permitan abaratar costos, limitar áreas de exploración a menores escalas y al mismo tiempo generar resultados confiables (incremento del nivel de certidumbre).

2. Objetivos

Justificación

Las etapas en programas de exploración minera inician con trabajos prospectivos a escala regional (1:250 000) para, una vez definidas las zonas con indicios de mineralización realizar la exploración a semidetalle (1:50 000) y con escalas que cubren menor área de estudio, disminuyendo así costos operativos. Una vez definida la zona más favorable se elaboran mapas a escala de detalle (1:10 000 - 1:5 000), realizando mapeos y muestreos sistemáticos de aquellas zonas mineralizadas más atractivas.

La actividad de localización de sitios prospectivos de recursos naturales (petróleo, carbón, yacimientos minerales, gas natural, etc.) no asociados a una infraestructura desarrollada en sitios prospectivos de recursos minerales se denomina *greenfields*, en contraparte a *brownfields* que se relaciona a toda aquella actividad de exploración en sitios de producción en unidades operativas y con el objetivo de incrementar reservas mineras

(mayor certidumbre geológica). La etapa de greenfields (high risk/low cost) involucra trabajos enfocados en reconocimientos geocientíficos, la colección de muestras y ensayos químicos lo cual se traduce de manera general a la realización de estudios geológicos y estructurales, entre otros. Desafortunadamente la integración de métodos geofísicos frecuentemente es escasa y, desafortunadamente separada, de los estudios geoquímicos y geofísicos de campo.

Este error en el enfoque exploratorio recae probablemente en la inadecuada interpretación del diagrama de clasificación de recursos (1G) propuesta por Mcklevy (1984), omitiendo el valioso aporte de la exploración geofísica y geoquímica para cada tipología de cada recurso evaluado. Con la gama de técnicas complementarias en ambas ramas del conocimiento aplicado en los tiempos actuales no es posible que se siga percibiendo la certidumbre de evaluación de recursos 1G (geológica), cuando debe ser considerada como 3G (Geológica + Geofísica + Geoquímica).

Los métodos geofísicos en etapas de prospección y exploración minera son esenciales para determinar las zonas más favorables de mineralización. En esta tesis de trabajo la información documental geológica y geoquímica existente en la zona de estudio se integra de una forma ordenada a los resultados de imágenes satelitales para poder determinar halos de alteración en zonas potencialmente mineralizadas.

El área de estudio se localiza próxima a unidades actualmente operativas y los resultados pueden indicar extensión de áreas mineralizadas y ampliación de reservas en zonas que actualmente están cubiertas por paquetes detríticos recientes.

Objetivo general

Determinar zonas de alteración mineral en el área de estudio con la técnica de Percepción Remota como guía detallada para la etapa de exploración. Integrar resultados con información geofísica, geológica y geoquímica (3G), en la zona perimetral de la Unidad Minera La Herradura, Sonora, NW de México.

Objetivos específicos

- Realizar un análisis de la información geofísica y geoquímica existente del área de estudio.
- Realizar el preprocesado y procesado de imágenes satelitales ASTER.
- Detectar zonas con alteraciones minerales en la región de estudio mediante diversos métodos de clasificación existentes en la percepción remota.
- Integrar la información geofísica, geoquímica y de percepción remota para la verificación e identificación de áreas con posible interés exploratorio.
- Ubicar espacialmente las zonas anómalas y de interés exploratorio mediante la generación de un mapa temático mediante sistemas de información geográfica.

3. Marco Teórico

3.1. Percepción Remota

El termino percepción remota (PR) en su sentido más amplio refiere a la adquisición de datos físicos de un objeto sin estar en contacto con este (Lintz and Simonett, 1976, citado por Campbell & Wynne, 2011).

Mientras que de manera más específica la percepción remota incluye todos los métodos relacionados a la obtención de imágenes u otras formas de registros electromagnéticos de la superficie terrestre a distancia, así como el tratamiento y procesamiento de las imágenes y los datos asociados (White, 1977, citado por Campbell & Wynne, 2011).

La percepción remota necesita de ciertos elementos, los cuales se observan en la figura 1 y se pueden resumir de la siguiente manera:

- Una fuente que produzca y proporcione la energía o radiación electromagnética.
- Una superficie que reciba la energía de la fuente generadora y al mismo tiempo la refleje y emita al sensor.
- Un sensor y plataforma, la plataforma alberga el sensor (o una serie de sensores) mientras que el sensor es el instrumento que realizara las mediciones de la energía proveniente de la superficie.
- Un sistema o equipo en tierra que recibirá la información proveniente del sensor y realizará los procesos necesarios para dar acceso a dicha información.
- Un analista que realizara los trabajos e interpretaciones necesarios para cumplir los objetivos establecidos.
- El usuario final, el cual hará uso de la información resultante acorde a su conveniencia.

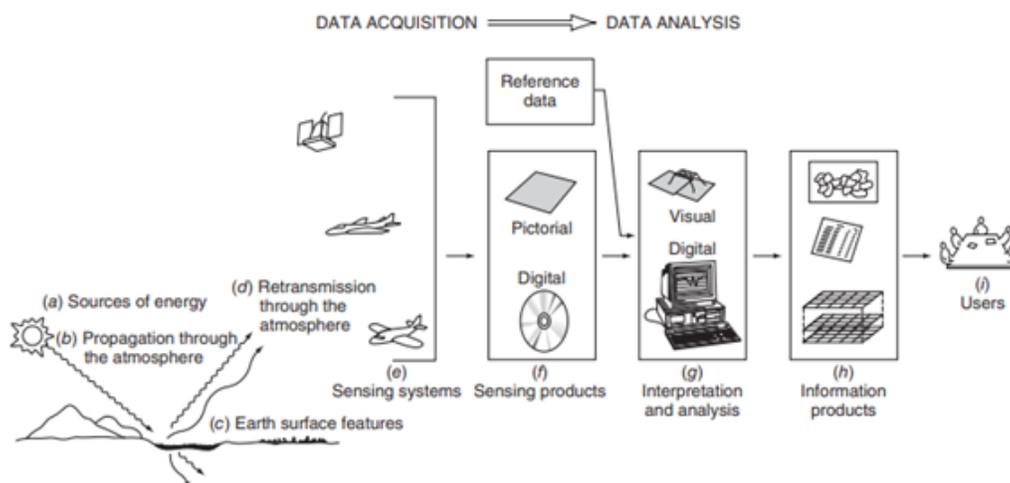


Figura 1: Diagrama del proceso de percepción remota, de la adquisición al análisis y a la implementación. (Lillesand et al., 2015)

3.1.1. Radiación electromagnética

Parte fundamental de la percepción remota es la identificación de materiales en superficie, lo cual se puede realizar mediante el estudio de la radiación reflejada, emitida y absorbida por estos materiales (Parker y Wolff, 1965, citado por Campbell & Wynne, 2011).

Esta radiación, denominada radiación electromagnética, “puede explicarse con dos teorías aparentemente contradictorias” aunque propiamente complementarias, la *teoría ondulatoria electromagnética* de Huygens y Maxwell y la *teoría cuántica* de Planck y Einstein (Chuvieco, 2016). En otras palabras, la radiación electromagnética puede comportarse tanto a la manera de una onda como a la de una partícula.

La teoría ondulatoria electromagnética establece que la radiación electromagnética se comporta como una onda cuyo comportamiento se rige por las ecuaciones de Maxwell (Elachi & Van Zyl, 2021) y cuya energía deriva de la oscilación del campo magnético y del campo eléctrico que conforman a la onda (Chuvieco, 2016).

La teoría cuántica establece que la radiación electromagnética se comporta como una partícula a la cual se le denomina *fotón*, este comportamiento se observa cuando la radiación interactúa con la materia (Jensen, 2007) y se describe como una sucesión de paquetes de fotones que realizaran la entrega energética (Jensen, 2007; Chuvieco, 2016).

La relación entre estos comportamientos establece que a mayor longitud de onda menor el contenido energético presente, teniendo así una relación inversamente proporcional.

3.1.2. Interacción de la radiación electromagnética con el medio

La radiación electromagnética detectada por los sistemas de PR atraviesa la atmósfera del planeta en su recorrido desde la fuente generadora (el Sol en la gran mayoría de los casos) a la superficie terrestre (interacción con materiales: rocas, minerales, suelo, plantas, etc.) y de estas al sensor, esta interacción conlleva a que la radiación se vea afectada por efectos atmosféricos causados por mecanismos de dispersión y absorción. (Lillesand et al., 2015)

La dispersión atmosférica refiere al proceso en el cual la radiación electromagnética es reflejada y/o refractada por los componentes de la atmósfera; los principales tipos son la dispersión Rayleigh, la dispersión Mie y la dispersión no selectiva, las cuales afectan principalmente a las longitudes de onda cortas, a las longitudes de onda largas y a todas las longitudes de onda por igual, respectivamente.

La absorción atmosférica refiere al proceso en el cual la radiación electromagnética pierde energía al incidir sobre algunos componentes de la atmósfera, principalmente sobre los enlaces de moléculas de vapor de agua (H_2O), al ozono (O_3) y al dióxido de carbono (CO_2).

Esta pérdida de energía ocurre en longitudes de onda específicas imposibilitando su recepción y medición en regiones del espectro afectadas; a las regiones del espectro electromagnético no afectadas por esta absorción se les llama *ventanas atmosféricas* e involucran a las longitudes de onda que se pueden medir con la percepción remota (Lillesand et al., 2015; Jensen, 2007). En la figura 2 se puede observar que porciones del espectro visible, del infrarrojo y del ultravioleta no se ven afectadas por la pérdida de energía.

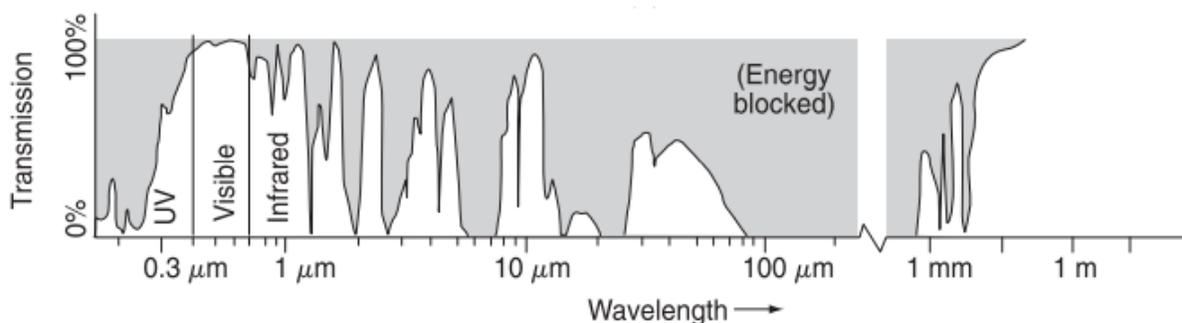


Figura 2: Longitudes de onda del espectro electromagnético con la señalización de las regiones afectadas por la absorción atmosférica en color gris y las ventanas atmosféricas en blanco. (Lillesand et al., 2015)

Adicional a la interacción con la atmósfera, la radiación electromagnética interactúa también con el planeta Tierra y su superficie. La energía incidente proveniente de la radiación electromagnética se fracciona al entrar en contacto con los diversos materiales presentes en la superficie terrestre, separándose en energía absorbida, reflectada y/o transmitida tal como se observa en la figura 3. La proporción de energía absorbida, reflectada y transmitida que se genera de la energía incidente dependerá de las características del material “afectado”.

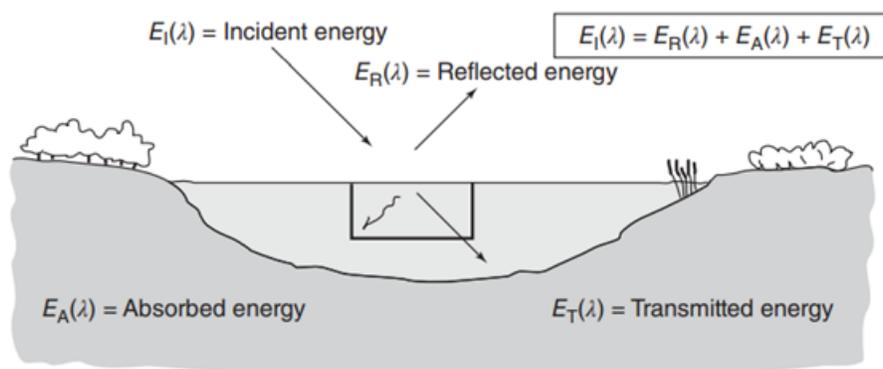


Figura 3: Diagrama de la interacción entre la energía incidente y la superficie, donde se muestra la separación en energía absorbida, reflejada y transmitida. (Lillesand et al., 2015)

Los sensores e instrumentos utilizados en la percepción remota son capaces de medir la reflectancia (en otras palabras el porcentaje de energía incidente que es reflejado) que presenta un material en diversas longitudes de onda, permitiendo así establecer las características espectrales de cada material y por ende determinar los puntos de comparación que permiten identificar entre cada uno. Al conjunto de características espectrales que presenta un material en las diversas longitudes de onda del espectro electromagnético se le conoce como su **firma espectral**, algunos ejemplos de firmas espectrales se observan en la figura 4.

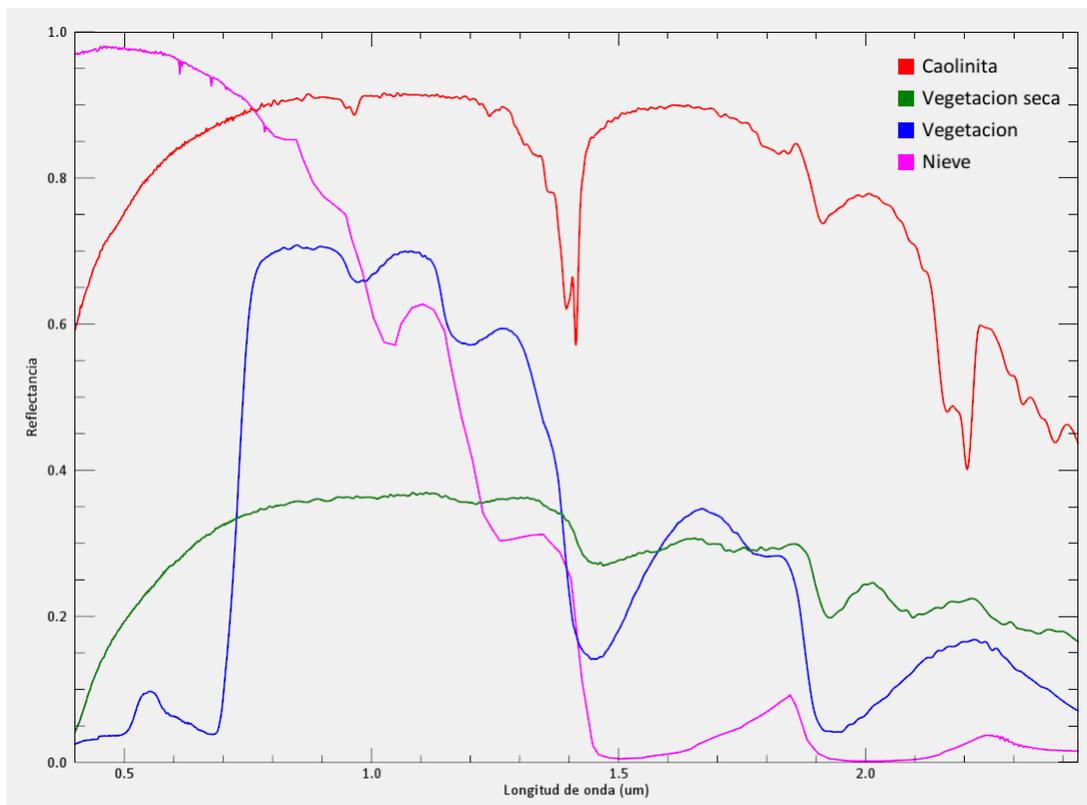


Figura 4: Firmas espectrales de vegetación, vegetación seca, nieve y caolinita. (Con información de Kokaly et al., 2017)

3.1.3. Espectro electromagnético

El espectro electromagnético es la distribución de las ondas electromagnéticas acorde a su longitud de onda, o en consecuencia a su frecuencia. Este espectro se divide (aunque de manera inexacta al ser continuo) en segmentos o porciones relacionadas a: los rayos gamma, los rayos X, la radiación ultravioleta, al espectro visible, al infrarrojo, a las microondas y las ondas de radio.

Para referirse a las longitudes de onda relacionadas al espectro electromagnético se hará uso de la escala micrométrica (figura 5) y del micrómetro, el cual tiene como símbolo μm y equivale a 1×10^{-6} [m].

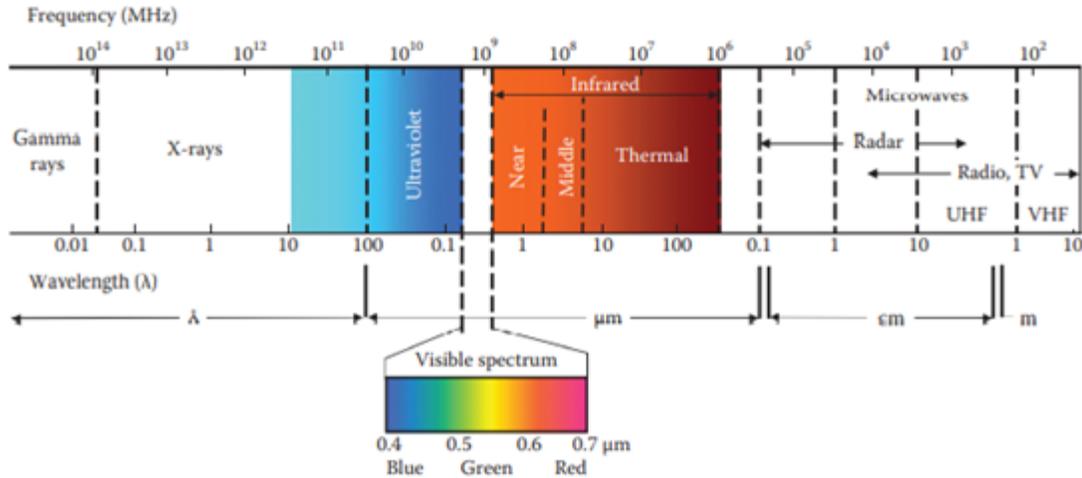


Figura 5: Espectro electromagnético indicando las subdivisiones en regiones principales, con énfasis en el ultravioleta (UV), el espectro visible (V) y el infrarrojo (IR). Se muestran las frecuencias en megahertz [MHz] y las longitudes de onda en ángstrom [\AA], micrometros [μm], centímetros [cm] y metros [m]. (Chuvieco, 2016)

La porción visible del espectro, la única capaz de ser detectada por el ojo humano, cubre aproximadamente de los $0.380 \mu\text{m}$ a los $0.75 \mu\text{m}$. Esta región se subdivide en la gama de colores visibles para el ser humano y, aunque no se tienen límites fijos entre cada color (o subdivisión), por convención se puede establecer que los violetas abarcan de los $0.380 - 0.450 \mu\text{m}$, los azules de los $0.450 - 0.500 \mu\text{m}$, los verdes de los $0.500 - 0.565 \mu\text{m}$ y los rojos de los $0.590 - 0.750 \mu\text{m}$.

La porción infrarroja del espectro cubre aproximadamente de los $0.750 \mu\text{m}$ hasta los $1000 \mu\text{m}$, aunque para la percepción remota la porción útil del infrarrojo se puede limitar en aproximadamente los $14 \mu\text{m}$. La radiación infrarroja se puede subdividir en el infrarrojo cercano o NIR (near-infrared), en el infrarrojo de onda corta o SWIR (shortwave infrared) y en el infrarrojo térmico o TIR (thermal infrared). Estas subdivisiones abarcan de los $0.750 \mu\text{m}$ a aproximadamente los $1.3 \mu\text{m}$, de los $1.3 \mu\text{m}$ a los $3 \mu\text{m}$ y de los $8 \mu\text{m}$ a los $14 \mu\text{m}$, respectivamente.

Como ya se estableció, el espectro electromagnético tiene porciones adicionales correspondientes a los rayos gamma, a los rayos X, a la radiación ultravioleta, a las microondas y a las ondas de radio; sin embargo estas porciones del espectro no serán detalladas en este trabajo debido a que los sensores o sistemas de percepción remota más comunes operan principalmente con la porción visible e infrarroja del espectro electromagnético (Lillesand et al., 2015).

3.1.4. Especificaciones del sensor ASTER

El sensor *Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER)* actúa como un generador de imágenes multiespectrales de alta resolución espacial y nació de una colaboración entre el Ministerio de Comercio Internacional e Industria japonés (MITI, por sus siglas en inglés) y la Administración Nacional de la Aeronáutica y del Espacio estadounidense (NASA, por sus siglas en inglés). Su lanzamiento se dio a finales de 1999 con el satélite EOS AM-1, mejor conocido como Terra, comenzando la captura de imágenes en febrero del año 2000.

El sensor cuenta con tres subsistemas ópticos: un radiómetro para el rango visible e infrarrojo cercano (VNIR), el radiómetro para infrarrojo de onda corta (SWIR) y un radiómetro para el infrarrojo térmico (TIR) (Yamaguchi, Kahle, Tsu, Kawakami, & Pniel, 1998).

En el VNIR se tienen tres bandas espectrales, en el SWIR se tienen seis bandas y en el TIR se tienen cinco bandas espectrales, con 15 [m], 30 [m] y 90 [m] de resolución espacial respectivamente (Yamaguchi et al., 1998); la tabla 1 resume la información de las bandas espectrales. En la figura 6 se muestra un comparativo entre el sistema satelital ASTER y la plataforma Landsat 7 así como la nomenclatura de bandas para cada sistema y los rangos

de longitud de onda correspondientes.

Subsistema	Banda	Rango espectral [μm]	Resolución espacial
VNIR	1	0.52 - 0.60	15 [m]
	2	0.63 - 0.69	
	3N	0.78 - 0.86	
	3B	0.78 - 0.86	
SWIR	4	1.60 - 1.70	30 [m]
	5	2.145 - 2.185	
	6	2.185 - 2.225	
	7	2.235 - 2.285	
	8	2.295 - 2.365	
TIR	9	2.360 - 2.430	90 [m]
	10	8.125 - 8.475	
	11	8.475 - 8.825	
	12	8.925 - 9.275	
	13	10.25 - 10.95	
	14	10.95 - 11.65	

Cuadro 1: Información de bandas espectrales. (Yamaguchi et al., 1998)

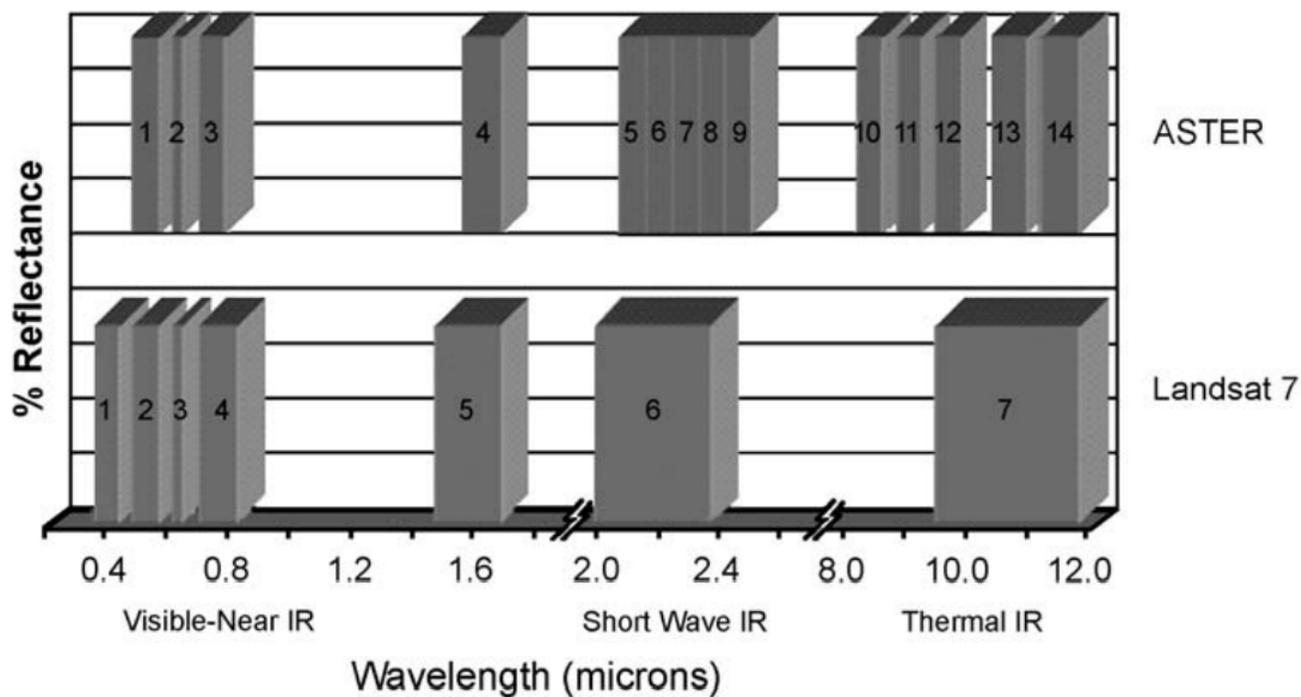


Figura 6: Respuesta espectral de ASTER comparada con Landsat 7. (Pieri & Abrams, 2004)

El principal objetivo científico de la misión ASTER es mejorar la comprensión que se tiene acerca de los procesos, tanto locales como regionales, que ocurren en la superficie de la Tierra y en su atmósfera inferior (Yamaguchi et al., 1998).

Los productos ASTER son proporcionados en formato HDF y son definidos en niveles acorde al preprocesamiento y procesamiento que presentan:

- Nivel 0: Datos reconstruidos y no procesados a resolución completa.
- Nivel 1A: Datos reconstruidos y no procesados a resolución completa, referencias en tiempo y con información auxiliar, incluyendo coeficientes de calibración geométrica y radiométrica así como parámetros de georeferenciación.
- Nivel 1B: Datos de nivel 1A procesados en unidades del sensor.
- Nivel 1T: Datos de nivel 1B con corrección geométrica y rotados a una proyección UTM (Universal Transversal de Mercator) con norte establecido, así como con corrección por Cross-Talk y corrección radiométrica.

Adicionalmente se presentan los niveles 2, 3 y 4 los cuales se constituyen por datos ya corregidos y procesados convertidos en variables o modelos finales (Abrams, 2000; Meyer, Siemonsma , Brooks , & Johnson, 2015).

Los datos generados por ASTER han sido utilizados para el estudio de diversos problemas y situaciones que asolan la superficie terrestre (Abrams, 2000), contando con una amplia gama de áreas de investigación, entre las que se incluyen: climatología de la superficie terrestre, vegetación y dinámica de ecosistemas, monitoreo de volcanes, hidrología, geología y suelos, cambios en la superficie y cubierta terrestre, entre otras líneas de investigación (Yamaguchi et al., 1998).

Adicional a la investigación científica el sensor ASTER es de amplia y probada utilidad

para la exploración geológica y de recursos minerales debido a su extensa cobertura en las longitudes de onda, específicamente en el infrarrojo de onda corta (SWIR) donde los minerales de alteración asociados a la génesis tienen una respuesta espectral determinada (Abrams & Hook, 1995).

Las bandas del VNIR son sensibles a la presencia de minerales de óxidos de hierro, las bandas del SWIR destacan la presencia de filosilicatos y carbonatos, siendo las arcillas el grupo mas importante, y finalmente la banda del TIR es sensible al contenido de sílice (Yamaguchi et al., 1998).

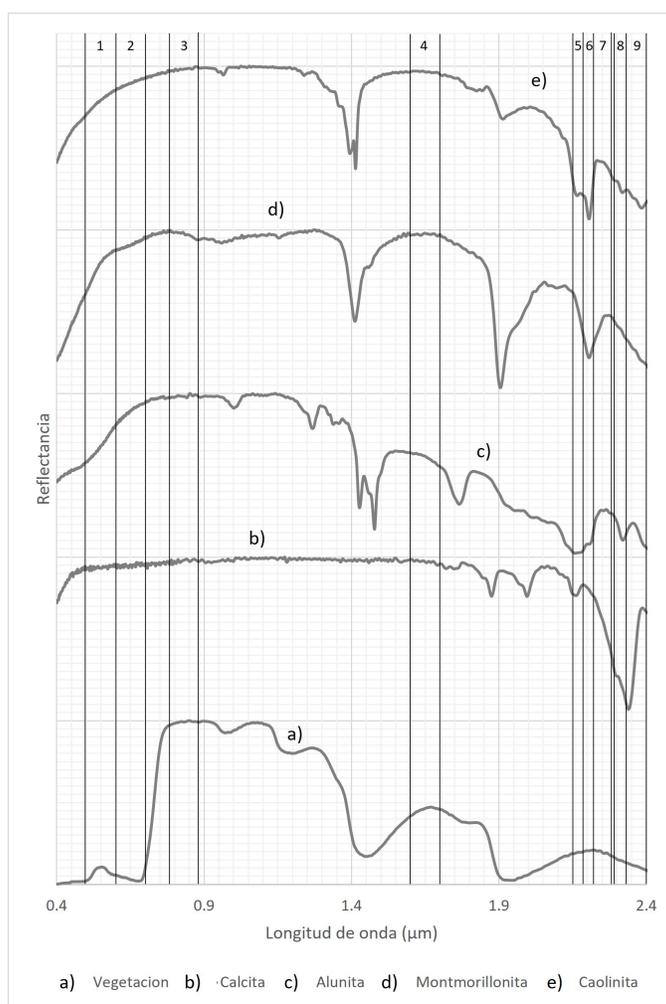


Figura 7: Bandas espectrales ASTER en VNIR y SWIR, y las firmas espectrales de minerales y vegetación común: a) Vegetación, b) Calcita c) Alunita, d) Montmorillonita, e) Caolinita.

3.2. Geoquímica

En *Applied Geochemistry: Advances in Mineral Exploration Techniques* Macheyeke et al. (2020) establecen que la geoquímica es la disciplina encargada del estudio del contenido, distribución y la dinámica de los elementos químicos en el planeta, ya sea en las rocas, suelo, aguas y/o atmosfera. Por su parte la geoquímica exploratoria asociada a la exploración minera hace uso de estos elementos químicos y de sus propiedades para localizar y caracterizar patrones relacionados a yacimientos minerales de interés económico (Govett, 1983; Macheyeke et al., 2020).

Govett (1983) establece que la geoquímica exploratoria tiene como premisa que la composición química de las rocas o suelos cercanos a un yacimiento será diferente a la composición de materiales similares en una zona adyacente donde no se tengan yacimientos. Macheyeke et al. (2020) indican que esta diferencia de composiciones se debe a que los yacimientos minerales presentan concentraciones de uno o varios elementos traza (tales como níquel, oro, plata, cobalto, cromo, elementos del grupo de tierras raras o del grupo del platino, entre otros) con niveles anormales respecto a los valores promedio de la corteza terrestre, por lo que se definen como anomalías geoquímicas que pueden ser identificadas, medidas y relacionadas a las tipologías correspondientes de los yacimientos minerales.

Existen diversos tipos de levantamientos geoquímicos, como los pedogeoquímicos (de suelo), sedimento de arroyo, litogeoquímicos (crestones o afloramientos de roca), biogeoquímicos (organismos extremófilos), geobotánicos (muestreo de plantas), hidroggeoquímicos (análisis de agua) y algunos otros. La selección del tipo de levantamiento a utilizar dependerá idealmente del objetivo de estudio, del alcance deseado y de las características del área de trabajo; aunque en la práctica igualmente se tiene que tomar en cuenta elementos como costos, tiempo disponible para los levantamientos y el acceso a equipos y laboratorios para el análisis de muestras.

3.2.1. Estudios de geoquímica de sedimento de arroyo

Los levantamientos de sedimento de arroyo se enfocan en recolectar muestras en causas de drenaje relacionados a escorrentías naturales, lagos y otros cuerpos de agua que puedan arrastrar detritos sin modificarlos significativamente en cuanto a concentración de elementos de interés. Estos sedimentos se producen por la erosión que sufren los diversos materiales rocosos que afloran en superficie, y reflejan la composición de las rocas, del suelo y de las mineralizaciones que se puedan presentar en las inmediaciones del área de captación de un arroyo o canal de drenaje (Gandhi & Sarkar, 2016; Haldar, 2018).

De manera simplificada, este tipo de levantamiento involucra la recolección de muestras de arenas, limos y/o arcillas de los canales de drenaje o de las llanuras de inundación cercanas a los canales. Las muestras resultantes son principalmente secadas, tamizadas y almacenadas para su posterior análisis en laboratorio por alguno de los diversos métodos analíticos existentes (Haldar, 2018).

Acorde a diversos autores los levantamientos de sedimentos de arroyo son de gran utilidad para obtener información geoquímica prospectiva de manera rápida y económica en áreas de gran extensión, por lo que son adecuados para realizar las primeras labores de exploración o “reconocimiento” en las áreas de trabajo. Al aumentar la densidad de muestreo, tales levantamientos igualmente son de utilidad para trabajos de exploración detallada en terrenos de menor extensión.

3.3. Prospección Magnética

La magnetometría, o prospección magnética, es una técnica pasiva de exploración geofísica que consiste en medir las variaciones del campo magnético terrestre y con base en ellas, inferir la geología del subsuelo.

El campo magnético terrestre se compone de: un campo principal relacionado a corrientes eléctricas generadas en el núcleo interno sólido del planeta, de un campo relacionado a la magnetización y distribución de los materiales profundos de la corteza y, de un campo externo relacionado a corrientes solares. El campo principal proporciona casi la totalidad de la magnitud del campo magnético terrestre mientras que la contribución de aquel campo relacionado a la corteza es mínima.

El campo relacionado a la corteza tiene principal importancia en la prospección magnética debido a que permite conocer la composición y estructura de los materiales en el subsuelo y que pueden ser de interés en actividades de exploración. Esto es posible debido a que el registro que se obtiene como respuesta de los materiales en la forma de la magnetización, es un atributo físico y mensurable que se rige por la permeabilidad y la susceptibilidad magnética del material, así como por la intensidad del campo asociado.

Los levantamientos magnéticos pueden realizarse vía terrestre, aérea o marina mediante un equipo denominado magnetómetro, el cual sirve para realizar las mediciones de la magnitud y/o de los componentes del campo.

3.3.1. Reducción al Polo Magnético

Las anomalías magnéticas son asimétricas debido a que se ven afectadas por la inclinación y declinación del campo magnético, por la geometría del cuerpo generador y por la dirección de magnetización de dicho cuerpo; esta asimetría dificulta la interpretación de

las anomalías magnéticas.

Buscando métodos que mejoren la interpretación de las anomalías magnéticas y que permitan relacionar directamente con la información geológica y aquella de otros métodos geofísicos, Baranov (1957) y Baranov & Naudy (1964) desarrollaron el método de reducción al polo (RTP, por sus siglas en inglés).

El método de reducción al polo convierte las anomalías magnéticas resultantes del magnetismo de regiones no polares a su comportamiento al generarse por el magnetismo de los polos, quedando así una anomalía simétrica que se superpone a su fuente generadora (figura 8).

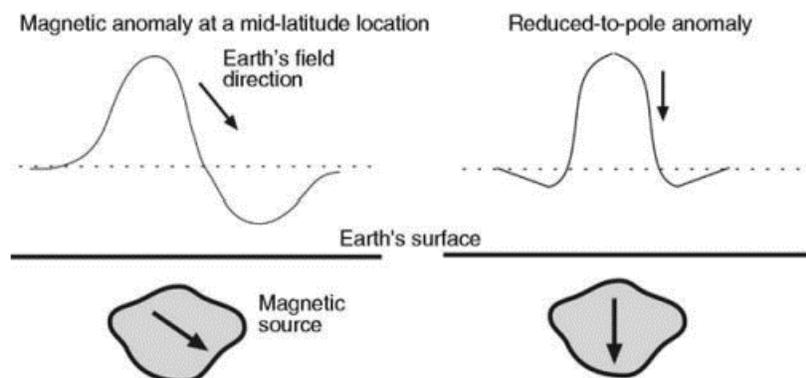


Figura 8: Ejemplo de una anomalía resultante de una fuente magnetizada en una región no polar (lado izquierdo) y su conversión a una región polar con la reducción al polo (RTP, por sus siglas en inglés) (lado derecho). (Gubbins & Herrero-Bervera, 2007)

3.3.2. Gradiente Horizontal

El método de gradiente horizontal fue establecido originalmente para gravimetría por Cordell (1979) mientras que su propuesta y posterior comprobación para magnetometría fue presentada en el trabajo conjunto de Cordell y Grauch (1985).

Este método hace uso de las derivadas horizontales del campo potencial para resaltar

anomalías y realizar de manera cruda la detección de sus posibles bordes o límites.

La función del gradiente horizontal queda establecida de la siguiente manera:

$$GH = \sqrt{\left(\left(\frac{\partial F}{\partial x}\right)^2\right) + \left(\left(\frac{\partial F}{\partial y}\right)^2\right)}$$

Donde F corresponde al campo magnético total y las derivadas parciales en X y Y corresponden a las componentes bidimensionales en el plano de investigación.

Los valores máximos alcanzados se ubicarán sobre los límites de las fuentes anómalas. El método tiene la limitante de no poder mostrar de manera balanceada tanto fuentes profundas como someras, logrando resaltar con buen detalle las anomalías someras mientras que las anomalías profundas tienden a observarse de manera difusa y sin clara delimitación.

3.3.3. Derivada de Tilt (Tilt Derivative o Tilt Angle)

Este método fue propuesto por Miller y Singh (1994) y hace uso de la tangente inversa y de las derivadas horizontales y vertical del campo magnético total para la identificación de los bordes de las anomalías.

La función del Tilt derivative queda establecida de la siguiente manera:

$$TA = a \tan \frac{\frac{\partial F}{\partial z}}{\sqrt{\left(\left(\frac{\partial F}{\partial x}\right)^2\right) + \left(\left(\frac{\partial F}{\partial y}\right)^2\right)}}$$

Donde F corresponde al campo magnético total.

Este método genera valores positivos sobre los cuerpos anómalos, el valor cero en o cerca de los bordes y valores negativos fuera de estos cuerpos anómalos. Tiene la ventaja de responder de buena manera tanto para fuentes someras como profundas por lo que es de

gran utilidad para determinar de manera aproximada la ubicación y extensión de posibles anomalías.

Adicional a la delimitación de bordes, es posible obtener una estimación de la profundidad relacionada a la fuente de las anomalías magnéticas mediante un método derivado del tilt derivative denominado tilt depth, el cual fue desarrollado por Salem et al.(2007) y obtiene la estimación de profundidad mediante el calculo de la distancia entre el contorno de 0° y el contorno de $\pm 45^\circ$, contornos provenientes del método tilt derivative.

3.3.4. FSED

El método denominado FSED propuesto por Oksum et al. (2021) hace uso de una función sigmoidea rápida modificada y de las derivadas horizontales y vertical del gradiente horizontal del campo potencial para la identificación de los bordes de las anomalías.

La función FSED queda establecida de la siguiente manera:

$$FSED = \frac{R - 1}{1 + |R|}$$

Donde R queda definido como:

$$R = \frac{\frac{\partial GH}{\partial z}}{\sqrt{\left(\left(\frac{\partial GH}{\partial x}\right)^2\right) + \left(\left(\frac{\partial GH}{\partial y}\right)^2\right)}}$$

Y GH hace referencia al gradiente horizontal.

Los autores indican que los bordes de los cuerpos anómalos se van a observar como los máximos de amplitud alcanzados por el método y que debido al uso de las derivadas del gradiente horizontal se pueden observar simultáneamente anomalías de fuentes profundas y someras.

3.4. Yacimientos de Oro Orogénico

Los yacimientos de oro orogénico se forman durante los procesos de deformación generados por sucesos orogénicos en márgenes convergentes, estos depósitos no se limitan a una sola edad geológica ya que pueden ser alojados por cinturones de rocas verdes del arqueano o por secuencias metasedimentarias del Proterozoico o del Fanerozoico; la asociación con terrenos metamórficos es esencial para la formación de estos yacimientos (Groves et al., 1998).

Los yacimientos de Au orogénico se caracterizan por la presencia de sistemas de vetas predominantemente de cuarzo metamorico con menor proporción de sulfuros y carbonatos, entre otros conjuntos minerales. Junto a estos sistemas de vetas se tiene presencia de una zonación mineral de alteraciones proximales hasta alteraciones distales, los conjuntos minerales (paragénesis) presentes y su extensión van a depender de la roca encajonante y la profundidad del nivel cortical que ha sido alterado (Groves et al., 1998).

4. Área de estudio y Tipología de Yacimiento

4.1. Localización

El área de estudio cubre parte de los municipios de Caborca y Puerto Peñasco del estado de Sonora, al noroeste de México. La ciudad de la Heroica Caborca, cabecera del municipio de Caborca, se ubica a aproximadamente 26 km de la parte mas sureste del área de estudio mientras que la distancia entre dicha cabecera municipal y la Mina La Herradura es de 82.5 km, ambas distancias son medidas en línea recta.

El área de estudio comprende las coordenadas $30^{\circ} 51'$ a $31^{\circ} 20'$ latitud norte y $112^{\circ} 22'$ a $112^{\circ} 60'$ longitud oeste y abarca un área aproximada de $3\,178\text{ km}^2$. Mientras que la Mina La Herradura se ubica específicamente en las coordenadas $323\,227.79$ [mE] y $3\,447\,767.60$ [mN], localizándose la unidad minera hacia la esquina noroeste del área de estudio.

La región delimitada para el estudio es cubierta por diversas cartas a escala 1:50 000 del Servicio Geológico Mexicano, específicamente las cartas:

- H12-A35 (Costa Rica)
- H12-A44 (El Sahuaro)
- H12-A45 (San Luisito)
- H12-A54 (Coahuila - Alvaro Obregon)
- H12-A55 (El Diamante)

Estas cartas serán consultadas con regularidad a través del escrito para obtener información geológica, geofísica y geoquímica del área de estudio.

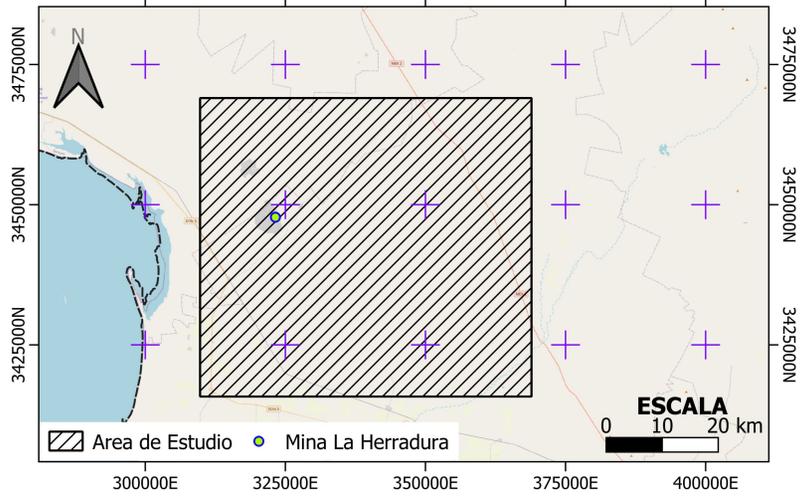
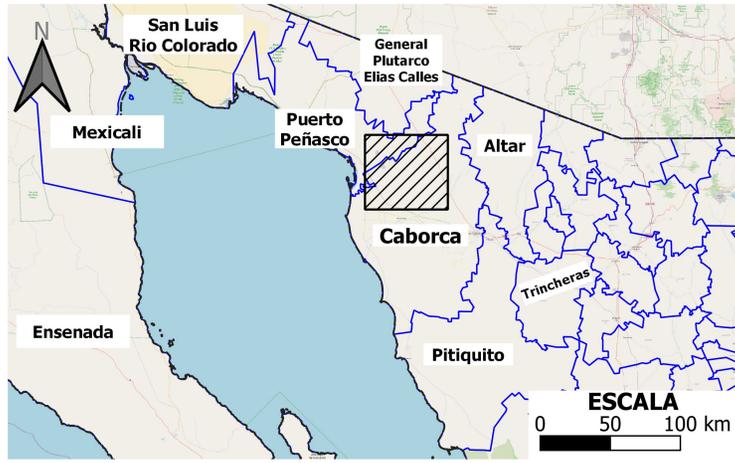


Figura 9: Ubicación de la zona de estudio mostrando progresivamente el área de trabajo a escalas requeridas en etapa de Greenfields.

4.2. Fisiografía

Acorde a la carta fisiográfica del INEGI (1981) escala 1:250 000, la zona de estudio se extiende sobre la Provincia Fisiográfica de la Llanura Sonorense y en la subprovincia de las Sierras y Llanuras Sonorenses (figura 10 y 11).

Lugo Hubp (1990, pp. 88-89) establece a la provincia de la Llanura Sonorense como una región geológica en la que prevalece una planicie de diversos tipos de sedimentos (aluviales, eólicos y de pie de monte) sobre la cual se asientan montañas y elevaciones residuales tipo *inselbergs* las cuales aumentan gradualmente en superficie y elevación conforme se alejan de la costa oriental del Golfo de California y avanzan al oriente del estado de Sonora. Estos elementos topográficos se componen principalmente por rocas metamórficas e intrusivas, presentando en menor medida rocas volcánicas.

4.3. Terrenos Tectonoestratigráficos

4.3.1. Terreno Caborca

El basamento del Terreno Caborca es formado por una serie de ortogneises y esquistos que sufren una intrusión de rocas metaplutónicas (Anderson & Silver, 1971, como se citó en Centeno-García, 2005).

Sobre el basamento profundo se desarrolla una cubierta sedimentaria cuya edad varia del Proterozoico al Permico acorde a Centeno-García (2005). Cooper y Arellano establecen que la sucesión litológica está compuesta principalmente de dolomitas y calizas fosilíferas (como se cito en Centeno-García, 2005).

Diversos autores describen la presencia de dos formaciones en el terreno Caborca, las cuales son denominadas Los Monos y El Antimonio. La Fm. Los Monos está compuesta

por calizas y dolomitas mientras que la Fm. El Antimonio presenta intercalaciones de limolita, calizas, areniscas y en menor medida conglomerados (Centeno-García, 2005).

Finalmente, la última sección de estratigrafía reportada por Centeno-García (2005) como parte del terreno Caborca corresponde a una sucesión de areniscas, limolitas y calizas pertenecientes al Triásico, dicha sucesión fue depositada en tanto en ambientes marinos someros como en ambientes continentales.

4.3.2. Cratón de Norteamérica

Acorde a Centeno-García (2005) el basamento del Cratón de Norteamérica presente en Sonora está compuesto por esquistos volcánicos y pelíticos, los cuales se encuentran intrusionados por granitos.

Igualmente, el autor establece que la sedimentación ocurrida durante el Paleozoico se correlaciona con las cuencas presentes en Texas, Nuevo México y Arizona, y con procesos de deposición de sedimentos marinos que alcanzaron espesores cercanos a los 3 [km], junto a estos sedimentos se reportan capas de areniscas.

El Permiano se puede observar en el cratón de Norteamérica con la presencia de depósitos calcáreos compuestos de calizas y dolomitas con intercalaciones de pizarras y areniscas (Centeno-García, 2005).

En la figura 12 se observa la ubicación y alcance de los Terrenos Tectono-estratigráficos mencionados en este apartado.

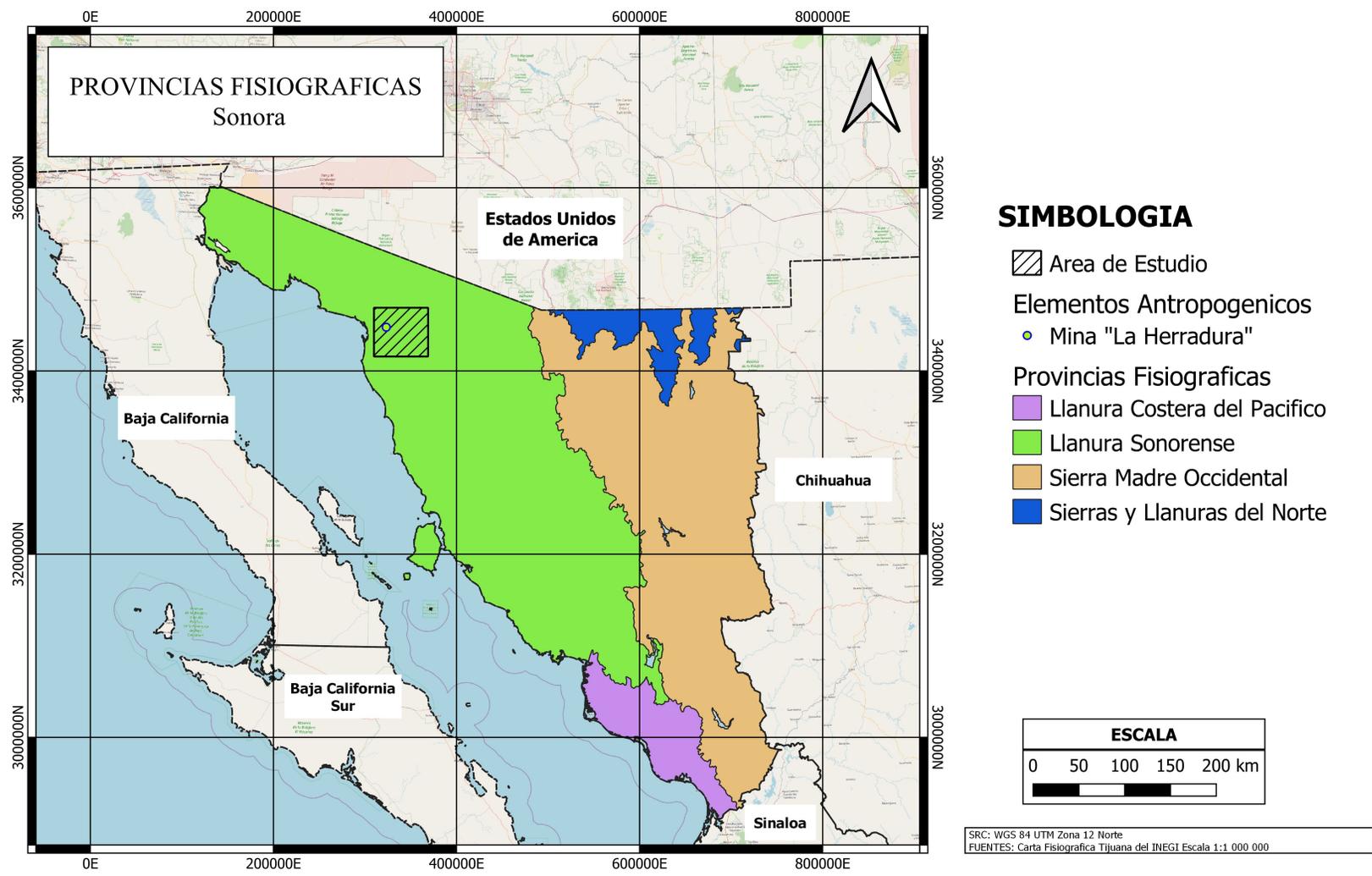


Figura 10: Provincias fisiográficas del estado de Sonora con la ubicación del área de estudio.

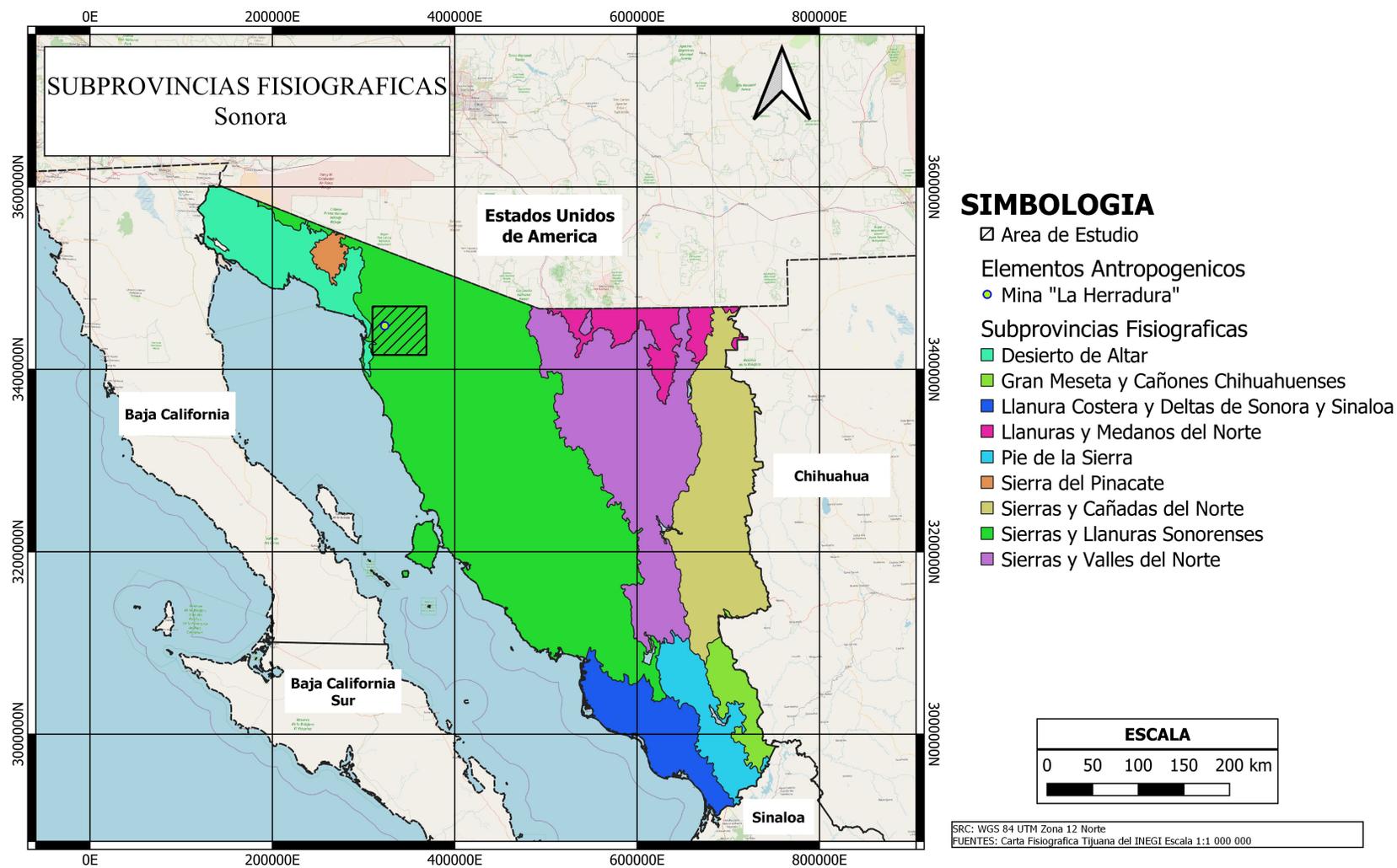


Figura 11: Subprovincias fisiográficas del estado de Sonora con la ubicación del área de estudio.

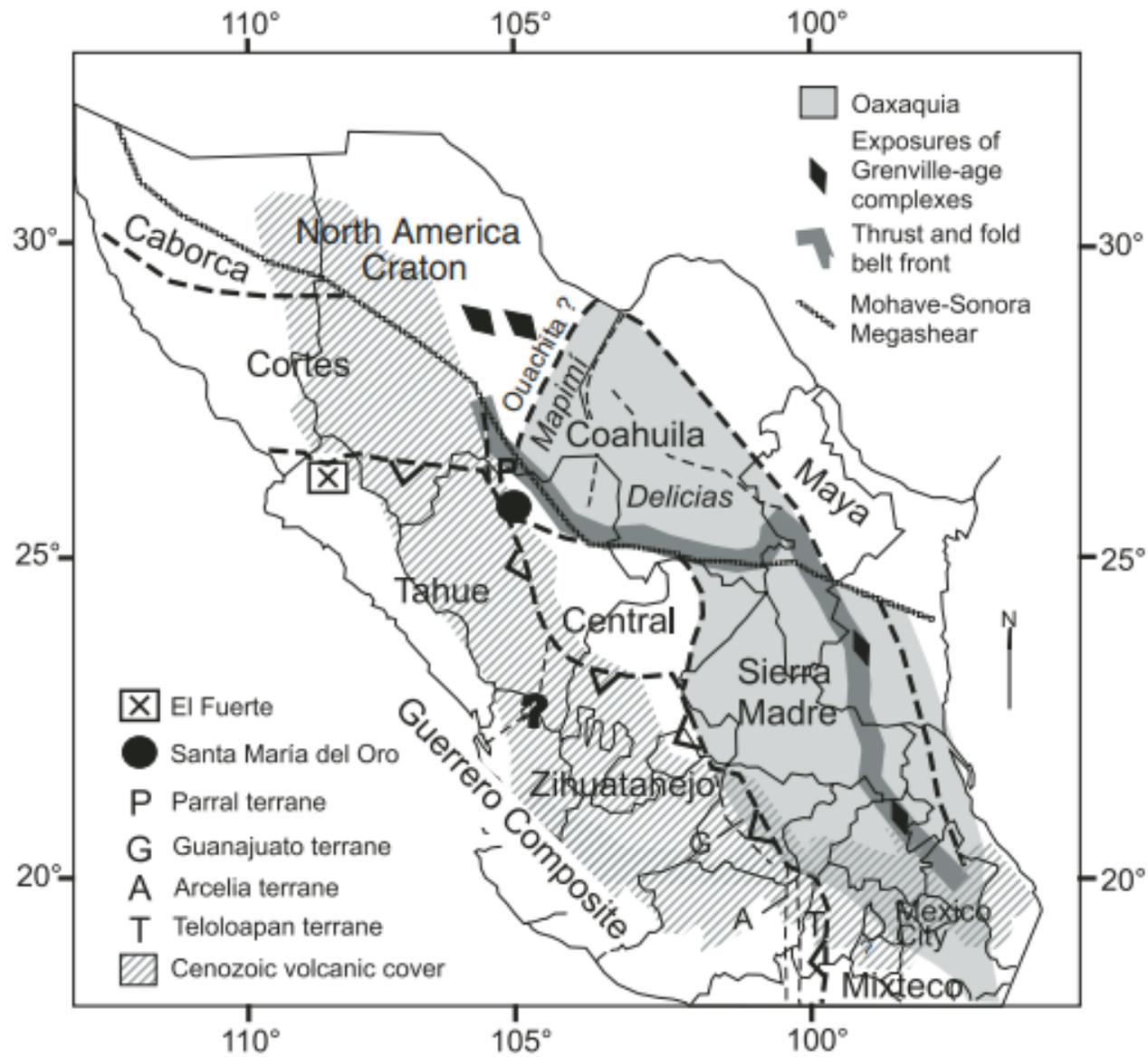


Figura 12: Terrenos Tectono-estratigráficos del norte de México (Centeno-García, 2005)

4.4. Geología regional

El entorno geológico del estado de Sonora es complejo, por lo que se dificulta la realización de una síntesis comprensiva de la historia geológica de la región, aun quedando establecida esta situación, en el presente trabajo se realiza una descripción simplificada acorde a diversas fuentes de las diversas litologías que afloran en la región NW del estado de Sonora (figura 13 y 14).

En la distribución de terrenos tectonoestratigráficos la región de estudio se ubica en el Terreno Caborca mientras que al este se presenta el cratón de Norteamérica y al sur el Terreno Cortes. La separación entre el terreno Caborca y el Cratón de Norteamérica quedaría marcada por la propuesta megacizalla Mojave-Sonora tal como establece Quintanar Ruiz (2008), algunas propuestas de la ubicación de la megacizalla se pueden observar en la figura 13, aunque la existencia de dicha mega estructura no es concluyente y sigue existiendo mucha controversia alrededor de este modelo (Molina-Garza & Iriondo, 2005).

4.4.1. Proterozoico

El basamento predominante de la región corresponde al Complejo Metamórfico Bamori del Proterozoico, el cual está constituido por una serie de gneises y esquistos afectados por granitos (Longoria et al. 1978, como se citó en Servicio Geológico Mexicano, 2002c).

4.4.2. Paleozoico

Se tienen afloramientos de diversas unidades sedimentarias a lo largo de la región, principalmente calizas combinadas ya sea con lutitas, limolitas y/o areniscas las cuales sobreyacen de diversas maneras al basamento metamórfico.

4.4.3. Mesozoico

Los afloramientos del Mesozoico se comienzan a presentar con granitos milonitizados y unidades metaareniscas y metalutitas del Triasico tal como reporta el servicio geológico mexicano (2002a).

Rodríguez Castañeda y Anderson (2011) establecen la presencia de unidades metavolcanicas y metasedimentarias relacionadas a un arco magmático continental del Jurásico. Estas unidades consisten en riolitas, andesitas, areniscas y conglomerados que sufrieron procesos de metamorfismo dinámico; así mismo establecen la presencia de granitos y granodioritas de este mismo periodo.

Sobreyaciendo a rocas del Jurásico se observan unidades metasedimentarias compuestas por conglomerados polimicticos y areniscas deformadas, así como unidades volcanosedimentarias compuestas por andesitas y areniscas.

El Servicio Geológico Mexicano (2002a) indica la presencia de afloramientos del Cretácico superior relacionados a la Orogenia Laramide, estos batolitos laramidicos de composición granítica-granodioritica se relacion al Cinturón Batolítico del oeste de Norteamérica.

4.4.4. Cenozoico

El Servicio Geológico Mexicano (2002c) establece la presencia de conglomerados polimicticos y areniscas del Paleogeno que sobreyacen discordantemente a unidades del Jurásico. Estas litologías del Paleógeno se ven afectadas por rocas intrusivas (granodioritas, granitos y gabros) del mismo periodo.

Igualmente se tienen afloramientos de diversas rocas volcánicas del Neógeno, estas rocas volcánicas son principalmente andesíticas y se encuentran en conjunto a tobas andesíticas,

basaltos y otros flujos riolíticos y riódacíticos.

Las unidades litológicas más jóvenes en la región son depósitos semiconsolidados y no consolidados del Pleistoceno y del Holoceno, los cuales están constituidos por conglomerados polimicticos, arenas, limos y arcillas. Estos depósitos sedimentarios presentan diversos orígenes dependiendo de su ubicación en el área de estudio, el Servicio Geológico Mexicano (2002c) ha establecido la presencia de depósitos aluviales, coluviales, eólicos, palustres, lagunares y de litoral.

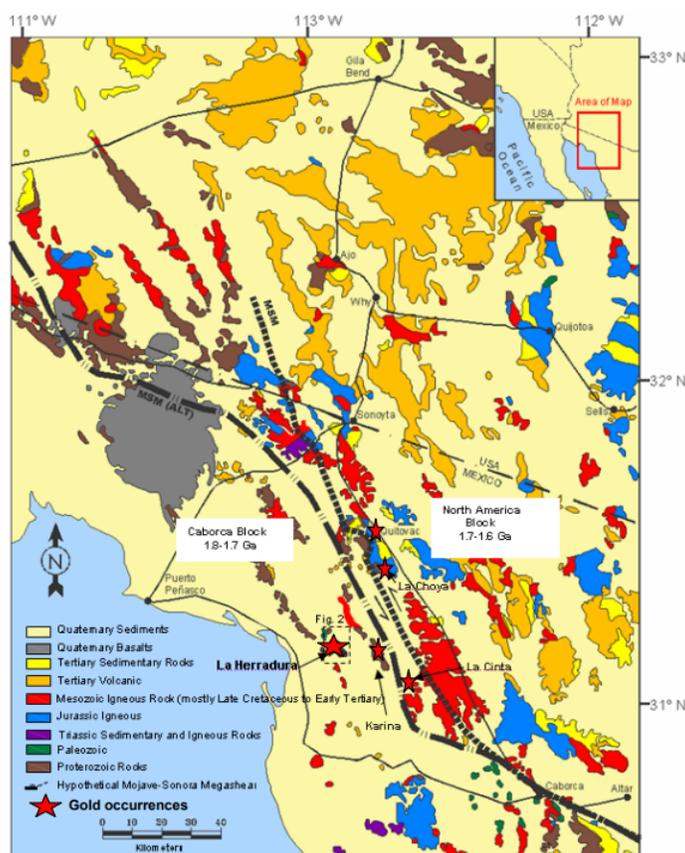


Figura 13: Mapa geológico regional con propuestas de la ubicación de la Megacizalla Mojave - Sonora (Quintanar Ruiz, 2008)

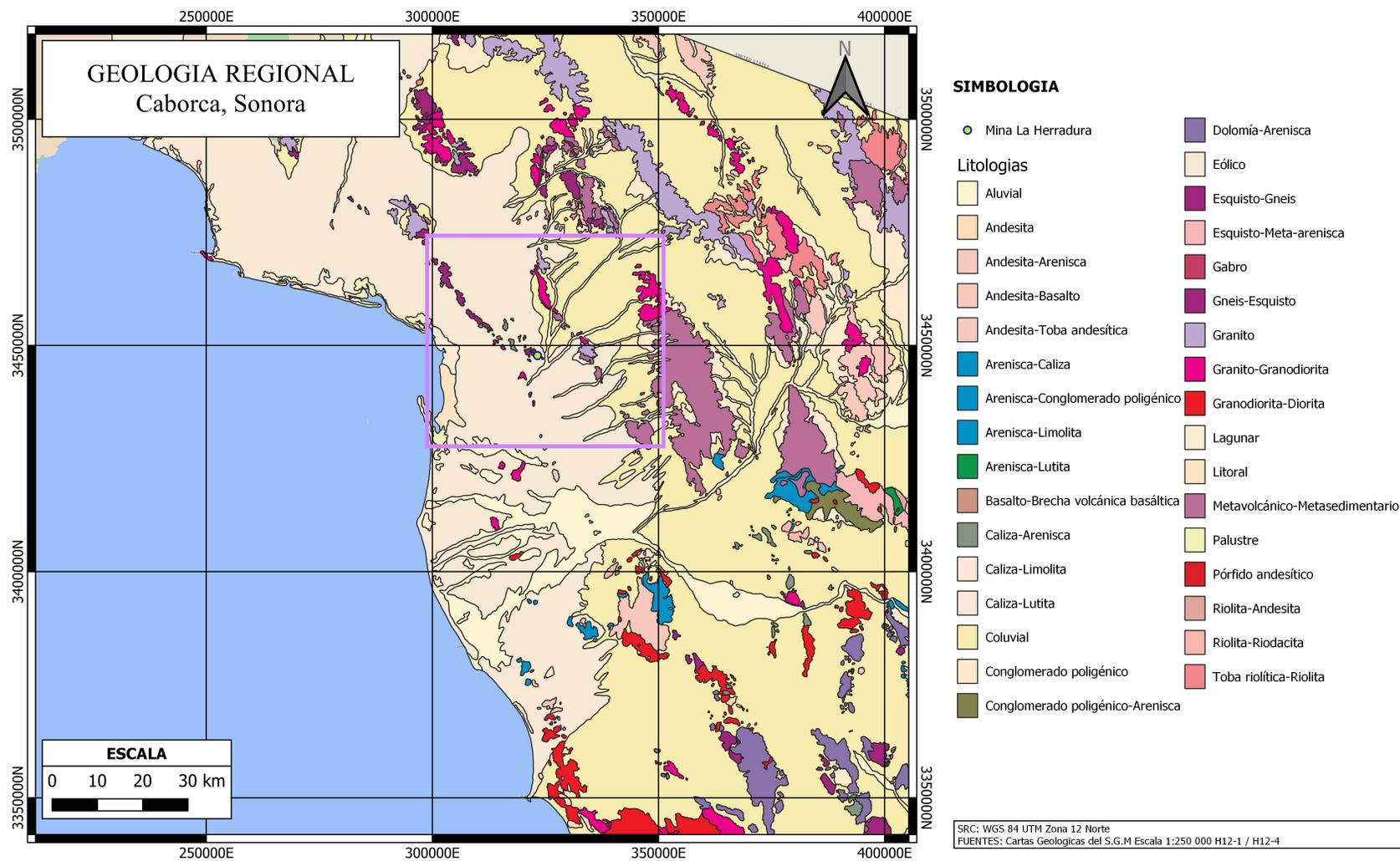


Figura 14: Mapa geológico regional del NW de México.

4.5. Geología local

Aunque a grandes rasgos ya se habló de la geología de esta región de Sonora en el apartado de Geología Regional, es necesario retomar de manera breve y concisa las litologías delimitadas específicamente en el área de estudio, tal como se observa en las figuras 15, 16, 17 y 18.

Antes de hablar acerca de las litologías más antiguas es necesario establecer la presencia de diversos cuerpos intrusivos que afectan a las diversas litologías presentes en la región. Los principales cuerpos intrusivos son formados por granitos, dioritas, granodioritas y por pórfidos andesíticos, dacíticos, riolíticos, cuarzofeldespáticos y cuarzomonzoníticos.

Las litologías más antiguas corresponden a unidades metamórficas del Precámbrico, teniendo unidades paleoproterozoicas como el *paragneis* “Cerro Prieto” y “Sierra Prieta”, el *ortoaugen gneis* “Cerro Prieto-Carina” y el *ortogneis* “La Herradura” y unidades mesoproterozoicas como la *cuarcita* “Sierra Prieta” y la *anortosita* “Sierra Prieta” tal como establece Izaguirre (2009). Junto a estas unidades se tiene otra unidad de gneis-esquistos y otra de anfibolitas reportadas por el Servicio Geológico Mexicano (2012b). Estas unidades forman parte del basamento de la región y presentan sus mayores afloramientos cerca de la Mina La Herradura y en la parte norte de la sierra ubicada al este de la zona de estudio.

Posterior a las unidades Precámbricas se tiene un hiatus litológico hasta el periodo Carbonífero y Pérmico del Paleozoico con una unidad denominada *calizas y cuarcitas* “La Ventana”, la cual presenta intercalaciones de calizas, cuarcitas y lutitas de los subperiodos Missisípico, Pensilvánico y del periodo Permiano (Izaguirre, 2009). Los afloramientos principales se ubican al noroeste de la Mina La Herradura.

El Jurásico presenta una mezcla de unidades sedimentarias, ígneas y metamórficas, comenzando con areniscas intercaladas con limolitas y conglomerados de la época inferior, pasando por andesitas, riolitas y tobas para acabar con los afloramientos de metariolitas, metaandesitas y dacitas de la época media (Servicio Geológico Mexicano, 2012b, 2015b, 2015c; Izaguirre, 2009). Los afloramientos jurásicos son los de mayor tamaño en la zona de estudio y componen casi la totalidad de la sierra presente en esta región.

El mesozoico consiste de andesitas, riolitas-andesitas, riolitas-areniscas y el *granito “Los Indios”* del Cretácico superior (Servicio Geológico Mexicano, 2012b, 2015b, 2015c; Izaguirre, 2009).

El cenozoico, más específicamente el Paleógeno, tiene presencia con rocas ígneas como la *dacita “El Dipolo”* y las *andesitas basálticas “La Herradura”* (Izaguirre, 2009), las cuales tiene afloramientos muy focalizados al noroeste de la mina La Herradura principalmente.

Finalmente, durante el Cuaternario se desarrollaron diversos depósitos sedimentarios que acabaron cubriendo la mayor parte del área de estudio, estos depósitos están compuestos por una amplia gama de materiales sedimentarios tales como arenas, limos, gravas y conglomerados (Servicio Geológico Mexicano, 2012a, 2012b, 2015a, 2015b, 2015c).

Al encontrarse cubierta la mayor parte de la carta por estos depósitos relativamente jóvenes, a simple vista se imposibilita obtener más información acerca de los procesos geológicos y estructurales que se fueron desarrollando durante la historia geológica en nuestra delimitación dentro del estado de Sonora, por lo que se vuelve importante la utilización de métodos indirectos de estudio.

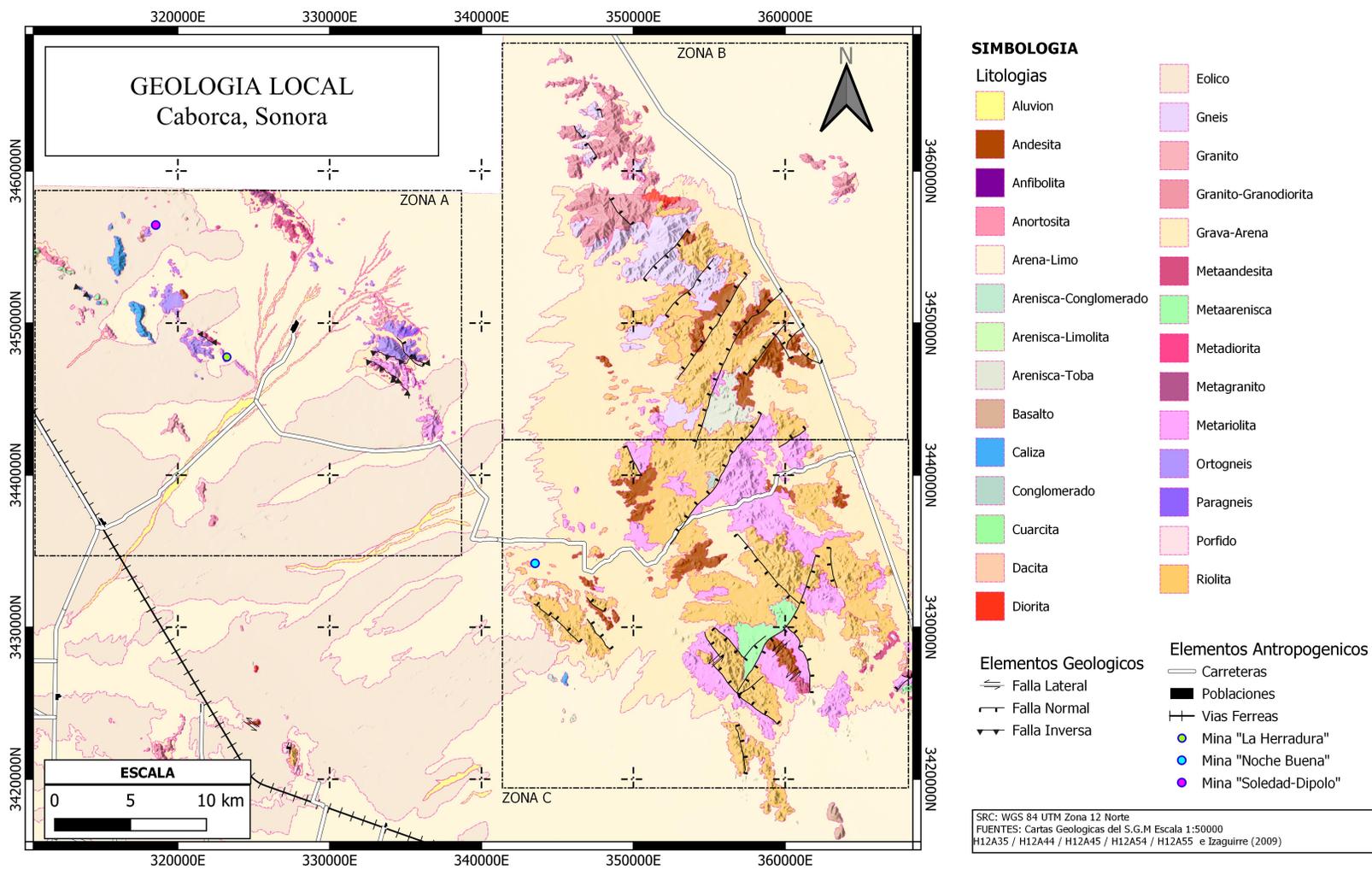


Figura 15: Mapa geológico del área de estudio.

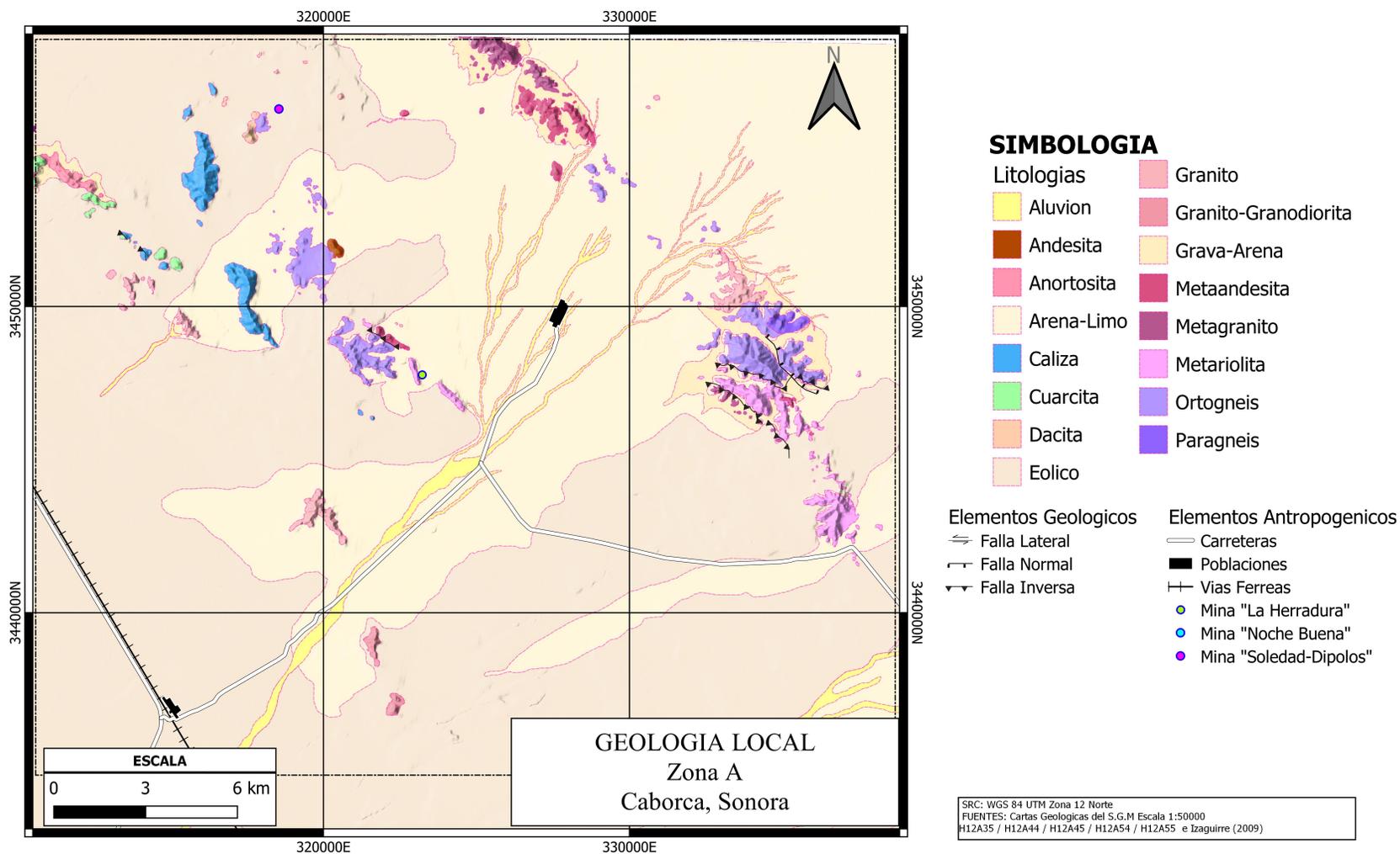


Figura 16: Ampliación del mapa geológico del área de estudio.

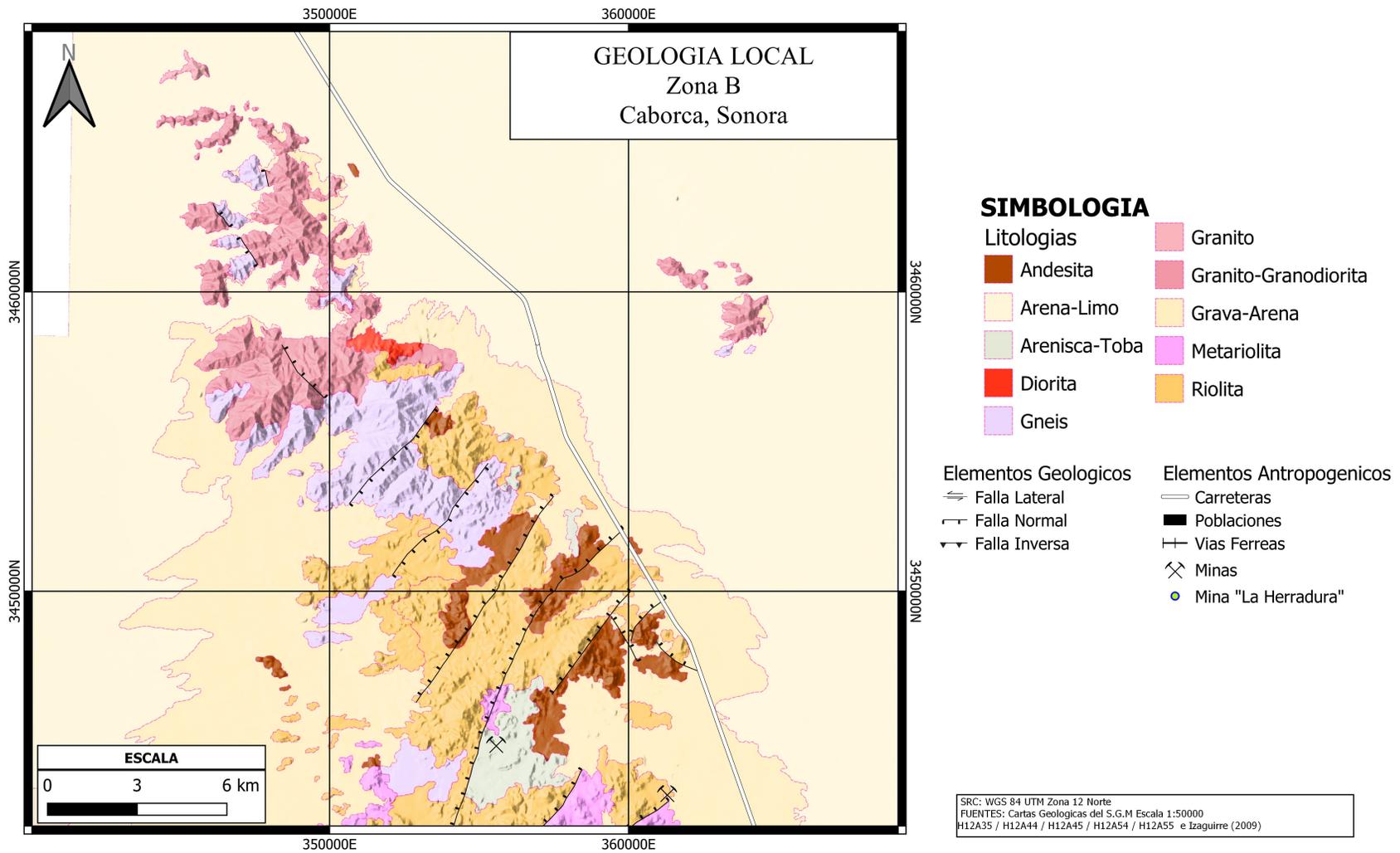


Figura 17: Ampliación del mapa geológico del área de estudio.

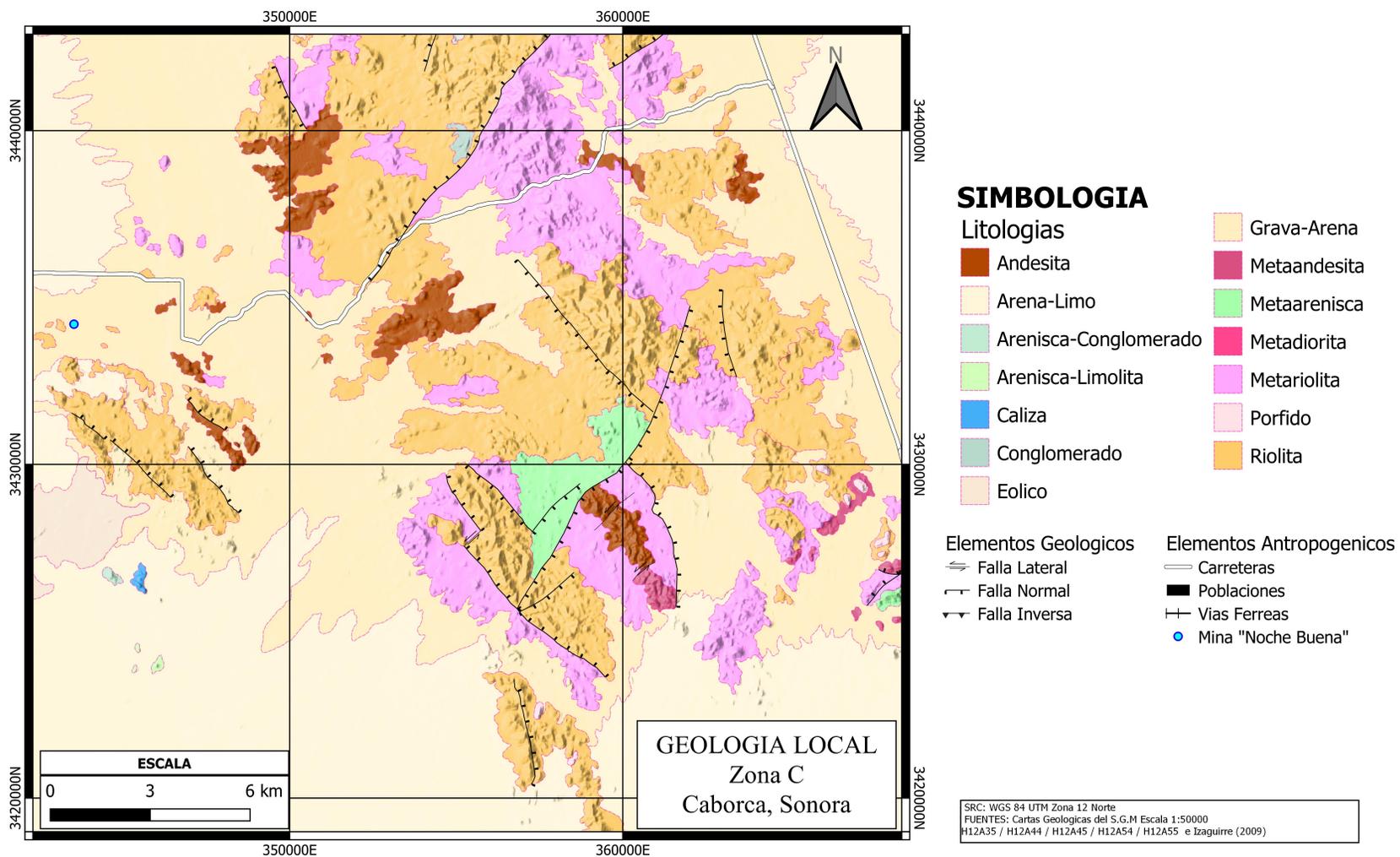


Figura 18: Ampliación del mapa geológico del área de estudio.

4.6. Antecedentes mineros en el área de estudio

4.6.1. Cinturón de Au orogénico de Caborca

Al norte–noroeste de Sonora se tiene una franja de depósitos de auríferos con asociación metamórfica conocido como el “cinturón de oro orogénico de Caborca” el cual presenta una dirección noroeste-sureste y se extiende aproximadamente 600 [km] de largo y entre 60-80 [km] de ancho (figura 19). Con base en diversos estudios realizados a las mineralizaciones encontradas se han categorizado edades que van desde los 69 millones de años hasta los 36 millones de años, por lo que se tiene un cinturón de depósitos que se fue formando desde finales del Cretácico superior hasta el Eoceno (Izaguirre et al., 2017).

Izaguirre et al. (2017) establecen que la mayoría de estos depósitos presentan características similares, con la mineralización generándose en rocas ígneas y metamórficas de diversas edades: principalmente en **gneises, esquistos, anfibolitas, granitos y dioritas** del Proterozoico; aunque igual se observa en **granitos, basaltos, andesitas, riolitas, dacitas, gneises, esquistos y rocas volcanoclásticas** formadas del permico al paleoceno. La mineralización generalmente está constituida por vetas acompañadas por cuarzo, pirita, galena, oro nativo, hematita y esfalerita; los minerales de ganga consisten de clorita, “sericita” y carbonatos de calcio y hierro.

Dentro de este cinturón de Caborca Izaguirre, Iriondo, et al. (2017) establecen la existencia de depósitos epitermales de baja temperatura los cuales se sobreponen a los depósitos de oro orogénico. Estos depósitos tardíos presentan edades de entre 32 y 17 millones de años y se observan en forma de vetas de cuarzo con oro y plata, igualmente dentro del cinturón se identifica que la mineralización orogénica llega a verse afectada por una alteración supergénica que destruye los sulfuros y carbonatos presentes en las venas de cuarzo ricas en oro y genera óxidos de hierro así como una nueva serie de sulfatos y

carbonatos residuales.

En “Depósitos minerales de Sonora” Ochoa Landin et al. (2011) enlistan algunos de los yacimientos que se han encontrado en el cinturón de oro orogénico de Caborca (figura 20), así mismo establece las características conocidas de cada tipo de mineralización. Aunque no se transcribirá la información expresada en el artículo si se establece su utilidad y se recomienda su revisión si se busca más información acerca de los depósitos orogénicos, y no orogénicos, identificados en el estado de Sonora.

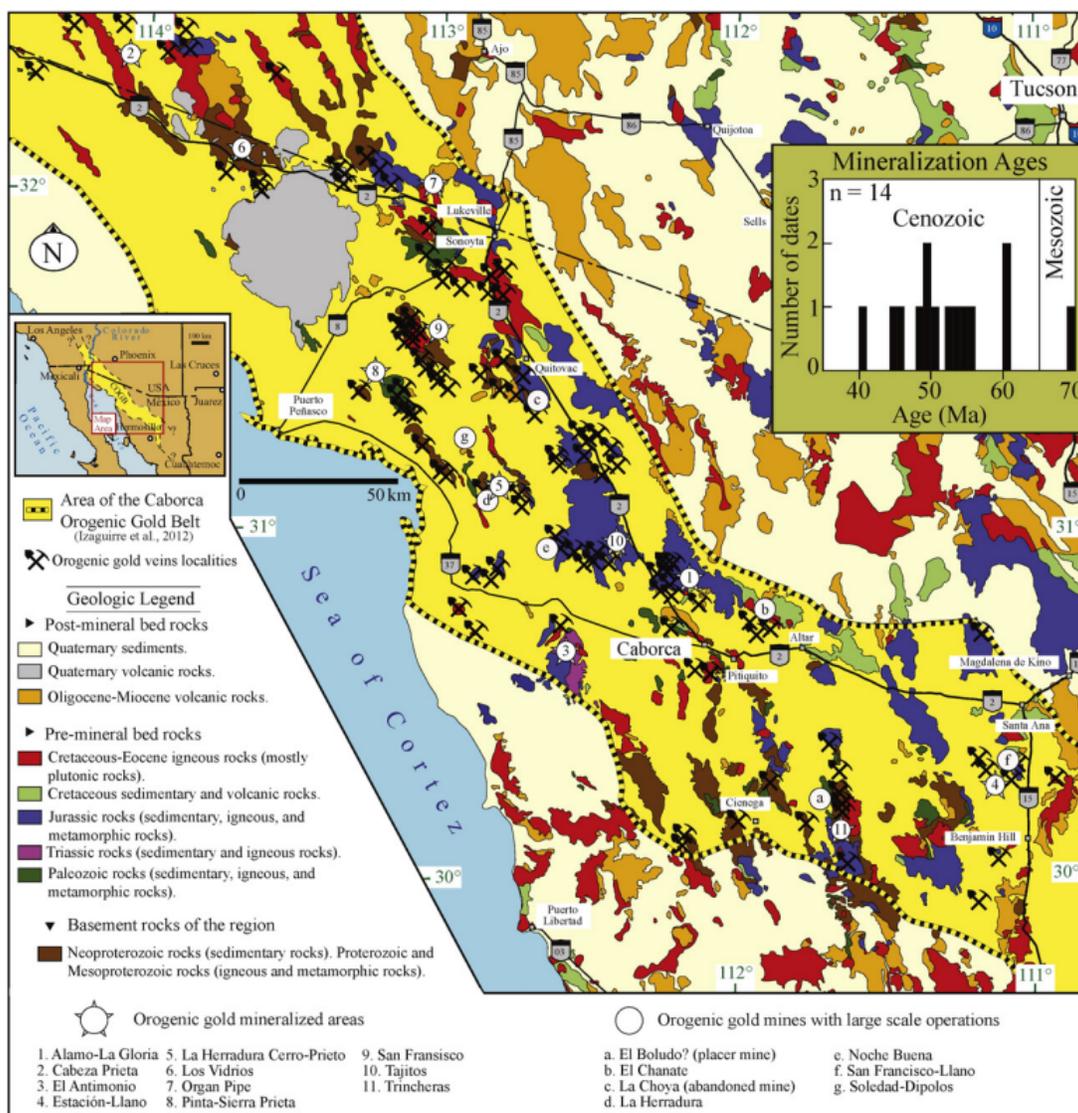


Figura 19: Ubicación y distribución del Cinturón de Oro orogénico de Caborca (Izaguirre et al., 2017).

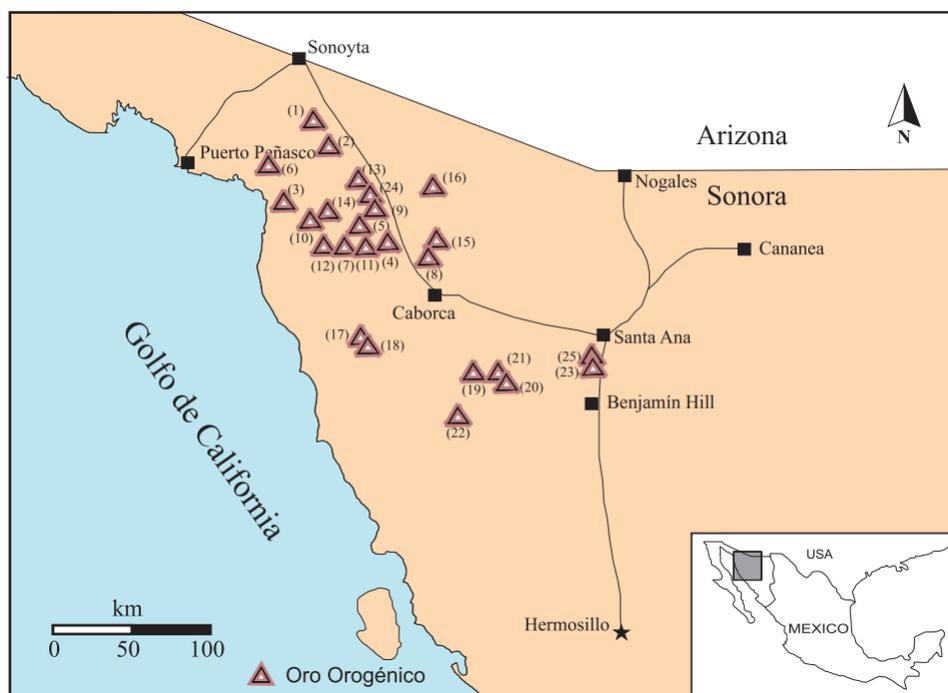


Figura 20: Ubicación aproximada de depósitos de oro orogénico al norte-noroeste del estado de Sonora. (1) Quitovac, (2) La Choya, (3) La Herradura, (4) Tajitos, (5) Juárez-San Francisco, (6) Sierra Pinta, (7) San Francisco, (8) El Chanate, (9) Cinco Hermanos, (10) Noche Buena, (11) Mexico Nuevo, (12) La Coronela, (13) La Union, (14) Carina, (15) La Joya, (16) San Miguel, (17) San Felix, (18) Veta Amarilla, (19) El Argonauta, (20) El Tiro, (21) El Boludo, (22) La Cienega, (23) San Francisco-Estacion Llano, (24) Banco de oro, (25) La Chicharra. (Ochoa Landin et al., 2011).

4.6.2. Proyecto Minero La Herradura

La Unidad Minera La Herradura se ubica en el municipio de Caborca en el estado de Sonora y es propiedad de la Minera Penmont (filial de Fresnillo PLC). El proyecto inicio operaciones en 1997 aunque las labores de exploración y barrenación habían comenzado en 1987 y 1991 respectivamente (Fresnillo PLC, s. f.-b).

Romero Valle (2005) identifico que el depósito en La Herradura se encuentra hospedado en una zona de cizalla controlada por fallas inversas, y esta formado tanto por vetas emplazadas a lo largo de las superficies de falla como por arreglos de vetillas en echelon, las cuales se restringen principalmente a las unidades del gneis cuarzo feldespático y más

raramente en los gneis de biotita-clorita. Por su parte Pérez-Segura et al. (2019) indican que los cuerpos de mineral económico presentan una forma tabular que alcanza hasta 1 km de largo y de profundidad así como 100 m de ancho.

Quintanar Ruiz (2008) indica con resultados de estudios de isotopos estables, inclusiones fluidas y del estilo y geometría de mineralización que el yacimiento explotado en La Herradura se clasifica como un depósito de oro orogénico y que la mineralización tiene una edad de 61 millones de años.

La asociación mineral típica del depósito es cuarzo-sericita-albita, presentando hematita, especularita, pirita, wulfenita, natrojarosita, plumbojarosita, jarosita, galena, anglesita, argentita y fluorita como minerales accesorio y calcopirita, bornita, esfalerita, electrum, yodargirita y oro nativo como minerales traza (Romero Valle, 2005).

Tanto Romero Valle (2005) como Quintanar Ruiz (2008) mencionan la presencia de siete asociaciones paragenéticas en el depósito, de las cuales tres se asocian al oro (cuarzo-wulfenita-galena, cuarzo-especularita-hematita y cuarzo lechoso). Adicionalmente reportan que las principales alteraciones hidrotermales identificadas en La Herradura son sericitica, carbonatación, propilitización y argilización.

Romero Valle (2005) entra a más detalle y describe algunas de las mineralizaciones existentes, la argilización se presenta prácticamente en todas las unidades geológicas cercanas a la mina, la argilización más fuerte se ubica en zonas asociadas a vetas y mineralizaciones, y se caracteriza por la presencia de caolinita y/o montmorillonita, mientras que la carbonatación se presenta como siderita-ankerita y calcita en zonas mineralizadas y material estéril respectivamente. Por otra parte las alteraciones sericitica y propilitica se relacionan a cuarzo-pirita-sericita y clorita-epidota-calcita respectivamente.

4.6.3. Otros Proyectos Mineros

Adicional a la Unidad Minera La Herradura, Minera Penmont cuenta con otros dos proyectos en los municipios de Caborca y Puerto Peñasco cuya principal producción es el oro, estos son Noche Buena y Soledad-Dipolos.

La Unidad Noche Buena se encuentra a 23 [km] al SE de La Herradura, es un proyecto a cielo abierto que se encuentra en operación desde el año 2012. Acorde a la información presentada por la Minera Penmont la mina se acerca al fin de su vida útil (Fresnillo PLC, s. f.-a).

La Unidad Soledad-Dipolos se encuentra a 10 [km] al NW de La Herradura, es un proyecto a cielo abierto que comenzó operaciones en el año 2010 aunque actualmente se encuentra suspendido indefinidamente (Fresnillo PLC, s. f.-c).

No se encontró información detallada acerca de la geología y/o mineralización de estos proyectos mineros, sin embargo se asume que cuentan con características similares a La Herradura y a otros depósitos del cinturón de oro orogénico de Caborca.

4.7. Geofísica

El Servicio Geológico Mexicano ha cartografiado gran parte del territorio mexicano mediante levantamientos aeromagnéticos proporcionando así una gran fuente de información geofísica que se puede aprovechar para una gran cantidad de proyectos exploratorios. Para este trabajo se hace uso de los datos en rejilla ofrecidos por el Servicio Geológico Mexicano, estos datos cubren las zonas correspondientes a las cartas mencionadas en el apartado de *Localización*.

La información aeromagnética presentada fue recopilada por una serie de vuelos realizados por el Servicio Geológico Mexicano durante el año 2000, estos vuelos fueron realizados mediante un avión *Islander BN2-A21* el cual llevaba consigo un magnetómetro de bombeo óptico de vapor de cesio modelo G-822A de la marca Geometrics. Los vuelos se realizaron a una altura constante de 300 [m] sobre el nivel del terreno, las líneas de exploración se designaron con dirección N-S y con una separación de 1 000 [m] entre cada línea.

Los datos aeromagnéticos obtenidos del Servicio Geológico Mexicano cuentan con la corrección por variación diurna y por IGRF así como las correcciones pertinentes al ser un levantamiento aeromagnético de intensidad de campo (nivelación de líneas de amarre, micronivelado, entre otras), por lo cual los datos representan la anomalía magnética de campo total. En la figura 22 se puede observar la presencia de al menos 4 cúmulos de anomalías, tres de ellos localizados entre las coordenadas 3 430 000 [mN] y 3 450 000 [mN], y el último localizado al sureste de la zona de estudio.

Para establecer correlación de las anomalías magnéticas directamente sobre el cuerpo que la causa, lo que permite una mejor interpretación, a las anomalías de campo total (figura 22) se le realizó una reducción al polo (RTP por sus siglas en inglés) (figura 23),

utilizando una inclinación de 57.3931° y declinación de 11.7591° . La anomalía con el RTP aplicado presenta magnitudes que van de -320 [nT] a 25 [nT].

Debido al interés sobre las anomalías someras se realiza una separación del campo regional y residual mediante la utilización de un filtro pasabajas.

Las anomalías magnéticas observadas en el campo residual con reducción al polo, figura 24, presentan principalmente una tendencia NW-SE en el sector norte, aunque adicionalmente se observa un cúmulo de anomalías cuya tendencia NE-SW es casi perpendicular a la tendencia principal. La distribución de campo residual presenta magnitudes de entre -179 [nT] y 278 [nT]. Las mayores magnitudes (≥ 200 [nT]) se presentan en la esquina sureste y en la parte este centro-oriental del área de estudio aproximadamente en las coordenadas $3\ 421\ 000$ [mN] $348\ 000$ [mE] y $3\ 450\ 000$ [mN] $354\ 000$ [mE], respectivamente.

Para describir la relación entre las litologías de la región y las anomalías magnéticas se establecen “zonas magnéticas”, las cuales se pueden observar en la figura 25. Las anomalías de la **zona I** se detectan en parte bajo las afloramientos de la unidad granítica “Los Indios”; las anomalías de la **zona II** se detectan bajo una unidad de metagranitos; las anomalías de la **zona III** se pueden relacionar a unidades metamórficas de metagranitos, metariolitas, paragneises y ortogneises; las anomalías de la **zona IV** en parte se podrían relacionar en parte a una unidad de granitos y a un cuerpo granito-granodiorítico; la **zona V** engloba anomalías que se ubican en parte sobre un cuerpo intrusivo granito-granodiorítico; la **zona VI** engloba un cúmulo de anomalías magnéticas que se reparten “sobre” riolitas y andesitas así como una unidad de gneis-esquisto; la anomalía que compone a la **zona VII** se puede relacionar espacialmente con unidades riolíticas y metariolíticas; la anomalía de la **zona VIII** en parte se puede relacionar a la ubicación de

una unidad riolítica aunque igual se tiene respuesta en una región donde no afloran unidades geológicas; las **zonas IX** engloban altos valores magnéticos sin embargo no presentan unidades litológicas aflorando.

Debido al enfoque de la tesis no se realiza un análisis exhaustivo de las anomalías magnéticas, sin embargo se hace uso de métodos de realce para la delimitación de anomalías, para la estimación de su profundidad y para el establecimiento de lineamientos magnéticos. Los métodos de realce de anomalías utilizados son el *tilt derivative* (y su derivado *tilt depth*) y el *FSED*, figuras 26, 27 y 28 respectivamente.

Acorde a la información calculada con el método tilt depth los límites superiores de las anomalías magnéticas detectadas en la región presentan una profundidad promedio de 600 [m], con profundidades mínimas cercanas a los 130 [m] y máximas de hasta 2 mil metros; la falta de anomalías más someras se atribuye al nivel de detalle del levantamiento aeromagnético.

En las inmediaciones de la Unidad Minera La Herradura se observan principalmente anomalías con profundidades estimadas de 130 [m] a 500 [m], aunque en el extremo oeste de la anomalía ubicada sobre el punto de la unidad minera se alcanzan profundidades de hasta 1 200 [m].

Las anomalías más someras de esta zona se ubican sobre lo que actualmente representa parte del tajo principal de La Herradura y al NW de esta unidad, estas anomalías presentan características similares con geometrías pseudo-circulares, diámetros de aproximadamente 500 [m] y profundidades de entre 130 y 230 [m].

El resto de las anomalías con profundidades menores a 250 [m] se ubican al este de la

coordenada 345 800 [mE], principalmente al norte de la coordenada 3 443 000 [mN] sobre la sierra que atraviesa el área de estudio y en menor medida al sur de la coordenada 3 434 000 [mN].

Los límites que se resaltan con el método de FSED, figura 28, permiten ver de manera “descompuesta” las anomalías y cúmulos de anomalías que se observan en el campo residual. Aun cuando parte de la zona de estudio se ve afectada por ruido, principalmente el extremo poniente, el método responde de buena manera generando respuestas detalladas acerca de las anomalías magnéticas permitiendo así la identificación de lineamientos, los cuales proporcionan información de contactos, fallas y/o fracturas que pueden no observarse en superficie.

Los lineamientos identificados, figura 29, presentan una dirección preferencial NW-SE con una dirección secundaria NE-SW casi perpendicular a la dirección preferencial, tal como se puede observar en el diagrama de rosas de la figura 21.



Figura 21: Diagrama de rosas con las direcciones preferenciales de los lineamientos aeromagnéticos.

Los lineamientos magnéticos serán el principal elemento geofísico a utilizar en el apartado de integración de información con el objetivo de establecer las zonas de interés exploratorio, por otra parte la estimación de profundidades será utilizada para dar prioridad a anomalías someras sobre aquellas a profundidad.

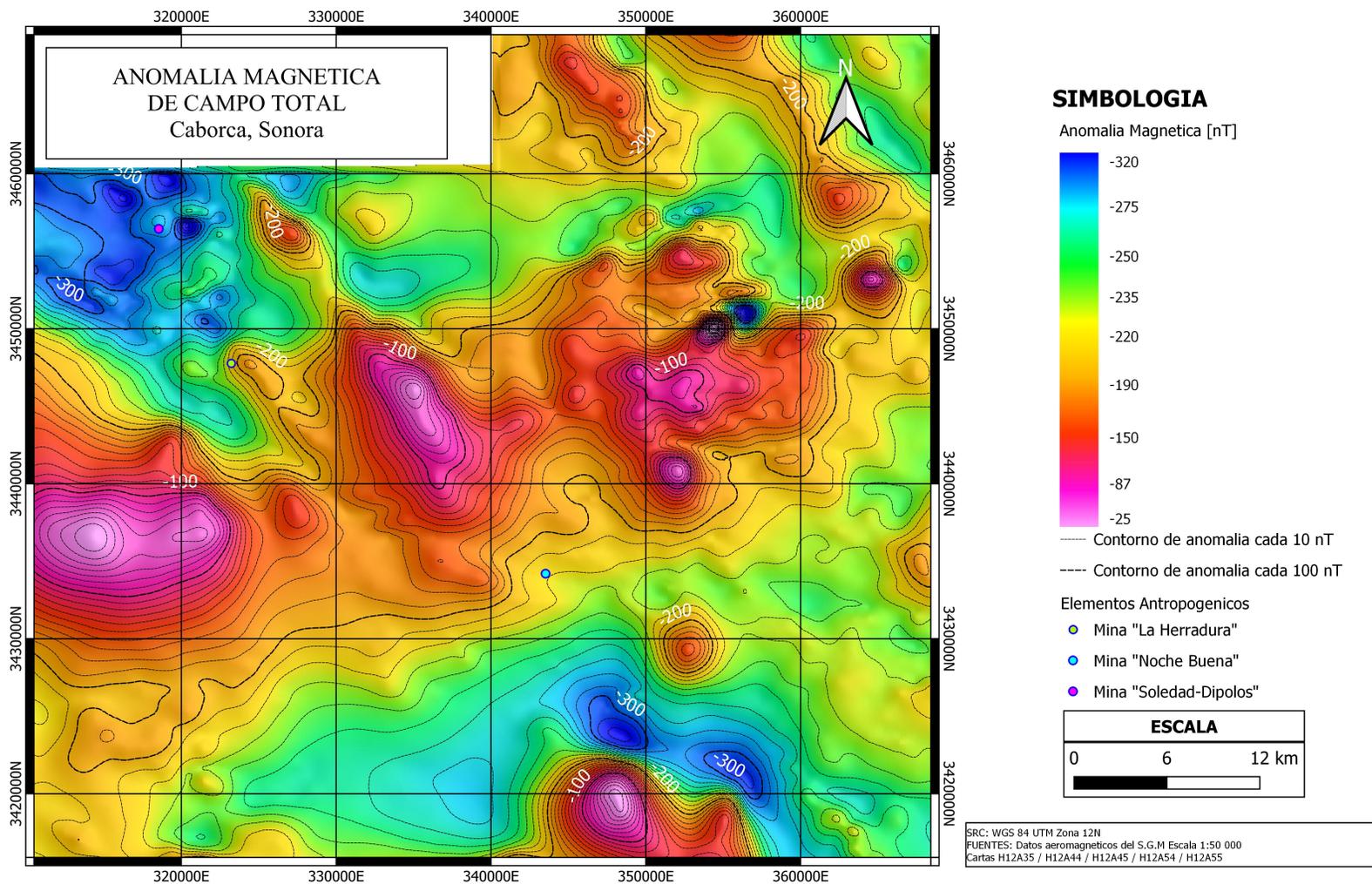


Figura 22: Anomalia magnética de campo total.

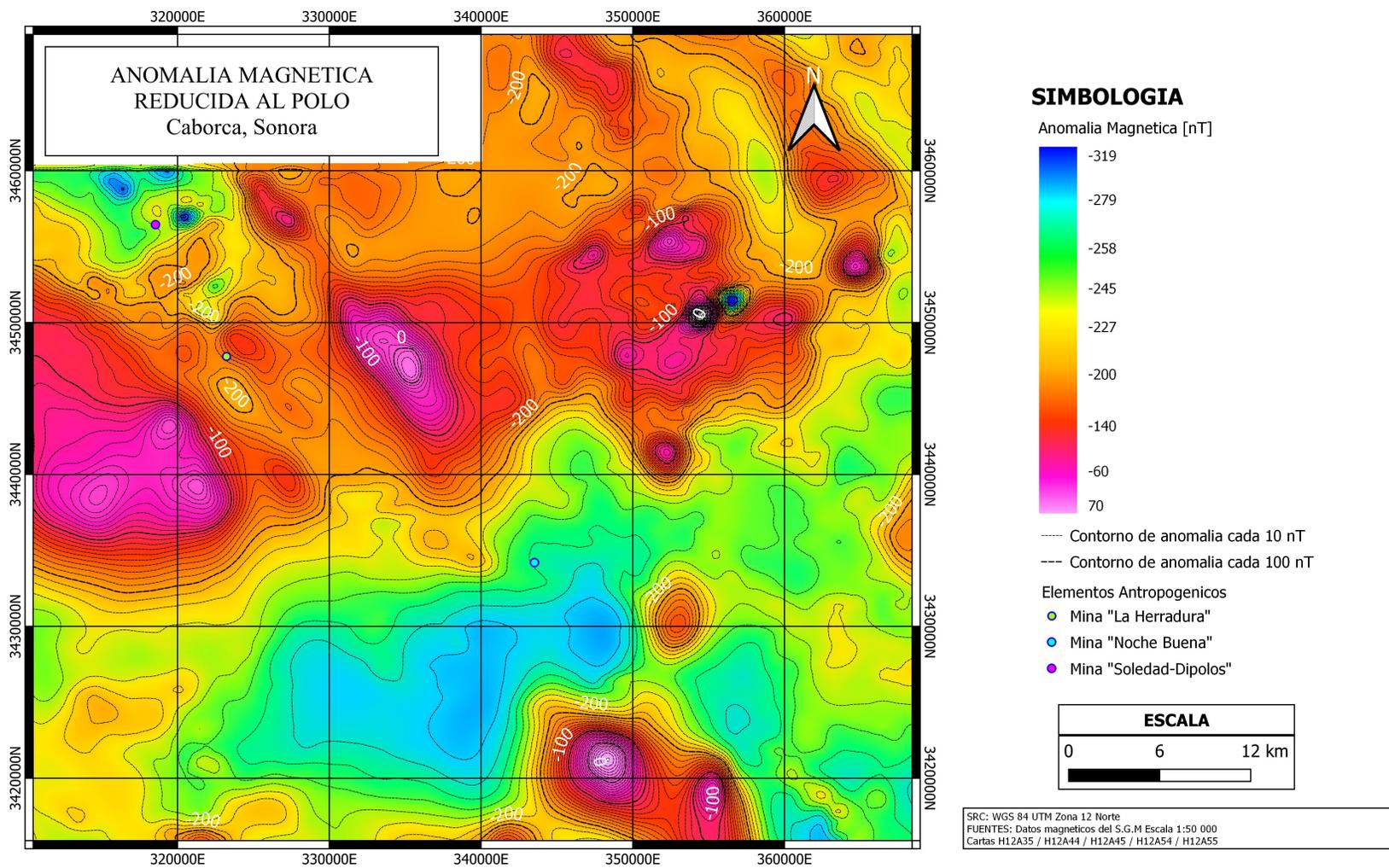


Figura 23: Anomalia magnética de campo total reducida al polo.

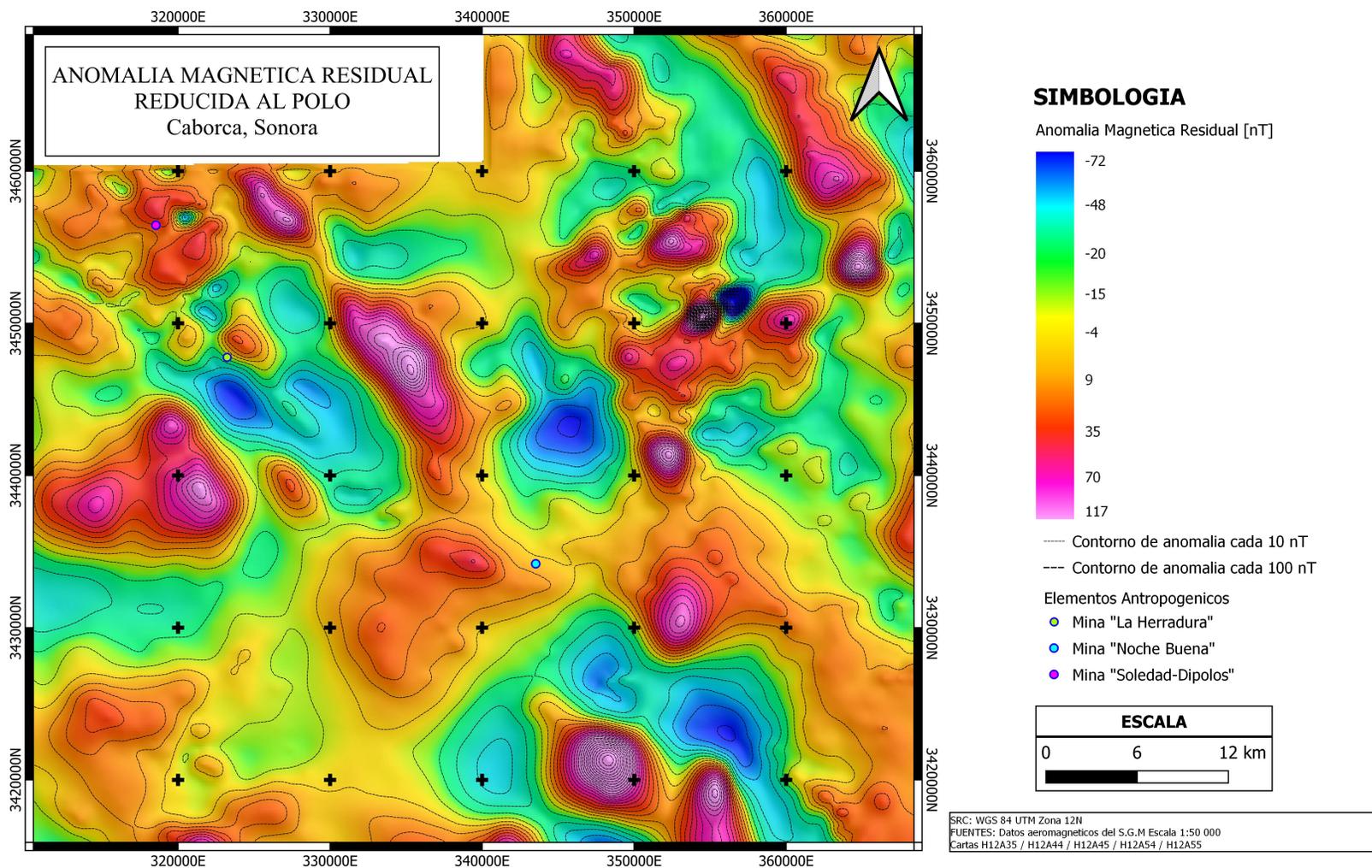


Figura 24: Anomalía magnética residual reducida al polo.

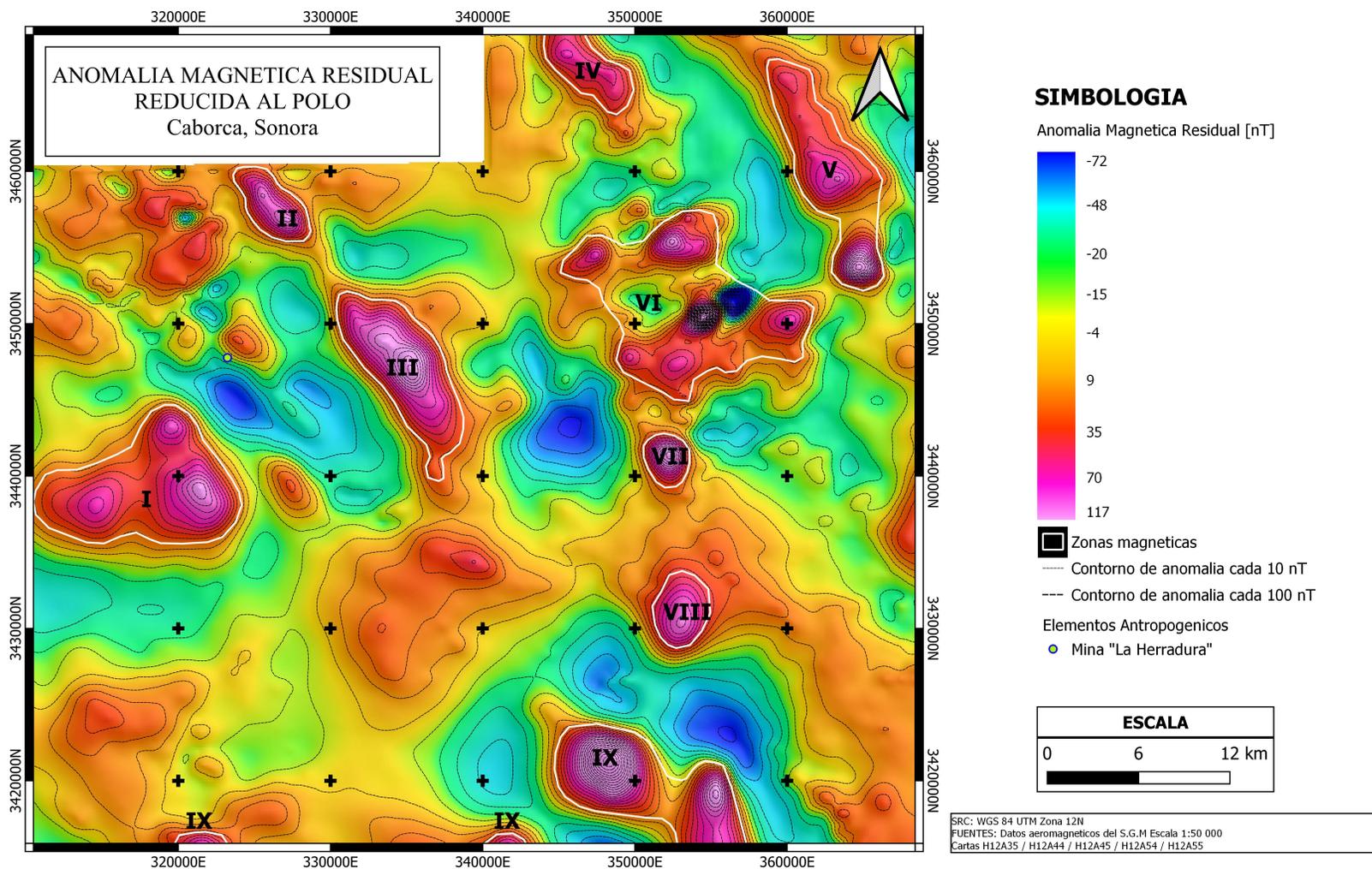


Figura 25: Anomalia magnética residual reducida al polo con la identificación de zonas magnéticas.

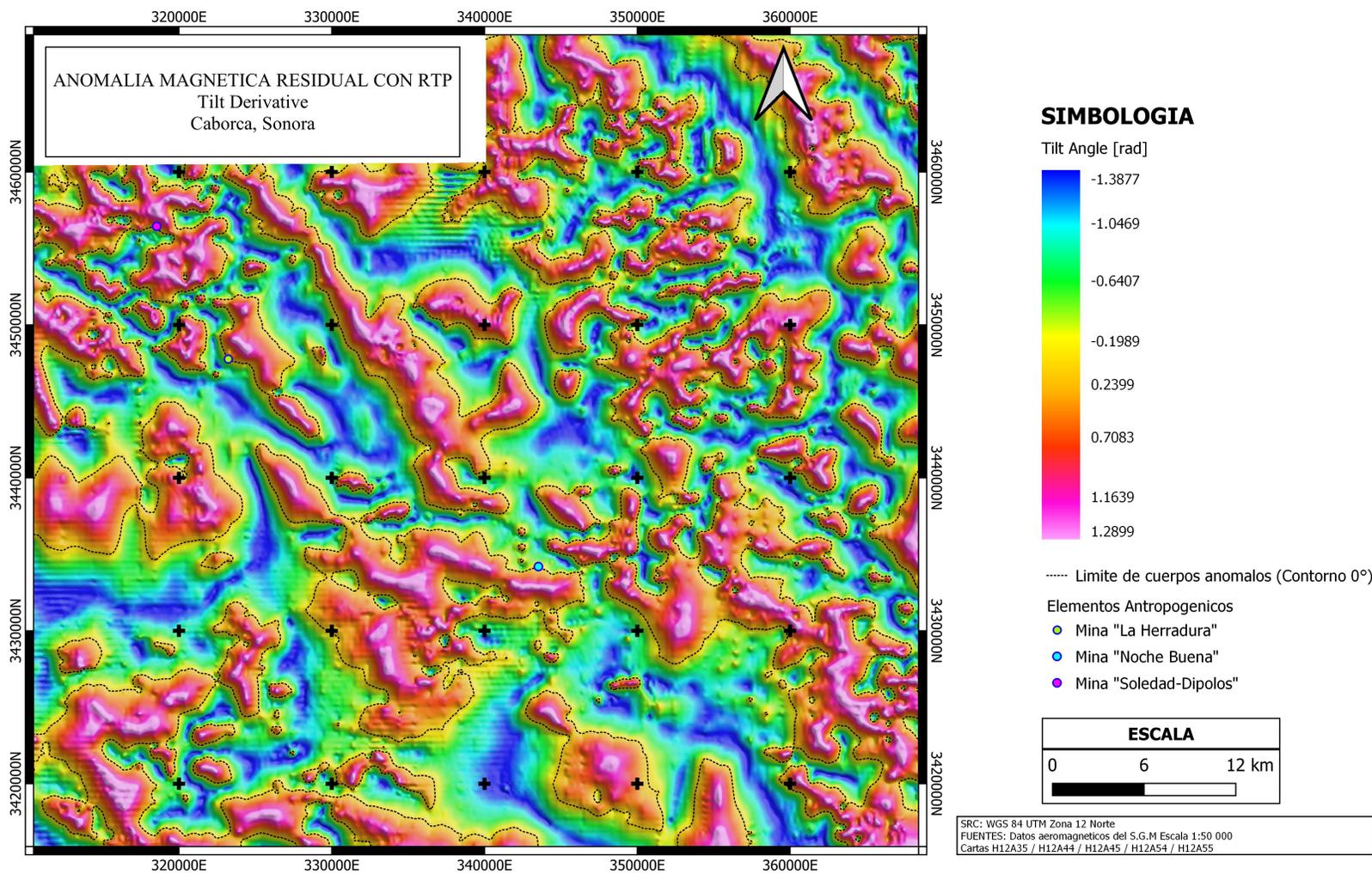


Figura 26: Derivada de Tilt (Tilt derivative) de la anomalía magnética residual reducida al polo.

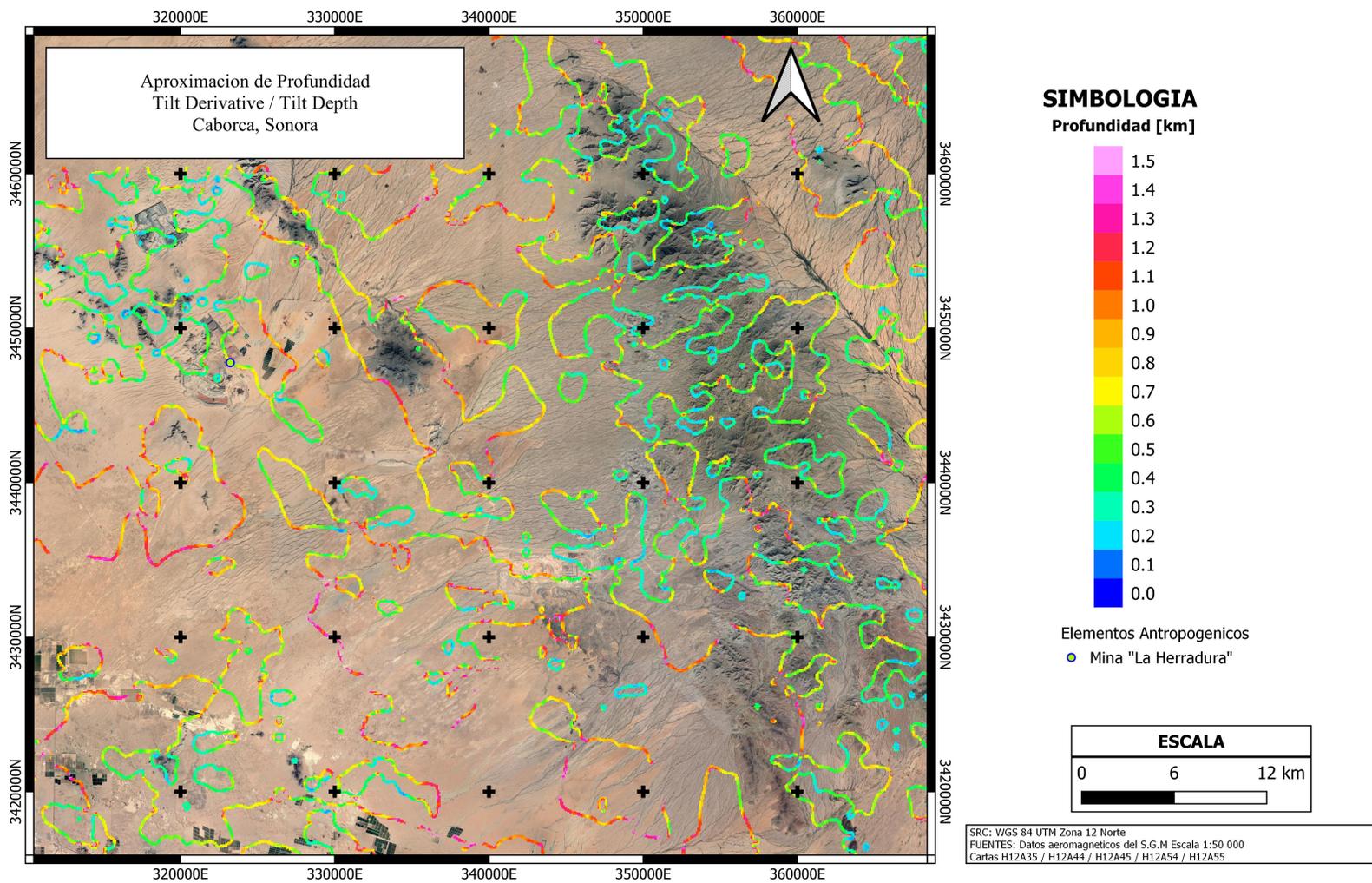


Figura 27: Estimación de profundidad de los bordes de las anomalías magnéticas, proveniente del tilt depth.

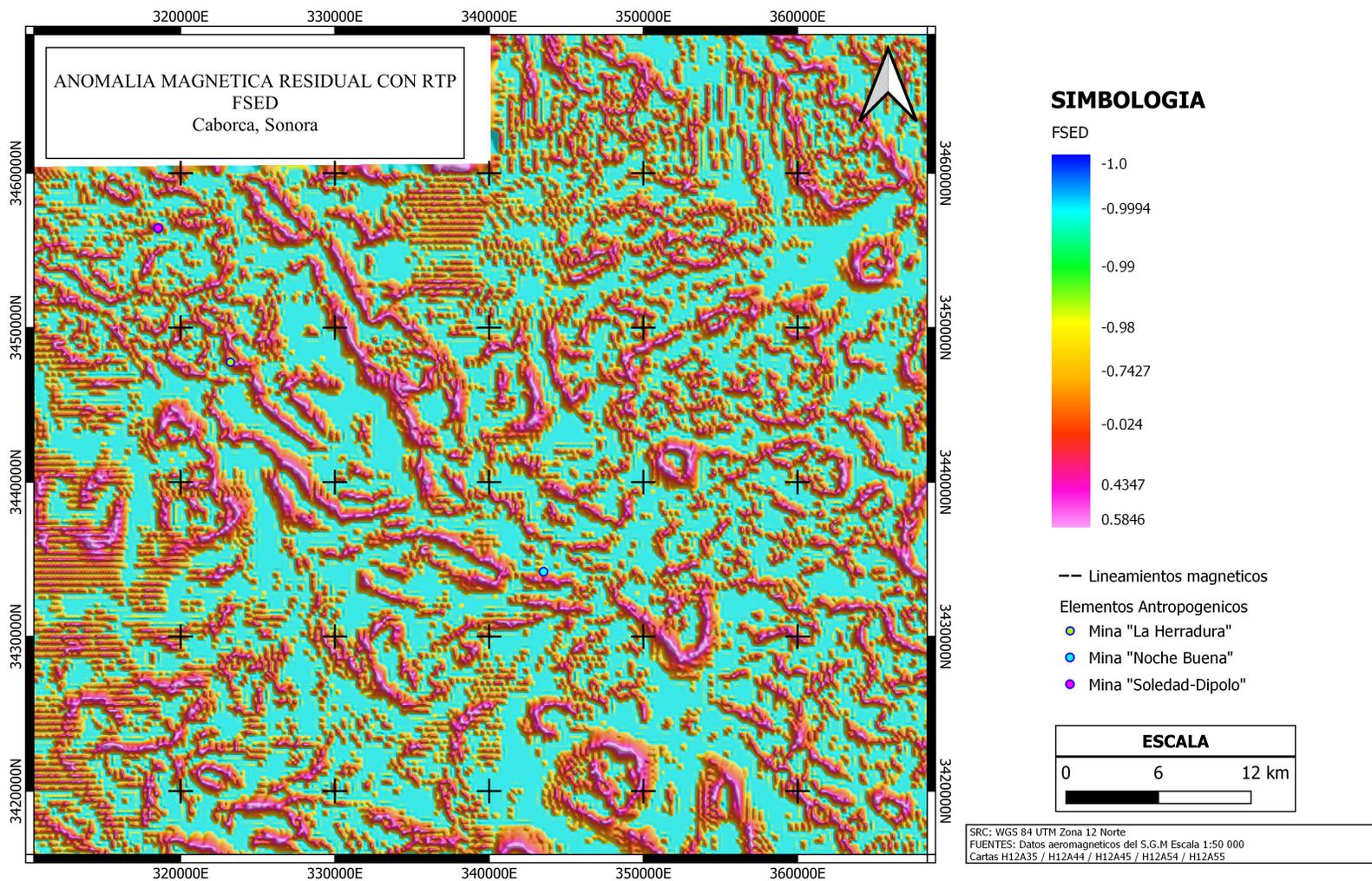


Figura 28: FSED de la anomalía magnética residual reducida al polo.

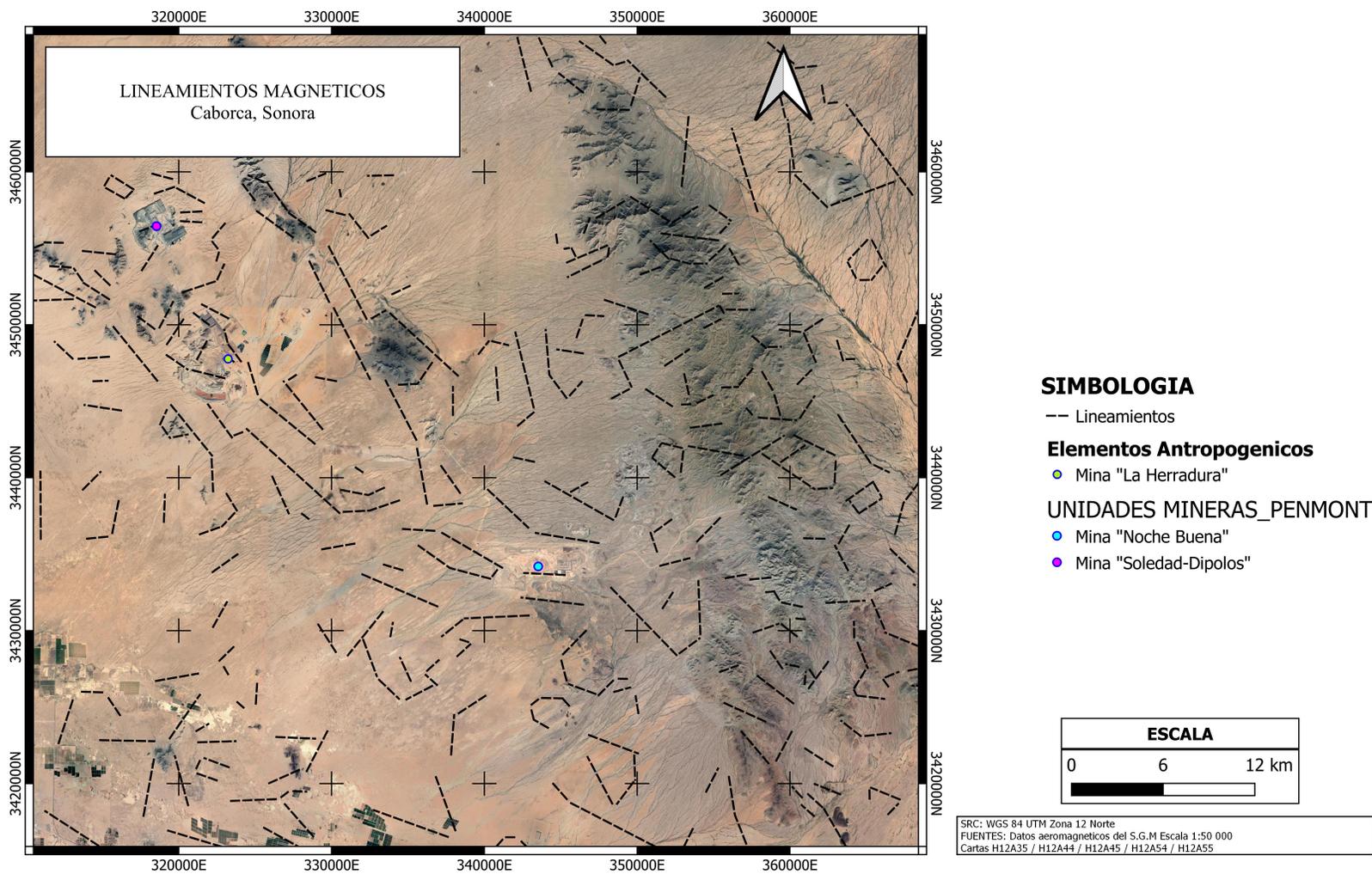


Figura 29: Lineamientos magnéticos identificados con el método de FSED.

4.8. Geoquímica

Como parte de los programas de cartografía geológica realizadas por el Servicio Geológico Mexicano para la creación de las cartas mencionadas en el apartado de *Localización* se llevaron a cabo diversas campañas de geoquímica. Se realizaron muestreos de sedimento de arroyo acorde a la densidad del drenaje presente en el área de estudio. Cada muestra consistió en la colecta de sedimento activo formado por partículas finas de tamaño de limos y arcillas tamizado con una malla -80 para su posterior análisis de laboratorio; la ubicación de las muestras se puede observar en la figura 30.

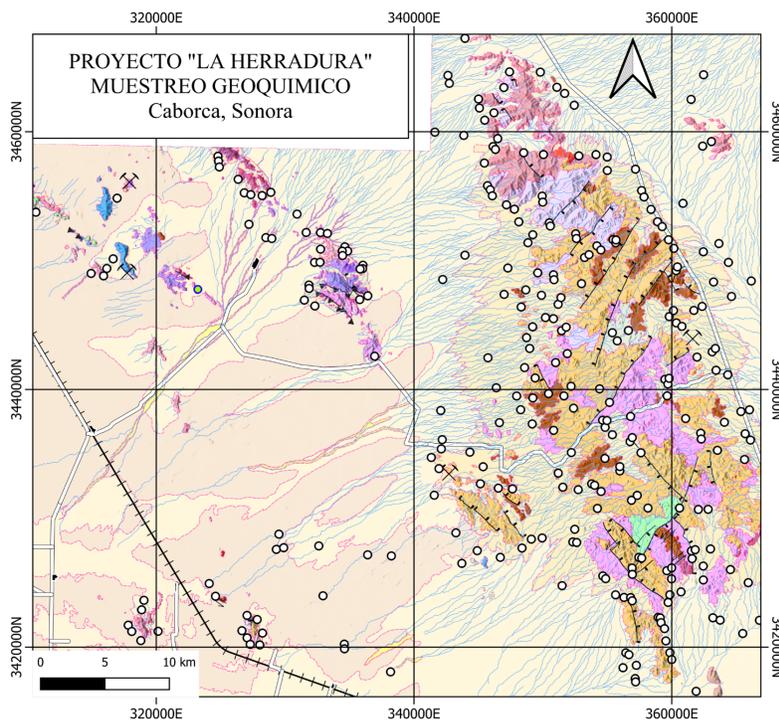


Figura 30: Ubicación de las muestras de sedimento de arroyo tomadas por el Servicio Geológico Mexicano.

En el área de estudio se recolectaron 304 ejemplares de sedimento, por lo que se tiene una densidad de una muestra cada $10.45 [km^2]$, el SGM establece que el bajo número de muestras se debe a la topografía de la región y a la escasez de drenajes en secciones pertinentes del área de estudio.

Acorde a los informes del SGM, las muestras se analizaron por el método de plasma de inducción acoplado (ICP por sus siglas en inglés) midiendo la plata (Ag), aluminio (Al), bario (Ba), berilio (Be), calcio (Ca), cadmio (Cd), cobalto (Co), cromo (Cr), cobre (Cu), hierro (Fe), potasio (K), magnesio (Mg), manganeso (Mn), molibdeno (Mo), sodio (Na), níquel (Ni), fósforo (P), plomo (Pb), escandio (Sc), estroncio (Sr), titanio (Ti), uranio (U), wolframio (W) y zinc (Zn) de manera directa.

Para el arsénico (As), bismuto (Bi), antimonio (Sb), selenio (Se), estaño (Sn) y telurio (Te) se utiliza un generador de hidruro antes de realizar la medición con ICP, el oro (Au) se analizó mediante absorción atómica.

Gazley et al., (2020) establecen que los depósitos de oro orogénico se asocian a elementos como la plata (Ag), el arsénico (As), el oro (Au), el bismuto (Bi), el molibdeno (Mo), el estaño (Sn), el telurio (Te) y el tungsteno (W); tomando como fundamentos diversos estudios geoquímicos Izaguirre et al. (2012) identifican que en el Cinturón de Oro Orogénico de Caborca las rocas encajonantes de las vetas auríferas y de las alteraciones hidrotermales tienen un enriquecimiento de elementos como el tungsteno (W), el cobre (Cu), el plomo (Pb), el molibdeno (Mo), el talio (Tl), el berilio (Be), el zinc (Zn), el vanadio (V), el antimonio (Sb), la plata (Ag), el estaño (Sn), el selenio (Se) y el níquel (Ni), a esta lista de elementos Izaguirre et al., (2017) agregan el arsénico (As), el hierro (Fe), el potasio (K), el níquel (Ni), el silicio (Si) y el torio (Th).

Con base en la información anterior se decidió enfocarse en 11 de los 31 elementos medidos por el SGM, siendo estos el arsénico (As), el oro (Au), el berilio (Be), el cobre (Cu), el hierro (Fe), el potasio (K), el molibdeno (Mo), el níquel (Ni), el plomo (Pb), el antimonio (Sb) y el zinc (Zn).

Mediante un sencillo análisis estadístico se determinan los parámetros geoquímicos necesarios para establecer un fondo y un umbral geoquímico y posteriormente identificar los valores anómalos para cada elemento en la región de estudio. Para determinar estos parámetros se hace uso de la serie completa de datos para cada elemento, de su media y de su desviación estándar, debido a que el valor de fondo cubre del valor mínimo presente en la serie de datos (o el valor 0) a la media de esta misma serie, mientras que el valor de umbral cubre del valor de la media al valor de la media mas dos veces la desviación estándar. Los valores anómalos serán todos aquellos que superen el valor máximo de umbral.

Algunos de los medidores estadísticos de cada elemento se muestran en la tabla a continuación:

Elemento	Min	Max	Media	Mediana	σ
As [ppm]	0.60	28.60	4.420	3.60	3.36
Au [ppb]	1	221	8.220	3.0	23.26
Be [ppm]	0.1	1.20	0.314	0.30	0.21
Cu [ppm]	0.40	84	20.255	17.0	11.75
Fe [%]	0.69	6.5	2.363	2.26	0.99
K [%]	0.1	0.8	0.307	0.30	0.15
Mo [ppm]	0.1	13.4	1.055	1.0	1.52
Ni [ppm]	1	34	7.785	7.1	6.0
Pb [ppm]	2	180	11.953	10.0	12.24
Sb [ppm]	0.6	2.30	0.705	0.6	0.28
Zn [ppm]	31	1637	336.671	182	329.77

Con la media y la desviación estándar calculadas se obtienen los valores de fondo, de umbral y los valores anómalos, los cuales se indican en la siguiente tabla:

Elemento	Valor de fondo	Valor de umbral	Valor anómalo
As [ppm]	0 - 4.420	4.420 - 11.153	≥ 11.153
Au [ppb]	0 - 8.220	8.220 - 54.819	≥ 54.819
Be [ppm]	0 - 0.314	0.314 - 0.730	≥ 0.730
Cu [ppm]	0 - 20.255	20.255 - 43.797	≥ 43.797
Fe [%]	0 - 2.363	2.363 - 4.348	≥ 4.348
K [%]	0 - 0.307	0.307 - 0.597	≥ 0.597
Mo [ppm]	0 - 1.055	1.055 - 4.099	≥ 4.099
Ni [ppm]	0 - 7.785	7.785 - 19.809	≥ 19.809
Pb [ppm]	0 - 11.953	11.953 - 36.469	≥ 36.469
Sb [ppm]	0 - 0.705	0.705 - 1.263	≥ 1.263
Zn [ppm]	0 - 336.671	336.671 - 997.293	≥ 997.293

En las figura 31 a la figura 41 se muestra la distribución de cada uno de los 11 elementos seleccionados para el área de estudio, tomando en cuenta los valores de fondo, de umbral y los valores anómalos. Las muestras con valores anómalos por si solas no indicarían un punto de interés, es necesario relacionar cada muestra con las litologías de la región mediante los desagües, la topografía y la fuente que les dio origen.

4.8.1. Arsénico (As)

De las 304 muestras de sedimento recolectadas se presentaron 16 muestras con valores anómalos, estas muestras se observan como puntos rojos en la figura 31 y se encuentran distribuidas sobre la sierra ubicada al este de la zona de estudio.

Siguiendo la topografía y la dirección de los desagües que desembocan en las zonas donde se tomaron las muestras se puede determinar que las anomalías de arsénico provienen de las metariolitas, riolitas y andesitas del Jurásico.

4.8.2. Oro (Au)

De las 304 muestras de sedimento recolectadas se presentaron 7 muestras con valores anómalos, estas muestras se observan como puntos rojos en la figura 32 y se encuentran distribuidas a través de la sierra principal de la zona de estudio.

Siguiendo la topografía y la dirección de los desagües que desembocan en las zonas donde se tomaron las muestras se puede determinar que las anomalías de oro provienen de las metariolitas, las riolitas y las areniscas con tobas riolíticas del Jurásico así como de los gneis-esquisto del Precámbrico.

4.8.3. Berilio (Be)

De las 304 muestras de sedimento recolectadas se presentaron 5 muestras con valores anómalos, estas muestras se observan como puntos rojos en la figura 33 y se encuentran distribuidas en la región sureste de la zona estudio, con excepción de un punto que se localiza en la parte central este de la zona de estudio.

Siguiendo la topografía y la dirección de los desagües que desembocan en las zonas donde se tomaron las muestras se puede determinar que las anomalías de berilio provienen de las andesitas y metariolitas del Jurásico así como de los gneis-esquisto del Precámbrico.

4.8.4. Cobre (Cu)

De las 304 muestras de sedimento recolectadas se presentaron 15 muestras con valores anómalos, estas muestras se observan como puntos rojos en la figura 34 y se encuentran distribuidas sobre gran parte de la sierra ubicada en la zona de estudio.

Siguiendo la topografía y la dirección de los desagües que desembocan en las zonas donde

se tomaron las muestras se puede determinar que las anomalías de cobre provienen de las metaandesitas, metariolitas, riolitas y andesitas del Jurásico así como de los gneis-esquistos del Precámbrico.

4.8.5. Hierro (Fe)

De las 304 muestras de sedimento recolectadas se presentaron 15 muestras con valores anómalos, estas muestras se observan como puntos rojos en la figura 35 y se encuentran distribuidas en la parte norte de la zona de estudio.

Siguiendo la topografía y la dirección de los desagües que desembocan en las zonas donde se tomaron las muestras se puede determinar que las anomalías de hierro provienen de cuerpos intrusivos de granito-granodiorita, de gneis-esquistos del Precámbrico y de andesitas y riolitas del Jurásico.

4.8.6. Potasio (K)

De las 304 muestras de sedimento recolectadas se presentaron 23 muestras con valores anómalos, estas muestras se observan como puntos rojos en la figura 36 y se encuentran distribuidas principalmente en la sección noroeste de la zona de estudio, con la excepción de tres puntos, dos de ellos se localizan en la parte central (a 22 km y 10 km de la mina La Herradura) mientras que el tercero se ubica en el extremo sureste de la zona de estudio.

Siguiendo la topografía y la dirección de los desagües que desembocan en las zonas donde se tomaron las muestras se puede determinar que las anomalías de potasio se generan por cuerpos intrusivos de composición granito-granodiorítica, de las riolitas y andesitas del Jurásico así como de los gneis-esquistos del Precámbrico.

4.8.7. Molibdeno (Mo)

De las 304 muestras de sedimento recolectadas se presentaron 13 muestras con valores anómalos, estas muestras se observan como puntos rojos en la figura 37 y se encuentran distribuidas sobre la parte central de la sierra principal de la zona de estudio.

Siguiendo la topografía y la dirección de los desagües que desembocan en las zonas donde se tomaron las muestras se puede determinar que las anomalías de molibdeno proceden de rocas del Jurásico, principalmente las andesitas y riolitas, así como de los gneis-esquisto del Precámbrico.

4.8.8. Niquel (Ni)

De las 304 muestras de sedimento recolectadas se presentaron 11 muestras con valores anómalos, estas muestras se observan como puntos rojos en la figura 38 y se encuentran en la región este - noreste sobre la sierra a 32 km aproximadamente de la mina La Herradura.

Siguiendo la topografía y la dirección de los desagües que desembocan en las zonas donde se tomaron las muestras se puede determinar que las anomalías de níquel provienen de sedimentos de un cuerpo intrusivo granito-granodiorítico, de las riolitas del Jurásico y de los gneis-esquisto del Precámbrico.

4.8.9. Plomo (Pb)

De las 304 muestras de sedimento recolectadas se presentaron 8 muestras con valores anómalos, estas muestras se observan como puntos rojos en la figura 39 y se encuentran distribuidas a lo largo de la sierra principal de la zona de estudio.

Siguiendo la topografía y la dirección de los desagües que desembocan en las zonas donde

se tomaron las muestras se puede determinar que las anomalías de plomo tienen su origen en las andesitas, riolitas y metariolitas del Jurásico.

4.8.10. Antimonio (Sb)

De las 304 muestras de sedimento recolectadas se presentaron 21 muestras con valores anómalos, estas muestras se observan como puntos rojos en la figura 40 y se encuentran distribuidas en la parte este de la zona de estudio.

Siguiendo la topografía y la dirección de los desagües que desembocan en las zonas donde se tomaron las muestras se puede determinar que las anomalías de antimonio provienen de las rocas del Jurásico presentes en la zona, específicamente de las riolitas, andesitas y metariolitas.

4.8.11. Zinc (Zn)

De las 304 muestras de sedimento recolectadas se presentaron 16 muestras con valores anómalos, estas muestras se observan como puntos rojos en la figura 41 y, a comparación de los demás elementos, se encuentran distribuidas de manera más estrecha en una zona al norte de la sierra principal.

Siguiendo la topografía y la dirección de los desagües que desembocan en las zonas donde se tomaron las muestras se puede determinar que las anomalías de zinc se generan por sedimentos de las riolitas del Jurásico, gneis-esquistos del Precámbrico y del cuerpo intrusivo de granito-granodiorita.

Las anomalías geoquímicas tienen su origen principalmente en las andesitas, riolitas y metariolitas del jurásico así como en los gneis-esquistos del precámbrico, en menor medida se tiene una relación entre ciertas anomalías y los cuerpos intrusivos de composición

granito-granodiorítica de la zona de estudio.

Esta relación entre las anomalías geoquímicas y las litologías mencionadas es acorde a la información existente de las mineralizaciones y sus litologías encajonantes de los depósitos presentes en el Cinturón de Oro Orogenico de Caborca, ya que Izaguirre et al. (2017) establecen que de manera general las mineralizaciones en los depósitos del Cinturón de Oro orogénico de Caborca se generan principalmente, aunque no únicamente, en rocas ígneas y metamórficas del Proterozoico, mientras que Romero Valle (2005) indica que para el caso específico de la Mina La Herradura la mineralización se observa en gneis del Precámbrico.

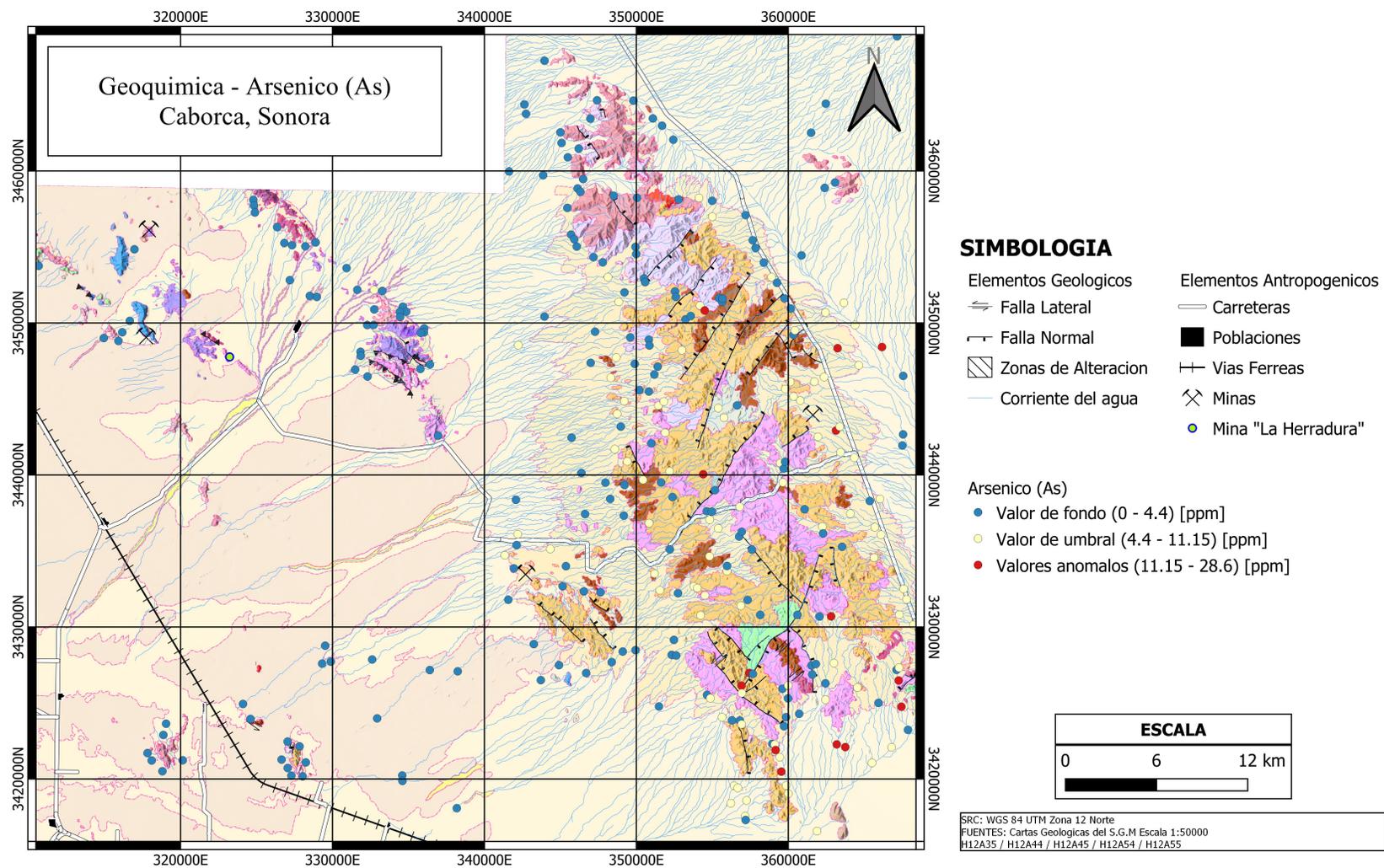


Figura 31: Mapa de la distribución del Arsénico en los sedimentos de arroyo del área de estudio.

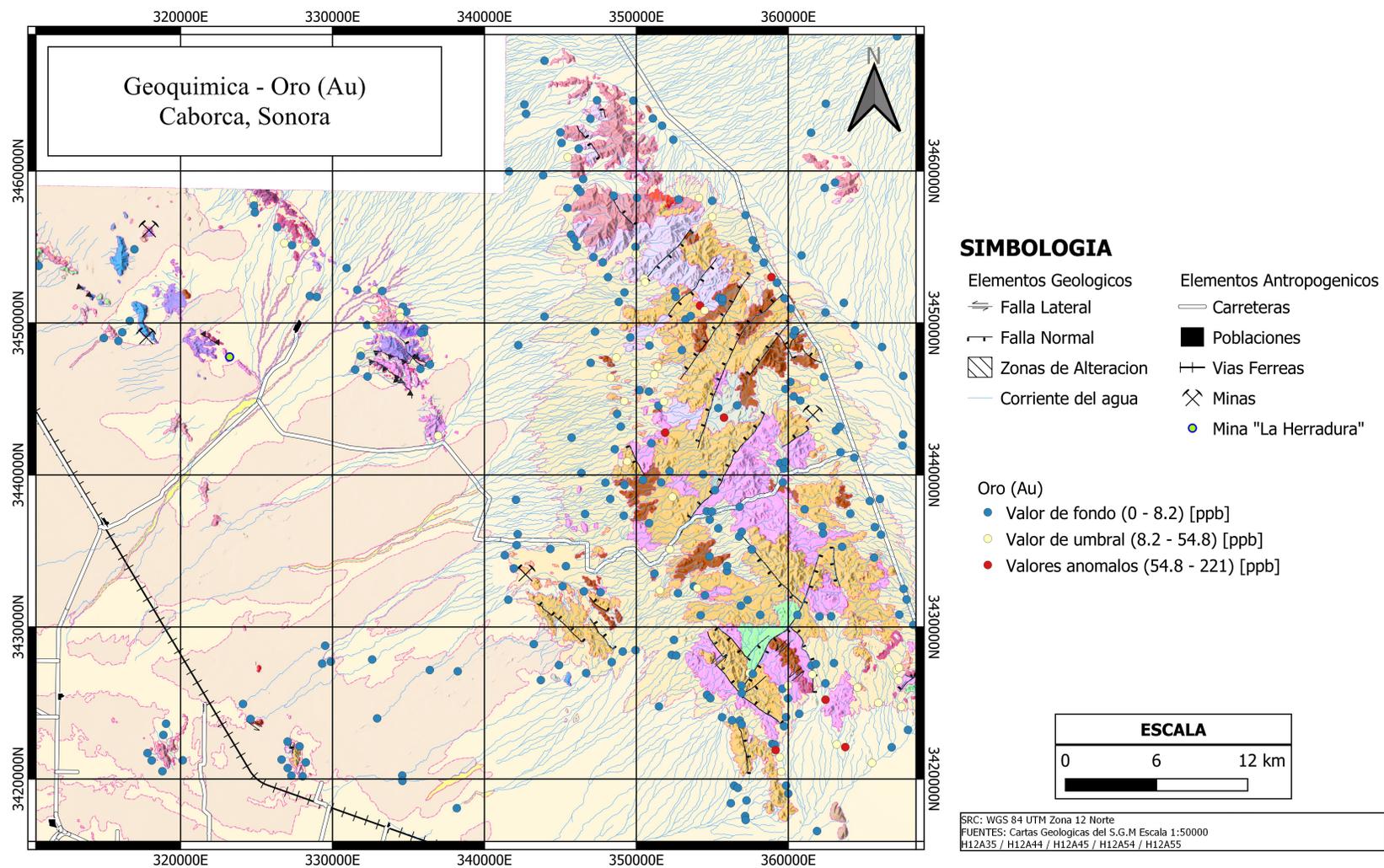


Figura 32: Mapa de la distribución del Oro en los sedimentos de arroyo del área de estudio.

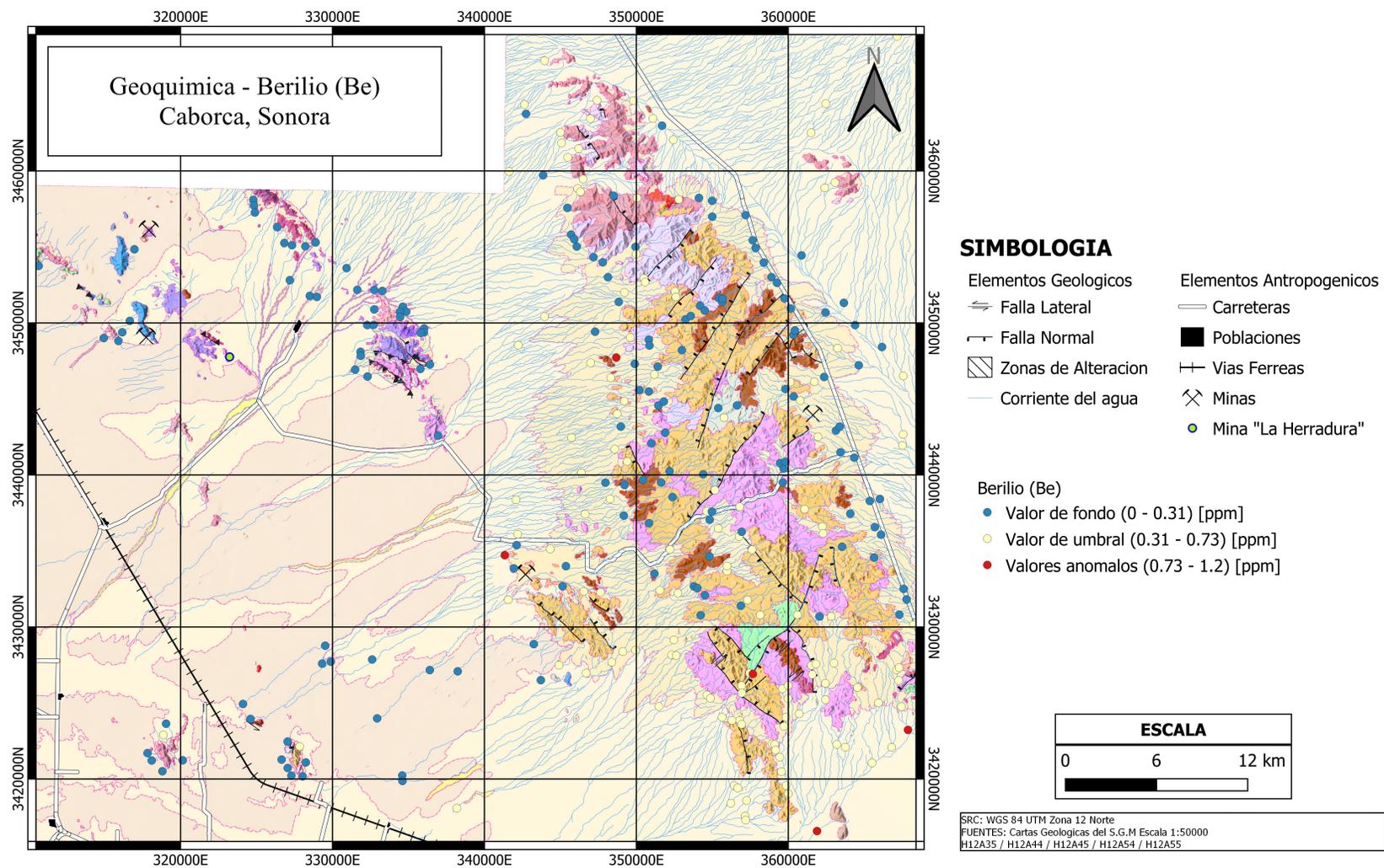


Figura 33: Mapa de la distribución del Berilio en los sedimentos de arroyo del área de estudio.

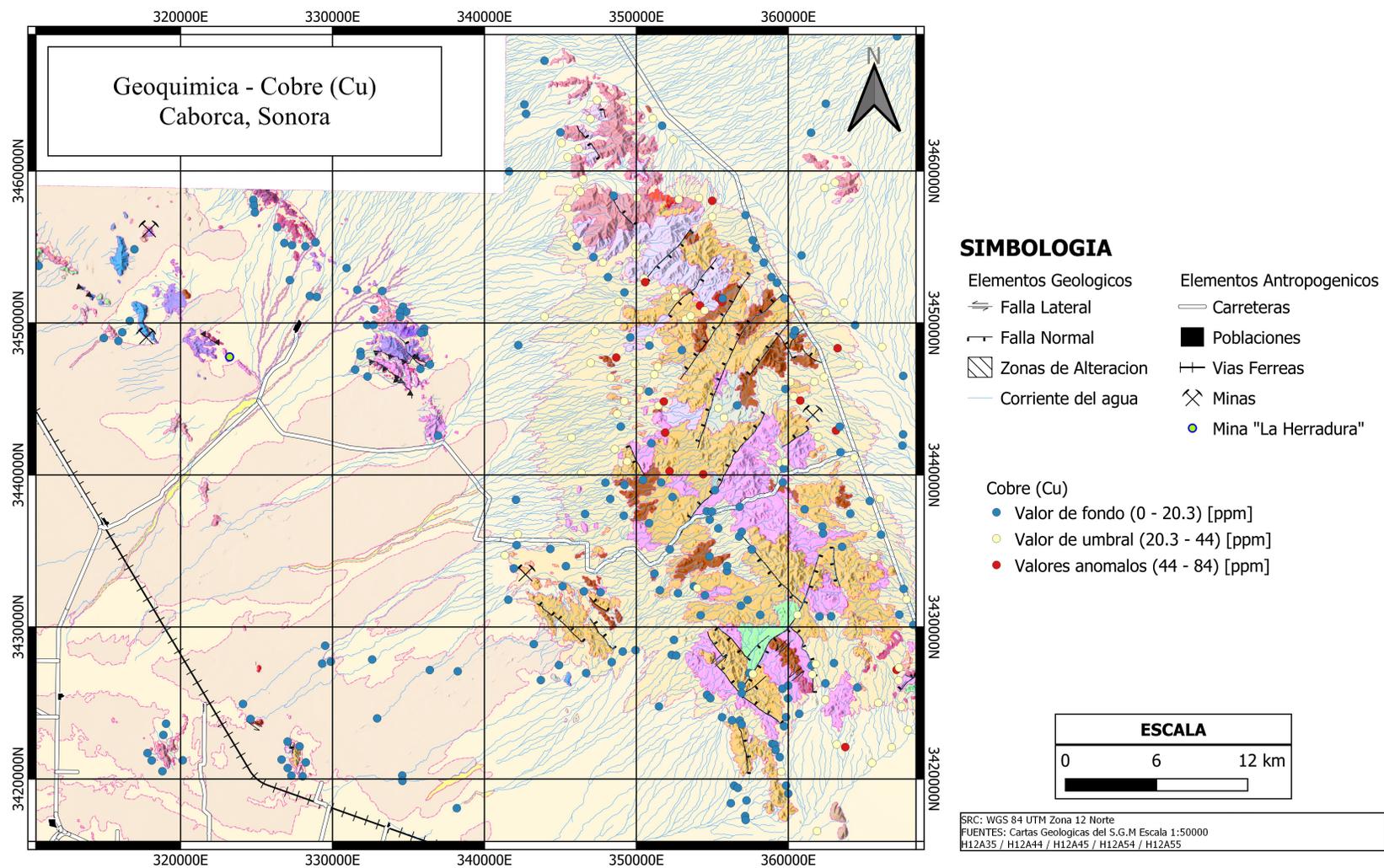


Figura 34: Mapa de la distribución del Cobre en los sedimentos de arroyo del área de estudio.

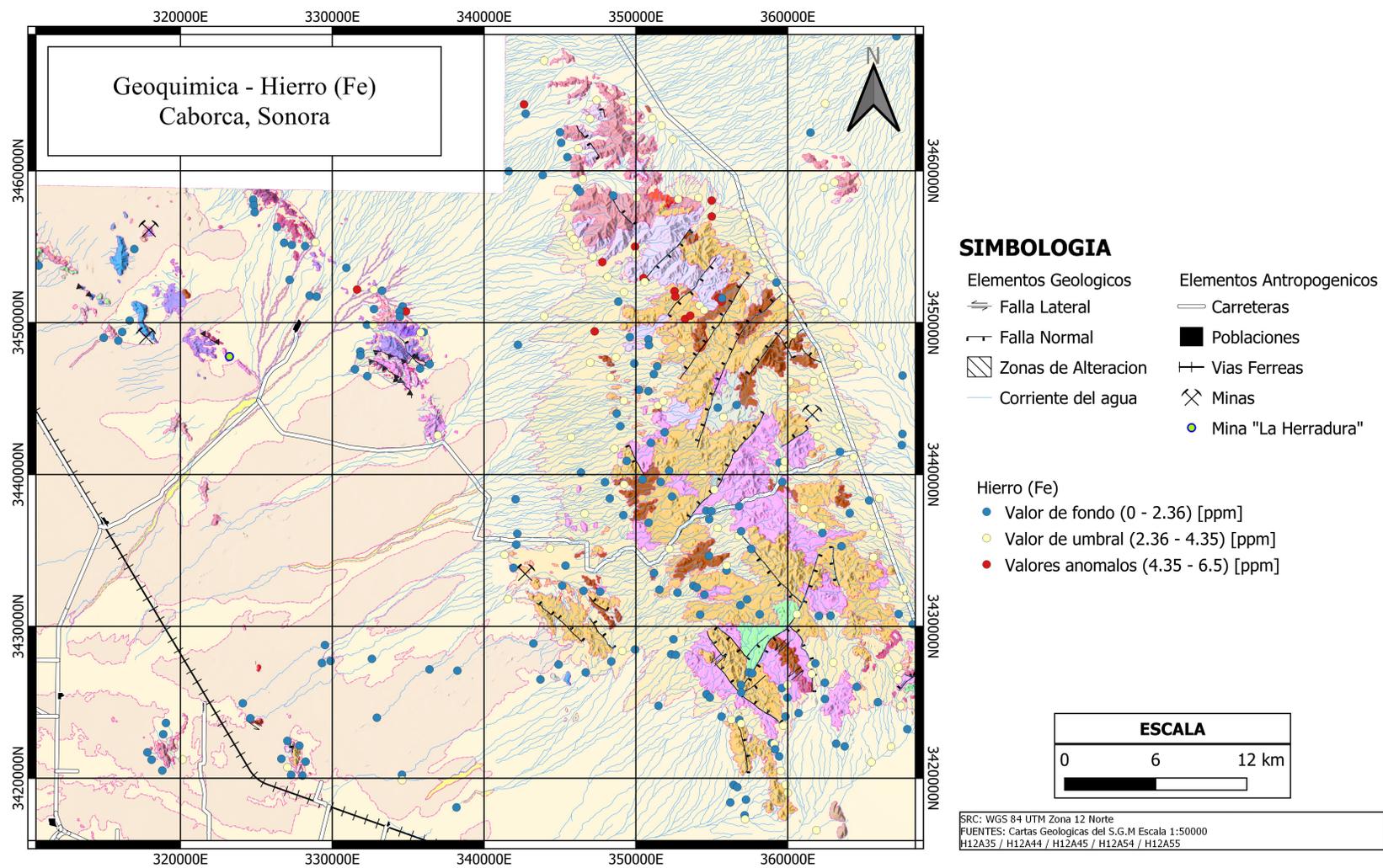


Figura 35: Mapa de la distribución del Hierro en los sedimentos de arroyo del área de estudio.

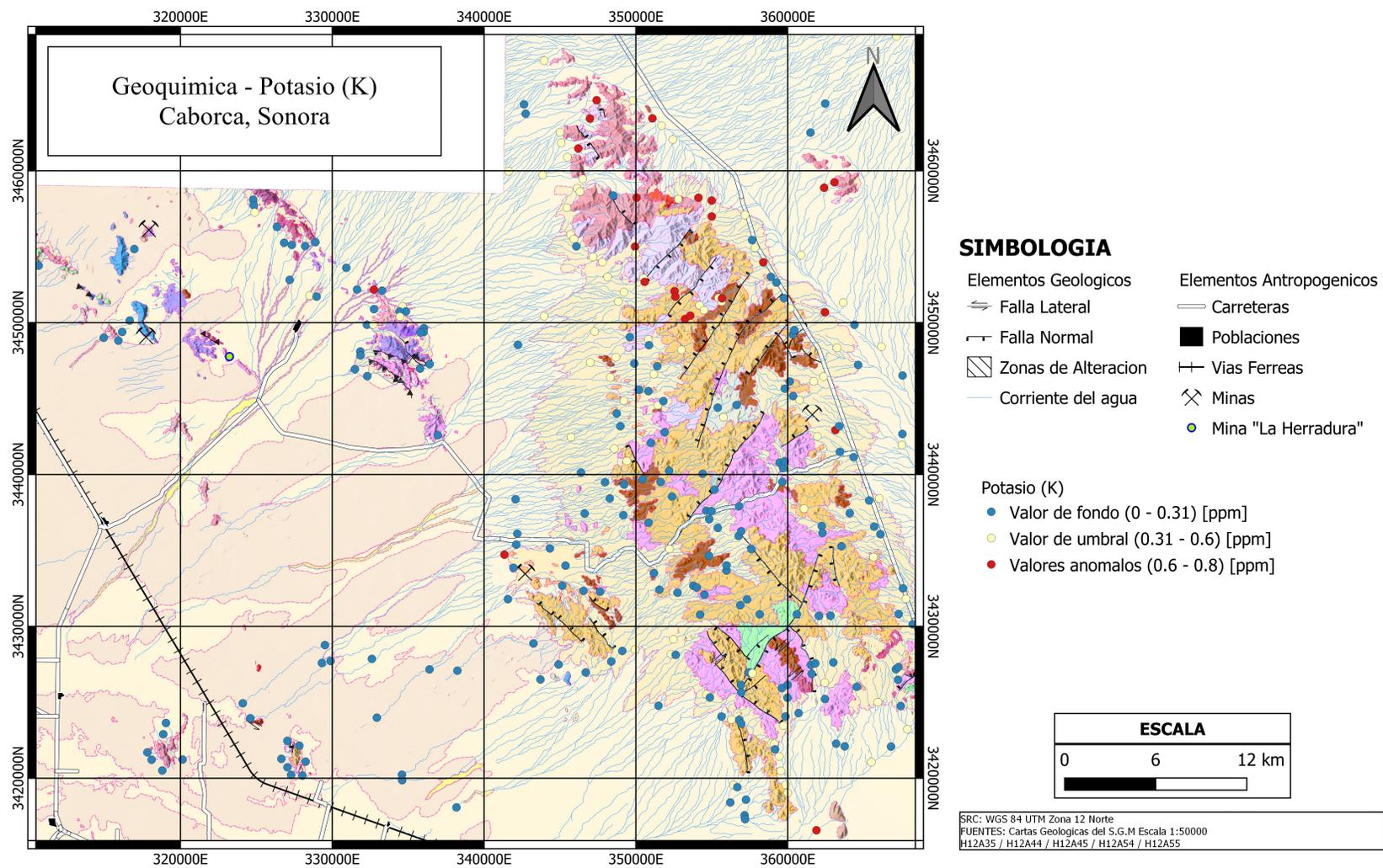


Figura 36: Mapa de la distribución del Potasio en los sedimentos de arroyo del área de estudio.

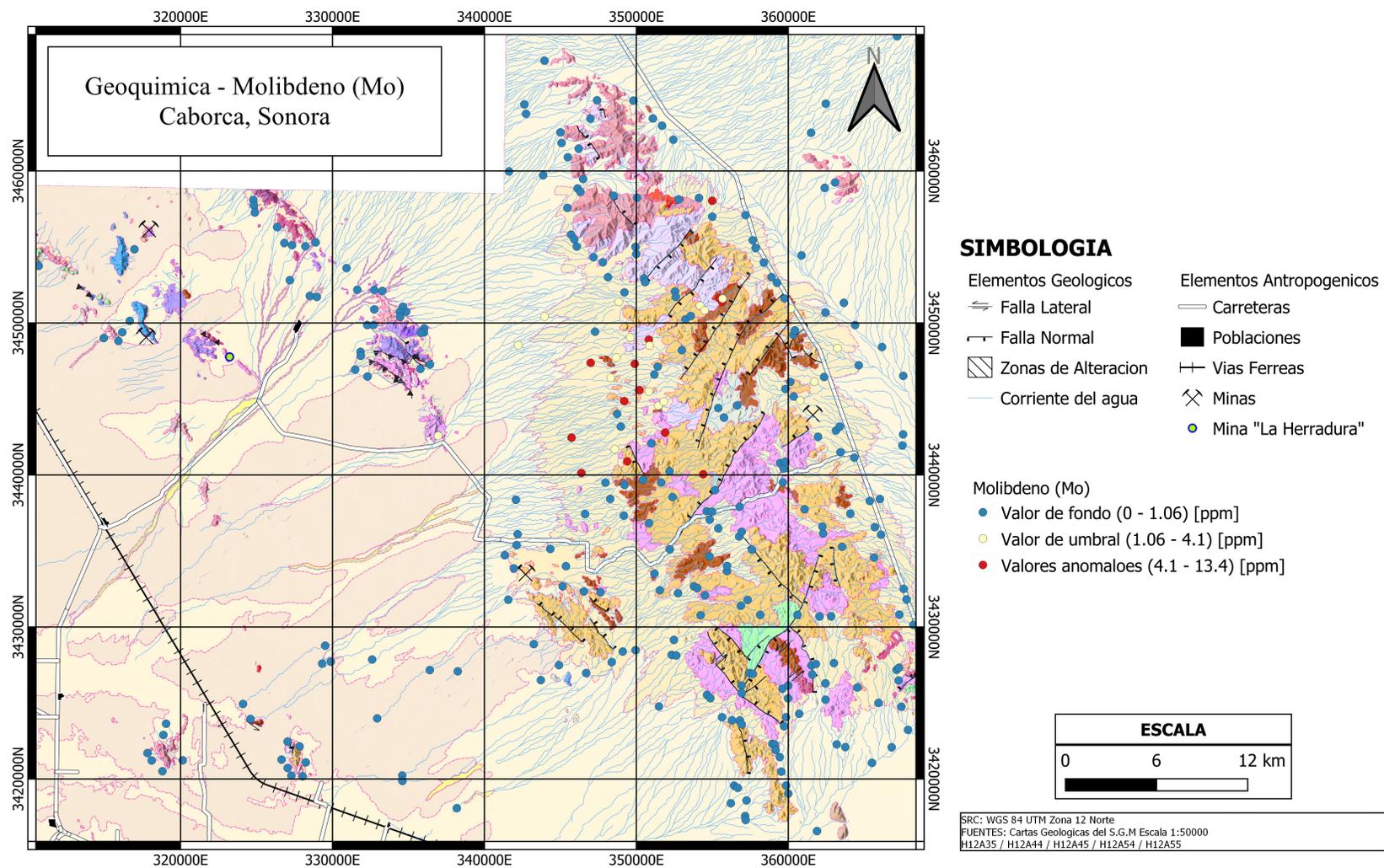


Figura 37: Mapa de la distribución del Molibdeno en los sedimentos de arroyo del área de estudio.

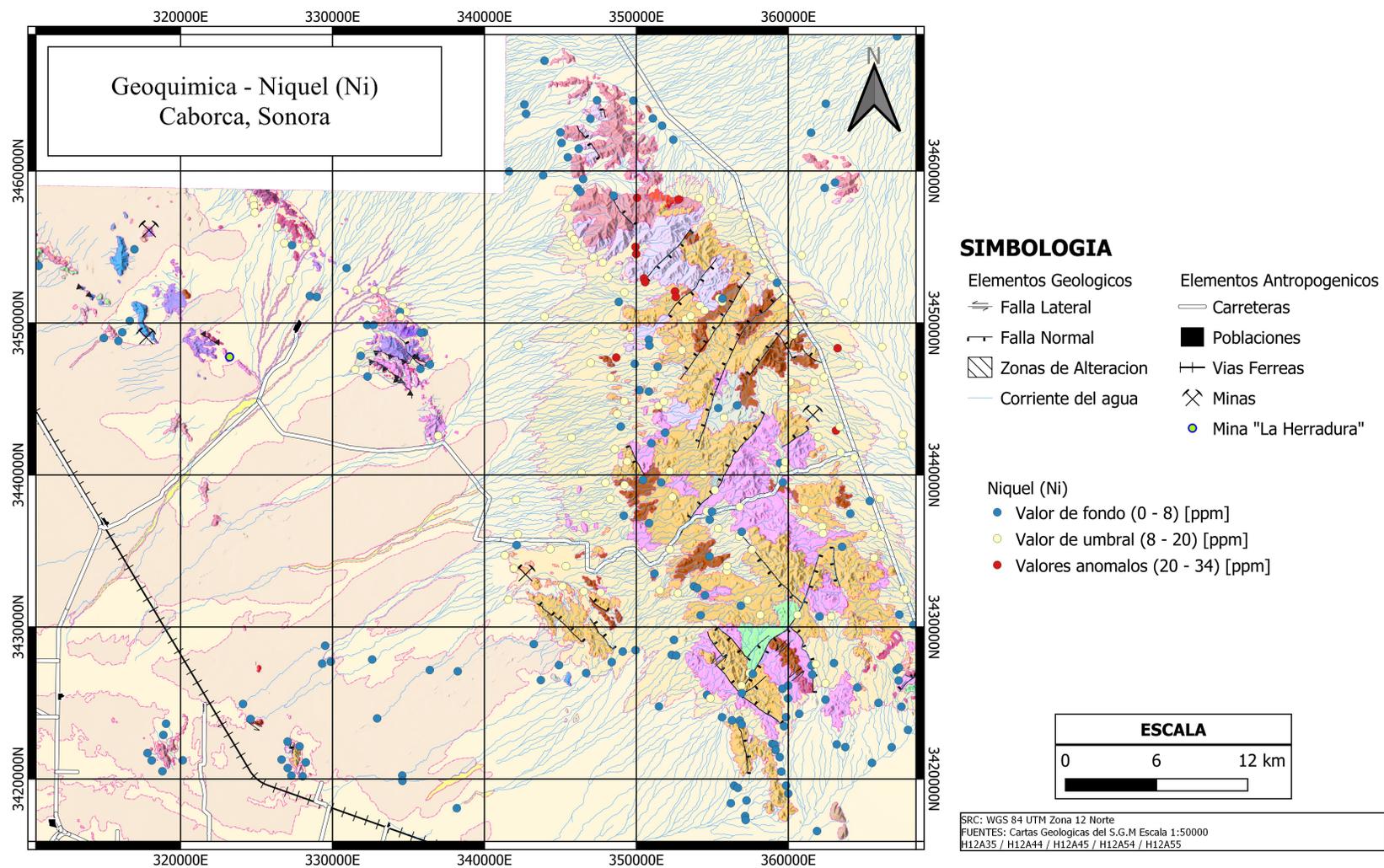


Figura 38: Mapa de la distribución del Níquel en los sedimentos de arroyo del área de estudio.

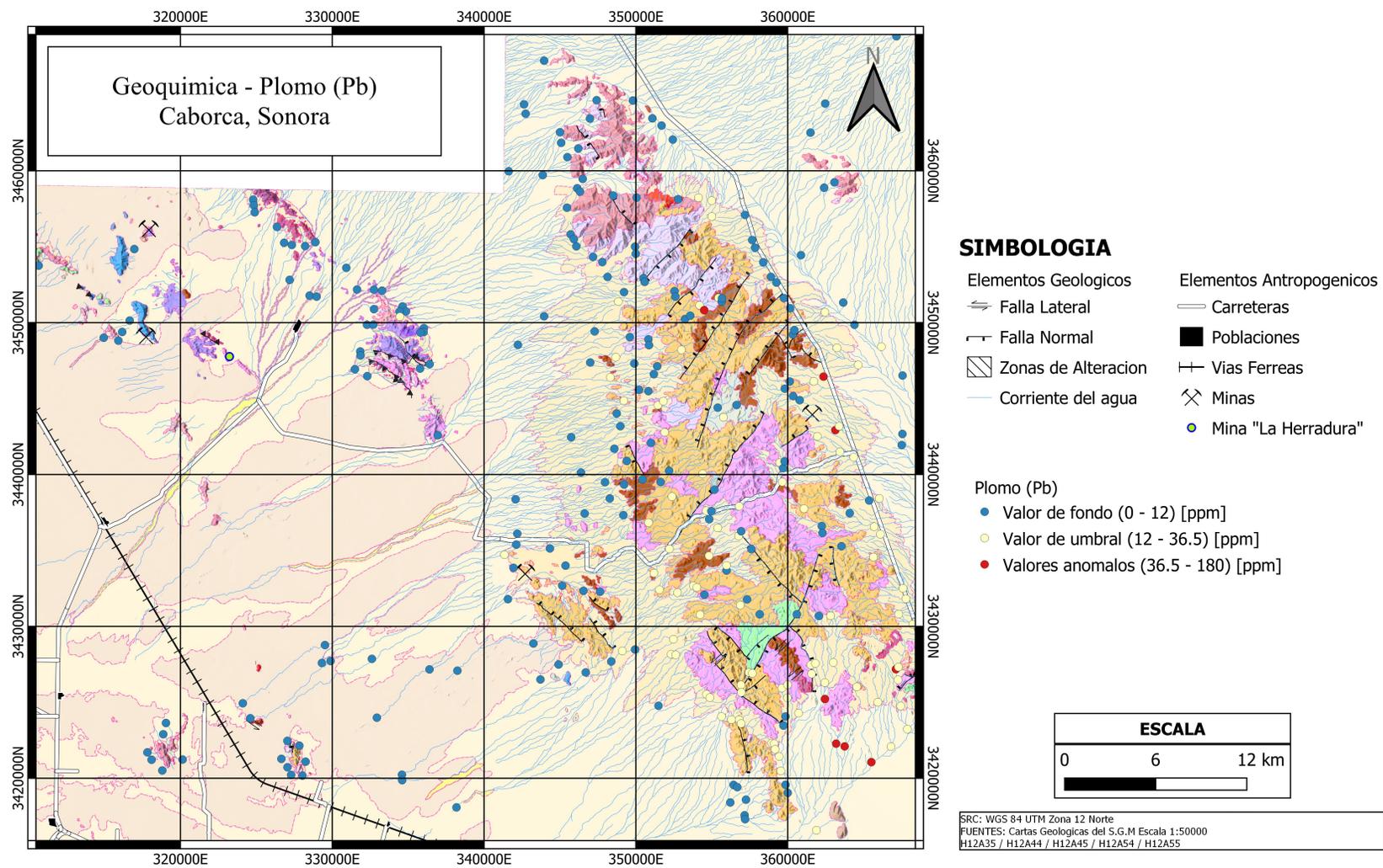


Figura 39: Mapa de la distribución del Plomo en los sedimentos de arroyo del área de estudio.

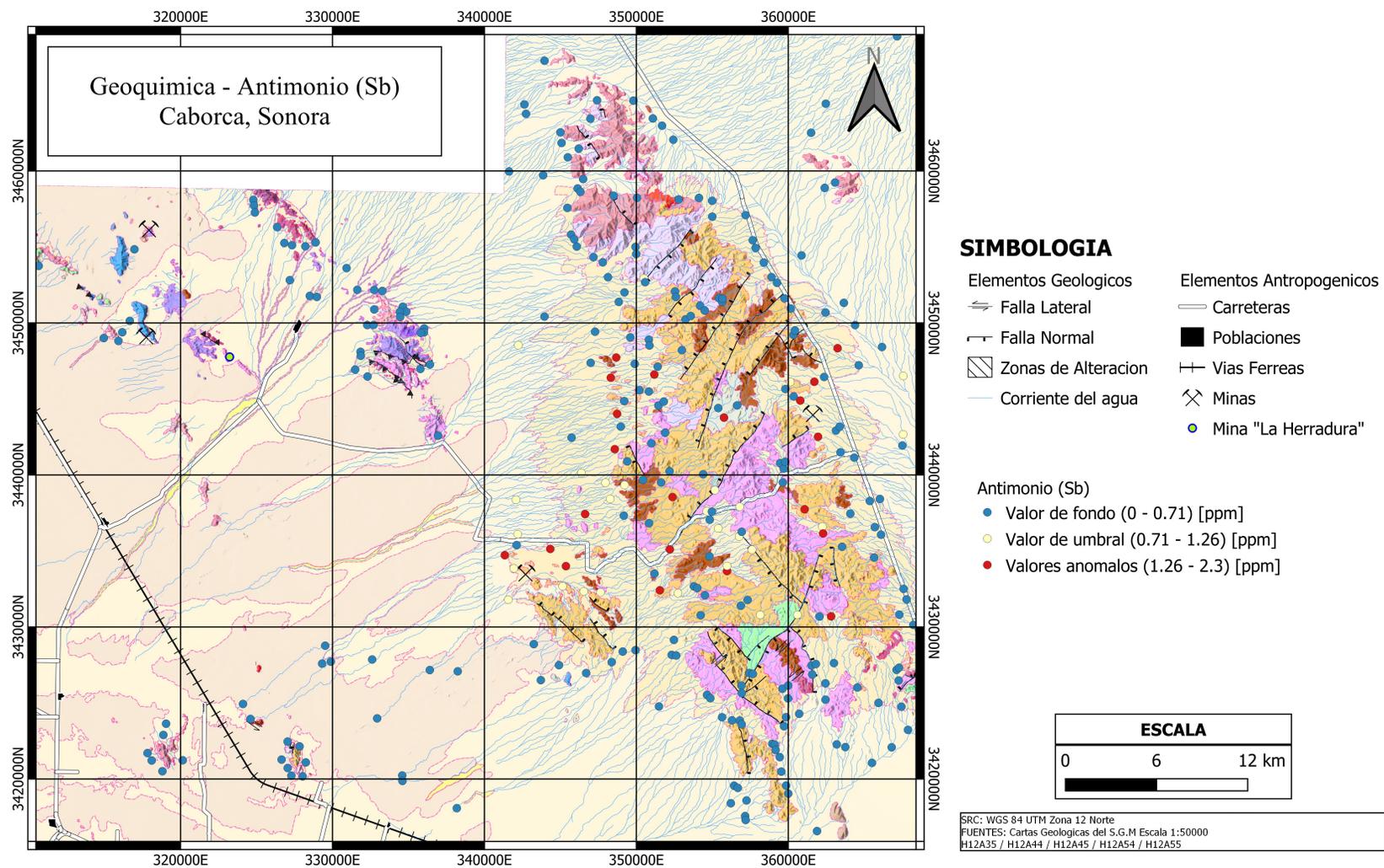


Figura 40: Mapa de la distribución del Antimonio en los sedimentos de arroyo del área de estudio.

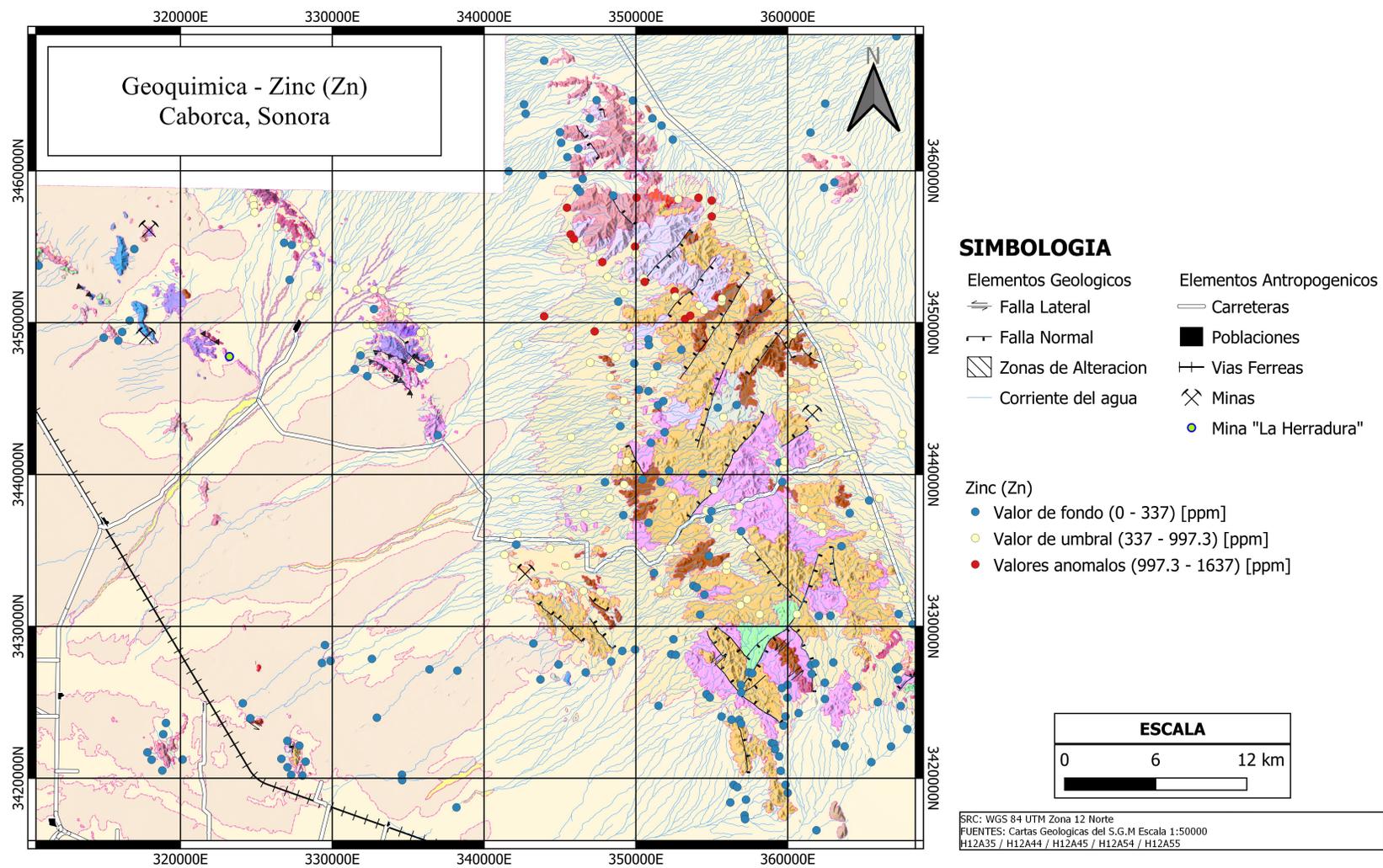


Figura 41: Mapa de la distribución del Zinc en los sedimentos de arroyo del área de estudio.

5. Metodología

5.1. Materiales

5.1.1. Software

Para realizar el proyecto se hizo uso de software para el procesamiento y análisis de imágenes satelitales y de los sistemas de información geográfica, específicamente se hizo uso de ENVI y QGIS respectivamente.

El programa QGIS es un sistema de información geográfica (SIG) de código abierto y libre uso, fue utilizado para georreferenciar la información y los resultados obtenidos, así como para la creación de mapas; se utilizó la versión QGIS 3.16.1.

El software ENVI es un programa utilizado para el procesamiento y análisis de las imágenes satelitales en la percepción remota, todo el preprocesamiento y procesamiento de las imágenes ASTER fue realizado mediante dicho software; se utilizó la versión ENVI 5.3.

5.1.2. Imágenes satelitales

Se hace uso de cuatro imágenes multiespectrales del sensor ASTER a nivel L1T (*ASTER Level 1 Precision Terrain Corrected Registered At-Sensor Radiance*).

Dos de las imágenes utilizadas fueron adquiridas por el sensor el 7 de Octubre del 2004 con segundos de diferencia entre una y otra, siendo la primera capturada a las 18 horas con 21 minutos y 4 segundos mientras la segunda fue capturada a las 18 horas con 21 minutos y 13 segundos. Las tercera y cuarta imágenes utilizadas fueron capturada el día 23 de Octubre del 2004 a las 18 horas con 20 minutos y 50 segundos y a las 18 horas con 20 minutos y 59 segundos respectivamente.

Los nombres o identificadores de las imágenes utilizados son los siguientes:

- AST_L1T_00310072004182104_20150506143436_37803
- AST_L1T_00310072004182113_20150506143444_39333
- AST_L1T_00310232004182050_20150506193349_33645
- AST_L1T_00310232004182059_20150506193359_34832

Se seleccionaron estas cuatro imágenes debido a su amplia cobertura no solo del área de estudio si no igual de la región cercana que igualmente podría ser de interés. La cercanía de las fechas de captura asegura la mejor similitud posible de condiciones atmosféricas entre las imágenes, lo que ayuda a evitar diversas problemáticas que se pueden presentar al realizar el mosaico de las imágenes y al realizar diversas técnicas de procesado. Aun tomando en cuenta estas consideraciones se continúan presentando algunos errores en la visualización de las imágenes, los cuales serán considerados en la interpretación, como se explica en la metodología de procesado y los resultados.

Finalmente cabe establecer que se va a trabajar exclusivamente con las bandas del espectro visible e infrarrojo cercano (VNIR) y del infrarrojo de onda corta (SWIR) debido a su probada utilidad en la identificación de alteraciones y minerales relacionados a dichas alteraciones, decidiendo en este caso no hacer uso de las bandas del infrarrojo térmico (TIR).

5.2. Preprocesamiento

Las imágenes ASTER L1T ya se encuentran georreferenciadas y así mismo ya cuentan con la corrección por Cross-Talk y con la corrección radiométrica, las cuales buscan compensar errores y/o distorsiones en la adquisición de las imágenes debido a factores externos al sensor, con esto solo queda la necesidad de aplicar una corrección atmosférica.

5.2.1. Calibración radiométrica

Aunque las imágenes a nivel L1T ya cuentan con una corrección radiométrica los valores de píxel corresponden a valores de número digital (DN), para convertirlos a valores de radiancia en el sensor en las unidades correctas es necesario aplicar los coeficientes de conversión proporcionados en el manual del sensor ASTER (Abrams, Hook & Ramachandran, 2002).

Para realizar este paso de manera automática se hace uso del módulo *Radiometric Calibration* del software ENVI el cual utiliza los valores de ganancia y offset de cada banda, valores provenientes del metadata de las imágenes, y la siguiente ecuación para hacer la calibración:

$$Radiancia = Ganancia * ND + Offset$$

Los valores de radiancia resultantes quedan en unidades de $[W/(m^2 * sr * \mu m)]$ (L3 Harris Geospatial Solutions, 2020).

La calibración radiométrica se le realiza por separado a cada conjunto de bandas (VNIR y SWIR).

5.2.2. Remuestreo de capas

Debido a la diferencia de resolución espacial entre las capas del VNIR y del SWIR se realiza el remuestreo necesario para igualarlas.

Aunque existe la posibilidad del aumento del error que se presentaría en los resultados generados, debido a la interpolación de información, se decidió remuestrear las bandas del SWIR de 30 [m] a 15 [m], para igualarlas a la resolución de las bandas del VNIR.

5.2.3. Corrección atmosférica

La corrección atmosférica tiene la función de eliminar o disminuir las distorsiones que sufre la imagen debido a las interacciones de la atmósfera con el sensor. Para las bandas del VNIR y del SWIR se utilizó la corrección FLAASH.

El módulo FLAASH (Fast Line-of-sight Atmospheric Analysis of Spectral Hypercubes) es una de las formas de corrección atmosférica disponibles, se basa en el algoritmo de transferencia de radiación MODTRAN4, el cual elimina los efectos de absorción y dispersión, causados por las partículas atmosféricas en suspensión, que afectan las mediciones de radiancia del sensor (Aguilar Arias, Mora Zamora & Vargas Bolaños, 2015).

5.3. Procesamiento

5.3.1. Enmascaramiento de vegetación

Para evitar problemas en la interpretación de los resultados espectrales es necesario disminuir o eliminar la influencia que genera la vegetación en el área de estudio mediante una máscara que elimine la respuesta espectral biogénica registrada.

Para identificar la vegetación se hace uso del *Soil-adjusted vegetation index (SAVI)*, este índice busca minimizar la influencia del brillo del suelo al momento de identificar vegetación por lo que se vuelve muy útil en las regiones áridas o semi-áridas donde la vegetación no es tan densa tal como establece Huete (1998), el creador del índice.

Al tener identificada la vegetación, mediante el software *ENVI* se crea y aplica la máscara al mosaico de las imágenes ASTER creado con anterioridad, con este paso acabado se puede proceder a los siguientes métodos de procesamiento espectral.

5.3.2. Cocientes de bandas

Los cocientes de bandas buscan mejorar las diferencias espectrales entre bandas permitiendo la discriminación y realce de materiales en las regiones de estudio. En este caso se busca identificar las alteraciones argílicas, propilíticas y fílicas, así como la mezcla de estos elementos, debido a su relación con los yacimientos económicamente importantes de la región, tomando como base la información recopilada de la Unidad Minera “La Herradura” y de otros depósitos del Cinturón de Oro Orogénico de Caborca.

El cociente de alteración argílica busca resaltar los minerales relacionados a esta alteración, como la caolinita, la alunita y la pirofilita, que cuentan con alta reflectancia en la banda 4 y absorbancia en la banda 5.

El cociente de alteración propilítica resalta minerales relacionados, como la epidota y la clorita, con reflectancia en la banda 5 y absorbancia en la banda 8.

El cociente de alteración fílica resalta algunos minerales relacionados, como la sericita y asociados, que cuentan con alta reflectancia en la banda 4 y absorbancia en la banda 7.

Por lo que los cocientes quedan de la siguiente manera:

– Alt. argílica: $\frac{B4}{B5}$

– Alt. Propilítica: $\frac{B5}{B8}$

– Alt. Fílica: $\frac{B4}{B7}$

Los resultados de los cocientes de bandas no serán analizados de manera individual, en su lugar se analizará la composición a falso color resultante de la unión de dichos cocientes.

5.3.3. Composición a falso color

Las composiciones a falso color permiten visualizar información, que normalmente no sería visible al ojo humano, al asignarle un color del espectro visible facilitando así la interpretación de la información espectral. Para este proyecto en específico, buscando un primer acercamiento a la delimitación de posibles zonas anómalas con alteraciones de interés minero se realiza una composición a falso color con cocientes de banda.

La composición se realiza utilizando los cocientes de banda de las alteraciones argílica, propilítica y fílica, quedando la asignación de colores de la manera en que se observa en la siguiente tabla.

Color real	Cociente de Banda
R	Alteración Argílica (B4 / B5)
G	Alteración Propilítica (B5 / B8)
B	Alteración Fílica (B4 / B7)

5.3.4. Índices mineralógicos

Los índices espectrales buscan indicar la abundancia de un material o conjunto de materiales de interés mediante la combinación de pares de bandas aprovechando la reflectancia y absorbancia de dicho material. Debido al objetivo del proyecto se hará uso específicamente de ciertos índices mineralógicos buscando detectar minerales relacionados a las alteraciones hidrotermales.

Los índices a utilizar son los siguientes:

- Índice de caolinita
- Índice de minerales con compuesto OH, grupo A

– Índice de minerales con compuesto OH, grupo B

Los índices de caolinita y de minerales con compuesto OH fueron desarrollados por Ninomiya (2003, 2004). Tal como explica Ninomiya (2004), el índice de minerales con compuesto OH grupo A busca identificar minerales como la montmorillonita que cuentan con una fuerte absorción en la banda 6, mientras que el índice de minerales con compuesto OH grupo B busca identificar minerales como la pirofilita que cuentan con fuerte absorción en la banda 5.

Aunque no provienen propiamente de un índice mineralógico, Ninomiya indica que los píxeles identificados tanto por el grupo A como por el grupo B pertenecen a un tercer grupo compuesto por minerales como la caolinita y la alunita que tienen fuerte absorción tanto en la banda 5 como en la banda 6.

5.3.5. Filtrado emparejado (Matched Filtering)

El método de *Matched Filtering* es una técnica de desmezclado o segregación espectral que utiliza el vector promedio y la matriz de covarianza para identificar firmas espectrales conocidas mientras se suprimen los elementos desconocidos (El Zalaky & Abd Elmonsif, 2016).

Siguiendo la información de Romero Valle (2005) acerca de las mineralizaciones existentes en la mina La Herradura se busca identificar minerales como la alunita, la dickita, la caolinita, la montmorillonita, la epidota y la clorita.

La resolución espectral del satélite ASTER no permite delimitar de manera precisa entre minerales con características espectrales similares por lo que los minerales mencionados se agrupan acorde a las alteraciones minerales:

- Alt. Argílica Avanzada
 - Alunita
 - Dickita
 - Caolinita

- Alt. Argílica
 - Caolinita
 - Montmorillonita

- Alt. Propilítica
 - Clorita
 - Epidota

La identificación de estos minerales se realiza mediante firmas espectrales obtenidas de la séptima versión de la librería espectral publicada por el Servicio Geológico de Estados Unidos (Kokaly et al., 2017), esto debido a que no se cuenta con muestras de los minerales y/o alteraciones minerales del área de estudio que permitan obtener firmas espectrales específicas para la zona.

6. Resultados

6.1. Resultados del análisis espectral en el área de estudio

La identificación de zona de interés minero se realiza siguiendo una metodología que va de lo general a lo específico, comenzando con una identificación general mediante los métodos de composición a falso color (formada por cocientes de bandas) e índices mineralógicos para proceder a delimitar zonas específicas mediante el método de *Matched Filtering*.

6.1.1. Composición a falso color

La composición a falso color generada con los cocientes de banda, figura 42 y 43, nos permite observar la presencia de materiales con reflectancia en la banda 4 (1.6 - 1.7 [μm]) y absorbancia en la banda 5 (2.145 - 2.185 [μm]) los cuales se relacionan a la **alteración argílica** y se observan en **color rojo**, materiales con reflectancia en la banda 5 (2.145 - 2.185 [μm]) y absorbancia en la banda 8 (2.295 - 2.365 [μm]) los cuales se relacionan a la **alteración propilítica** y se observan en **color verde** y materiales con reflectancia en la banda 4 (1.6 - 1.7 [μm]) y absorbancia en la banda 7 (2.235 - 2.285 [μm]) los cuales se relacionan a la **alteración fílica** y se observan en **color azul**.

Así mismo se indican las zonas donde se presenta una mezcla de estos materiales, entendiéndose mezcla como la presencia de ambos materiales en un solo píxel.

Para la descripción de resultados se simplificara lo antes descrito mencionando directamente las alteraciones minerales dando por entendida la relación entre las bandas espectrales y las alteraciones, así mismo al utilizar los cocientes de banda y la composición a falso color como un primer acercamiento a la identificación de zonas de interés minero, para una posterior delimitación mediante otros métodos espectrales, se asume que todos los materiales identificados mediante esta composición a falso color corresponden a las

alteraciones a identificar.

Para identificar las zonas correspondientes a cada grupo de materiales se hace uso de las imágenes 42 y 43, siendo la figura 42 la composición original mientras que la figura 43 corresponde a una composición a la cual se le aplicó un estiramiento de decorrelación, este estiramiento ayuda a distinguir entre un material y otro al remover o amortiguar la alta correlación que puede presentar la información espectral.

En la mina La Herradura la composición a falso color indica la presencia de materiales relacionados a la alteración argílica así como su mezcla con alteración fílica, todo esto rodeado principalmente de alteración propilítica. En las montañas cercanas a esta unidad minera se detectan principalmente materiales posiblemente relacionados a la alteración propilítica con menores concentraciones de esta alteración propilítica con materiales relacionados a la alteración fílica.

Por otra parte, en la porción sur de la sierra localizada en el extremo este de la zona de estudio dominan los materiales relacionados a la alteración fílica, los cuales se juntan con menores concentraciones de materiales relacionados a la mezcla de la alteración argílica y propilítica; en la porción norte dominan materiales relacionados a la alteración propilítica y a la mezcla de la alteración fílica y argílica.

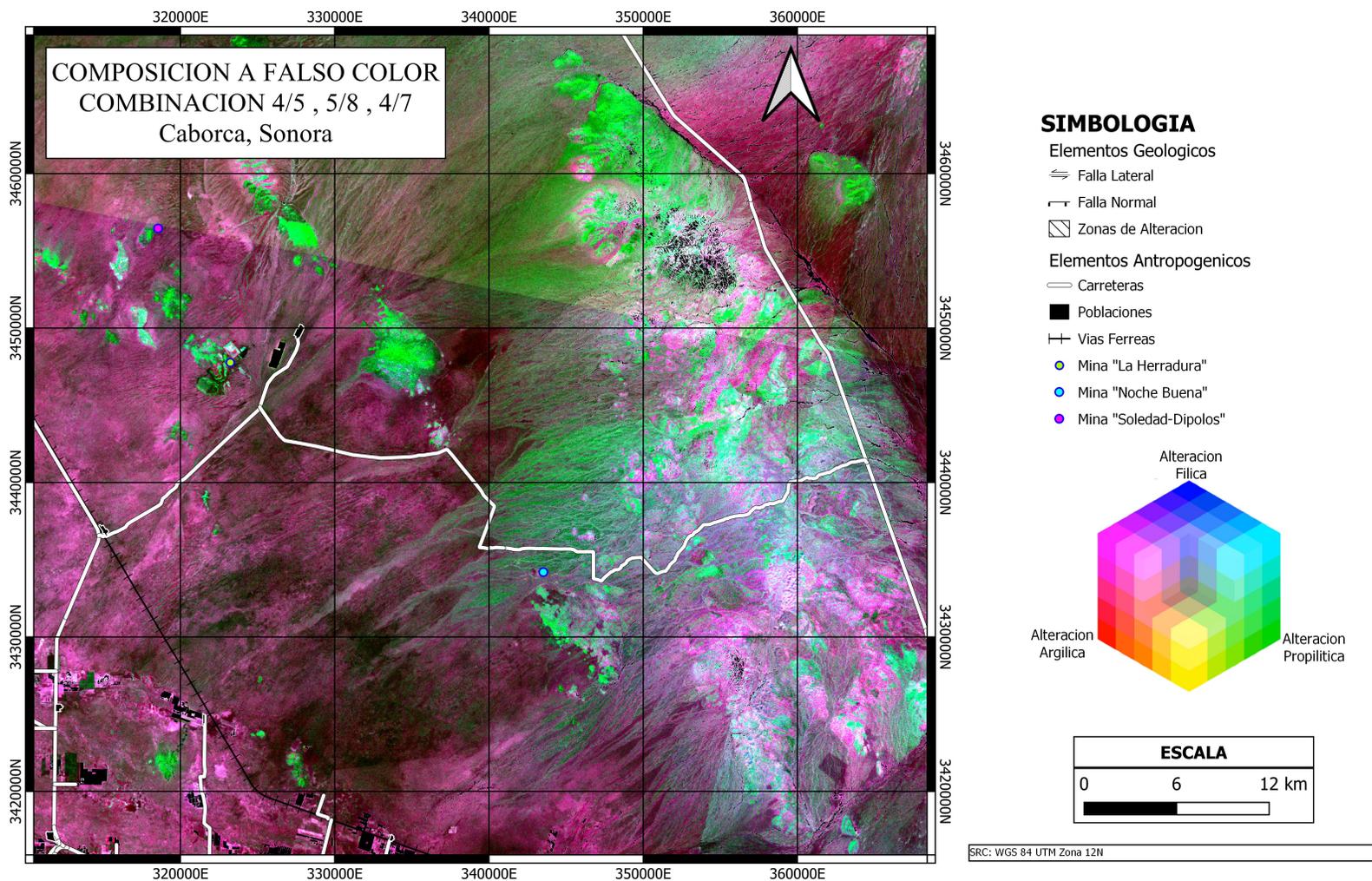


Figura 42: Composición a falso color con la alteración argílica en el rojo (R), la alteración propilítica en el verde (G) y la alteración filica en el azul (B).

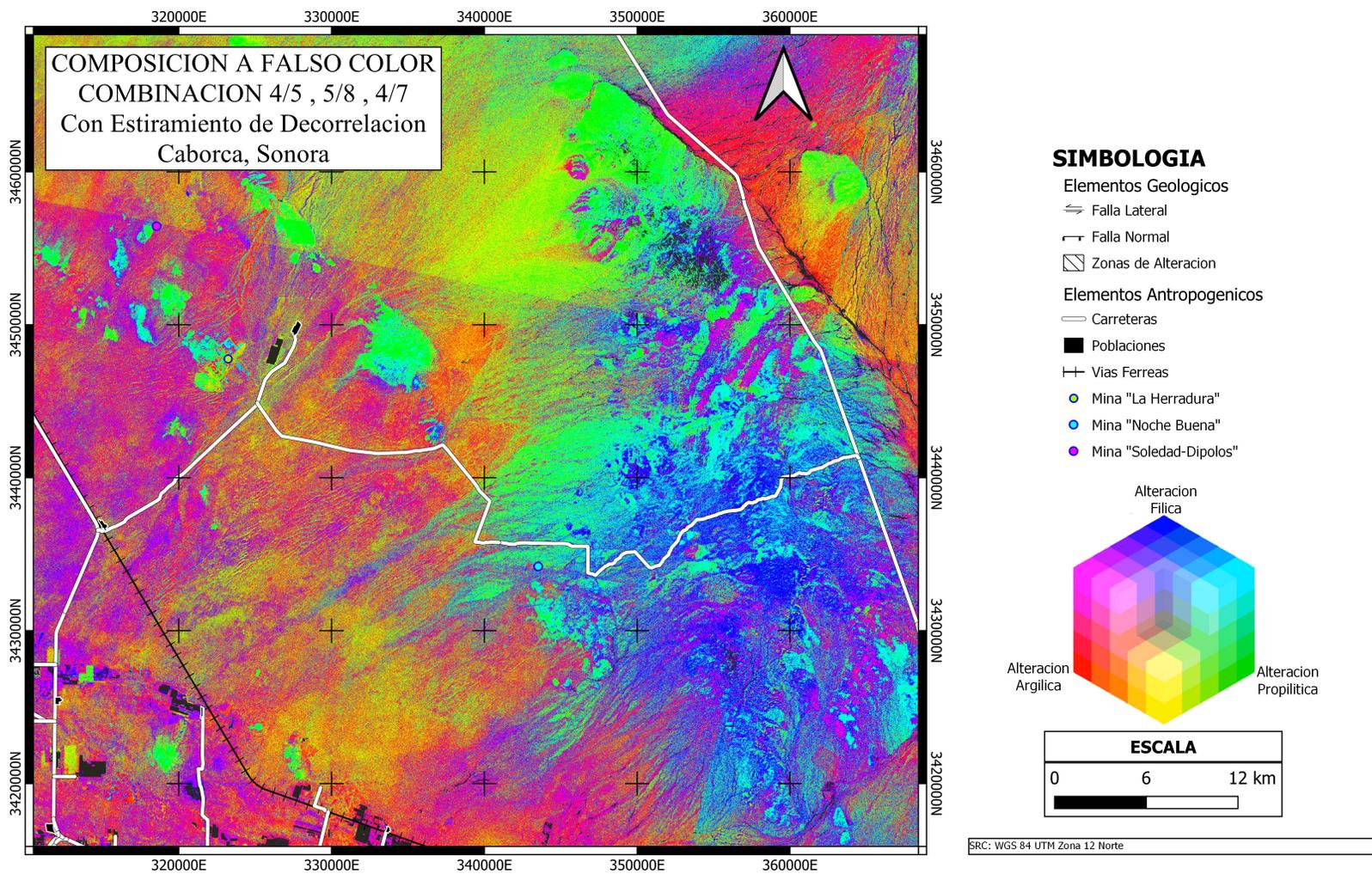


Figura 43: Composición a falso color con la alteración argílica en el rojo (R), la alteración propilítica en el verde (G) y la alteración fílica en el azul (B), a la cual se le aplico un estiramiento de decorrelación.

6.1.2. Índice mineralógico

El uso de los índices mineralógicos, figura 44, permitió la identificación de aglomeraciones de minerales y grupos de minerales en diversas zonas del área de estudio.

Cabe recordar que en los índices mineralógicos los resultados del compuesto OH grupo A busca identificar minerales como la montmorillonita que cuentan con una fuerte absorción en la banda 6, el compuesto OH grupo B busca identificar minerales como la pirofilita que cuentan con fuerte absorción en la banda 5 y el grupo C se compone por minerales como la caolinita y la alunita que tienen fuerte absorción tanto en la banda 5 como en la banda 6.

Se identifica en la Unidad Minera La Herradura la presencia de píxeles relacionados a la caolinita y a otros minerales con el compuesto OH, delimitando lo que aparenta ser tajos a cielo abierto y otras estructuras de la unidad. A aproximadamente 15 [km] de la unidad minera, en dirección NW y E, se identifican concentraciones de minerales con compuesto OH, principalmente del grupo A con una menor participación del grupo C.

En el extremo oriente de la zona de estudio se identifican concentraciones de los minerales con compuesto OH así como de caolinita a lo largo de la sierra, con las mayores concentraciones localizándose entre las coordenadas 3 443 600 – 3 456 500 [mN] y al sur de la coordenada 3 435 000 [mN].

En la porción oriente de la zona de estudio los píxeles identificados se distribuyen sobre casi todas las litologías ígneas y metamórficas que afloran, teniendo la mayor presencia sobre las riolitas mientras que casi no se tiene presencia sobre los cuerpos intrusivos al norte de la sierra. En la porción poniente los píxeles identificados se distribuyen principalmente sobre los afloramientos de cuarcitas y metariolitas.

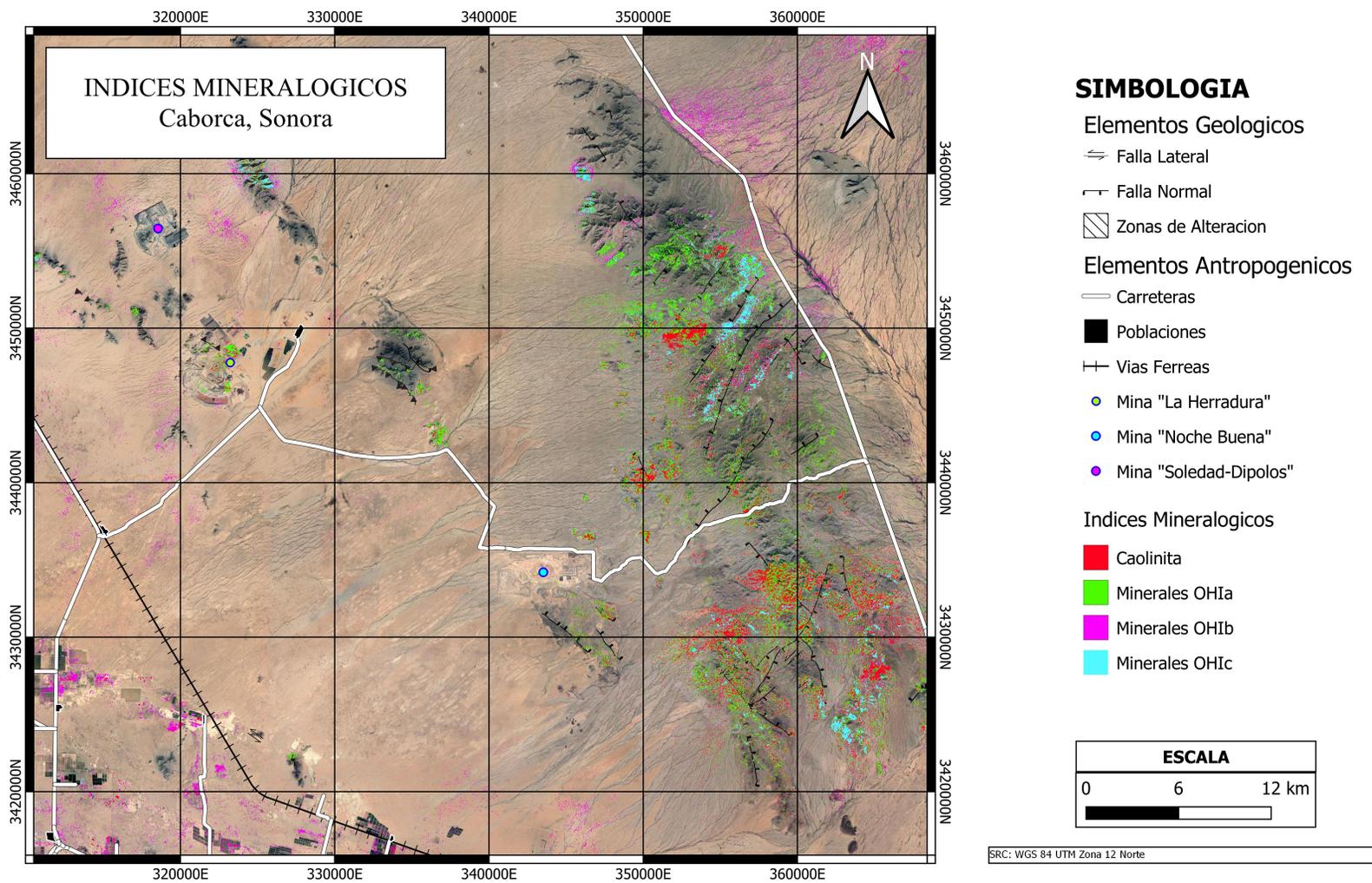


Figura 44: Identificación de minerales de interés mediante índices mineralógicos.

6.1.3. Filtrado emparejado (Matched Filtering)

El método de Matched Filtering (*MF*), figura 45, permite delimitar de mejor manera las zonas con alteraciones propilítica, argílica y argílica avanzada al identificar los minerales relacionados a estas alteraciones.

Romero Valle (2005) y Quintanar Ruiz (2008) establecen la presencia de alteración filica, argílica y propilítica en la unidad minera La Herradura, con el método de *Matched Filtering* se identifica la presencia de minerales relacionados a alteración argílica (así como a la argílica avanzada) y a la alteración propilítica.

En las pequeñas montañas que se van presentando en una distancia de hasta 15 [km] en dirección NW de la unidad minera La Herradura se identifican minerales relacionados a la alteración propilítica y argílica. Se identifica la presencia de la alteración argílica sobre la unidad de cuarcitas “Sierra Prieta” mientras que la alteración propilítica se identifica sobre la anortosita “Sierra Prieta”, el ortogneis “La Herraduraz las calizas y cuarcitas “La Ventana”, unidades geológicas reportadas por Izaguirre (2009).

A aproximadamente 15 [km] al este de la unidad minera La Herradura se identifican minerales relacionados a la alteración argílica y argílica avanzada sobre una unidad de metariolitas.

En el extremo oriente de la zona de estudio se identifica la presencia de las alteraciones en diversas unidades litológicas sobre el conjunto de montañas que atraviesa la región. Las concentraciones de la alteración propilítica se identifican principalmente sobre unidades andesíticas y riolíticas en la parte central mientras que en el extremo sur se identifican sobre unidades metaandesíticas, metariolíticas y metadioríticas. Las alteraciones argílicas y argílicas avanzadas se identificaron sobre las unidades riolíticas, andesíticas, metariolíticas

y sobre los cuerpos intrusivos granito-granodioríticos.

Las zonas correspondientes a las unidades mineras Noche Buena y Soledad-Dipolos se encuentra recubiertas por sedimentos en las imágenes satelitales utilizadas al haber sido construidas en fechas posteriores a la toma de estas imágenes, a raíz de esto no se identifican alteraciones minerales que se relacionen espacialmente con las unidades mineras.

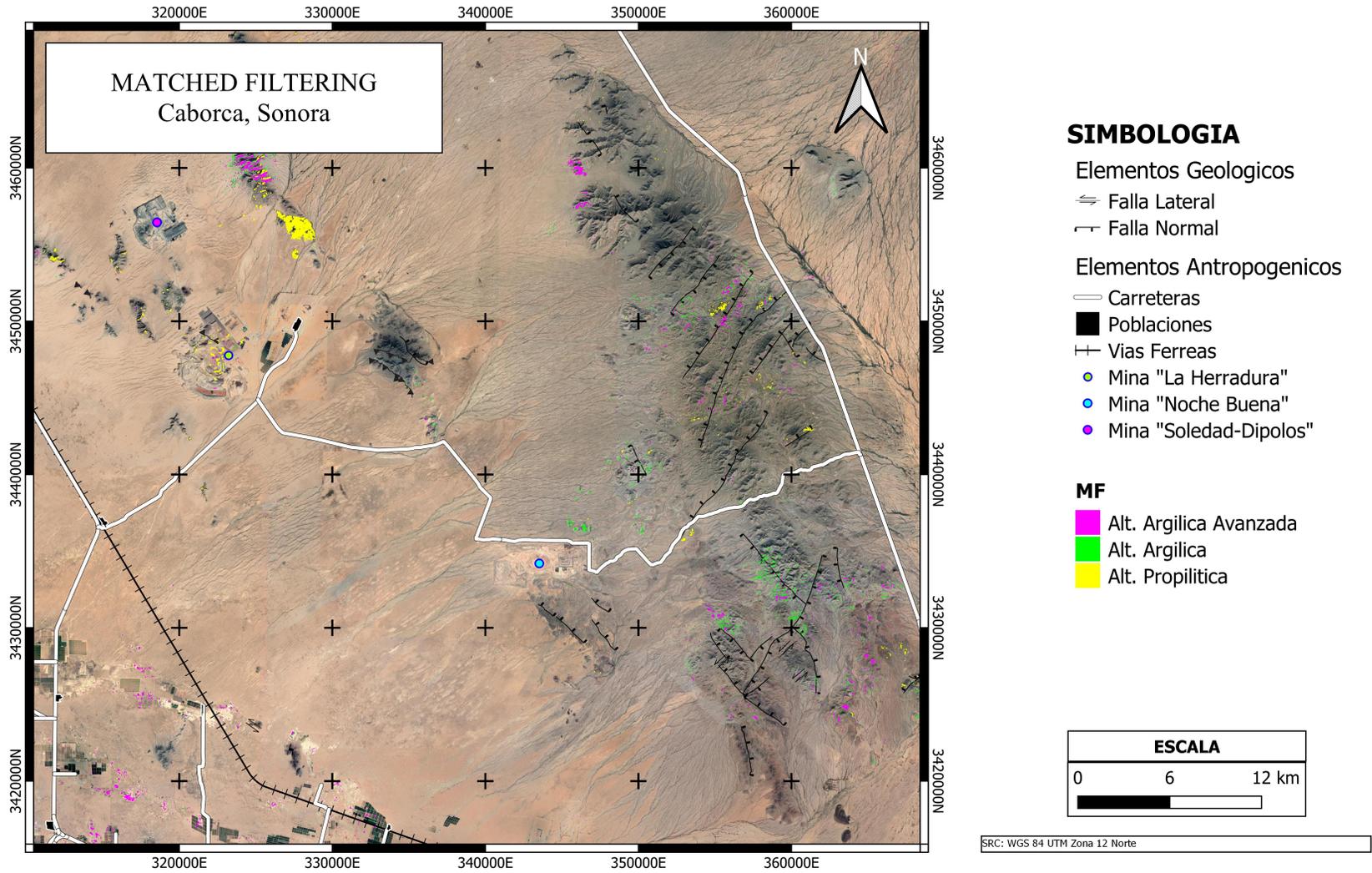


Figura 45: Identificación de alteraciones minerales mediante el método *Matched Filtering*

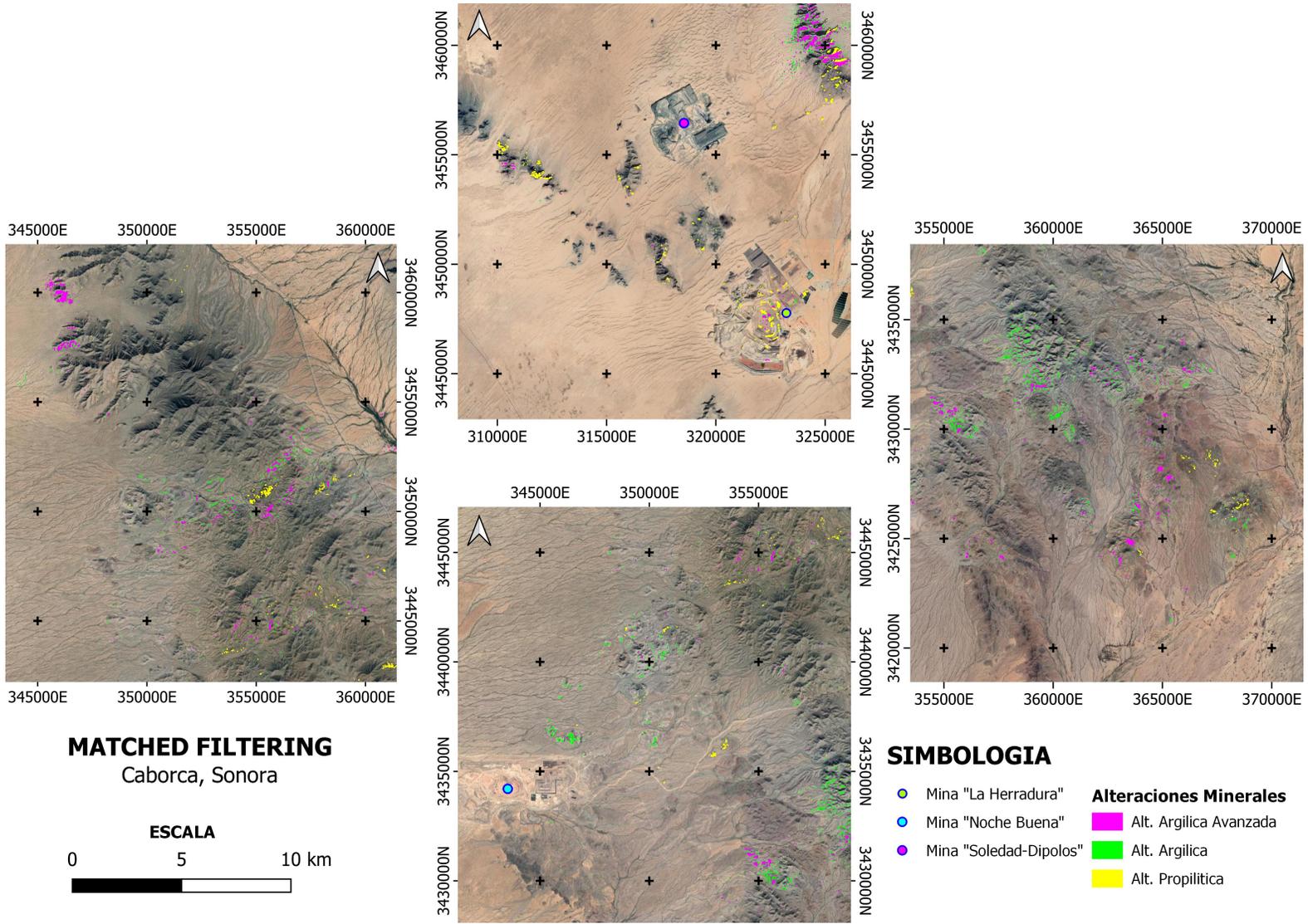


Figura 46: Acercamiento a las alteraciones minerales identificadas mediante el método *Matched Filtering*

6.2. Integración de información

La información geológica, geofísica y geoquímica recopilada en los apartados de mismo nombre será integrada a las alteraciones minerales identificadas mediante la información espectral obtenida con la composición a falso color, los índices mineralógicos y el método *Matched Filtering*.

La integración de la información se realiza mediante la generación y utilización de un modelo difuso o un sistema de inferencia difusa; este modelado difuso hace uso de la lógica difusa para formular y/o resolver de manera mas natural sistemas que presentan alta complejidad e incertidumbre debido a la naturaleza y/o definición propia del sistema y/o a la ambigüedad o imprecisión de la información relacionada al sistema (Galetakis & Vasiliou, 2012).

La complejidad y ambigüedad presente en la interacción entre los diversos procesos formadores de depósitos minerales y los controles relacionados, aunado a los diversos grados de incertidumbre que presentan gran parte de los conjuntos de datos existentes en las ciencias geológicas y geofísicas vuelve ideal el uso de métodos relacionados a la lógica difusa (An & Moon., 1990; Lusty et al., 2012).

Específicamente, autores como An y Moon (1990), D’Ercole et al. (2000), Porwal et al. (2003) y Lusty et al. (2012) entre otros han validado la utilidad de los modelos difusos para el análisis y mapeo de la prospectividad minera usando tanto modelos que utilizan un enfoque basado en conocimientos como un enfoque basado en datos.

Los sistemas difusos están compuestos por tres componentes esenciales: un codificador (fusificador o “*fuzzifier*”), un procesador (motor de inferencia o “*inference engine*”) y un decodificador (defusificador o “*defuzzifier*”). De manera simplificada, el fusificador tiene la

función de convertir los datos de entrada en valores difusos; el motor de inferencia hace uso de operadores difusos para integrar los datos difusos en un solo conjunto difuso acorde al objetivo de interés; el defusificador tiene la función de convertir el conjunto difuso resultante a un conjunto convencional el cual ejemplificara el modelado realizado y permite realizar su interpretación.

Con el objetivo de generar un mapa de prospectividad en el área de estudio se hace uso de criterios relacionados a los lineamientos magnéticos, a las anomalías geoquímicas, a las alteraciones minerales y a las litologías que actúan como rocas encajonantes para las mineralizaciones.

De manera más específica, las capas de evidencia a utilizar se encuentran compuestas por:

- Distancia desde los lineamientos magnéticos identificados con FSED.
- Distancia desde los desagües donde se detectaron anomalías geoquímicas.
- Distancia desde la alteración argílica avanzada identificada con percepción remota.
- Distancia desde las principales litologías encajonantes (rocas ígneas y metamórficas del Proterozoico (Izaguirre et al., 2017)).

6.2.1. Fusificación

El proceso de fusificación se realiza mediante la función logística propuesta por Porwal et al. (2003):

$$F_{Ev} = \frac{1}{1 + e^{-s(Ev-i)}}$$

En la cual F_{Ev} va a representar el valor difuso resultante, s e i son parámetros relacionados a la pendiente y al punto de inflexión de la función logística respectivamente,

y Ev representa el valor de la capa a transformar.

Los valores de los parámetros s e i se calculan para cada capa a transformar a partir de las siguientes funciones provenientes de la función original:

$$s = \frac{9.2}{Ev_{max} - Ev_{min}}$$

$$i = \frac{Ev_{max} - Ev_{min}}{2}$$

Donde Ev_{max} y Ev_{min} representan los valores máximos y mínimos de la capa a transformar respectivamente.

Con base en esta función se transforman las capas de evidencia a valores difusos con un rango de entre 0 y 1; las capas transformadas (figura 47) presentan valores de pertenencia difusa que se van acercando a 1 entre menor sea la distancia entre el píxel evaluado y los píxeles con presencia del elemento deseado, por consiguiente indicando que los valores de pertenencia que van decreciendo hasta llegar a 0 representan el aumento de la distancia entre el píxel evaluado y los píxeles con presencia del elemento deseado.

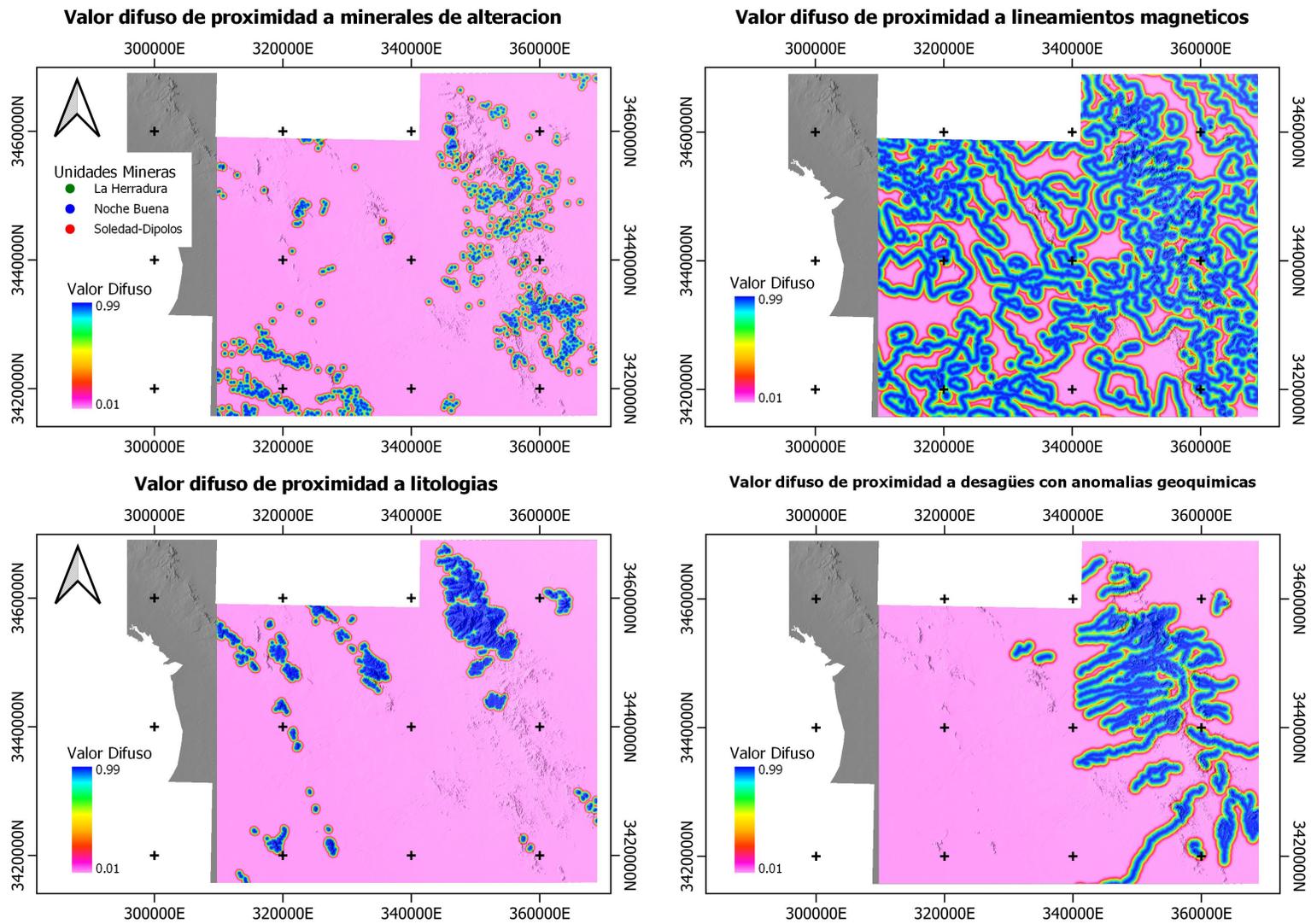


Figura 47: Capas de evidencia transformadas a valores difusos entre 0 y 1, estas capas se utilizaran en el método de integración.

6.2.2. Motor de Inferencia

El motor de inferencia utilizado en esta integración (figura 48) hace uso del operador gamma difuso, uno de los varios operadores relacionados a las matemáticas difusas, que se define como la mezcla de los operadores de producto algebraico y de suma algebraica.

$$\text{Gamma difusa} = (\text{Suma difusa})^\gamma * (\text{Producto difuso})^{1-\gamma}$$

Donde los operadores difusos de suma y producto quedan definidos de la siguiente manera:

$$\text{Suma difusa} = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - F_{Ev_n})$$

$$\text{Producto difuso} = \prod_{i=1}^n F_{Ev_n}$$

El uso del operador gamma difuso en motores de inferencia cuyo objetivo es generar mapas prospectivos y/o de clasificación ha sido abordado por diversos autores, tales como An y Moon (1990), D'Ercole et al. (2000), Lusty et al. (2012), Yousefi y Nykänen (2016).

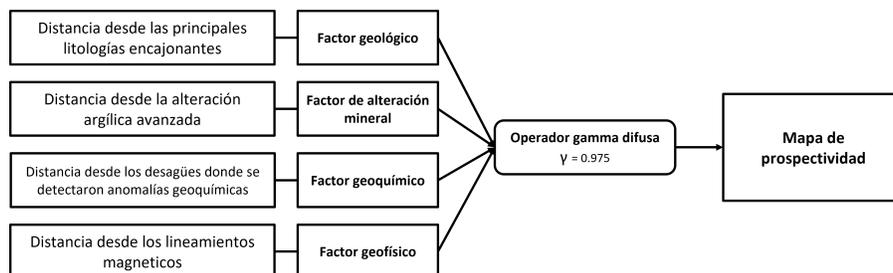


Figura 48: Diagrama del motor de inferencia utilizado.

Siguiendo lo mencionado por otros autores, se realizaron pruebas de integración con diversos valores de gamma ($\gamma = 0.80, 0.85, 0.90, 0.95, 0.975$), siendo finalmente seleccionando el valor de 0.975 debido a que genero la mejor respuesta acorde al gráfico de predicción-área, el mapa resultante se muestra en la figura 49.

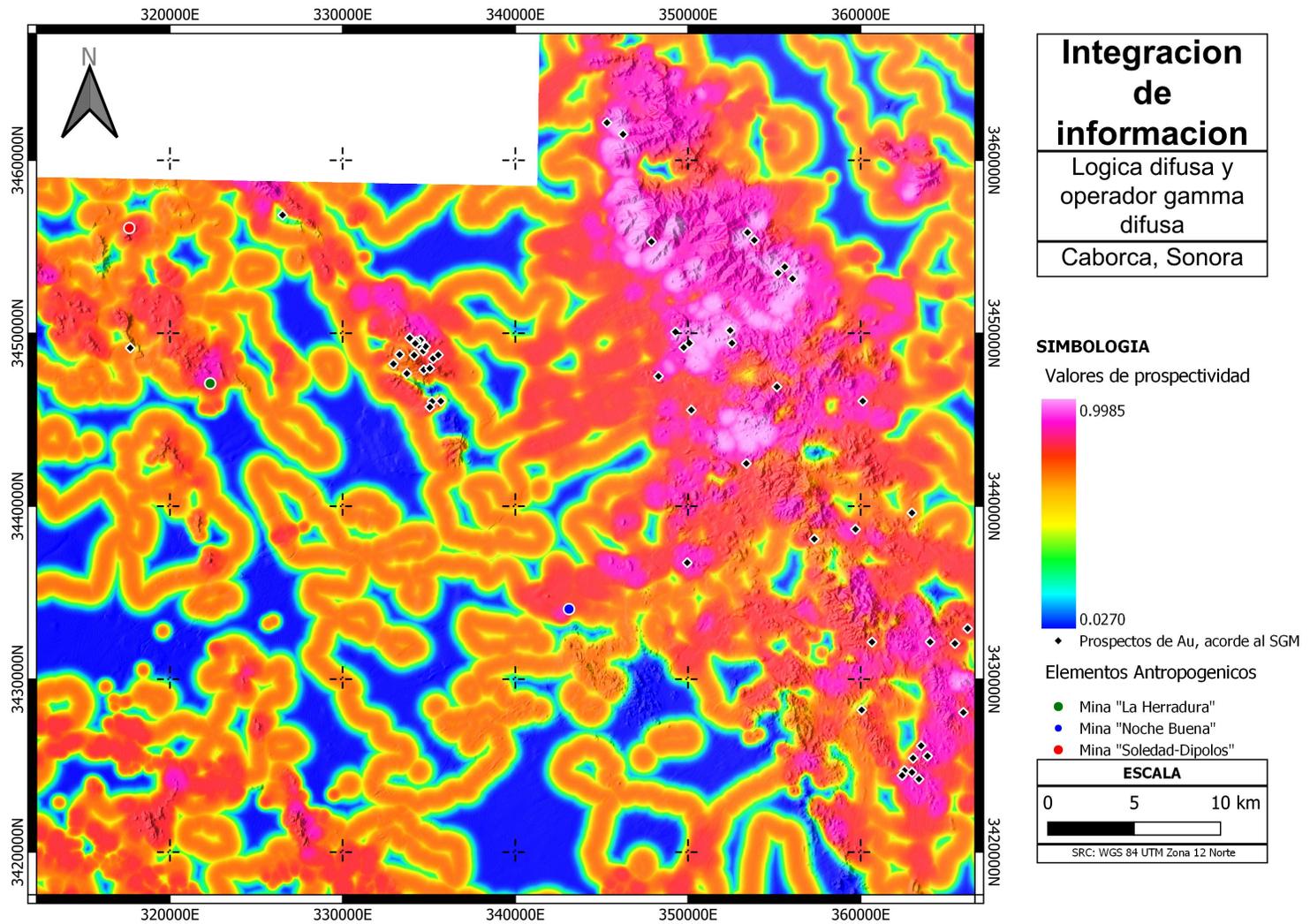


Figura 49: Mapa resultante del motor de inferencia con el operador gamma difusa.

El gráfico de predicción-área o “*P-A plot*” utilizado se realiza tomando como base el método propuesto por Yousefi y Carranza (2015a), quienes establecen la creación de un gráfico que permite evaluar la fiabilidad de los métodos de integración mediante el análisis de las curvas formadas por el porcentaje de los depósitos minerales identificados por cada valor de prospectividad y por el porcentaje del área respecto al área total que cubre cada valor de prospectividad. La intersección entre estas dos curvas ejemplifica la capacidad de predicción del método utilizado, indicando el porcentaje de depósitos identificados o “predichos” con respecto al porcentaje del área total identificada como zona objetivo.

Para realizar el gráfico de predicción-área (y otros procesos de evaluación y/o verificación) se hace uso de datos provenientes del Servicio Geológico Mexicano, específicamente de 62 depósitos o prospectos de oro identificados y reportados en las cartas geológico-mineras utilizadas a lo largo del escrito, la ubicación de los depósitos se puede observar en la figura 50.

El gráfico resultante del mapa de integración realizado con el operador gamma difuso (figura 51) indica que el método logra predecir $\approx 79.5\%$ de los depósitos o prospectos de oro reportados en la región por el Servicio Geológico Mexicano en el $\approx 20.5\%$ del área total de la zona de estudio que se designo como posible zona de interes.

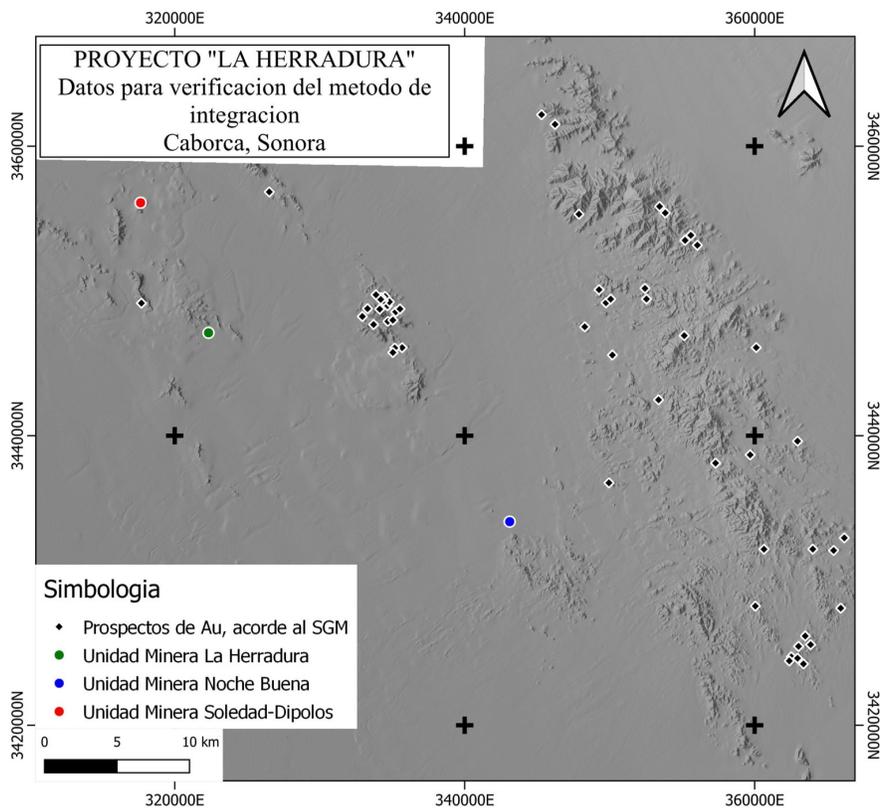


Figura 50: Ubicación de los depósitos y/o prospectos de oro reportados por el Servicio Geológico Mexicano (2012a, 2012b, 2015a, 2015b, 2015c).

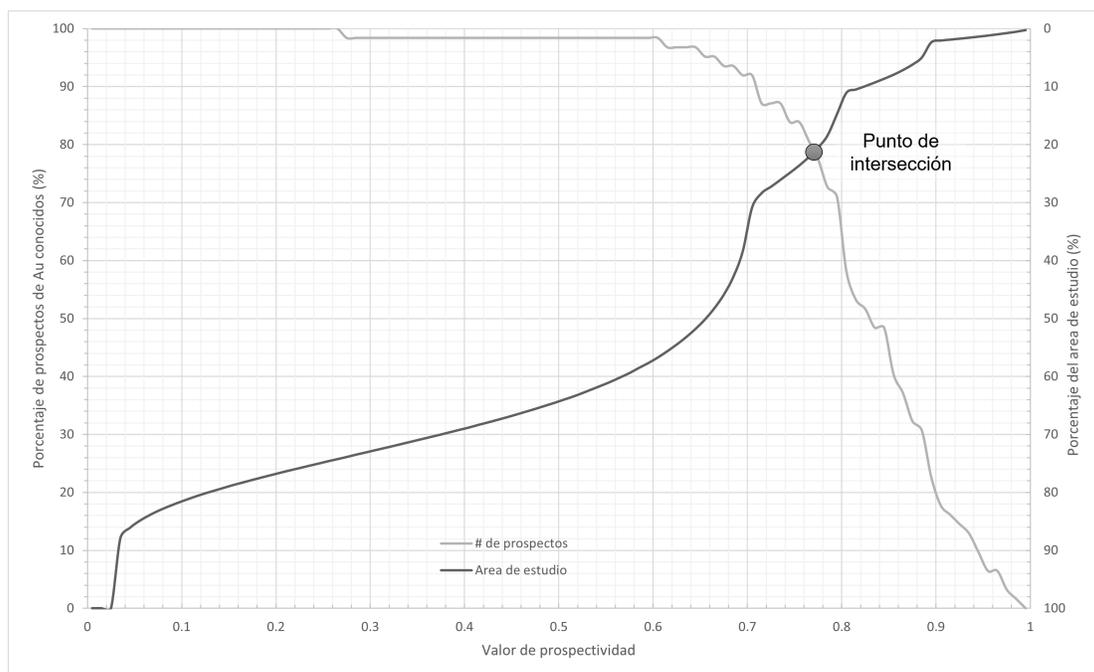


Figura 51: Gráfico de predicción-área del mapa de integración resultante con el operador gamma difuso.

6.2.3. Defusificacion

El proceso de defusificación es el ultimo paso en la integración de información mediante un sistema difuso. Se hace uso del gráfico de concentración-área o “*C-A plot*” propuesto por Cheng et al. (1994) para convertir los valores difusos a conjuntos que delimitan los niveles de prospectividad, este grafico presenta en el eje X el logaritmo del valor difuso mientras que en el eje Y presenta el logaritmo del área acumulada en cada valor difuso, cada cambio de pendiente en la curva formada por este conjunto de datos indica una nueva clase de prospectividad.

El gráfico de concentración-área correspondiente al mapa de integración resultante del operador gamma difuso (figura 52) identifico 5 clases de prospectividad con las cuales se reclasificara el mapa resultante del motor de inferencia de la figura 49, el nuevo mapa reclasificado se observa en la figura 53.

Las clases de prospectividad establecidas presentan las siguientes características:

# de clase	Valores difusos	Área [km^2]	Área [%]
1	0 - 0.4549	1 059.72	33.65
2	0.4549 - 0.6668	618.50	19.64
3	0.6668 - 0.7852	938.63	29.81
4	0.7852 - 0.8810	380.73	12.09
5	0.8810 - 0.9225	97.99	3.11
6	0.9225 - 1	53.47	1.70

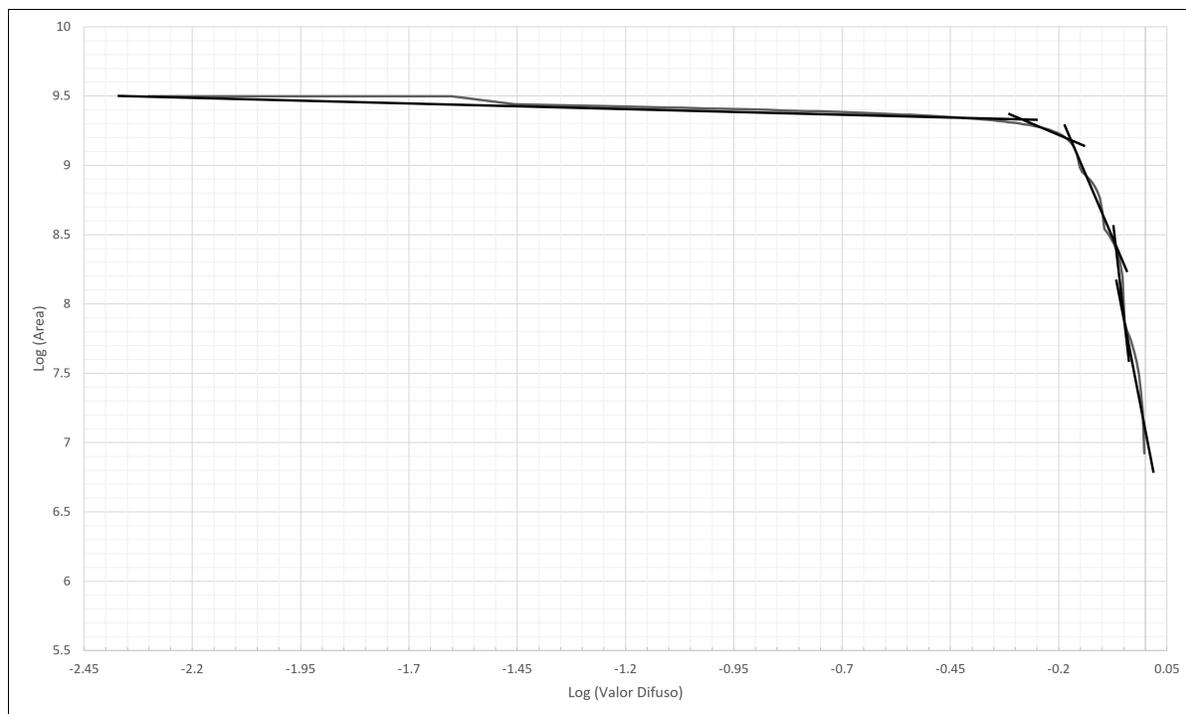


Figura 52: Gráfico de concentración-área del mapa de integración resultante con el operador gamma difuso.

Con la integración de la información se designan diversas zonas a través del área de estudio que acorde a la metodología utilizada pueden presentar potencial minero, y por consiguiente pueden ameritar campañas exploratorias.

Específicamente, con el proceso de defusificación las zonas identificadas para exploración se clasifican en zonas de prospectividad *muy alta*, *alta* e *intermedia alta* acorde a los conjuntos de valores difusos establecidos. Entre estas zonas de alta prospectividad se “predicen” o identifican 45 de los 62 prospectos (72.58%) reportados por el Servicio Geológico Mexicano en un área de 532.20 km^2 , lo que equivale al 16.9% del área total.

En la unidad minera La Herradura se identifica una zona con potencial exploratorio de alta prospectividad; en las unidades mineras Noche Buena y Soledad-Dipolos se identifican zonas con potencial exploratorio de prospectividad intermedia-alta.

Así mismo hay que establecer que la metodología utilizada presenta algunas limitantes (principalmente la falta de información geoquímica que cubra una mayor porción de la zona de estudio y el carácter subjetivo del diseño del motor de inferencia) por lo cual existe la posibilidad de que esta metodología no sea la mas eficiente y/o exhaustiva; quedando esto establecido, el análisis realizado se sigue considerando adecuado y correcto con los criterios utilizados.

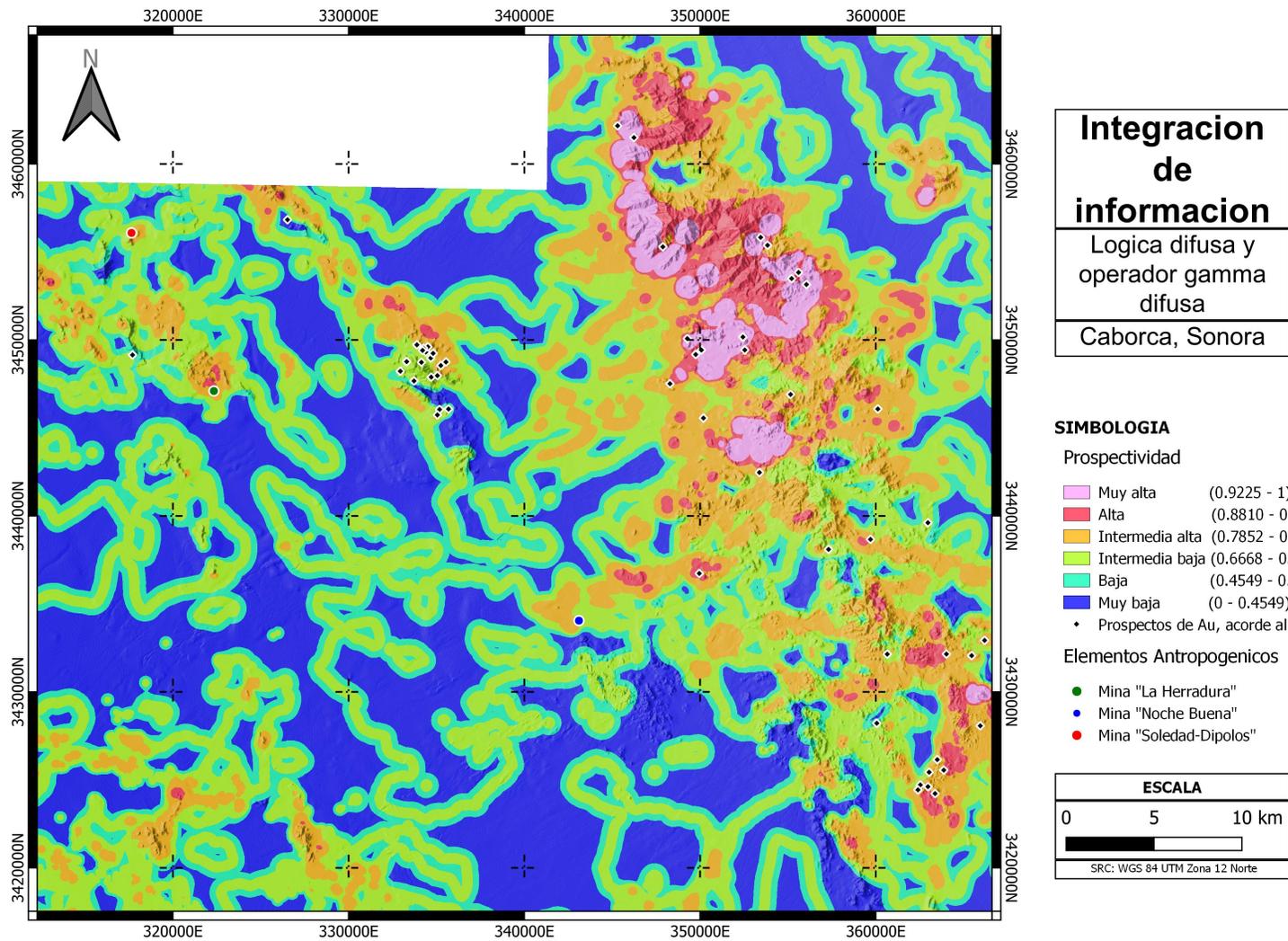


Figura 53: Mapa resultante del proceso de defusificación.

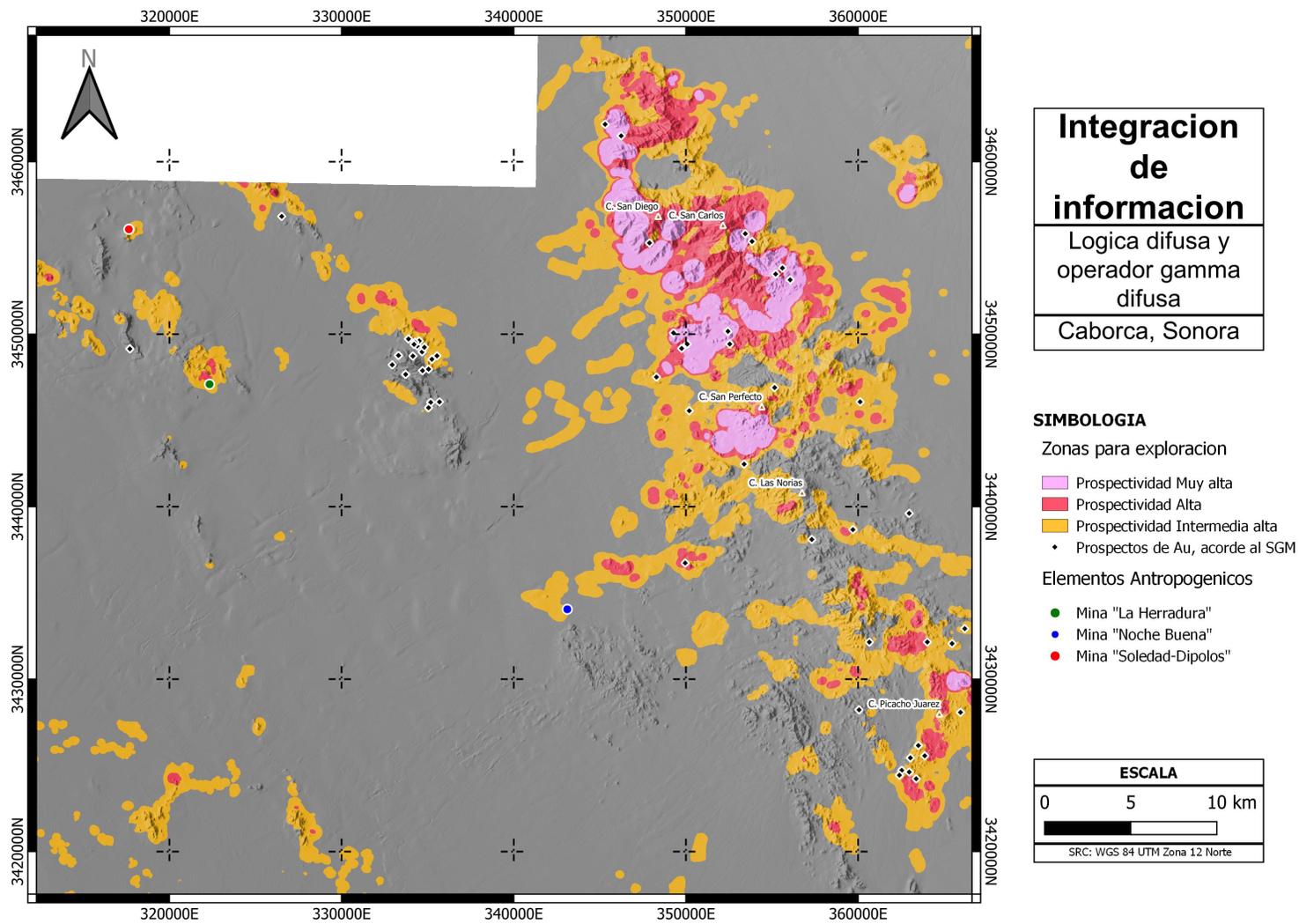


Figura 54: Zonas designadas para exploración, obtenidas con el sistema difuso y el operador gamma.

7. Conclusiones y recomendaciones

El análisis de la información aeromagnética proveniente del SGM permitió la delimitación de lineamientos magnéticos y de cuerpos anómalos (así como de una aproximación de su profundidad). La estimación de profundidad establece que la mayor parte de los cuerpos identificados por la anomalía magnética residual presentan profundidades que van de entre los 150 [m] y los 700 [m], aunque se tiene la presencia de algunos cuerpos con profundidades mayores. Los lineamientos magnéticos identificados presentan una dirección preferencial NW-SE y una dirección secundaria NE-SW.

Mediante el análisis de la información geoquímica proveniente del SGM se establece la presencia de anomalías geoquímicas con valores anómalos de alguno (o varios) de los siguientes elementos: arsénico, oro, berilio, cobre, hierro, potasio, molibdeno, níquel, plomo, antimonio y zinc; de las 304 muestras de sedimento recolectadas en las campañas geoquímicas del SGM, 89 muestras presentaron valores anómalos de al menos uno de los elementos establecidos. Sin embargo el tipo de estudio geoquímico realizado y la baja densidad de muestreo dificulta precisar el origen de estas anomalías.

Mediante la utilización de técnicas de percepción remota en imágenes espectrales del sensor ASTER se realizó la identificación de alteraciones minerales de interés. La identificación se realizó de lo general a lo específico, partiendo con el método de composición a falso color y acabando con el método de *Matched Filtering*, permitiendo así al mismo tiempo identificar la presencia y alcance de la alteración argílica, de la alteración argílica avanzada y de la alteración propilítica, coincidiendo con lo ya establecido por Romero Valle (2005).

El sistema difuso con operador gamma difusa utilizado como método de integración presentó un correcto funcionamiento y fiabilidad en la identificación de zonas de interés al

“predecir” aproximadamente un 79.5 % de los depósitos ya conocidos en un aproximado del 20.5 % del área total de estudio. Combinando métodos ya existentes se aplicó un sistema difuso con un enfoque objetivo generando varias de las características y variables necesarias directamente con los conjuntos de datos del mismo sistema, sin embargo, esto no elimina completamente la necesidad de aplicar técnicas subjetivas a lo largo del proceso. En el caso específico de los sistemas difusos, la selección de las capas de evidencia y la creación de un motor de inferencia correcto y adecuado para el tipo de depósitos de interés va a depender en gran medida del conocimiento y experiencia del autor, por lo que se vuelve necesario que este tenga un extenso y comprensivo conocimiento de los yacimientos minerales y los diversos procesos que participan en la génesis de estos.

Con la integración de la información resultante de los estudios de geología, geofísica, geoquímica y percepción remota se logró determinar la presencia de diversas zonas de interés, las cuales se proponen para la realización de campañas de exploración a mayor detalle.

Estas áreas de interés logran disminuir el área a explorar de 3 478 [km^2] a 532.20 [km^2], de los cuales 53.47 [km^2] se catalogan como prospectividad muy alta, 97.99 [km^2] se catalogan como prospectividad alta y los 380.73 [km^2] restantes se catalogan como prospectividad intermedia alta.

Aproximadamente 62.5 [%] del área identificada como zona de interés (aproximadamente 332.8 [km^2]) se ubica en la porción noreste de la zona de estudio, a aproximadamente 30 [km] al este de la unidad minera La Herradura, a aproximadamente 34 [km] al este de la unidad Soledad-Dipolos y a aproximadamente 20 [km] al noreste de la unidad Noche Buena.

En las inmediaciones de las unidades mineras La Herradura y Soledad-Dipolos se establecen 55.06 [km^2] de zonas exploratorias, coincidiendo con las ubicaciones de la unidad minera La Herradura y Soledad-Dipolos.

En las esquinas sureste y suroeste de la zona de estudio se establecen 106.35 [km^2] y 37.65 [km^2] de zonas exploratorias, coincidiendo una de las zonas identificadas con la ubicación de la unidad minera Noche Buena.

Acorde a la información de la Dirección General de Minas, aproximadamente 335.01 [km^2] de las zonas propuestas para exploración se encuentran dentro del polígono de alguna de las concesiones mineras vigentes en la zona, tal como se puede observar en la figura 55.

De los 197.18 [km^2] sin concesión, 37.10 [km^2] se encuentran distribuidos en la esquina suroeste de la zona de estudio, 133.54 [km^2] en la esquina noreste y los últimos 26.54 [km^2] en la esquina sureste.

La existencia de concesiones mineras vigentes en la región, específicamente en las áreas propuestas en este trabajo, permite la realización de campaña exploratorias en las áreas de interés.

Tal como han demostrado diversos autores y como se espera haber demostrado nuevamente en este trabajo, la integración de imágenes espectrales del satélite ASTER, o del método de percepción remota en general, en campañas de exploración regional es de gran utilidad para la identificación de zonas de posible interés que ameriten ser exploradas a menor escala y a mayor detalle.

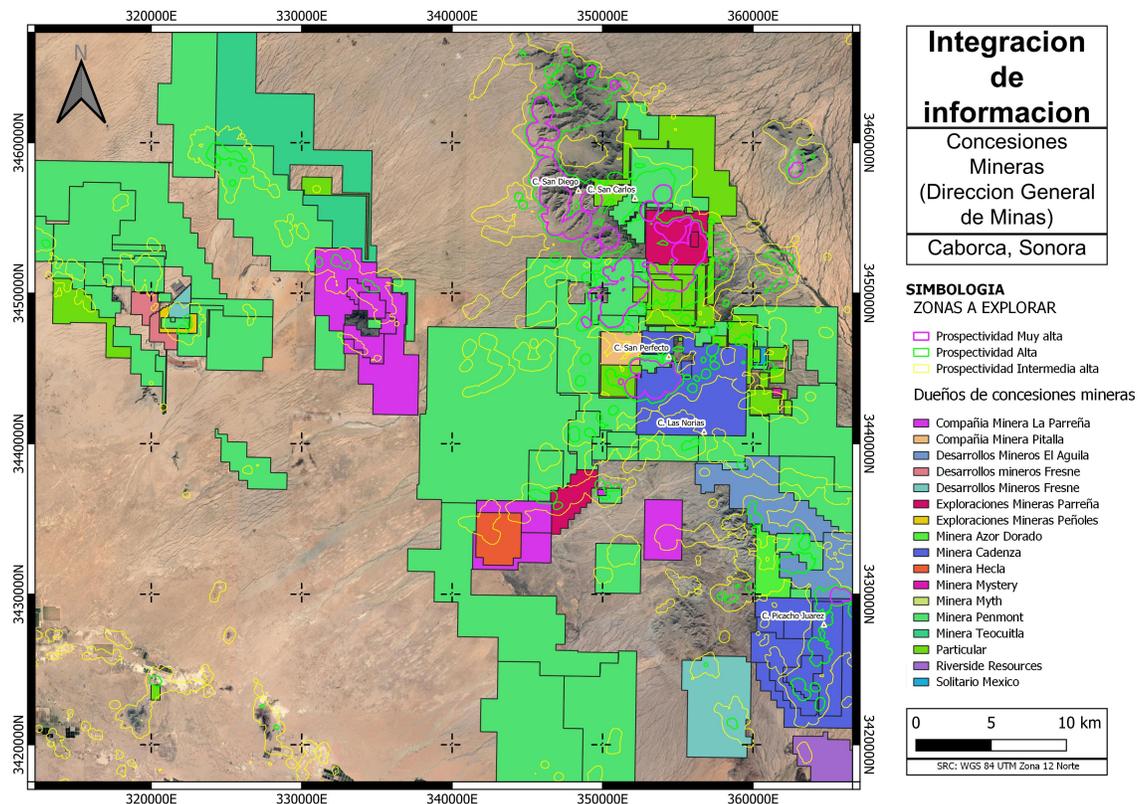


Figura 55: Concesiones mineras vigentes sobre las zonas propuestas para campañas de exploración, con información de la Dirección General de Minas (DGM).

La integración de información geológica, geoquímica y geofísica a los resultados obtenidos con la percepción remota nos permite tener mayor certeza de la viabilidad de los prospectos o áreas de interés identificadas, logrando así resultados más robustos y mejores propuestas de exploración.

Aún con lo estipulado es necesario reconocer las limitantes existentes, por lo cual para la mejora de este estudio y por consiguiente de las conclusiones alcanzadas, se realizan las siguientes recomendaciones:

- Se recomienda la realización de una verificación de campo de la información espectral mediante la toma de muestras de las alteraciones minerales existentes en el área de estudio.
- Se recomienda la realización de campañas de geoquímica de suelo en las zonas de

interés para la identificación de anomalías químicas relacionadas a yacimientos de interés económico.

- Se recomienda la realización de campañas de prospección aeromagnetica a mayor detalle sobre la totalidad del área de estudio para lograr una mejor delimitación de las anomalías ya reconocidas.
- Así mismo se recomienda la realización de otros métodos geofísicos, principalmente métodos electromagneticos para la identificación de estructuras relacionadas al oro orogénico y/o gravimetria para la identificación de estructuras relacionadas a otros tipos de depósitos.
- Se recomienda la realización de caminamientos geológicos para definir a mayor detalle la geología y los elementos estructurales de la región, especialmente en la región noreste de la zona de estudio.
- En caso de obtener conjuntos de datos con mayor detalle y cobertura de la zona de estudio, se recomienda realizar una nueva integración de la información mediante un sistema difuso como el ya utilizado.

8. Bibliografía y Referencias

Abrams, M., & Hook, S. J. (1995). Simulated Aster Data for Geologic Studies. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 33(3), 692-699. <https://doi.org/10.1109/36.387584>

Abrams, M. (2000). The Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER): Data products for the high spatial resolution imager on NASA's Terra platform. *International Journal of Remote Sensing*, 21(5), 847-859. <https://doi.org/10.1080/014311600210326>

Abrams , M., Hook , S., & Ramachandran , B. (2002). *ASTER User Handbook*. Recuperado de https://asterweb.jpl.nasa.gov/content/03_data/04_documents/aster_user_guide_v2.pdf

Aguilar Arias, H., Mora Zamora, R., & Vargas Bolaños, C. (2015). Metodología para la corrección atmosférica de imágenes ASTER, RAPIDEYE, SPOT 2 y LANDSAT 8 con el módulo FLAASH del software ENVI. *Revista Geográfica de América Central*, 2(53), 39-59. <https://doi.org/10.15359/rgac.2-53.2>

An, P., & Moon, W. M. (1990). Application of Fuzzy Set Theory for Integrating Geological and Geophysical Information. *Society of Exploration Geophysicists Annual Meeting*, San Francisco, California, Estados Unidos.

Baranov, V. (1957). A New Method for Interpretation of Aeromagnetic Maps, Pseudo-Gravimetric Anomalies. *Geophysics*, 22(2), 359-382. <https://doi.org/10.1190/1.1438369>

Baranov, V. & Naudy, H. (1964). Numerical Calculation of the Formula of Reduction to the Magnetic Pole. *Geophysics*, 29(1), 67-79. <https://doi.org/10.1190/1.1439334>

Campbell, J. B., & Wynne, R. H. (2011). *Introduction to Remote Sensing* (5.a ed.). Nueva York, E.U.A: The Guilford Press.

Centeno-García, E. (2005). Review of Upper Paleozoic and Lower Mesozoic stratigraphy and depositional environments of central and west Mexico: Constraints on terrane analysis and paleogeography. *The Mojave-Sonora Megashield Hypothesis: Development, Assessment, and Alternatives*. <https://doi.org/10.1130/0-8137-2393-0.233>

Cheng, Q., Agterberg, F. P., & Ballantyne, S. B. (1994). The separation of geochemical anomalies from background by fractal methods. *Journal of Geochemical Exploration*, 51(2), 109-130. [https://doi.org/10.1016/0375-6742\(94\)90013-2](https://doi.org/10.1016/0375-6742(94)90013-2)

Chuvieco, E. (2016). *Fundamentals of Satellite Remote Sensing: An Environmental Approach*, (2nd ed.). CRC Press.

Cordell, L. (1979). Gravimetric expression of graben faulting in Santa Fe country and the Espanola Basin, New Mexico. *New Mexico Geological Society 30th Annual Fall Field Conference Guidebook*, 59–64.

Cordell, L., & Grauch, V. J. S. (1985). 16. Mapping Basement Magnetization Zones from Aeromagnetic Data in the San Juan Basin, New Mexico. *The Utility of Regional Gravity and Magnetic Anomaly Maps*, 181–197.
<https://doi.org/10.1190/1.0931830346.ch16>

D’Ercole, C., Groves, D. I., & Knox-Robinson, C. (2000). Using fuzzy logic in a Geographic Information System environment to enhance conceptually based prospectivity analysis of Mississippi Valley-type mineralisation. *Australian Journal of Earth Sciences*, 47(5), 913-927. <https://doi.org/10.1046/j.1440-0952.2000.00821.x>

El Zalaky, M. & Abd Elmonsif, M. (2016). Target Detection Using Matched Filtering Analysis of the ASTER Data for Exploration of Uranium Mineralization in the Northern Part of El-Erediya Pluton, Central Eastern Desert, Egypt. *The Arab Journal of Sciences & Research*, 2(3), 120-133. <https://doi.org/10.12816/0025312>

Fresnillo PLC. (s. f.-a). Noche Buena. Recuperado 12 de agosto de 2022, de <http://www.fresnilloplc.com/what-we-do/mines-in-operation/noche-buena/>

Fresnillo PLC. (s. f.-b). Nuestra Historia. Recuperado 26 de octubre de 2021, de <http://www.fresnilloplc.com/quienes-somos/nuestra-historia/>

Fresnillo PLC. (s. f.-c). Soledad-Dipolos. Recuperado 12 de agosto de 2022, de <http://www.fresnilloplc.com/what-we-do/mines-in-operation/soledad-dipolos/>

Galetakis, M., & Vasiliou, A. (2012). Applications of fuzzy inference systems in mineral industry - overview. *Expert System Software*.

Gandhi, S. M., & Sarkar, B. C. (2016). *Essentials of Mineral Exploration and Evaluation*. Elsevier Gezondheidszorg. <https://doi.org/10.1016/C2015-0-04648-2>

Gazley, M. F., Martin, A. P., Turnbull, R. E., Frontin-Rollet, G., & Strong, D. T. (2020). Regional patterns in standardised and transformed pathfinder elements in soil related to orogenic-style mineralisation in southern New Zealand. *Journal of Geochemical Exploration*, 217. <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2020.106593>

Govett, G. J. S. (1983). *Rock Geochemistry in Mineral Exploration* (1.a ed.). Elsevier.

Groves, D., Goldfarb, R., Gebre-Mariam, M., Hagemann, S., & Robert, F. (1998).

Orogenic gold deposits: A proposed classification in the context of their crustal distribution and relationship to other gold deposit types. *Ore Geology Reviews*, 13(1–5), 7–27. [https://doi.org/10.1016/s0169-1368\(97\)00012-7](https://doi.org/10.1016/s0169-1368(97)00012-7)

Gubbins, D. & Herrero-Bervera, E. (2007). *Encyclopedia of Geomagnetism and Paleomagnetism*. Springer.

Haldar, S. K. (2018). *Mineral Exploration Principles and Applications*. Elsevier Gezondheidszorg.

Huete, A. (1988). A soil-adjusted vegetation index (SAVI). *Remote Sensing of Environment*, 25(3), 295–309. [https://doi.org/10.1016/0034-4257\(88\)90106-x](https://doi.org/10.1016/0034-4257(88)90106-x)

Instituto Nacional de Estadística y Geografía. (1981). *Carta Fisiografica Tijuana Escala 1:1 000 000*. https://www.inegi.org.mx/contenidos/productos/prod_serv/contenidos/espanol/bvinegi/productos/geografia/tematicas/FISIOGRAFIA/702825690281.pdf

Izaguirre, A. (2009). El basamento paleoproterozoico (1.71-1.68 Ga) Yavapai en el área Mina La Herradura en NW de Sonora: Sus implicaciones para el desarrollo del arco magmatico continental Mesozoico-Cenozoico del NW de México [Tesis de maestria]. Universidad Nacional Autónoma de México

Izaguirre, A., Camprubí, A., & Iriondo, A. (2017). Mesozoic orogenic gold deposits in Mexico. *Ore Geology Reviews*, 81, 1172–1183. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2015.10.006>

Izaguirre, A., Iriondo, A., Caballero Martínez, J. A., Moreira Rivera, F., & Espinosa-Arámburu, E. (2012). Homogeneidad geoquímica de la alteración hidrotermal del cinturón de oro orogénico del NW de Sonora, México: Estudio de balance de masas en rocas encajonantes de la mineralización. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 64(1), 119–153. <https://doi.org/10.18268/bsgm2012v64n1a10>

Izaguirre, A., Iriondo, A., Kunk, M. J., McAleer, R. J., Atkinson, W. W., & Martínez-Torres, L. M. (2017). Tectonic Framework for Late Cretaceous to Eocene Quartz-Gold Vein Mineralization from the Caborca Orogenic Gold Belt in Northwestern Mexico. *Economic Geology*, 112(6), 1509–1529. <https://doi.org/10.5382/econgeol.2017.4519>

Jensen, J. R. (2007). *Remote Sensing of the Environment: An Earth Resource Perspective*. Prentice Hall.

Kokaly, R. F., Clark, R. N., Swayze, G. A., Livo, K. E., Hoefen, T. M., Pearson, N. C., Wise, R. A., Benzel, W. M., Lowers, H. A., Driscoll, R. L., & Klein, A. J. (2017). USGS Spectral Library Version 7. Data Series. Published. <https://doi.org/10.3133/ds1035>

L3 Harris Geospatial Solutions. (2020). Radiometric Calibration. Recuperado 27 de octubre de 2021, de <https://www.harrisgeospatial.com/docs/radiometriccalibration.html>

Lillesand, T. M., Kiefer, R. W. & Chipman, J. W. (2015). *Remote Sensing and Image Interpretation* (7th ed.). Wiley.

Lugo Hubp, J. (1990). El relieve de la Republica Mexicana. *Revista Mexicana de Ciencias Geologicas*, 9(1), 82–111.
<http://rmcg.geociencias.unam.mx/index.php/rmcg/article/view/1255>

Lusty, P., Scheib, C., Gunn, A. G., & Walker, A. S. (2012). Reconnaissance-Scale Prospectivity Analysis for Gold Mineralisation in the Southern Uplands-Down-Longford Terrane, Northern Ireland. *Natural resources research*, 21(3), 359-382.
<https://doi.org/10.1007/s11053-012-9183-3>

Macheyeki, A. S., Kafumu, D. P., Li, X., & Yuan, F. (2020). *Applied Geochemistry: Advances in Mineral Exploration Techniques*. Elsevier.

McKelvey, V. E. (1984). *Principles of the Mineral Resource Classification System of the U.S. Bureau of Mines and U.S. Geological Survey*.

Meyer, D., Siemonsma, D., Brooks, B., & Johnson, L. (2015). *Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer Level 1 Precision Terrain Corrected Registered At-Sensor Radiance (AST_L1T) Product, Algorithm Theoretical Basis Document*. Recuperado de https://lpdaac.usgs.gov/documents/72/AST_L1T_ATBD.pdf

Miller, H. G., & Singh, V. (1994). Potential field tilt—a new concept for location of potential field sources. *Journal of Applied Geophysics*, 32(2–3), 213–217.
[https://doi.org/10.1016/0926-9851\(94\)90022-1](https://doi.org/10.1016/0926-9851(94)90022-1)

Molina-Garza, R. S., & Iriondo, A. (2005). La Megacizalla Mojave-Sonora: la hipótesis, la controversia y el estado actual de conocimiento. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 57(1). <https://doi.org/10.18268/bsgm2005v57n1a1>

NASA LP DAAC. (2015). *ASTER Level 1 Precision Terrain Corrected Registered At-Sensor Radiance V003 [Data set]*. NASA EOSDIS Land Processes DAAC. Recuperado 11 de mayo de 2020, de https://doi.org/10.5067/ASTER/AST_L1T.003

Ninomiya, Y. (2003). A stabilized vegetation index and several mineralogic indices defined for ASTER VNIR and SWIR data. *IGARSS 2003. 2003 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. Proceedings (IEEE Cat. No.03CH37477)*, 1552-1554. <https://doi.org/10.1109/igarss.2003.1294172>

Ninomiya, Y. (2004). Lithologic mapping with multispectral ASTER TIR and SWIR data. *Sensors, Systems, and Next-Generation Satellites VII*, 180-190.
<https://doi.org/10.1117/12.511902>

Ochoa Landin, L., Perez Segura, E., del Rio Salas, R., & Valencia Moreno, M. (2011). Depositos minerales de Sonora, México. En T. Calmus (Ed.), *Panorama de la geología de Sonora, México* (Vol. 118, pp. 299–331). Universidad Nacional Autonoma de México, Instituto de Geología.

Oksum, E., Le, D. V., Vu, M. D., Nguyen, T-H. T., & Pham, L. T. (2021). A novel approach based on the fast sigmoid function for interpretation of potential field data. *Bulletin of Geophysics and Oceanography*, 62(3), 543–556.
<https://doi.org/10.4430/bgta0348>

Pérez-Segura, E., Romero-Valle, J. M., Orozco-Rivera, G., Rosales-Suárez, D., & Martínez-Peñuñuri, R. (2019). Ensayo geometalúrgico para la recuperación de oro de la zona de sulfuros primarios de la mina La Herradura, Sonora, México. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 71(1), 139–168. <https://doi.org/10.18268/bsgm2019v71n1a8>

Porwal, A., Carranza, E. J. M., & Hale, M. F. (2003). Knowledge-Driven and Data-Driven Fuzzy Models for Predictive Mineral Potential Mapping. *Natural Resources Research*, 12. <https://doi.org/10.1023/a:1022693220894>

Pieri, D., & Abrams, M. (2004). ASTER watches the world's volcanoes: a new paradigm for volcanological observations from orbit. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 135(1), 13-28.
<https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2003.12.018>

Quintanar Ruiz, F.J. (2008). *La Herradura Ore Deposit: An Orogenic Gold Deposit in Northwestern Mexico* [Tesis de maestría]. Universidad de Arizona

Rodríguez Castañeda, J. L., & Anderson, T. H. (2011). El arco magmático jurásico en Sonora, México. Distribución, edades y ambiente tectónico. *Boletín del Instituto de Geología*, 118, 81–111.
[https://www.geologia.unam.mx:8080/igl/pubs/boletin/bol118/\(4\)Rodriguez.pdf](https://www.geologia.unam.mx:8080/igl/pubs/boletin/bol118/(4)Rodriguez.pdf)

Romero Valle, J.M. (2005). *Geología y Metodos de exploracion mina La Herradura, municipio de Caborca* [Tesis de Licenciatura]. Universidad de Sonora

Salem, A., Williams, S., Fairhead, J. D., Ravat, D. & Smith, R. (2007). Tilt-depth method: A simple depth estimation method using first-order magnetic derivatives. *The Leading Edge*, 26(12), 1502-1505.
<https://doi.org/10.1190/1.2821934>

Servicio Geológico Mexicano. (2002a). Carta Geologico-Minera Puerto Peñasco H12-1 Escala 1:250 000. https://mapserver.sgm.gob.mx/Cartas_Online/geologia/10_H12-1_GM.pdf

Servicio Geológico Mexicano. (2002b, noviembre). Carta Geologico-Minera Caborca H12-4 Escala 1:250 000. https://mapserver.sgm.gob.mx/Cartas_Online/geologia/11_H12-4_GM.pdf

Servicio Geológico Mexicano. (2012a, mayo). Carta Geológico-Minera El Sahuaro H12-A44 Escala 1:50 000. https://mapserver.sgm.gob.mx/Cartas_Online/geologia/170_H12-A44_GM.pdf

Servicio Geológico Mexicano. (2012b, noviembre). Carta Geologico-Minera San Luisito H12-A45 Escala 1:50 000. https://mapserver.sgm.gob.mx/Cartas_Online/geologia/188_H12-A45_GM.pdf

Servicio Geológico Mexicano. (2015a). Carta Geologico-Minera Coahuila (Alvaro Obregon) H12-A54 Escala 1:50 000. https://mapserver.sgm.gob.mx/Cartas_Online/geologia/171_H12-A54_GM.pdf

Servicio Geológico Mexicano. (2015b, julio). Carta Geologico-Minera El Diamante H12-A55 Escala 1:50 000. https://mapserver.sgm.gob.mx/Cartas_Online/geologia/189_H12-A55_GM.pdf

Servicio Geologico Mexicano. (2015c, noviembre). Carta Geologico-Minera Costa Rica H12-A35 Escala 1:50 000. https://mapserver.sgm.gob.mx/Cartas_Online/geologia/187_H12-A35_GM.pdf

Servicio Geológico Mexicano, Corral Gastelum, R., & Gaytan García, J. (2011). Anexos del Informe de la carta geologico-minera y geoquimica San Luisito H12-A45 Escala 1:50 000. https://mapserver.sgm.gob.mx/InformesTecnicos/CartografiaWeb/A262011COGR0001_01.PDF

Servicio Geológico Mexicano, Corral Gastelum, R., & Hernandez Montaña, M. A. (2015). Anexos del informe de la carta geologico-minera y geoquimica El Diamante H12-A55 Escala 1:50 000. https://mapserver.sgm.gob.mx/InformesTecnicos/CartografiaWeb/A262015COGR0001_01.PDF

Servicio Geologico Mexicano, Corral Gastelum, R., Moreno Ibarra, V. M., & Hernandez Montaña, M. A. (2015). Anexos del informe de la carta geologico-minera y geoquimica Coahuila (Alvaro Obregon) H12-A54 Escala 1:50 000. https://mapserver.sgm.gob.mx/InformesTecnicos/CartografiaWeb/A262015MOIV0001_01.PDF

Servicio Geológico Mexicano, Doval Arenas, H., & Silva Hernandez, G. (2011). Anexos del Informe de la Carta Geologico-minera y geoquimica de El Sahuaro H12-A44 Escala 1:50 000. https://mapserver.sgm.gob.mx/InformesTecnicos/CartografiaWeb/A262011DOAH0001_01.PDF

Servicio Geológico Mexicano, Guzman Espinosa, J. B., Lucero Morales, E., & Hernandez Montaña, M. A. (2015). Anexos del informe de la carta Geologico-minera y geoquimica Costa Rica H12-A35 Escala 1:50 000.

https://mapserver.sgm.gob.mx/InformesTecnicos/CartografiaWeb/A262015GUEJ0003_01.PDF

Yamaguchi, Y., Kahle, A. B., Tsu, H., Kawakami, T., & Pniel, M. (1998). Overview of Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER). *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 36(4), 1062-1071. <https://doi.org/10.1109/36.700991>

Yousefi, M., & Nykänen, V. (2016). Data-driven logistic-based weighting of geochemical and geological evidence layers in mineral prospectivity mapping. *Journal of Geochemical Exploration*, 164, 94-106. <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2015.10.008>

Yousefi, M., & Carranza, E. J. M. (2015a). Fuzzification of continuous-value spatial evidence for mineral prospectivity mapping. *Computers & Geosciences*, 74. <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2014.10.014>