



**UNIVERSIDAD DE SONORA**  
DIVISIÓN DE CIENCIAS EXACTAS Y  
NATURALES  
**DEPARTAMENTO DE GEOLOGÍA**

Definición de zonas de alteración hidrotermal por medio del sensor satelital ASTER: Nuevas perspectivas de exploración en el Distrito Minero de Nacozari, Sonora, México.

**TESIS**

Que para obtener el grado de:

***Maestro en Ciencias-Geología***

PRESENTA:

**Héctor Mendívil Quijada**

Hermosillo, Sonora, Marzo 2017.



# Universidad de Sonora

Repositorio Institucional UNISON



**"El saber de mis hijos  
hará mi grandeza"**



Excepto si se señala otra cosa, la licencia del ítem se describe como openAccess





"El saber de mis hijos  
hará mi grandeza"

# UNIVERSIDAD DE SONORA

Departamento de Geología  
División de Ciencias Exactas y Naturales

F01

Hermosillo, Sonora, a 23 de Febrero de 2017

**Dr. Jesús Vidal Solano**  
Coordinador de Programa  
Maestría en Ciencias-Geología  
Departamento de Geología

Por este conducto y de la manera más atenta, me permito someter a su consideración, para su aprobación el siguiente tema de tesis, intitulado:

***"Definición de zonas de alteración hidrotermal por medio del sensor satelital  
ASTER: Nuevas perspectivas de exploración en el Distrito Minero de  
Nacozari, Sonora, México."***

Esto es con el fin de que el alumno: **HÉCTOR MENDIVIL QUIJADA**, pueda presentar su examen profesional, para la obtención de su título de Grado de la Maestría en Ciencias-Geología.

Sin otro en particular quedamos de Usted.

**ATENTAMENTE**

**Dr. Lucas Ochoa Landin**

Director de Tesis



C.c.p. Interesado  
C.c.p. Archivo



"El saber de mis hijos  
hará mi grandeza"

# UNIVERSIDAD DE SONORA

División de Ciencias Exactas y Naturales

Departamento de Geología

Hermosillo, Sonora a 23 de febrero de 2017

**Dr. Lucas Hilario Ochoa Landín**  
Director de Tesis

Por este conducto le comunico que ha sido aprobado el tema de tesis propuesto por Usted, intitulado:

**"DEFINICIÓN DE ZONAS DE ALTERACIÓN HIDROTHERMAL POR MEDIO DEL SENSOR SATELITAL ASTER: NUEVAS PERSPECTIVAS DE EXPLORACIÓN EN EL DISTRITO MINERO DE NACOZARI, SONORA, MÉXICO"**

Esto, con el fin de que el alumno: **HÉCTOR MENDIVIL QUIJADA** pueda presentar su examen profesional, para la obtención del título de Grado. Asimismo le comunico que han sido asignados los siguientes sinodales:

<b>Dr. Inocente Gpe. Espinoza Maldonado</b>	<b>Presidente</b>
<b>M.C. José Ismael Minjárez Sosa</b>	<b>Secretario</b>
<b>Dr. Rafael Eduardo Del Río Salas</b>	<b>Vocal</b>
<b>Dr. Lucas H. Ochoa Landín</b>	<b>Vocal</b>

Sin otro en particular quedo de Usted

Atentamente

**Dr. Jesús Roberto Vidal Solano**  
Coordinador de Programa  
Maestría en Ciencias-Geología



El saber de mis hijos  
hará mi grandeza  
**MAESTRIA EN  
CIENCIAS  
GEOLOGIA  
DEPARTAMENTO  
DE GEOLOGIA**

C.c.p. Interesado  
C.c.p. Archivo



"El saber de mis hijos  
hará mi grandeza"

# UNIVERSIDAD DE SONORA

División de Ciencias Exactas y Naturales

Departamento de Geología

## NOMBRE DE LA TESIS:

**"DEFINICIÓN DE ZONAS DE ALTERACIÓN HIDROTHERMAL POR MEDIO DEL SENSOR SATELITAL ASTER: NUEVAS PERSPECTIVAS DE EXPLORACIÓN EN EL DISTRITO MINERO DE NACOZARI, SONORA, MÉXICO"**

## NOMBRE DEL SUSTENTANTE:

**HÉCTOR MENDIVIL QUIJADA**

El que suscribe, certifica que ha revisado esta tesis y que la encuentra en forma y contenido adecuada, como requerimiento parcial para obtener el Título de Grado en la Universidad de Sonora.

*Inocente Espinoza Maldonado*  
Dr. Inocente Gpe. Espinoza Maldonado

El que suscribe, certifica que ha revisado esta tesis y que la encuentra en forma y contenido adecuada, como requerimiento parcial para obtener el Título de Grado en la Universidad de Sonora.

*José Ismael Minjarez Sosa*  
M.C. José Ismael Minjarez Sosa

El que suscribe, certifica que ha revisado esta tesis y que la encuentra en forma y contenido adecuada, como requerimiento parcial para obtener el Título de Grado en la Universidad de Sonora.

*Rafael Del Río Salas*  
Dr. Rafael Del Río Salas

El que suscribe, certifica que ha revisado esta tesis y que la encuentra en forma y contenido adecuada, como requerimiento parcial para obtener el Título de Grado en la Universidad de Sonora.

*Lucas Ochoa Landín*  
Dr. Lucas Ochoa Landín

*Jesús Roberto Vidal Solano*  
**Atentamente**

**Dr. Jesús Roberto Vidal Solano**  
Coordinador de Programa  
Maestría en Ciencias-Geología



El saber de mis hijos  
hará mi grandeza  
**MAESTRIA EN  
CIENCIAS  
GEOLOGIA  
DEPARTAMENTO  
DE GEOLOGIA**



"El saber de mis hijos  
hará mi grandeza"

# UNIVERSIDAD DE SONORA

División de Ciencias Exactas y Naturales  
Departamento de Geología

F07

Heramosillo, Sonora, a 3 de marzo de 2017

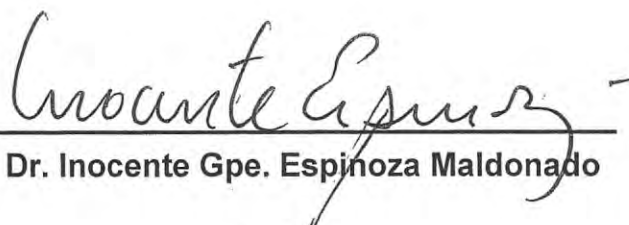
**Dr. Jesús Vidal Solano**  
Coordinador de Programa  
Maestría en Ciencias-Geología  
Departamento de Geología

Por medio de la presente, nos permitimos informarle que después de revisar y aprobar el trabajo de tesis del alumno **HÉCTOR MENDÍVIL QUIJADA**, hemos acordado que la presentación del examen de grado del alumno se lleve a cabo el día viernes 10 de marzo del presente a las 17:00 horas.

Sin otro particular, quedamos a la espera de su respuesta.

**ATENTAMENTE**  
*Comité de Tesis*



  
\_\_\_\_\_  
Dr. Inocente Gpe. Espinoza Maldonado

  
\_\_\_\_\_  
M.C. José Ismael Minjárez Sosa

  
\_\_\_\_\_  
Dr. Rafael Eduardo Del Río Salas

  
\_\_\_\_\_  
Dr. Lucas Hilario Ochoa Landín  
Director de Tesis

C.c.p. Archivo



"El saber de mis hijos  
hará mi grandeza"

# UNIVERSIDAD DE SONORA

F08

División de Ciencias Exactas y Naturales  
Departamento de Geología

Hermosillo, Sonora a 07 de marzo de 2017

**Dr. Lucas H. Ochoa Landín**  
Director de Tesis

Por este conducto y en atención a la solicitud recibida el día 06 de marzo del presente, le comunico que ha sido aprobada la fecha para la presentación de Examen de Grado del alumno **HÉCTOR MENDIVIL QUIJADA** propuesta por el Comité de Tesis.

Dicho examen se llevará a cabo el día **viernes 10 de marzo del presente a las 17:00 horas** en el *Auditorio del Departamento de Física*.

Sin otro en particular quedo de Usted

Atentamente

**Dr. Jesús Roberto Vidal Solano**  
Coordinador de Programa  
Maestría en Ciencias-Geología



El saber de mis hijos  
hará mi grandeza  
**MAESTRIA EN  
CIENCIAS  
GEOLOGIA  
DEPARTAMENTO  
DE GEOLOGIA**

C.c.p. Archivo





A mi esposa Lizette. Porque siempre estás a mi lado y en mi mente, por enseñarme todos los días algo sobre la vida..., ta.

A mis hijos, Ana Paula, José Miguel, Juan Pablo y Jesús Héctor.  
Por ustedes me levanto todos los días, los quiero.

A mi Madre por tí estoy aquí. A mi Padre, te extraño. A mis hermanos (¡los doce!), los quiero.



## Tabla de contenido

Capítulo 1. Introducción.....	1
Capítulo 2. Objetivos .....	4
2.1 Objetivos específicos.....	4
Capítulo 3. Marco teórico.....	5
3.1 Sensores remotos.....	5
3.2 Alteración hidrotermal. ....	16
3.3 Yacimientos minerales en Sonora. ....	19
3.3.1 Pórfidos de Cobre.....	21
3.3.2 Depósitos Epitermales.....	26
Capítulo 4. Área de estudio.....	29
Capítulo 5. Marco geológico-minero .....	32
Capítulo 6. Materiales y metodología .....	36
6.1 Información geológica.....	36
6.2 Muestreo de zonas de alteración .....	38
6.3 Imágenes de satélite .....	41
6.4 Modelo de elevación .....	49
Capítulo 7. Resultados .....	51
7.1 Análisis exploratorio de imágenes satelitales Landsat 8 y ASTER .....	52
7.2 Análisis de lineamientos.....	55
7.3 Mapas de alteraciones a partir del análisis de la escena ASTER. ....	58
Capítulo 8 Discusión.....	67
8.1 Contraste litológico MNF y conciliación con geología del SGM. ....	68
8.2 Análisis de lineamientos.....	69
8.3 Correlación entre imagen de color natural y el índice para óxido férrico. ....	70
8.4 Índice de sílice.....	71
8.5 Correlación del índice de óxido férrico con el índice de óxido ferroso. ....	73
8.6 Correlación de la imagen índice de arcillas con la composición RGB arcillas-óxido férrico- óxido ferroso. ....	74
8.7 Imagen composición RGB alteración filica – argílica – propilítica. ....	75
8.8 Imagen índice de caolinita.....	77

8.9 Imagen índice de alunita .....	78
8.10 Imagen índice de calcita.....	79
Capítulo 9 Conclusiones.....	81
Agradecimientos .....	83
Referencias bibliográficas .....	85

## Índice de figuras:

Fig. 1. Imágenes de diferentes resoluciones espaciales.....	6
Fig. 2. Esquema del espectro electromagnético .....	8
Fig. 3. Esquema de las bandas de diferentes sensores satelitales .....	9
Fig. 4. Firmas espectrales de minerales seleccionados .....	10
Fig. 5. Firmas espectrales de diferentes minerales de alteración hidrotermal.....	11
Fig. 6. Firmas espectrales de diferentes tipos de roca .....	12
Fig. 7. Modelos de alteración para depósitos tipo pórfido de cobre y tipo epitermal .....	14
Fig. 8. Esquema de composición mineralógica de las alteraciones hidrotermales.....	17
Fig. 9. Distribución de los depósitos tipo pórfido de cobre .....	21
Fig. 10. Distribución de los depósitos tipo epitermal.....	27
Fig. 11. Mapa de localización del área de estudio.....	29
Fig. 12. Mapa de actividad minera en el área de estudio .....	30
Fig. 13. Mapa de de localidades mencionadas en el texto. ....	31
Fig. 14. Porción de la carta original Geológico-Minera Nacozari H12-6 .....	36
Fig. 15. Mapa geológico del área de estudio recortado del SGM .....	37
Fig. 16. Localización de muestras colectadas en campo.....	39
Fig. 17. Escena del sensor ASTER colectada el 8 de marzo de 2007 .....	41
Fig. 18. Cobertura de las escenas del sensor Landsat 8 OLI-TIRS.....	47
Fig. 19. Imagen del sensor Landsat 8 recortada a la cobertura del área de estudio.....	48
Fig. 20. Imagen resultado de la fusión y color natural Landsat 8 .....	52
Fig. 21. Imagen resultado del contraste sílice-alteración-roca huésped.....	53
Fig. 22. Imagen resultado del contraste litológico MNF.....	54
Fig. 23. Imagen resultado del modelo de relieve .....	55
Fig. 24. Mapa resultado del análisis de extracción de lineamientos. ....	56
Fig. 25. Mapa resultado del cálculo de densidad de lineamientos .....	57

Fig. 26. Imagen resultado del proceso para el índice de arcillas .....	58
Fig. 27. Imagen resultado del proceso para el índice para óxido férrico.....	59
Fig. 28. Imagen resultado del proceso para el índice de óxido ferroso .....	60
Fig. 29. Imagen resultado del índice de sílice .....	61
Fig. 30. Imagen resultado del índice de caolinita.....	62
Fig. 31. Imagen resultado del índice de alunita.....	63
Fig. 32. Imagen resultado del índice de calcita .....	64
Fig. 33. Imagen resultado de la composición RGB arcillas-óxido férrico-óxido ferroso .....	65
Fig. 34. Imagen resultado de la composición RGB alteraciones filica-argílica-propilítica .....	66
Fig. 35. Comparación de las imágenes contraste litológico con mapa geológico SGM. ....	68
Fig. 36. Mapa de estructuras obtenidas del SGM.....	69
Fig. 37. Comparación de los procesos de la escena Landsat 8 color natural contra óxido férrico....	70
Fig. 38. Imagen de relación del índice de sílice con las estructuras del SGM .....	71
Fig. 39. Imágenes de comparación del óxido férrico y óxido ferroso .....	73
Fig. 40. Imágenes de comparación del índice de arcillas y composición RGB arcillas-óxido férrico- óxido ferroso. ....	75
Fig. 41. Imagen de relación de la imagen alteraciones filica-argílica-propilítica con las estructuras del SGM y lineamientos interpretados .....	76
Fig. 42. Imagen de relación de la imagen índice de caolinita con las estructuras del SGM y lineamientos interpretados.....	77
Fig. 43. Imagen de relación de la imagen índice de alunita con las estructuras del SGM y lineamientos interpretados.....	78
Fig. 44. Imagen de relación del índice de calcita con las estructuras del SGM y lineamientos interpretados.....	79

## **Índice de tablas:**

Tabla 1. Características geológicas y mineralógicas de los depósitos pórfido de cobre en Sonora..	25
Tabla 2. Características de los principales depósitos epitermales en el NW de México .....	28
Tabla 3. Coordenadas y descripción de muestras colectadas en campo .....	40
Tabla 4. Características de las bandas del sensor ASTER .....	43
Tabla 5. Características de las bandas del sensor Landsat 8 OLI-TIRS .....	46

## Resumen

El noroeste de México ha sido históricamente una zona de gran importancia minera, caracterizándose por una amplia variedad de yacimientos minerales, muchos de ellos considerados como de los principales en México. En particular, el Estado de Sonora contiene tres franjas importantes con mineralización de oro orogénico, pórfido de cobre y epitermales de baja y alta sulfuración, así mismo en el Estado se encuentra el distrito minero de Nacozari, que contiene la segunda mina más grande de cobre-molibdeno de México, acompañada de otras zonas mineralizadas de menor volumen.

Sabiendo que los yacimientos de tipo pórfido cuprífero comúnmente presentan extensas zonas de alteración hidrotermal, y que los minerales que conforman estas alteraciones son reconocibles mediante espectrometría de infrarrojos, este trabajo se enfocó a un estudio multiespectral con imágenes de satélite para el distrito minero de Nacozari, con el objetivo de localizar las zonas de alteración hidrotermal presentes en la región. Para ello se realizaron diversos procesos digitales espectrales, consistentes en álgebra y composición de bandas aplicadas a las imágenes de satélite adquiridas. Aprovechando la respuesta espectral de los diferentes minerales de alteración se obtuvieron distintas imágenes derivadas de estos procesos. Además del procesamiento espectral, se efectuó también un análisis y extracción automática de lineamientos para apoyar tanto a los resultados de los procesos espectrales como a su posterior interpretación.

A partir de los diferentes procesos espectrales, se obtuvieron como resultado un total de once imágenes con información sobre distintos índices de minerales o grupos de alteración. Entre las imágenes resultado están las generadas para los índices de óxido férrico y ferroso, composiciones en las bandas roja, verde y azul de las alteraciones fílica, argílica y propilítica así como para sílice, alteración y unidades litológicas, también se consiguieron generar imágenes de índice de calcita e índice de sílice. Por otro lado, como resultado del análisis, extracción automática e interpretación de lineamientos, se logró la interpretación de la extensión para la longitud de las estructuras y lineamientos reportados por el Servicio Geológico Mexicano para este sector de Sonora.

Los datos obtenidos en este trabajo de investigación sugieren que el área de estudio está dividida en zonas con diferentes niveles de exposición, indicando la posible presencia de



pórfidos profundos en el sector suroeste, representados por las localidades Florida – El Barrigón, El Batamote y Bella Esperanza, donde las imágenes procesadas indican que existe una franja con dirección NW-SE caracterizada por zonas de igual proporción de alteraciones argílica y filica; en cambio, la parte central de la escena parece corresponder a las partes más intermedias y superiores del sistema, como es el caso de Los Alisos y La Caridad Vieja, sectores representados por zonas de alteración filica. Por otro lado, los datos sugieren la presencia de ciertas asociaciones mineralógicas de alteración relativas a sistemas epitermales, como es el caso de la localidad de El Tigre en el límite noreste del área de estudio, aunque es importante aclarar que ésta corresponde a una época del Paleógeno, netamente post-laramidica.

Además de lo anterior, las imágenes resultado de los procesos combinadas con la interpretación de lineamientos apuntan a una clara relación espacial entre las diferentes zonas de alteración y los lineamientos, tanto del SGM como los interpretados en este trabajo, interpretándose que los lineamientos funcionan como límites para estas zonas de alteración.

Los resultados de este estudio muestran que el uso de imágenes multiespectrales y la metodología de procesamiento espectral y extracción automática de lineamientos en la exploración de yacimientos minerales es una excelente herramienta de apoyo para la obtención de información que pudiera llevar a la reafirmación de localidades de interés minero o al descubrimiento de nuevos yacimientos económicos, sin embargo, sigue siendo necesario el trabajo de campo para poder definir con mayor certeza las zonas de posibles yacimientos metálicos rentables económicamente.

## Capítulo 1. Introducción

La alteración hidrotermal alrededor de los depósitos minerales normalmente forma halos que proveen blancos para exploración mucho más grandes que el depósito en sí mismo, como lo han documentado los trabajos de Sillitoe (1993, 1975, 2010), Titley (1982a), Gustafson (1975), por lo que este tipo de alteración es de suma importancia en la exploración de yacimientos minerales.

La composición química y el arreglo mineralógico hacen que cada mineral de alteración tenga una firma específica y casi única en el espectro electromagnético, con picos de absorción y reflexión que los hace identificables mediante técnicas de procesamiento de imágenes multispectrales. La espectrometría es una excelente herramienta no sólo para detectar composiciones, sino también para definir niveles de abundancia, lo que otras técnicas no pueden completar (Clark, 1999).

Aunque se consideran como “nuevas tecnologías”, los sensores satelitales han sido utilizados como herramienta en la exploración por yacimientos minerales desde hace varios años, sin embargo, no todos pueden ser utilizados para la extracción de información geológica, por ejemplo para contrastes litológicos, identificación de zonas de alteración, identificación de minerales específicos de alteración, etc. Para conseguir esto se requiere que el sensor a utilizar cuente con bandas o canales en los sectores del visible (VIS, *Visible*), infrarrojo de onda corta (SWIR, *Short Wave Infrared*) e infrarrojo térmico (TIR, *Thermal infrared / emitted infrared*) del espectro electromagnético, ya que es en estas porciones del espectro donde los minerales de alteración y las unidades litológicas tienen sus características de absorción o reflexión de energía más significativa (Mendivil-Quijada, 2012).

Las imágenes multispectrales de satélite requieren de un tratamiento especial antes de poder usarse para la extracción de información geológica, y de ese tratamiento previo depende la precisión del resultado final (Sabins, 2007), por lo que el pre-proceso es un paso fundamental en los trabajos de procesamiento y análisis de imágenes de satélite.

Además de la espectrometría con imágenes de satélite, otras herramientas pueden ser utilizadas para apoyar las deducciones, discusiones o conclusiones derivadas de un análisis espectral. Ejemplos de estas herramientas usadas en la exploración de yacimientos minerales

son los métodos geofísicos, modelos de elevación e imágenes de satélite de alta resolución espacial.

En el estudio de yacimientos minerales, la porción del espectro electromagnético con longitudes de onda desde los  $\sim 0.40$  hasta los  $\sim 0.75 \mu\text{m}$  (visible) es utilizada principalmente para la detección de óxidos de hierro, mientras que el sector con longitudes de onda desde los  $\sim 1$  hasta los  $\sim 4 \mu\text{m}$  (infrarrojo de onda corta) es utilizado para la identificación de zonas de alteración y minerales específicos. Por último, la parte del espectro con longitudes de onda desde los  $\sim 4$  y hasta los  $\sim 2,500 \mu\text{m}$  (infrarrojo térmico) es aprovechada para la detección de zonas potenciales por carbonatos y sílice.

El sensor ASTER (*Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer*) es un instrumento multispectral de 14 bandas montado en la plataforma del satélite Terra, del Sistema de Observación Terrestre (EOS, *Earth Observing System*). Las tres bandas del subsistema visible + infrarrojo cercano, y las seis del subsistema infrarrojo de onda corta, con una resolución espacial de 15 y 30 metros respectivamente, fueron seleccionadas en primer lugar para hacer determinaciones mineralógicas (Rowan, 2003).

Una particularidad importante de los yacimientos magmato-hidrotermales es la presencia de ciertos minerales de alteración. Estos minerales tienen firmas características en la porción del infrarrojo de onda corta, en la cual es posible analizar imágenes multispectrales para definir su presencia en el terreno. Minerales como alunita, caolinita, calcita, sílice, entre otros, son productos de alteración que guardan una cierta distribución espacial en los modelos de yacimientos tipo pórfido de cobre y epitermales de alta (HS) o baja sulfuración (LS). Así mismo, las zonas de oxidación de Fe permiten distinguir un nivel específico en los modelos antes mencionados, donde los minerales que conforman las zonas de oxidación pueden ser detectados con precisión analizando la porción visible del espectro. Analizando la porción del infrarrojo térmico, se pueden identificar zonas con alto contenido de sílice en forma de posible alteración por silicificación, misma que sugiere el paso de soluciones hidrotermales potencialmente mineralizadas.

El suroeste de Estados Unidos y el noroeste de México se caracterizan por la presencia de importantes yacimientos magmato-hidrotermales, así como de innumerables

manifestaciones de mineralización asociada a este tipo de depósitos. Dicha región conforma la provincia de pórfidos de cobre de la Cordillera Norteamericana (Titley, 1982b), también conocida como el gran *clúster* de depósitos de pórfidos de cobre (Keith y Swan, 1996).

Sabiendo que el distrito minero de Nacozari es un área que ha sido extensamente estudiada, desde el punto de vista de yacimientos minerales, especialmente con geología regional, geo-cronología, composición de fluidos mineralizantes, etc. (Valencia *et al.*, 2008; Rascón-Heimpel *et al.*, 2012), este distrito representa un sitio ideal para llevar a cabo una investigación haciendo uso del análisis multiespectral basado en imágenes de satélite que, en conjunto con el uso de sistemas de información geológica, permiten un mejor entendimiento de la mineralización en los sistemas magmato-hidrotermales de esta región.

La metodología de análisis espectral y las ineludibles observaciones geológicas directas de campo, permitirán considerar la exploración minera desde una nueva perspectiva en ambientes magmato-hidrotermales, no sólo en este distrito, sino también en otros del noroeste de México.

## **Capítulo 2. Objetivos**

El objetivo de este trabajo de investigación es la aplicación de la técnica de análisis multiespectral de imágenes de satélite enfocada a la exploración de yacimientos minerales, para generar nueva información que fortalezca los programas de exploración, así como entender la distribución y abundancia de alteraciones hidrotermales en sistemas mineralizantes del distrito minero de Nacozari.

### **2.1 Objetivos específicos**

- Definir zonas de alteración hidrotermal diferenciadas minerales como caolinita y alunita, así como en grupos de alteración argílica, filica, propilítica, presencia de sílice y óxidos de hierro, por medio de análisis multiespectral de imágenes de satélite de los sensores ASTER y Landsat 8.
- Determinar la presencia de sistemas estructurales relacionados con la alteración hidrotermal en el Distrito Nacozari.
- Establecer los posibles niveles de exposición de zonas de alteración y mineralización del distrito de Nacozari de acuerdo con modelos de yacimientos tipo pórfido de cobre y epitermal en el distrito minero de Nacozari.
- Proponer la metodología para generar nuevas guías de exploración en el distrito que se podrán aplicar tanto a áreas de frontera como a sectores estudiados con anterioridad.

## **Capítulo 3. Marco teórico**

### **3.1 Sensores remotos.**

Las imágenes de los sensores multispectrales montados en plataformas satelitales son utilizadas para un variado número de aplicaciones; éstas van desde el monitoreo y clasificación de riesgos en territorios urbanos hasta la detección del estado de vegetación, pasando por la identificación de zonas favorables para el descubrimiento de posibles yacimientos minerales. Como herramienta en la exploración de yacimientos minerales, las imágenes multispectrales son especialmente útiles, ya que las características de reflexión o absorción de energía de ciertos minerales de alteración hidrotermal es evidente en el rango del espectro electromagnético que algunos sensores multispectrales pueden detectar (Mendivil-Quijada, 2012).

Actualmente están disponibles varios sensores que son programables, es decir, con los que se pueden adquirir imágenes para coleccionar en un lugar y en una fecha específica de acuerdo con su resolución temporal. Asimismo, existen datos de archivo que consisten de imágenes tomadas en fechas anteriores, que son resguardadas y utilizadas para ciertas aplicaciones en las que no se requiere que la escena sea actual, esto aplica para cualquier tipo de sensores satelitales.

Las imágenes de archivo son de uso recurrente en la exploración por yacimientos minerales ya que los cambios temporales, relativamente cortos, no son de gran impacto en los suelos o afloramientos rocosos, objetos de estudio en la geología de exploración.

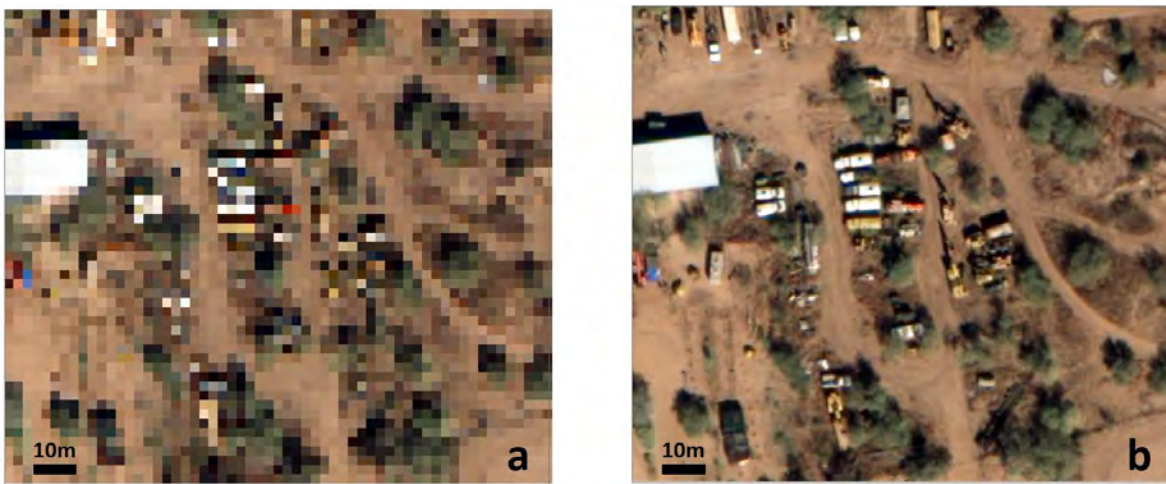
En percepción remota, que es la disciplina encargada del procesamiento y análisis de imágenes de satélite, es ampliamente utilizado el término de resolución. Este concepto tiene diferentes connotaciones y se reconocen cuatro tipos de resolución: 1) Radiométrica, 2) Temporal, 3) Espacial y 4) Espectral.

De manera general, la resolución radiométrica se refiere a la profundidad de pixel de la imagen generada por un sensor y es expresada en bits por pixel, esto define la capacidad de una imagen para guardar cierta cantidad de datos en un solo pixel, lo que permite discriminar, según la cantidad de bits, diferencias muy sutiles en la energía registrada. A

mayor resolución radiométrica de un sensor, mayor será la capacidad de registrar pequeñas diferencias en la energía absorbida, reflejada o emitida hacia el sensor.

Por otra parte, la resolución temporal en sensores remotos, es definida por el tiempo en que el satélite pasa por el mismo lugar en la Tierra con un ángulo normal a su órbita. Por ejemplo, si la resolución temporal de un determinado sensor es de dieciséis días, significa que éste tarda dieciséis días en volver a tomar una imagen en el mismo lugar y con el mismo ángulo de colección. Esta resolución es importante cuando se trata de estudiar cambios en vegetación, niveles de agua, desastres naturales, riesgos, explotación minera, etc. Ya que la diferencia en días entre escenas es importante. Por otro lado, para el caso de la exploración por yacimientos minerales esta resolución no es muy relevante.

Otro tipo de resolución, es la resolución espacial (Fig. 1). Esta resolución en las imágenes satelitales toma gran importancia para la exploración ya que es la que define el tamaño mínimo de un objeto en la Tierra (afloramientos rocosos o estructuras geológicas), que un sensor puede detectar.



*Fig. 1. Imágenes mostrando diferentes resoluciones espaciales, a) 2 m por píxel y b) 30 cm por píxel. Nótese que en a), aunque no es posible identificar inmediatamente los objetos en el terreno, con interpretación podían deducirse rasgos evidentes como caminos y árboles, mientras que en b) no se requiere de interpretación para reconocer formas.*

Hoy en día es posible obtener imágenes satelitales cuya resolución espacial puede ir desde 100m hasta 30cm. Sensores como Landsat 8 OLI-TIRS (*Operational Land Imager – Thermal Infrared Sensor*) y ASTER, tienen resoluciones espaciales de 100, 60, 30 y 15 m en sus diferentes subsistemas, en comparación, el sensor WorldView 3, tiene la capacidad de entregar imágenes con resolución de 30cm por pixel, pero sólo en su modo pancromático.

La mayor relevancia de la resolución espacial radica básicamente en la definición de la forma y extensión de los objetos detectados. La Figura 1 muestra como los objetos en el terreno pueden presentar los mismos colores en ambas resoluciones, sin embargo no es posible distinguir con precisión rasgos morfológicos en la de menor resolución (Fig. 1a), la extensión y forma de los objetos estudiados son identificadas mejor cuando se trata de imágenes de alta resolución espacial, mientras menor sea ésta mayor será el tamaño de píxel utilizado para representarlo, por lo tanto, la forma y extensión de los objetos cambiarán dependiendo del sensor utilizado.

Para el caso de la exploración por yacimientos minerales, la escala del proyecto indica la resolución espacial necesaria y por ende el sensor a utilizar. Regiones grandes como un ejido, un municipio o un estado, son mejor estudiadas utilizando imágenes de media resolución espacial, aún si la superficie del proyecto es menor, como por ejemplo un grupo de propiedad minera o un distrito minero, imágenes con resoluciones de 30 a 15 m aportan información muy útil. Un área relativamente pequeña, o un grupo de pequeños afloramientos se estudian mejor con imágenes de alta resolución espacial (1 m, 60 cm o 50 cm).

Independientemente de lo anterior, cualquier imagen es susceptible de combinarse digitalmente con otras para mejorar su resolución espacial. Por ejemplo, se pueden combinar imágenes de alta resolución espacial (en escala de grises o pancromática) con imágenes a color (o multiespectrales) de baja resolución espacial. Este proceso, denominado *Pansharpening*, incrementa la resolución espacial de imágenes a color de baja resolución usando la información espacial extraída de la imagen pancromática, que está normalmente en alta resolución; aunque esto afecta en una determinada medida la información espectral original (Johnson, 2014) por lo que no se recomiendan estudios espectrales en imágenes fusionadas con el pancromático.



La resolución espectral es la más importante en las imágenes de satélite aplicadas a la exploración de yacimientos minerales. Esta resolución es la que define la capacidad de un sensor para detectar zonas de ciertos minerales de alteración en la superficie de la Tierra basándose en su absorción, reflexión o emisión de energía en ciertos rangos del espectro electromagnético hacia el sensor.

El espectro electromagnético es la distribución energética de las diferentes ondas electromagnéticas (como los rayos gama, la luz visible o los rayos X) y se representa como una franja graduada en longitud de onda (Fig. 2), ya sea en nanómetros, micrómetros o milímetros por el tamaño de las ondas, o en Hertz por la frecuencia de las mismas.

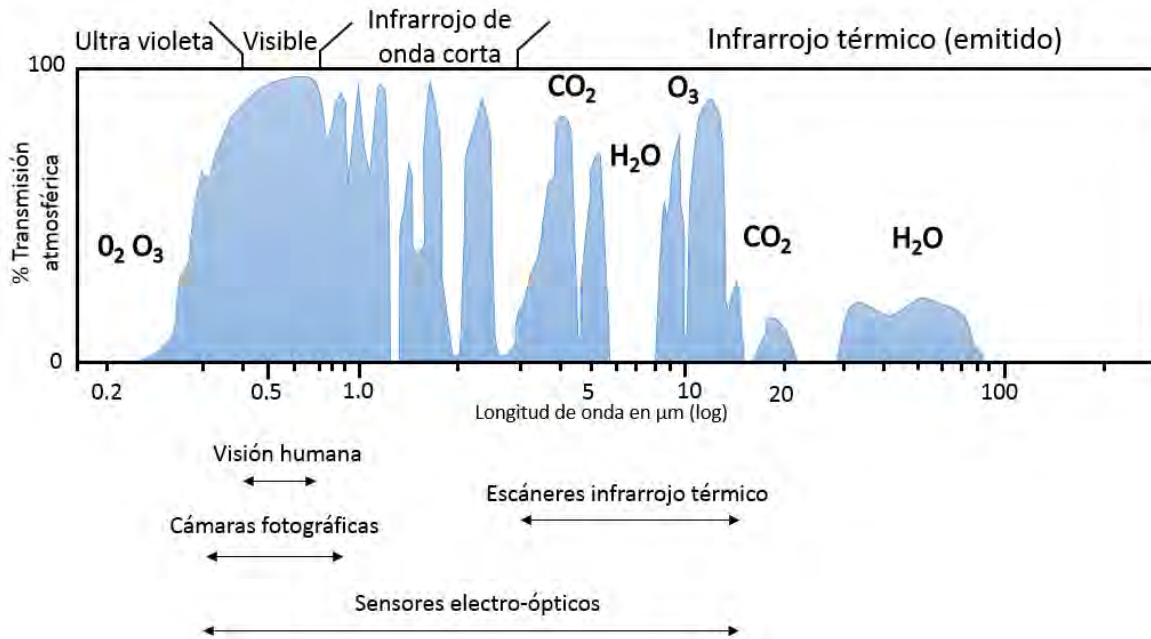


Fig. 2. Esquema de una parte del espectro electromagnético, de los  $\sim 0.2 \mu\text{m}$  a los  $>100 \mu\text{m}$  de longitud de onda. Las imágenes procesadas en este estudio pertenecen al rango del espectro indicado como “sensores electro-ópticos” que va de los  $0.3$  a los  $15 \mu\text{m}$  en longitud de onda. La sombra azul representa la parte en el que la atmósfera es capaz de transmitir energía. La parte del espectro donde la atmósfera es opaca a la transmisión de energía se debe a los compuestos indicados en el fondo blanco. Modificada de Alfultis, 2003.

El espectro electromagnético abarca longitudes de onda que van desde los rayos gamma ( $1 \times 10^{-13} \text{ m}$ ) que son del tamaño del núcleo atómico, hasta las ondas de radio ( $1 \times 10^4 \text{ m}$ ) cuyo tamaño se compara al de edificios grandes.

Incluidas en este espectro se encuentran las porciones del visible (con un rango de longitud de onda de  $\sim 0.38$  a  $\sim 0.76 \mu\text{m}$ ), del infrarrojo de onda corta (de  $\sim 0.76$  a  $\sim 2.5 \mu\text{m}$ ) y del infrarrojo térmico ( $\sim 2.5$  a  $\sim 13.0 \mu\text{m}$ ); en estos sectores del espectro es donde los sensores multispectrales tienen la capacidad de registrar datos que luego son transformados a imágenes digitales (Fig. 3).

Estos sectores son los que interesan en la percepción remota aplicada a la exploración de yacimientos minerales. El rango del visible (VIS) se puede utilizar para obtener imágenes en color natural (como una fotografía digital común) o para el realce de zonas de óxidos de hierro. De igual forma, la porción del infrarrojo de onda corta (SWIR) es de gran utilidad para obtener imágenes que realcen la presencia o identifiquen minerales de alteración hidrotermal del grupo de las arcillas. Por otro lado, el sector del infrarrojo térmico (TIR) es útil en la identificación de carbonatos y sílice.

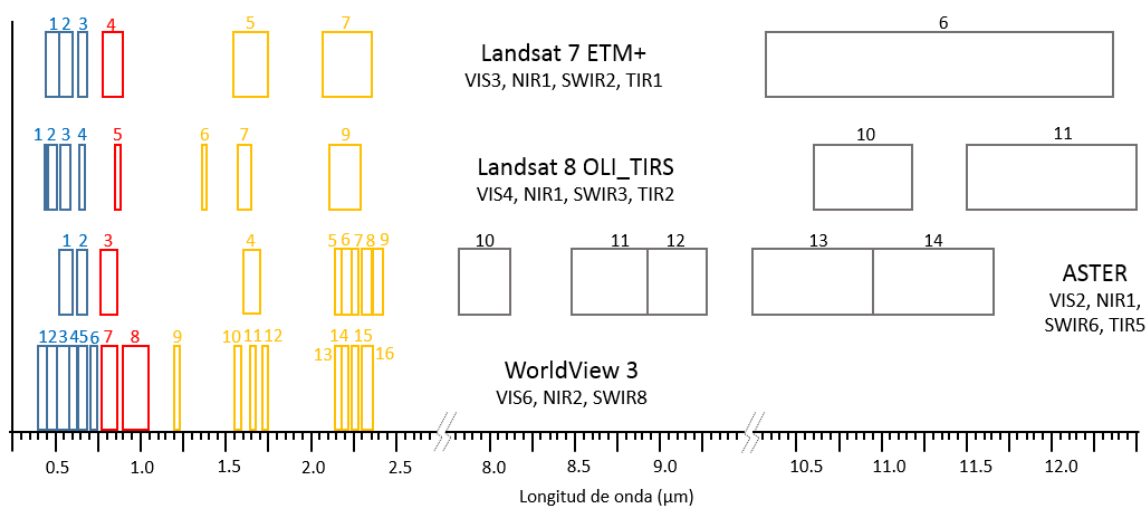
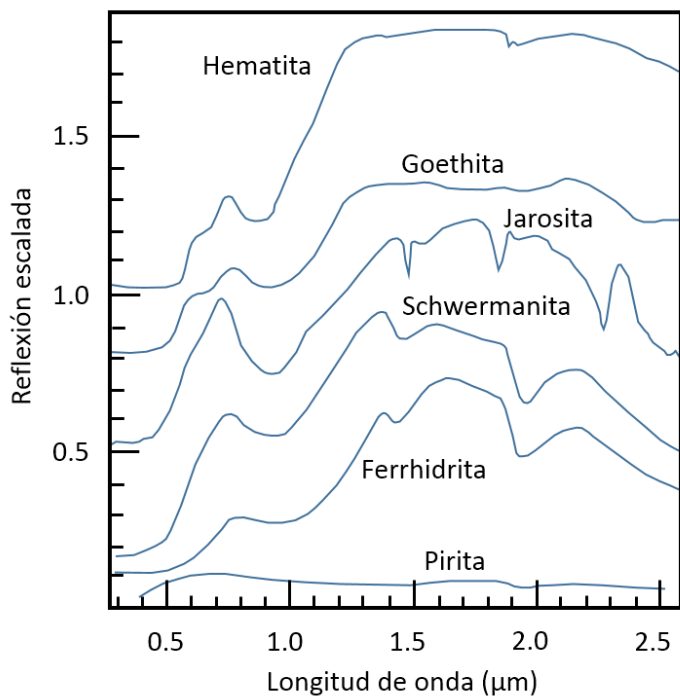


Fig. 3. Esquema mostrando las bandas de diferentes sensores satelitales respecto al espectro electromagnético. En color azul se muestran las bandas ubicadas en la porción del visible, en rojo las del sector del infrarrojo cercano, en color naranja las bandas en el infrarrojo de onda corta y en gris las que corresponden al infrarrojo térmico. Las interrupciones en la longitud de onda se deben a la amplia separación entre los sectores. En el caso de los sensores Landsat 7 y 8 no se muestra la banda 8 que es la banda pancromática de alta resolución. Los datos de longitud de onda para las bandas de cada sensor fueron tomados de la página del Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS) <https://landsat.usgs.gov/what-are-band-designations-landsat-satellites> para Landsat, del Jet Propulsion Laboratory (JPL) de la NASA (<https://asterweb.jpl.nasa.gov/characteristics.asp>) para el sensor ASTER y de [https://dg-cms-uploads-production.s3.amazonaws.com/uploads/legal\\_document/file/49/DS-SWIR\\_DS\\_0416\\_web.pdf](https://dg-cms-uploads-production.s3.amazonaws.com/uploads/legal_document/file/49/DS-SWIR_DS_0416_web.pdf) para el sensor WorldView3.

Gracias a que los materiales en la superficie terrestre tienen características únicas de reflexión, absorción y emisión de energía en ciertas partes del espectro electromagnético, es posible reconocerlos e identificarlos usando imágenes multispectrales. A estas características (únicas para cada material), se les denomina firma espectral. Los minerales de alteración hidrotermal, así como la sílice y los óxidos de hierro tienen firmas espectrales muy distintivas, y sus rangos de absorción y reflexión son muy contrastantes entre ellos (Sabins, 2007).

Los óxidos de hierro férrico, como la hematita o goethita, poseen en su firma espectral picos de absorción y reflexión en el rango visible del espectro. Los minerales de arcillas como montmorillonita, esmectita, pirofilita, ilita, caolinita, alunita, entre otras, se caracterizan por tener estos picos en el sector del infrarrojo de onda corta. Cabe mencionar que las firmas de estos minerales de alteración son muy parecidas entre ellas, la diferencia principal que las identifica radica en la longitud de onda donde se ubican esos picos. Así mismo existen minerales que son importantes para la exploración minera, pero que su detección o identificación es difícil con espectrometría; tal es el caso de la pirita, que carece de picos de absorción-reflexión relevantes (Fig. 4), ya que se comporta de manera plana en todo el rango detectable del espectro electromagnético (Swayze *et al*, 2000).



*Fig. 4. Firmas espectrales de minerales seleccionados en un gráfico de reflexión escalada contra longitud de onda. Nótese el llano comportamiento de la firma para la pirita, lo que hace difícil identificarla por espectrometría. Modificado de Swayze *et al* (2000).*

En la Figura 5 se muestran algunos ejemplos de firmas espectrales de minerales de alteración de interés en la exploración por yacimientos minerales. Los picos de absorción y reflexión característicos para estos minerales se manifiestan en la porción del infrarrojo de onda corta (con longitudes de onda de los 0.76 a los 2.5  $\mu\text{m}$ ). Se marcan en línea punteada las longitudes de onda donde éstos son más evidentes (Fig. 5a). Otro sector del espectro que es de interés en la exploración por yacimientos minerales es el infrarrojo térmico (de 8 a 13  $\mu\text{m}$ ), en esta porción, los sensores registran la emisión y no la reflexión de energía, es decir, se basan en la capacidad de los materiales para emitir energía más que para reflejarla. Ejemplos de minerales o rocas que se pueden detectar en este rango son aquéllos con alto contenido de sílice. La Figura 6 muestra las firmas espectrales de algunos tipos de roca con respuesta dentro de este rango, nótese cómo conforme mayor es la cantidad de sílice, los picos de absorción y emisión en el rango de los 9 a los 13  $\mu\text{m}$  se hacen más evidentes.

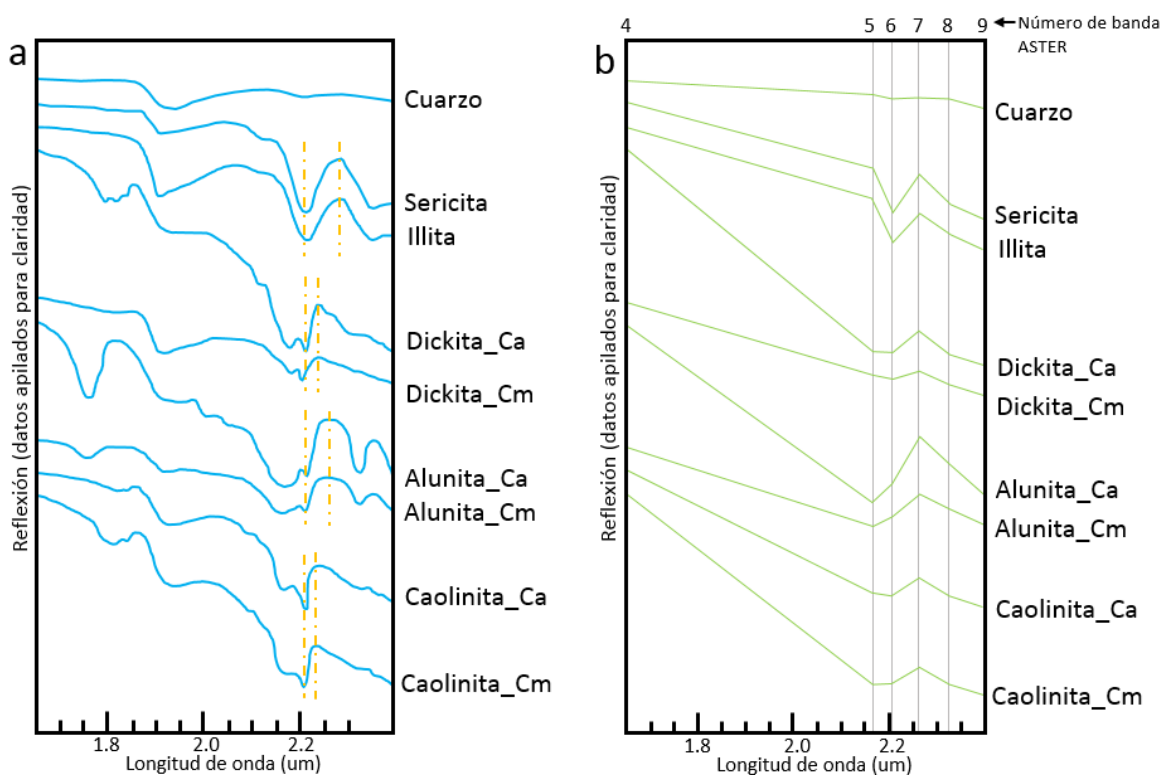


Fig. 5. Firmas espectrales de algunos minerales de alteración hidrotermal. a) firmas espectrales de laboratorio; b) firmas re-muestreadas a las bandas del sensor ASTER. El sufijo “\_Ca” y “\_Cm” en los minerales dickita, alunita y caolinita indican cristalinidad alta y cristalinidad media respectivamente. Las firmas están movidas sobre el eje Y para permitir la visualización. Modificado de Ducart (2005).

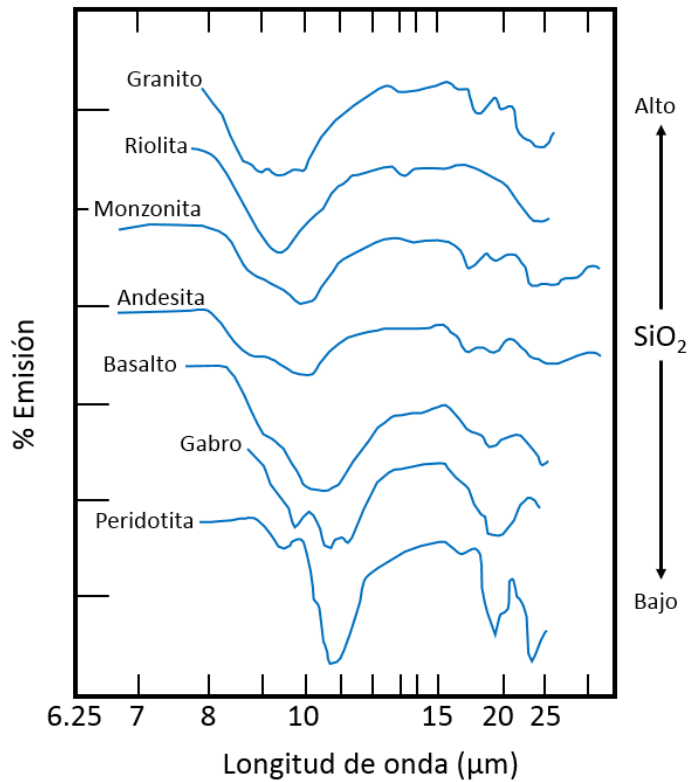


Fig. 6. Firmas espectrales de algunos tipos de roca con diferentes contenidos de sílice. El eje vertical izquierdo indica el porcentaje relativo de emisión de energía. El eje vertical derecho indica la abundancia de sílice (Modificada de Kobayashi et al., 2010)

Ningún sensor multiespectral tiene la capacidad de registrar la información completa de todo el rango del espectro VIS-TIR, en primer lugar porque la atmósfera no transmite la energía de ciertas longitudes de onda (Fig. 2) y en segundo, porque los sensores son diseñados para registrar sólo ciertas bandas del espectro según sea el objetivo del fabricante.

Por otro lado, hoy en día se cuenta con sensores que poseen, al mismo tiempo, alta resolución espacial (tamaño de píxel pequeño) y alta resolución espectral (decenas de bandas espectrales), tal es el caso del sensor WorldView 3. Este sensor, lanzado en 2014, y operado por la compañía *DigitalGlobe* (E.U.), es capaz de coleccionar imágenes con una resolución espacial de 30 cm en su subsistema pancromático (escala de grises), 1.2 m en su subsistema que va desde el visible hasta el infrarrojo cercano, 3.7 m en el infrarrojo de onda corta y de 30 m en el sector que va de 0.405 a 2,245  $\mu\text{m}$  (CAVIS *Clouds, Aerosols, Vapors, Ice, and Snow*, correcciones para nubes, aerosol, vapor, hielo y nieve). Estas características, hacen que WorldView 3 sea el sensor más avanzado a la fecha para el análisis de yacimientos minerales (entre otras muchas disciplinas más).

Otros sensores que cuentan con menor resolución espacial, de los 15 a los 100 m, tienen también altas resoluciones espectrales, de 7 a 14 bandas. Ejemplos de ellos son los sensores Landsat 8 OLI-TIRS (E.U.) y ASTER (E.U. / Japón).

Independientemente del sensor seleccionado para la exploración por yacimientos minerales, las imágenes colectadas deben primero ser tratadas con un pre-proceso para, primero, calibrarlas a valores de radiación y luego, para corregir los efectos de la atmósfera, con ello se obtiene una imagen con valores de reflexión. Una vez completado el pre-proceso se utilizan diferentes metodologías como el álgebra y composición de bandas y la clasificación digital para obtener con los resultados ésta información de las alteraciones o minerales de interés. Al final, se hace necesario un post-proceso, que consta de la geo-referencia y orto-rectificación de los resultados, esto para que las imágenes puedan ser utilizadas en cualquier sistema de información geográfica o en forma de mapas.

Estos procesos pueden ser aplicados al estudio de yacimientos minerales apoyados en modelos tipo pórfido de cobre y/o epitermal, mismos que son ampliamente aceptados en geología económica, como por ejemplo el de Seedorff *et al.* (2005) para pórfidos de cobre, o el de Buchanan (1981) para epitermales. Estos modelos indican, entre otras cosas, las zonas de alteración asociadas a la mineralización (Fig. 7). Entre los minerales de alteración reconocidos para estos tipos de depósitos están la sílice, caolinita, alunita, clorita, epidota, sericita, esmectita, illita, calcita, entre otras.

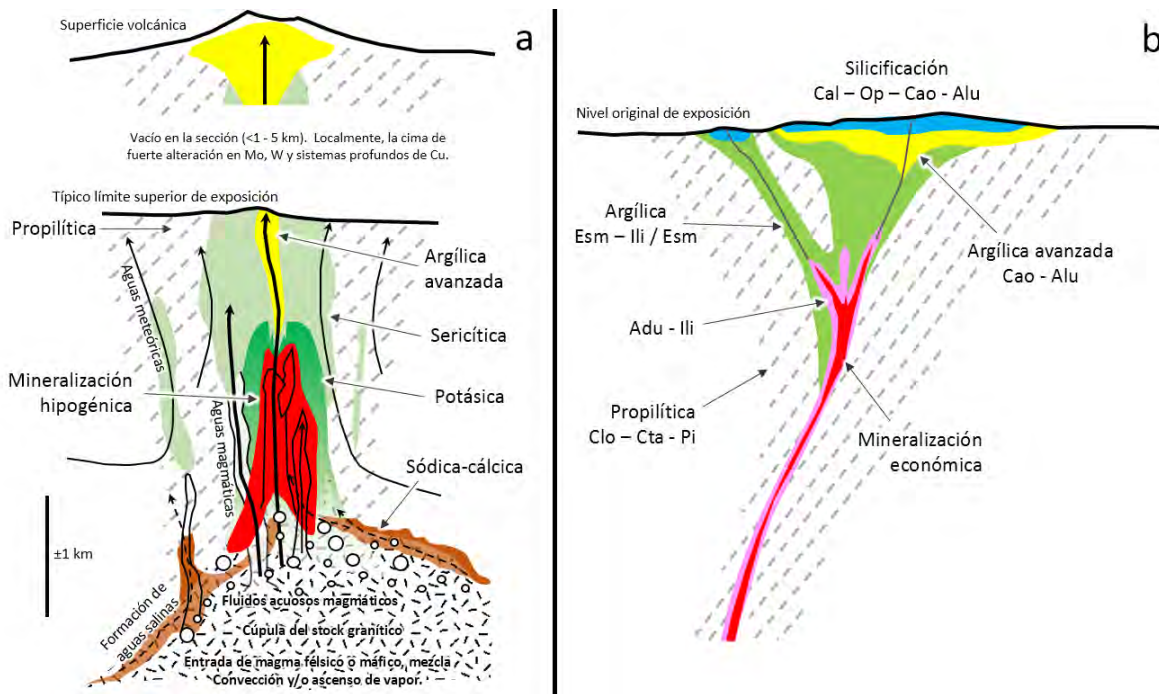


Fig. 7. Modelos de alteración para a) depósitos tipo pórfido de cobre (modificado de Seedorff et al., 2005); b) depósitos tipo epitermal (modificado de Buchanan, 1980). Abreviaciones: Adu - adularia, Alu - alunita, Cal - calcedonia, Cao - caolinita, Clo - clorita, Cta - calcita, Esm - esmectita, Ili - Ilita, Mag - magnetita, Op - ópalo, Pi - pirita.

Utilizando estas bases se pueden establecer similitudes en la abundancia y ubicación espacial de los minerales de alteración obtenidos de las imágenes multiespectrales con las que en estos modelos se proponen. Con el apoyo del análisis estructural en el área de estudio, los modelos de yacimientos pueden ser imaginariamente erosionados, fallados y/o basculados para hacerlos coincidir con la distribución de las alteraciones extraídas de las imágenes procesadas.

En el estudio de yacimientos minerales, las imágenes de sensores que tienen bandas únicamente en la porción visible e infrarrojo cercano del espectro (como por ejemplo WorldView 2), sólo pueden ser procesadas para realzar la presencia de zonas de oxidación de hierro férrico, como hematita o goethita. Estas imágenes podrían ser usadas como parte del análisis de depósitos donde la hematita juega un papel importante, como son los de tipo IOCG (*Iron Oxide-Copper Gold*) ya que éstos se caracterizan principalmente por sus elevados contenidos de hematita (Sillitoe, 2003), sin embargo, no es posible con estas

imágenes diferenciar minerales del grupo de las arcillas, aunque sí se lograrían identificar zonas de blanqueamiento (*bleaching*), mismas que potencialmente podrían corresponder a zonas de alteración.

Actualmente los sensores más utilizados para la extracción de zonas de alteración son el Landsat 8 OLI-TIRS y el ASTER. Con el primero es posible identificar anomalías de color que se podrían interpretar como zonas de alteración por arcillas, pero debido a la posición y ancho de las bandas de este sensor en el infrarrojo, no es posible identificar los minerales que conforman la alteración. El sensor ASTER tiene la suficiente resolución espectral en la porción del infrarrojo de onda corta para mapear zonas de minerales de alteración hidrotermal asociadas a pórfidos de cobre y epitermales (Pour and Hashim, 2012). Por otro lado, las rocas con alto contenido de sílice son identificables en cualquiera de los dos sensores ya que ambos cuentan con bandas en la porción del infrarrojo térmico.

A pesar de lo anterior, no significa que un sensor sea mejor que otro, esto sólo indica que cada sensor es útil en diferentes etapas y objetivos de la exploración de yacimientos minerales, así, el sensor Landsat 8 es altamente recomendado para la exploración regional ya que cada escena individual (es decir una sola toma), cubre un polígono de 185 x 185 km. Con un procesamiento adecuado, la aplicación de algoritmos y álgebra de bandas, especialmente configuradas para el realce zonas de óxidos de hierro y de grupos de alteraciones, es posible obtener imágenes que servirán de guía para la identificación de áreas potenciales para albergar posibles yacimientos minerales. Una vez seleccionadas dichas áreas con este sensor, se puede usar después el sensor ASTER para estudiar las zonas seleccionadas, ahora con una mayor resolución espectral. Luego de la identificación de los minerales de interés, se pueden extraer clústeres de las alteraciones detectadas y convertirlos a polígonos vectoriales para su uso y aplicación en un sistema de información geográfica (SIG).

El proceso espectral para la extracción de alteraciones en imágenes multiespectrales inicia con la selección correcta de la imagen, utilizando la que menor contenido de nubes y vegetación tenga. La corrección atmosférica es también de suma importancia ya que este proceso elimina el “ruido” en las imágenes que es provocado por la dispersión de la energía al viajar desde el objeto en la Tierra hasta el sensor (Mendivil-Quijada, 2012). Luego, la selección correcta de las combinaciones de bandas, cocientes, álgebra y algoritmos utilizados



para el realce del o los minerales de interés es crítica, ya que de esto depende que se puedan identificar alteraciones relevantes para la definición de blancos de exploración. Es importante enfatizar que la precisión en la identificación y detección de zonas de oxidación, alteración y sílice utilizando imágenes obtenidas de diferentes sensores, está totalmente supeditada al tratamiento aplicado previo al análisis (pre-proceso).

### **3.2 Alteración hidrotermal.**

Muchos cuerpos mineralizados son depositados por fluidos termales acuosos a los que se les conoce como soluciones hidrotermales. Durante el depósito de la mineralización, estas soluciones interactúan químicamente con la roca huésped alterando su composición mineral por extensiones considerables, incluso más allá del sitio del depósito mineral. Las rocas alteradas hidrotermalmente contienen arreglos distintivos de minerales secundarios llamados “minerales de alteración” que reemplazan a algunos de los minerales originales de la roca. Los minerales de alteración ocurren comúnmente en secuencias distintas o “zonas de alteración hidrotermal” relativas al cuerpo mineral (Sabins, 2007).

Para simplificar su estudio, normalmente los diferentes minerales de alteración se agrupan en conjuntos de minerales de alteración en el mismo estado de estabilidad. El método más simple para una agrupación de este tipo es mediante la utilización del mineral más abundante y más obvio en la roca alterada. Algunos ejemplos de estas agrupaciones son: silicificación ( $\text{SiO}_2$ ), sericitización (micas blancas), argilización (minerales del grupo de las arcillas), cloritización (clorita), epidotización (epidota) y actinolitización (actinolita). Estas asociaciones normalmente reflejan condiciones relativas de pH, presión y temperatura de formación. La Figura 8 muestra las asociaciones de minerales de alteración relacionadas al grado de acidez en el eje horizontal y a niveles de emplazamiento en el eje vertical.

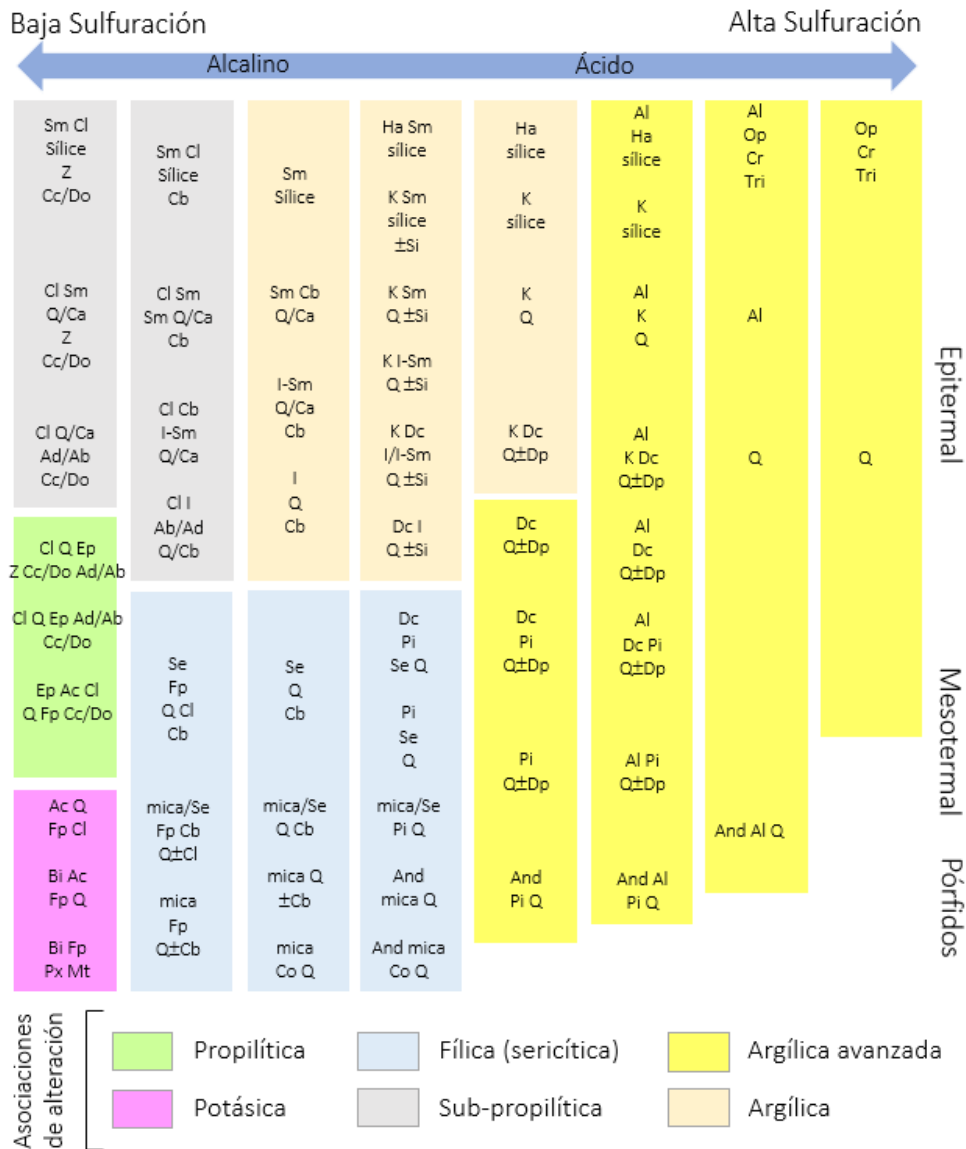


Fig. 8. Esquema de composición mineralógica de las alteraciones hidrotermales asociadas a la formación de depósitos minerales epitermales, mesotermiales y pórfidos según el pH de las soluciones mineralizantes. Abreviaciones: Ab - albita, Ac - actinolita, Ad - adularia, Al - alunita, And - andalucita, Bi - biotita, Ca - calcedonia, Cb - carbonatos (de Ca, Mg, Mn y/o Fe), Cc - calcita, Cl - clorita, Co - corindón, Cr - cristobalita, Dc - dickita, Dp - diáspora, Do - dolomita, Ep - epidota, Fp - feldespatos potásicos, Ha - halloysita, I - illita o illita-esmectita, K - caolinita, Mt - magnetita, Op - ópalo o sílice opalina, Pi - pirofilita, Px - clinopiroxenos, Q - cuarzo, Se - sericita, Si - siderita, Sm - esmectita o esmectita-illita, Tri - tridimita, Z - zeolitas (de menor a mayor temperatura: natrolita, chabazita, mordenita, heulandita; laumontita; wairakita). Modificado de Corbett y Leach, 1998; Camprubí et al., 2003.

Otros grupos de alteración registrados en la literatura son la alteración propilítica, cuarzo-sericítica, argílica intermedia, argílica avanzada, y potásica, siendo esta última la que se presenta en condiciones de más alta temperatura que el resto.

La alteración propilítica se caracteriza por la presencia de epidota y clorita, de todas las alteraciones ésta es la que más se extiende en distancia horizontal. Comúnmente se presentan en este tipo de alteración minerales como albita, calcita y piritita. Esta alteración representa un grado bajo de hidrólisis de los minerales de las rocas por lo que su posición en zonas alteradas es normalmente de carácter marginal. Además su temperatura de formación es la más baja respecto al resto.

La alteración sericítica o cuarzo-sericita ocurre cuando los feldespatos (plagioclasas y feldespato potásico) son transformados a sericita y cuarzo, con una menor abundancia en caolinita.

Por su parte, la alteración denominada como argílica intermedia se constituye de altas cantidades de caolinita, montmorillonita o esmectita que aparecen reemplazando principalmente a las plagioclasas; puede haber sericita junto a las arcillas. Esta alteración representa un grado más alto de hidrólisis (y más alta temperatura) respecto a la alteración propilítica.

La alteración argílica avanzada se genera al transformarse gran parte de los minerales de las rocas a dickita, caolinita, pirofilita, diásporo, alunita y cuarzo. Este tipo de alteración representa un ataque hidrolítico extremo de las rocas en que incluso se rompen los fuertes enlaces del aluminio en los silicatos originando sulfato y óxido de aluminio. En casos extremos la roca puede ser transformada a una masa de sílice oquerosa residual cuyo término generalizado es el de “*vuggy silica*”. Esta masa es un importante indicador de posición en sistemas de tipo epitermal.

Por último, la alteración potásica es la alteración de las plagioclasas y minerales máficos a feldespato potásico y/o biotita. Esta alteración corresponde a un intercambio catiónico con la adición de K a la roca. A diferencia de las anteriores, este tipo de alteración no implica hidrólisis y ocurre en condiciones de pH neutro o alcalino a altas temperaturas (principalmente en el rango 350°-550°C). Por esta razón, frecuentemente se refiere a la

alteración potásica como *tardimagmática* y se presenta en la porción central o núcleo de zonas alteradas ligadas al emplazamiento de cuerpos intrusivos. Este tipo de alteración es una guía importante en el estudio de yacimientos de tipo pórfido de cobre.

### **3.3 Yacimientos minerales en Sonora.**

El noroeste de México se caracteriza por contener una amplia variedad de yacimientos minerales. La gran mayoría de ellos mantienen una fuerte relación genética con la evolución y cristalización de cuerpos magmáticos. En este ambiente de formación se pueden desarrollar diversos tipos y estilos de mineralización, que incluyen pórfidos de Cu-Mo, Cu-Au, skarn de Cu-Zn, Cu-Zn-Pb-(Ag), W, Fe, reemplazamiento (Pb-Zn-Ag), brechas y depósitos epitermales de alta y baja sulfuración, como ha sido documentado por varios autores entre los que destacan Sillitoe (2010), Tittley y Beane (1981), Tittley (1982b), Seedorff (2005), entre otros.

Por otro lado, otros depósitos minerales denominados como oro orogénico “*Orogenic Gold*”, se encuentran distribuidos preferentemente en el NW de Sonora, y en la actualidad, algunos de ellos han sido cuestionados en su origen, denominándolos más como depósitos relacionados a intrusivos “*Intrusion Related*” (Sillitoe, 2014 y 2015, comunicación personal). Aunque estos depósitos mantienen una edad asociada a la orogenia Laramide (80-40 Ma), como es el caso de los depósitos tipo pórfido de cobre, a pesar de su relativa cercanía aún no se conoce una relación genética entre ellos. Por otro lado, algunos autores estiman que podrían haberse formado en partes más profundas asociados a un sistema de zona de subducción como ha sido sugerido por Groves *et al.*, (1998).

Aunque el noroeste de México, y especialmente el Estado de Sonora, muestra una fuerte presencia de depósitos de hierro normalmente catalogados como tipo skarn (Pérez-Segura, 1985; Ochoa-Landín *et al.*, 2014), se han definido depósitos de hierro magmático tipo kiruna, que actualmente se han incluido como tipo IOCG. De manera informal, estos depósitos, que marcan un estilo y tipo de mineralización de hierro en el sur de Sonora, suroeste de Chihuahua, norte de Sinaloa y norte de Baja California, parecen ubicar una provincia metalogenética para este tipo de depósitos (Ochoa-Landín *et al.*, en preparación).

Por otro lado, Sonora abarca una serie de yacimientos catalogados como no metálicos, los cuales incluyen depósitos de sales de sodio (thenardita, trona), boro, litio, etc., que se distribuyen mayormente a lo largo de cuencas asociadas a la extensión del “*Basin & Range*”, desarrolladas desde antes de los 26 Ma (Calmus *et al.*, 2015).

A continuación se hace una descripción generalizada de los depósitos minerales más importantes tipo pórfido de cobre y epitermales en Sonora, cuya mayoría presenta un arreglo en tiempo y espacio formando verdaderas provincias metalogenéticas, como ha sido mencionado por diferentes autores (Pérez-Segura, 1985; Clark, 1991, 2010).

### 3.3.1 Pórfidos de Cobre

Los depósitos tipo pórfido de cobre en el NW de México se encuentran asociados a plutones de afinidad calcoalcalina, emplazados durante la etapa de convergencia de la placa Farallón bajo la placa de Norteamérica. Éstos presentan una amplia distribución a lo largo de cinturones orogénicos del Fanerozoico, comúnmente presentes en el noroeste de México y suroeste de Estados Unidos (Fig. 9).

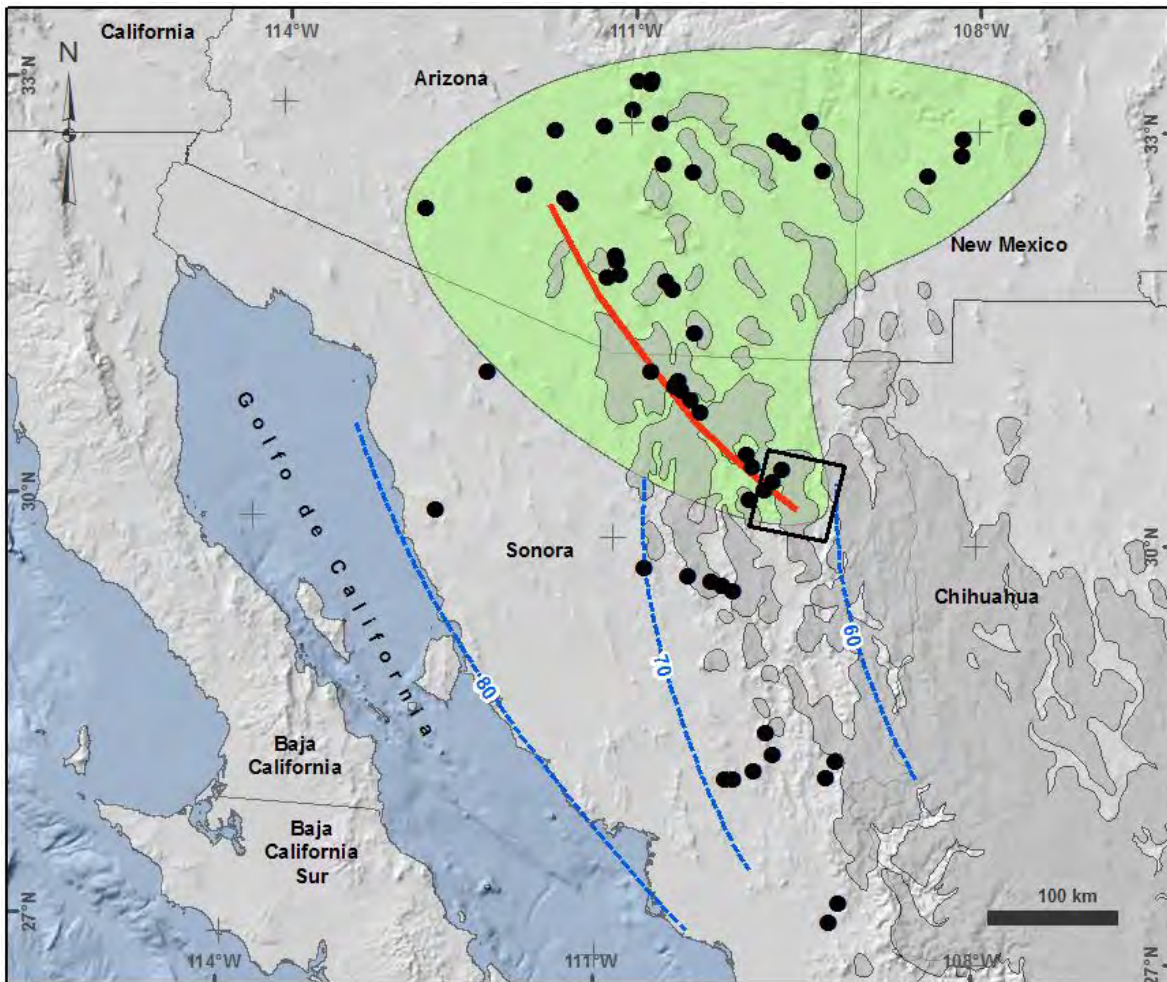


Fig. 9. Distribución de los depósitos tipo pórfido de cobre a lo largo del cinturón Laramide del noroeste de México y suroeste de Estados Unidos. El área en color verde representa el Gran Clúster de pórfidos de cobre de Sonora, Arizona y Nuevo México. Las áreas grises indican la distribución de las rocas volcánicas del Cenozoico. Las líneas azules son líneas de igual edad en Ma. La línea que se presenta en color rojo muestra el lineamiento Silver Bell-Cananea (Hollister, 1978). Modificado de Del Río Salas et al., (2017).

Los cuerpos magmáticos generadores de los stocks porfídicos mineralizadores fueron emplazados a profundidades relativamente someras, que varían entre 4 a 8 km, como ha sido documentado por varios autores (Wodzicki, 1995; Zurcher, 2002; Flores-Vázquez, 2005; Zúñiga-Hernández, 2010). Los stocks porfídicos generados durante la cristalización de estos cuerpos magmáticos forman sistemas hidrotermales gigantes con miles de kilómetros cúbicos de roca alterada, acompañada con mineralización hipogénica. El tamaño de los sistemas porfídicos son variables, desde pocos millones a miles de millones de toneladas, con leyes que van desde 0.2 a 2% de Cu y 0.01 a 0.6% de Mo. (Valencia-Moreno *et al.*, 2006).

En el noroeste de México, este cinturón está formado por rocas intrusivas y volcánicas con edades que varían desde el Mesozoico hasta el Cenozoico, mismas que fueron emplazadas en un basamento conformado por rocas precámbricas graníticas y metamórficas, así como rocas paleozoicas de facies del miogeosinclinal (Sillitoe, 1976; Stewart, 1988; Zurcher, 2006). Los depósitos de tipo pórfido de cobre en esta región del país guardan una clara relación en tiempo y espacio con intrusiones graníticas laramídicas. Estos depósitos incluyen grandes áreas de alteración hidrotermal del tipo potásica, filica, propilítica y argílica, relacionados en la mayoría de los casos a cuerpos sub-volcánicos o cuerpos hipabisales que varían en composición desde monzonita a cuarzo-diorita. La Tabla 1 muestra las características geológicas de zonas con mineralización del tipo pórfido de cobre en Sonora.

La mineralización de Cu en estos depósitos se encuentra principalmente en zonas de “*stockwork*” o en forma diseminada, la mayoría de las veces en rocas volcánicas pre-laramídicas o comagmáticas, y dentro de cuerpos intrusivos sub-volcánicos. Adicionalmente, concentraciones significativas de Mo, Ag, Au, W y Zn están presentes en estos tipos de depósitos. Aunque las leyes de cobre en la mineralización hipogénica fluctúan entre 0.2 a 0.3% de Cu, las altas leyes de cobre y su gran tonelaje proviene de potentes cuerpos horizontales (*blankets*) con espesores, en algunos casos, de más de 200 m, y con una fuerte extensión horizontal que alcanza varios kilómetros, como sucede en la mina Buenavista del Cobre (conocida anteriormente como mina de Cananea), producto de enriquecimiento supergénico y compuestos por limonitas conteniendo hematita, goethita y jarosita mezclada con arcillas supergénicas.

Por otro lado, este tipo de yacimientos desarrollan distintos estilos de mineralización, como por ejemplo zonas de skarn, como es el caso del distrito de Cananea, con mineralización de Zn-Cu, producto del reemplazamiento de rocas carbonatadas paleozoicas intercaladas con cuarcitas (Meinert, 1982), cuyos contenidos alcanzan más de 30 Mt con leyes del orden de 3% de Cu y 0.8% de Zn. Otras veces se desarrolla mineralización dentro de zonas de brechas tipo “*pipe*” como producto de una intensa fracturación en la cúpula de cuerpos intrusivos y posterior relleno de fluidos inmiscibles originados a partir de un magma a profundidad, como ocurrió en la brecha La Colorada, en Cananea (Bushnel, 1988), o la brecha María en el mismo distrito (Wodzicki, 2001), La Caridad (Pilares de Nacozari), El Batamote, El Alacrán (Arellano-Morales, 2004), y Cumobabi (Scherkenbach *et al.*, 1985).

Los depósitos tipo pórfido de cobre en el noroeste de México guardan una gran similitud con aquellos del suroeste de Norteamérica en lo que respecta a su geometría, patrones de alteración, mineralización y tectónica; solamente se puede presentar variaciones en contenido metálico de Cu, Mo, y Au, debido a la composición del basamento en el cual fueron emplazados (Valencia-Moreno *et al.*, 2006). Este basamento, en la porción centro-norte de Sonora, está conformado por rocas cristalinas y sedimentos de facies miogeosinclinal pertenecientes al cratón de Norteamérica. En cambio hacia el sur, el basamento parece estar conformado por una serie de bloques o terrenos, algunos de ellos fuertemente deformados y metamorfoseados, con facies eugeosinclinal y más hacia el sur el basamento parece corresponder a arcos volcánicos acrecionados al continente durante el Cretácico (p. ej. Terreno Guerrero), lo que podría inducir un cambio en la mineralogía metálica.

La tectónica de distensión durante gran parte del Cenozoico en el noroeste de México, desarrolló extensas y alineadas cuencas, como aquellas que rodean a los grandes depósitos de Buenavista, La Caridad y algunos yacimientos del mismo tipo en el centro de Sonora, como es el caso de Suaqui Verde y Cuatro Hermanos. Evidencias geológicas y radiométricas sugieren que el desarrollo de estas cuencas ocurrió durante o directamente después de la formación del enriquecimiento supergénico, desarrollando ciclos de enriquecimiento alrededor de los 23 Ma o antes (Ochoa Landín *et al.*, 2007; 2017). Esta etapa tectónica extensional debió impactar directamente en este tipo de depósitos, moldeando su morfología



actual y disectando zonas de mineralización, destruyendo de manera periódica las etapas de enriquecimiento supergénico, conformando distintos ciclos en algunos de ellos y, aunado a las condiciones climáticas adecuadas durante esta etapa, pudieron influir en el movimiento y migración lateral de soluciones enriquecidas, con el desarrollo de posibles cuerpos de Cu exótico relacionados en algunos lugares en esta región, como sucede en el área de Cananea, El Pilar, La Caridad, y aún en yacimientos no tan grandes como en Suaqui Verde y Cuatro Hermanos, en la parte centro-sur del Estado.

Tabla 1. Características geológicas y mineralógicas de los depósitos tipo pórfido de cobre en el estado de Sonora (modificada de Valencia-Moreno *et al*, 2006).

Distrito	Metales	Tipo de miner.	Rocas pre-min.	Rocas intrusivas	Edad (Ma)	Método	Mineralogía	Ton. (Mt)	Contenido metálico
Cananea	Cu-Mo-Zn	sw, b, sk	gd, mz-d	i cz-feld	59.9 ± 2.0	K-Ar (flo)	Py, Ccp, Mbd, Cc	7.14	0.42% Cu; 0.008% Mo; 0.58 g/t Ag; 0.012 g/t Au
María	Cu-Mo	sw, b	gd	cz-feld	57.4 ± 1.6	Re-Os (Mbd)	Py, Ccp, Mbd	8.6	1.7% Cu; 0.1% Mo
Mariquita	Cu-Mo	sw, b	gd, mz-d	i cz-feld	~63	Re-Os (Mbd)	Py, Ccp, Cc	100	0.48% Cu
Lucy	Mo-Cu	sw	gd	gd	~63	Re-Os (Mbd)	Mbd, Ccp	-	-
Milpillas	Cu	sw	gd	cz-feld	63.0-63.1	Re-Os (Mbd)	Ccp, óxidos	230	0.85% Cu
El Alacrán	Cu-Mo	sw, b	gd	cz-lat	56.7 ± 1.2	K-Ar (Bt)	Py, Ccp, Cc	2.4	0.35% Cu
La Caridad	Cu-Mo	sw, b	gd	cz-mz	53.8-53.6	Re-Os (Mbd)	Py, Ccp, Mbd, Cc	1,800	0.452% Cu; 0.0247% Mo
Pilares	Cu-Mo-W	b	gd	cz-mz	~53	-	Py, Ccp, Mbd, Sp	147	1.04% Cu
Bella Esperanza	Cu-Mo	sw, b	gd	cz-mz	55.9 ± 1.2	K-Ar (Bt)	Py	-	-
Los Alisos	Cu	sw, b	gd	dac?	-	-	Py, Ccp, Mbd, Cc, Cv	-	0.13% Cu
Florida-Barrigón	Cu-Mo	sw	gd	gr, micro-di	52.4 ± 1.1	K-Ar (Ser)	Py, Ccp, Mbd	85	0.32% Cu; 0.022% Mo; menor W
El Batamote	Cu-Mo	sw, b	gd	cz-mz	56.8 ± 1.2	K-Ar (Bt)	Py, Ccp, Mbd, Cc	4.4	0.36% Cu
San Judas	Mo-(Cu-W)	b, sw	mz	-	40.0 ± 0.9	K-Ar (Bt)	Mbd, Py, Ccp, Ttr, Sp, Gn	2	0.25% Cu, 0.2% Mo
Transvaal	Mo-Cu	b	mz	-	-	-	Py, Ccp, Mbd	-	0.4% Cu, 0.2% Mo
Cobre Rico	Cu	b	gd	-	-	-	-	-	2% Cu
Washington	Cu-Mo-W	b	gd	-	45.7 ± 1	K-Ar (Ser)	Py, Ccp, Sch, Mbd	1.2	1.8% Cu; 0.106% Mo; 0.14% W; 0.17 g/t Au; 15.8 g/t Ag
El Crestón	Mo	sw, b	gd	cz-feld	53.5 ± 1.1	K-Ar (Ser)	Mbd, Ccp	100	0.16% Mo; 0.15% Cu
Suaqui Verde	Cu-Mo	sw, b	gd	cz-di	56.7 ± 1.1	K-Ar (Ser)	Py, Ccp, Mbd, Cc	-	0.1-0.15% Cu
Cuatro Hermanos	Cu-Mo	sw, b	-	gd, gr	-	-	Py, Ccp, Mbd, Cc	233	0.431% Cu, 0.035% Mo
San Antonio de La Huerta	Cu-Mo	b	-	dac, micro-di	57.4 ± 1.4	K-Ar (matriz)	Mbd, Cc, Py, Ccp	14.5	0.73% Cu, 0.42 g/t Au
Aurora	Cu-Mo	sw, b	cz-mz	mz-mz	58.8 ± 1.8	K-Ar(Bt)	Py, Ccp, Mbd	-	0.1% Cu, 0.015% Mo
Los Verdes (San Nicolás)	W-(Mo)	sk	gd	gr, peg	49.6 ± 1.2	K-Ar (Bt)	Py, Ccp, Sch, Wfr	10	1.3% W, menor Mo
Tres Piedras	Mo-W-Cu	b	gd	gr, peg	55.7 ± 0.8	Ar/Ar (Ms)	Py, Ccp, Bn, Mbd, Sch, Wfr	-	-
Piedras Verdes	Cu-Mo	sw	gd	gd	~60	Re-Os (Mbd)	Py, Ccp, Mbd, Cc	105	0.1 a 0.15 % Cu

Tipo de mineralización. sw: *stockwork* y vetas; sk: skarn; b: brecha

Rocas intrusivas. cz-feld: pórfido cuarzo-feldespático; lat: latita; di: diorita; mz: monzonita; gr: granito; gd: granodiorita; peg: pegmatita; rdc: riocacita; rio: riolita; tn: tonalita. Minerales fechados. Bt: biotita; FK: feldespato potásico; flo: flogopita; Hbl: hornblenda; Ms: muscovita; Mbd: molibdenita; Ser: sericita. Mineralogía metálica. Arg: argentita; Apy: arsenopirita; Bn: bornita; Cc: calcocita; Ccp: calcopirita; Cv: covelita; Gn: galena; Mbd: molibdenita; Py: pirita; Pow: powellita; Sch: scheelita; Sp: esferita; Ttr: tetradrita; Wfr: wolframita.

### 3.3.2 Depósitos Epitermales

El termino epitermal define aquellos depósitos formados a <1 km de profundidad, temperaturas bajas (entre ~300 y ~150 °C), y a partir de fluidos hidrotermales predominantemente meteóricos, con salinidades menores de 10% de NaCl equivalente. Por lo regular están hospedados dentro de secuencias de rocas volcánicas, normalmente del Cenozoico y parecen guardar una fuerte similitud en tiempo, espacio y génesis parecida a la de los sistemas geotermales activos, reconociéndose a los primeros como sistemas fósiles de estos últimos, como ha sido sugerido por Giggenbach (2003) y White y Hedenquist (1995). Todos ellos guardan una serie de estructuras distintivas (minerales de alteración, estructuras de relleno, crustificación, brechas multifásicas, etc.) y una serie de concentraciones elementales que los caracteriza como Au, Ag, As, Sb, Hg, Se, Te, Tl, Pb, Zn y U (Buchanan, 1981; Berger, 1985, 1986 y otros).

El marco tectónico asociado a este tipo de depósitos está relacionado a zonas de subducción (Swakins, 1972; Sillitoe y Hedenquist, 2003), sin embargo, Sillitoe y Hedenquist (2003), han sugerido una variedad de ambientes del tipo intra-, extra-, antearco y rift, donde se tienen distintivos y característicos tipos de vulcanismo, así como variación en mineralización y alteración de los depósitos epitermales asociados. Estas diferencias en el estilo tectónico, textural y mineralógico, aunado a las diferencias químicas de los fluidos hidrotermales incluidos durante la formación de este tipo de depósitos, han permitido separar dos tipos principales de depósitos epitermales (Sillitoe, 1977; Hayba et al. 1985; Bonham, 1988; Heald et al. 1987; Hedenquist, 1987) denominados como de alta y baja sulfuración. Aunque posteriormente, Hedenquist et al. (2000) han definido un tercer tipo denominado de sulfuración intermedia (IS). Las características mineralógicas, texturales y estructurales de cada uno de estos tipos y estilos de mineralización de depósitos epitermales es definido en la Tabla 2.

Para el Estado de Sonora, la mayoría de los depósitos epitermales se distribuyen preferentemente en su parte centro-oriental y en las estribaciones de la Sierra Madre Occidental (Fig. 10), siguiendo un cinturón de depósitos de alta y baja sulfuración que se extiende desde el sur de Chihuahua y norte de Sinaloa, que se prolonga hacia la porción este de Sonora. Para esta región del país, se tienen localizados más de diez distritos mineros

conteniendo depósitos epitermales (Staude y Barton, 2001), definidos en su mayoría como de baja sulfuración (adularia-sericita), y en menor grado del tipo de alta sulfuración (alunita-dickita) (González, 2008; Paez, 2013). En la Tabla 2 se describen de manera resumida las características geológicas y económicas sobresalientes de los distritos y minas más importantes de este tipo de depósito en el Estado de Sonora, tratando de rescatar a la vez algunos con menor información geológica (Fig. 10).

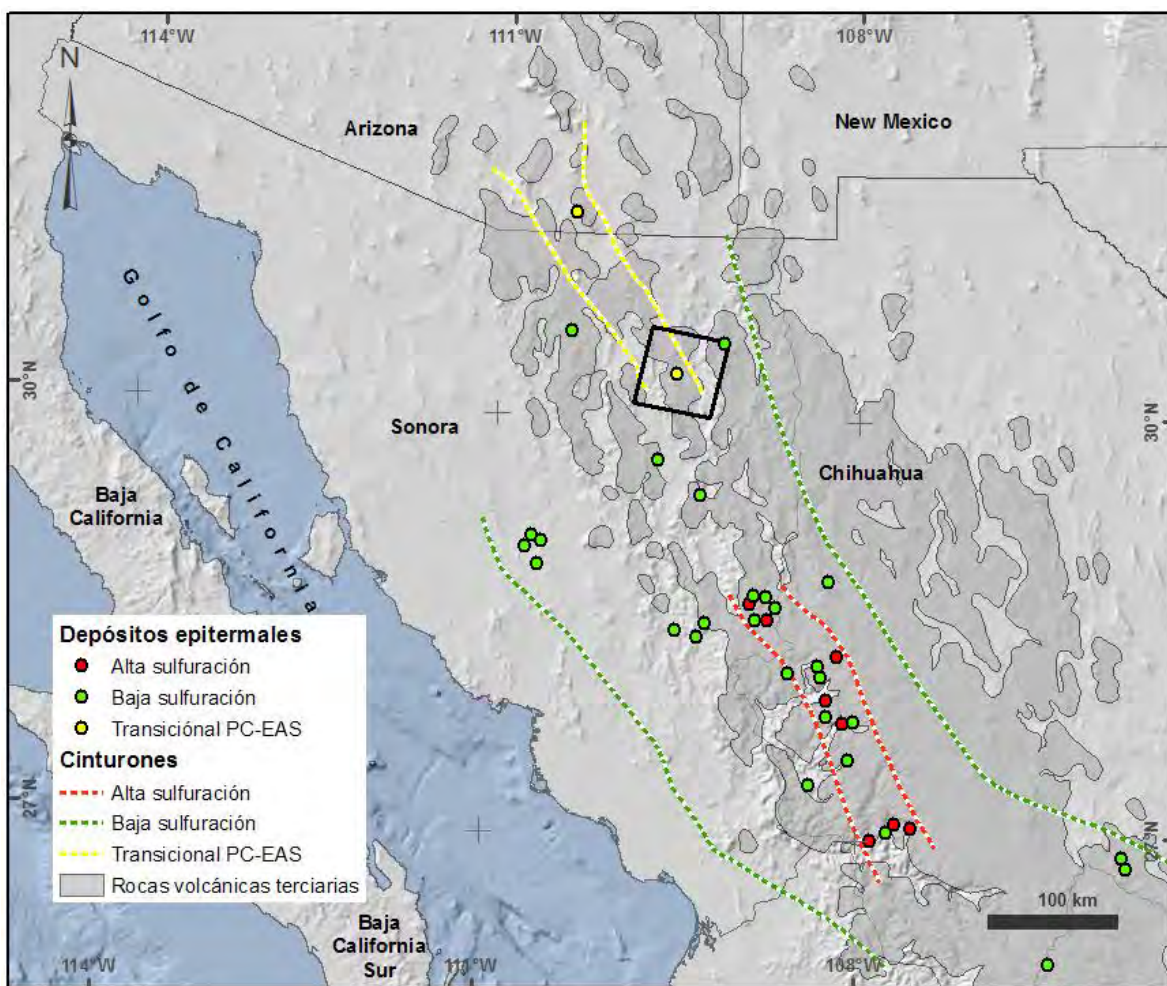


Fig. 10. Distribución de los depósitos tipo epitermal el noroeste de México. Se muestran en línea punteada los cinturones para este tipo de depósitos. El área en cuadrado negro representa el área de estudio. PC-EAS: Pórfidos Cupríferos-Epitermales de alta sulfuración. Modificado de Bejarano, 2017.

Tabla 2.-Características de los principales depósitos epitermales en el NW de México (modificada de González, 2008)

Depósito	Tipo	Metales	Mineralogía	Roca encajonante	Estructuras relacionadas	Estilo Ocurrencia	Control de min.	Recursos-Leyes	Edad de min. (Ma.)	Inclusiones fluidas
El Sauzal	AS	Au	Au nat, e, ba, pi, eng, he, cov, bo, ap, re, cp, cal.	Rocas piroclásticas dacíticas a riolíticas; entre CVI y SVS	Intersección de estructuras NW y NE	Diseminado, cuerpos tabulares con extensiones verticales <100m	Litológico	19 Mton, 3.4 ppm Au, 3.72 ppm Ag.	29.65±0.18 a 31.0±0.4	302.6°C de temperatura en una muestra con Au visible y 201.3°C en cuarzo estéril.
Palmarejo	BS	Au-Ag	Au nat, Ag nat, e, arg, ac, ga, esf, cr, carb, pi.	Riolitas, pizarras, tobas y flujos andesíticos	N-S a NNW	Vetas, brechas y stockworks	Fallas	20 Mton, 1.8 ppm de Au, 190 ppm de Ag 39.3 Mton, 1.46 ppm Au, 61 ppm Ag; eq. 1.85 Moz Au y 76.68 Moz Ag	-	-
Ocampo	BS	Au-Ag	Au nat, Ag nat, ac, arg, e, esf, cp, cz, pi, cal.	Tobas riolíticas, flujos andesíticos y dacíticos, y diorita porfídica; entre CVI y SVS	NW	Vetas, brechas y stockworks	Fallas	1.2 Moz Au eq., 5.6 ppm de Au, 118.8 ppm de Ag	29.2-27.8(K-Ar)	-
Pinos Altos	BS	Au-Ag	Au nat, e, cz, ser, ad, cal, pi.	Tobas y domos de composición andesítica y riolítica; entre CVI y SVS	NNW	Vetas y stockworks	Fallas	47.65 Mton, 1.35 ppm Au, eq. 2.5 Moz	-	Temperaturas desde 200 a 300°C y salinidades de 0.17 a 2.39 wt% NaCl eq.
Mulatos	AS	Au	E, pi, au, eng, ten, esf, tet, fam, luz, bis, co, cz, ba.	Dacitas porfídicas, tobas riolíticas, rocas volcanoclásticas, y conglomerados; en el CVI	N-S	Diseminados, cuerpos tabulares sub-estratiformes e irregulares	Contactos litológicos y fallas	36.8 Mton, 0.79 ppm Au, eq. 936,000 oz 101 Mton, 0.84 ppm Au, 40.8 ppm de Ag, eq. 2.73 Moz Au y 132.7 Moz Ag	31.6-25 (Ar <sup>40</sup> /Ar <sup>39</sup> )	-
La India	AS	Au	Au nat, pi.	Andesitas y estratos de rocas extrusivas félsicas, entre CVI y SVS	NNW	Diseminado y vetas	Contactos litológicos y fallas	38-35 (basada en asociaciones geológicas)	-	-
Dolores	BS	Au-Ag	Au y Ag nat, e, pi arg, ac, est, jal, mia, ga, esf, cp, cz, ser, ap, bo, ep, cl, cal, fl, ba, ye.	Diques y flujos de latitas, flujos, brechas y tobas andesíticas; en el CVI	NNW	Diseminados, vetas y stockworks	Fallas	38-35 (basada en asociaciones geológicas)	-	Temperaturas de 200 a 300°C

Abreviaturas: BS - baja sulfuración, AS - alta sulfuración, CVI - complejo volcánico inferior, SVS - serie volcánica superior, Au - oro, Au nat - oro nativo, Ag - plata, Ag nat - plata nativa, e - electrum, pi - pirita, pi au - pirita aurífera, pi arg - pirita argentífera, ar - argentita, ac - acantita, est - estromeyerita, jal - jalpaita, mia - miagirita, ga - galena, esf - esfalerita, cp - calcopirita, cz - cuarzo, ser - sericita, ap - arsenopirita, bo - bornita, ep - epidota, cl - clorita, cal - calcita, fl - fluorita, ba - barita, ye - yeso, eng - enargita, ten - tennantita, tet - tetrahedrita, fam - famalita, luz - luzonita, bis - bismutinita, cov - covelita, ad - adularia, carb - carbonatos, he - hematita, re - rejalgar.

## Capítulo 4. Área de estudio

El área de estudio del presente trabajo se centra en el Distrito Minero de Nacozari, localizado en la porción noreste del Estado de Sonora, México (Fig. 11), y comprende una superficie de 3,600 km<sup>2</sup> en un polígono regular de 60km x 60km. Este polígono corresponde a la huella de la imagen del sensor ASTER seleccionada para este trabajo de investigación.

La región de estudio se encuentra localizada aproximadamente a 200 km en línea recta al noreste de la ciudad de Hermosillo, con acceso por carretera pavimentada hasta la población de Nacozari de García.

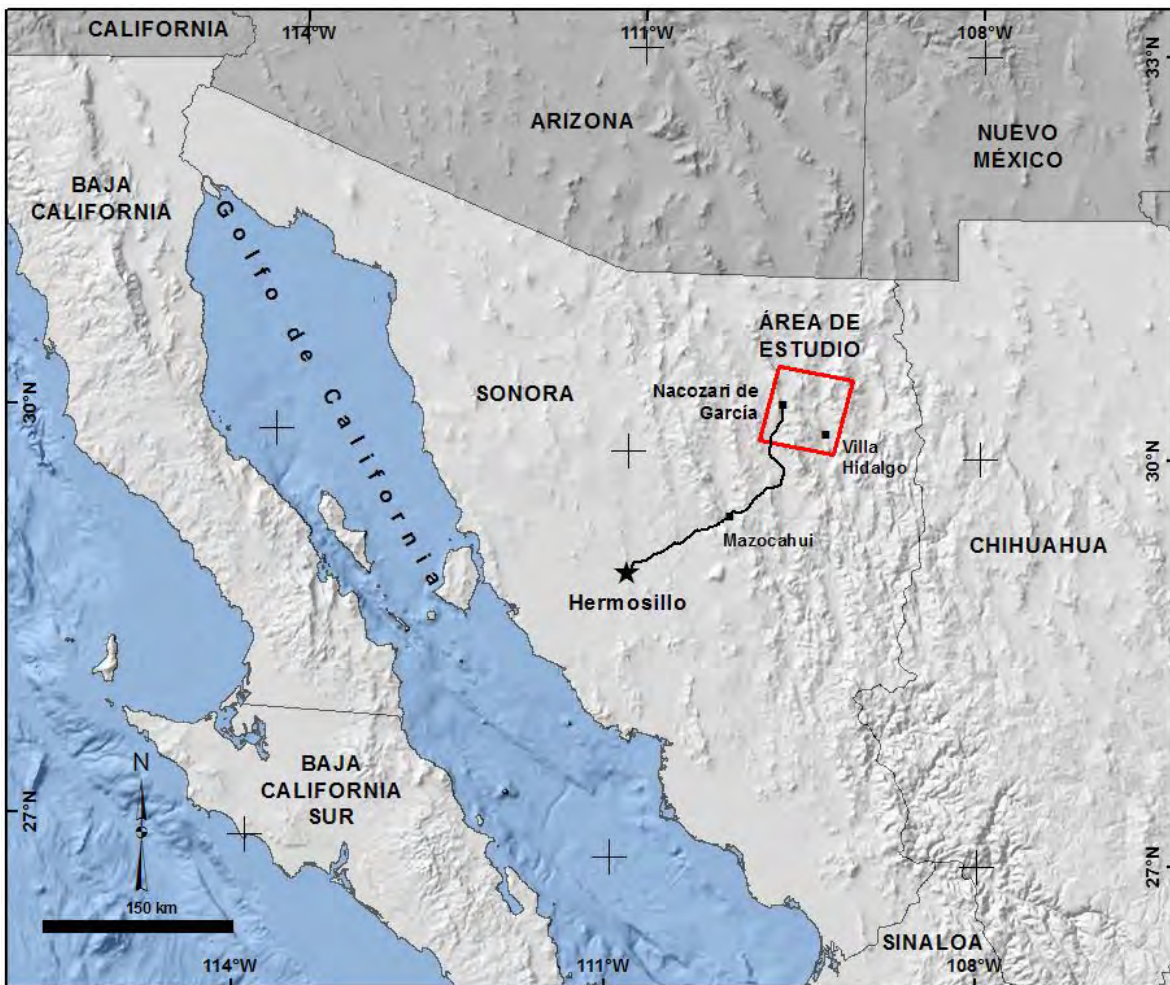


Fig. 11. Mapa de localización del área de estudio. El polígono en rojo indica, además del límite del área de estudio, la huella de la escena del sensor ASTER utilizada en este trabajo de investigación.

En el área de estudio se cuenta con más de 60 localidades con actividad minera (Servicio Geológico Mexicano, 1998), estas localidades van desde proyectos de exploración en evaluación por compañías mineras hasta minas en producción de alto nivel, pasando por obras artesanales abandonadas o activas (Fig. 12). Fisiográficamente, el área de estudio está comprendida dentro de la Provincia de la Sierra Madre Occidental (porción noreste del área de estudio) y en la Provincia de Sierras y Valles Paralelos (porción oeste del área de estudio).

Como se puede observar en la Figura 12, la mayoría de las minas están siendo (o han sido) beneficiadas por Cu-Mo-Ag. Asimismo, se puede apreciar que las localidades de interés por Au y Ag conforman el grupo más abundante después del Cu, Mo.

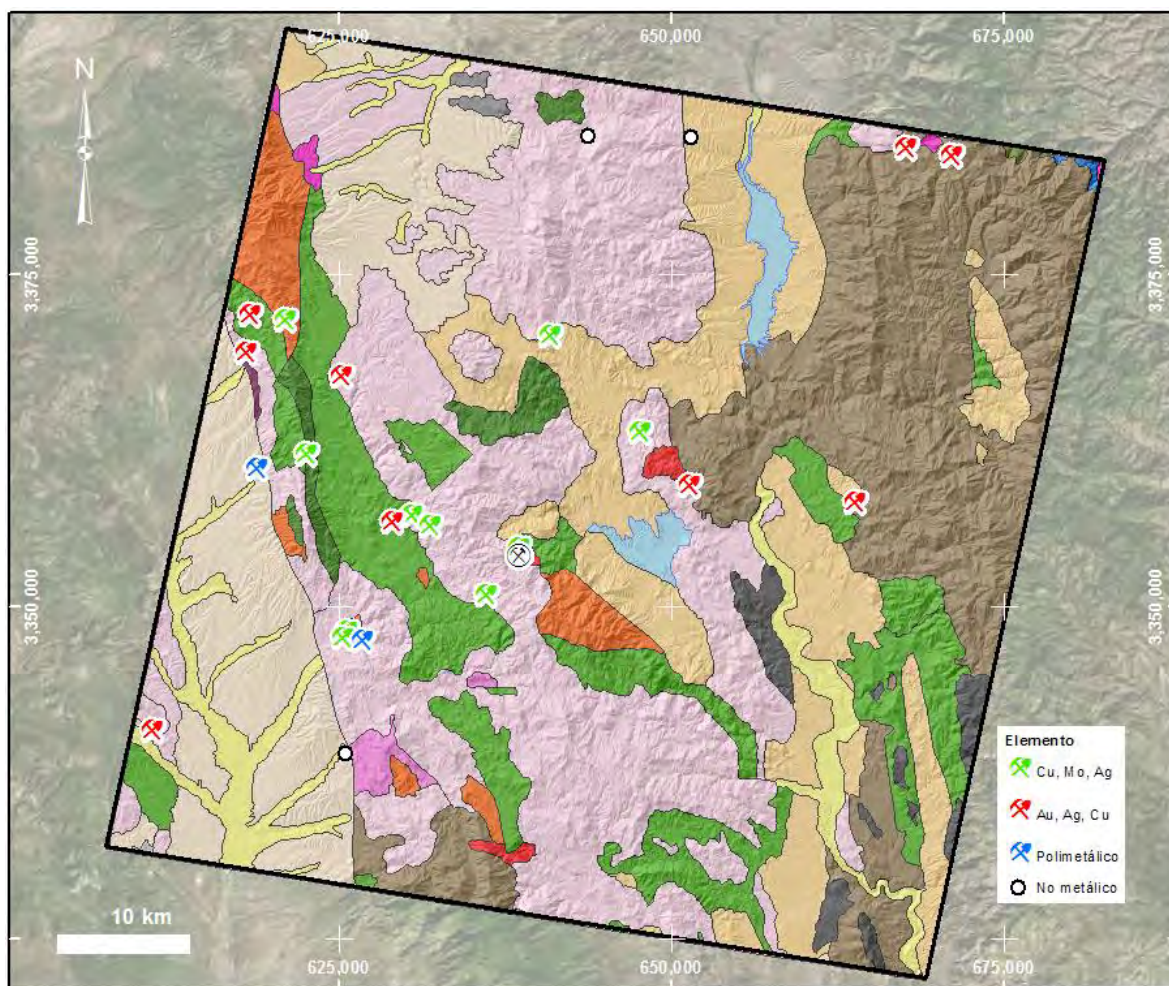


Fig. 12. Mapa mostrando la actividad minera reportada según el Servicio Geológico Mexicano (SGM, 1998). La información de minas obtenida del SGM fue recortada sólo al área de estudio.

A manera de referencia geográfica, algunas localidades dentro del área de estudio son mencionadas en el presente trabajo (Fig. 13). Estas localidades son los poblados de Los Hoyos, Nacozari de García y Villa Hidalgo, así como también las localidades conocidas como Sierra La Púrica, El Batamote, Florida-Barrigón, Bella Esperanza, Presa General Lázaro Cárdenas (La Angostura), Mina El Tigre, Mina La Caridad y la presa de Jales de esta última.

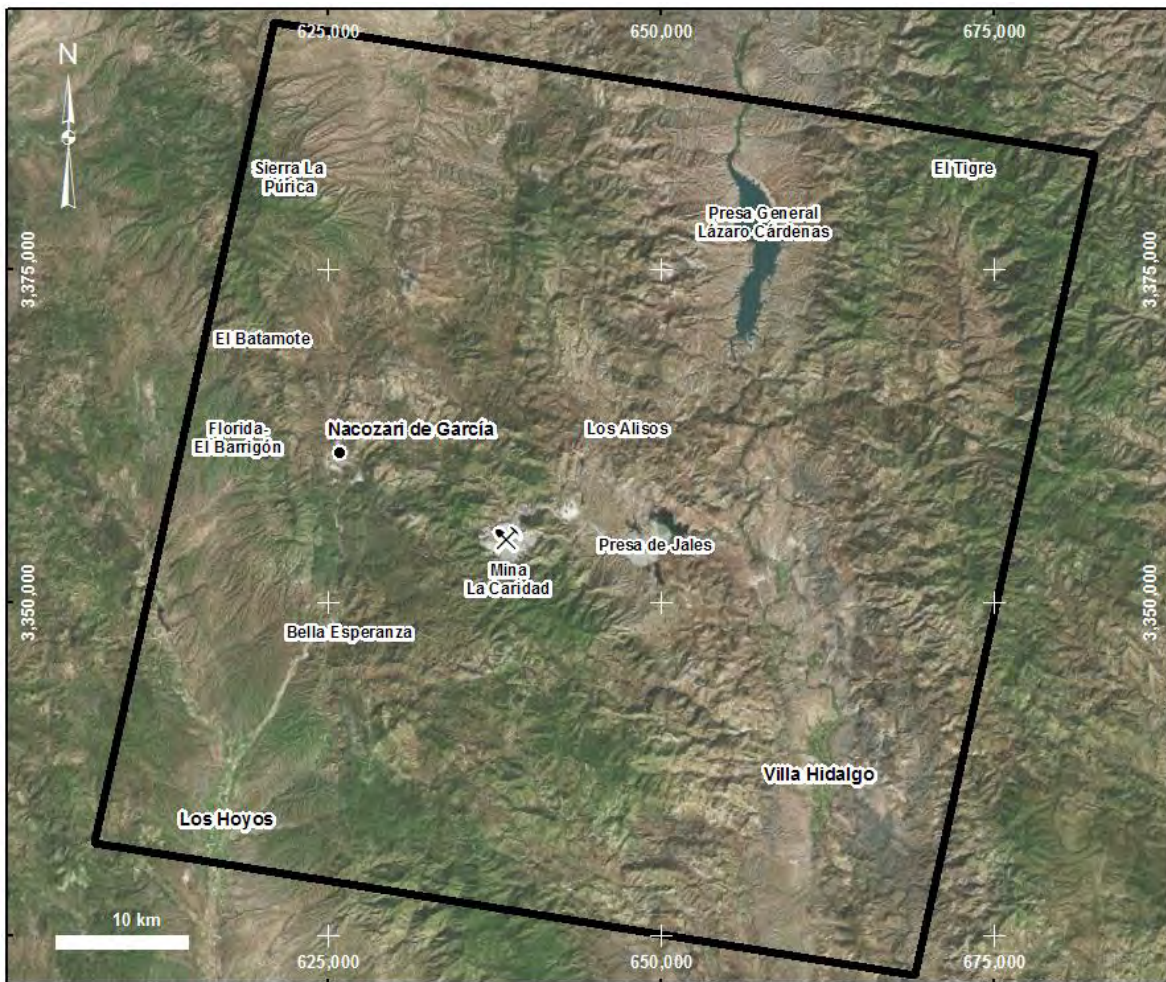


Fig. 13. Mapa de ubicación de diversas localidades mencionadas en el texto.



## Capítulo 5. Marco geológico-minero

De acuerdo con el SGM, Las rocas más antiguas se encuentran situadas en el extremo oeste del área de estudio y localmente consisten en afloramientos de gneis de edad Proterozoico medio-Cámbrico y de granito-granodiorita del Proterozoico medio.

El Cretácico está representado en su mayoría por rocas intrusivas de composición félsica como granito y granodiorita y, en menor proporción, por flujos volcánicos de composición andesítica y tobas andesíticas.

Del Cretácico superior al Eoceno temprano se produjo el emplazamiento del denominado Batolito Laramide, constituido esencialmente por granodioritas, granitos, cuarzdioritas y cuarzomonzonitas. En el área de estudio, este evento magmático está representado por una granodiorita de edad Paleoceno, expuesta localmente en el área de la Mina La Caridad, Los Alisos y borde extremo sur del área de estudio y por intrusiones hipabisales más jóvenes de tipo pórfido dacítico, riolítico y monzonítico de edad Eoceno, aflorantes en la zona de La Caridad. El pórfido monzonítico es particularmente importante, por tener implicaciones minero-económicas, pues se le considera estrechamente relacionado a los procesos de mineralización de esta zona.

Sobreyaciendo discordantemente a las unidades félsicas cretácicas, se encuentra una secuencia volcánica asignada al Paleoceno, que consiste principalmente de andesitas, tobas andesíticas piroclásticas y brechas andesíticas, que cambia gradualmente a otra secuencia de composición andesítica a dacítica con abundantes variaciones texturales y composicionales.

Durante el Eoceno temprano y de forma discordante, continuó este estilo de volcanismo con un incremento paulatino en los contenidos de feldespato potásico, conformando secuencias del tipo latitas-andesitas, con aisladas coladas riódacíticas y traquíticas, en el área del Cerro California-rancho Los Baños; secuencia latítica en la Mina Pilares, secuencia de traquitas en la Sierra de Juriquipa y secuencia de latitas-riodacitas aflorantes en el rancho Los Alisos-Cerro El Gacho y en el Cerro Las Borregas-Puerto El Saucito; concordantemente sobre las unidades anteriores, se depositaron brechas andesíticas.

Al norte del tajo La Caridad aflora un conglomerado polimíctico de edad Eoceno, formado principalmente por clastos derivados de rocas volcánicas altamente alteradas y escasos fragmentos de pórfido cuarzomonzónico, englobados en una matriz arenosa y ferruginosa. Al final del Eoceno tienen lugar algunas efusiones de tobas riolíticas y principalmente flujos de carácter riolítico, aflorantes en la porción central del área de estudio.

El Oligoceno está representado por rocas basálticas y andesíticas, expuestas en la porción centro y suroeste del área, principalmente al este de Villa Hidalgo. La unidad de basaltos subyace a la secuencia de tobas riolíticas y riolitas y aflora ampliamente al sureste de Los Alisos con afloramientos discontinuos orientados aproximadamente NW - SE.

Sobreyaciendo discordantemente a las rocas basálticas se encuentran las tobas riolíticas, flujos riolíticos y tobas de cristales, líticas y cristalovítreas, con ocasionales flujos riodacíticos; le sobryace en forma concordante un paquete de ignimbritas. Ambas unidades afloran extensamente en la región oriental, coronando a las secuencias más antiguas y ocupando por lo general, las prominencias topográficas.

Durante el Mioceno se depositó discordantemente el conglomerado polimíctico denominado por Dumble, (1900) y King, (1938), como Formación Báucarit, constituido principalmente por clastos derivados de rocas volcánicas y en menor proporción de rocas intrusivas, englobados en una matriz arenosa o tobácea; presenta variaciones composicionales en función de las dimensiones y litología de la cuenca de aporte, incluyendo también algunas coladas latíticas y basálticas, así como tobas andesíticas; esta unidad aflora en una dirección preferencial N-S en lo que fueron pequeñas cuencas en la mitad oriental del área de estudio.

Sobreyaciendo discordantemente a la Formación Báucarit, se depositó el conglomerado polimíctico de edad Plioceno; en el Pleistoceno se tiene el conglomerado oligomíctico y por último el aluvión del holoceno, cubriendo las partes bajas de los valles (Servicio Geológico Mexicano, 1999).

Los eventos tectónicos más notorios corresponden al período laramídico (Rangin, 1982; Damon, 1993; Calmus, 1988), consisten de procesos de convergencia de la placa tectónica Farallón en la margen continental propiciando la generación de un arco volcánico

continental caracterizado por el emplazamiento de grandes batolitos granitoides y sus equivalentes volcánicos. Después de este evento, tiene lugar un régimen tectónico de distensión a partir del Eoceno tardío (Cochemé, 1987; Roldán y Clark, 1992) con desarrollo importante de fallas normales y extrusiones de andesitas basálticas y la serie riolítica-ignimbrítica. A partir del Mioceno (Cochemé, 1985; Demant, 1991; Anderson, 1992), acontece el episodio de fallamiento normal responsable de la formación de pilares y fosas tectónicas (Sierras y Valles Paralelos), rellenas con fragmentos de los bloques levantados.

Las zonas mineralizadas que se encuentran dentro del distrito minero Nacozari se han explotado ininterrumpidamente desde el siglo XVII (Servicio Geológico Mexicano, 1999). Considerando la ubicación, abundancia de estructuras y semejanza en estilo de mineralización, algunos depósitos se agruparon en diferentes zonas, como ejemplo están las denominadas: La Caridad, Pilares-Santo Domingo y Tabatacuchi-Los Alisos y El Tigre, donde las estructuras son abundantes y en ocasiones las manifestaciones de mineralización son muy intensas, considerando como sus rasgos más sobresalientes, que las estructuras mineralizadas se localizan por lo general en bloques levantados (horst) y que los sistemas corresponden a los tipos vetas epi-mesotermales, chimeneas brechadas y pórfidos cupríferos hospedados principalmente en rocas eocénicas y pre-eocénicas.

La zona La Caridad, se localiza en la porción centro-suroeste del área de estudio y en ella se tiene el pórfido cuprífero de La Caridad, el más importante del área, el cual se considera que fue formado a partir de rocas pre-batolíticas afectadas durante el Cretácico superior- Paleoceno por intrusiones múltiples de composición cuarzomonzonítica que generaron la mineralización primaria, la cual, por procesos de enriquecimiento supergénico, dio las características actuales al yacimiento. La mineralización consiste principalmente de calcocita, calcopirita, pirita y molibdenita; la alteración relacionada es propilítica, argílica, fílica y potásica. La información disponible indica reservas de 451 millones de toneladas con leyes de 0.53% de Cu y 0.03% de Mo y 242 millones de toneladas con ley de 0.23% de Cu.

En la zona Pilares-Santo Domingo, una mina importante actualmente inactiva es Pilares, que es una chimenea brechada y específicamente corresponde a una brecha de colapso con mineralización de cobre, encajonada en su porción superior por latitas y a profundidad en andesitas y en un pórfido diorítico. Según información bibliográfica, este

yacimiento tiene reservas cercanas a 80 millones de toneladas con ley de 0.7% de Cu. No menos importante es la mina Santo Domingo, donde se tiene la existencia de una zona de brecha de forma oval, asociada a estructuras tabulares y mantos, con altas leyes de plata, cobre y ocasionalmente oro. En esta zona, existe una notable alteración, representada por oxidación y argilización.

La zona Tahatacuchi-Los Alisos, quizá corresponda a la periferia de un sistema tipo pórfido cuprífero débilmente mineralizado o muy profundo. En Tabatacuchi las minas de mayor interés son El Poche y los Rosales, en las que se tienen vetas angostas de orientación preferencial NE 50°-60° SW y buzamientos de 70-80° al SE, alojadas en tobas andesíticas del Paleoceno. La alteración es propilítica con abundantes óxidos de hierro en fracturas y silicificación en los respaldos de las vetas. La mineralización en general, para el sistema filoniano, consiste de cuarzo, óxidos de hierro, ocasionalmente pirita y trazas de carbonatos de cobre, esfalerita y galena; con los resultados del ensaye se determinó la asociación geoquímica de Ag-Pb-Cu con Au subordinado, que zonalmente corresponde a un sistema epitermal inferior. En Los Alisos, se tiene una extensa zona de alteración propilítica y oxidación que contiene varias minas abandonadas, siendo la más significativa San Ignacio, donde la mineralización está alojada en un sistema de vetas andesíticas angostas de rumbo NE 60°-83° SW y buzamientos de 75-88° al NW, encajonadas en tobas del paleoceno. Las vetas contienen cuarzo cristalino crustiforme, escasa pirita, limonita jarosítica y en algunas estructuras trazas de barita, galena, esfalerita y carbonatos de cobre. La asociación geoquímica general es Au-Ag-Pb-Zn-Cu, con ligeras variaciones zonales en algunas estructuras a nivel individual genéricamente expuestas en el rango epitermal inferior en transición a mesotermal superior.

Además de las zonas mineralizadas antes mencionadas, se tienen dispersas una gran cantidad de estructuras vetiformes principalmente, con mineralización de Ag,Pb.Zn. y Cu.

## Capítulo 6. Materiales y metodología

### 6.1 Información geológica

Se adquirió del Servicio Geológico Mexicano (SGM) la carta geológica interactiva Nacozari escala 1:250,000 (H12-6). Los datos de esta carta (Fig. 14) se recortaron al área de interés con el objetivo de compararla con los diferentes procesos efectuados a la imagen (Fig. 15). Toda la información geológica disponible en esta carta interactiva se añadió al Sistema de Información Geográfica de este trabajo de investigación para quedar disponible para análisis posteriores.

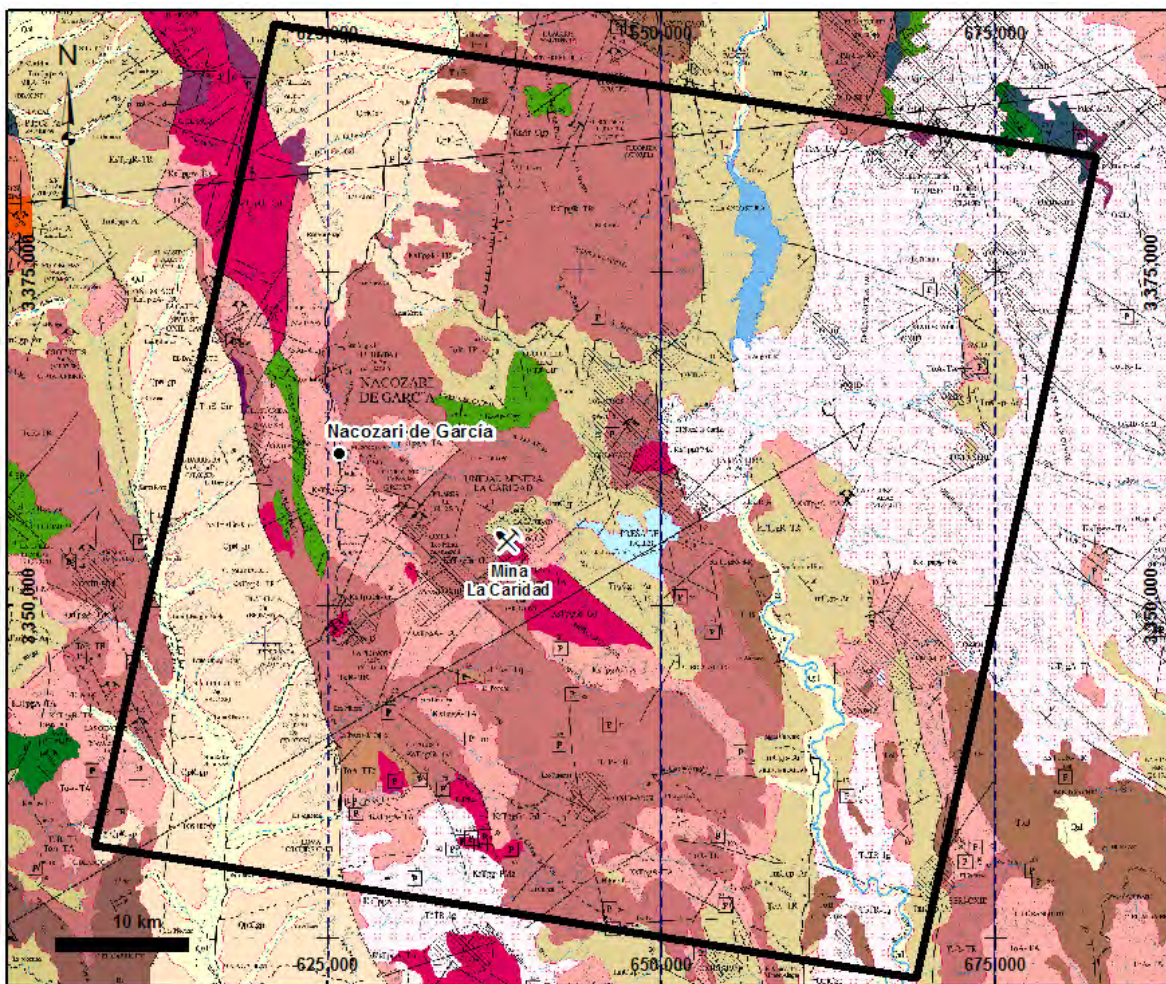


Fig. 14. Porción de la carta original Geológico-Minera Nacozari H12-6 adquirida del Servicio Geológico Mexicano. El recuadro negro representa el área de estudio.

El recorte de los datos vectoriales (en formato *shapefile*) al área de interés se consiguió mediante el software ArcGIS de ESRI (*Environmental Systems Research Institute*, <http://www.esri.com/>). Usando el mismo software, los polígonos recortados fueron categorizados en diferentes colores usando el campo “CODIGO” (sic) proveído en la base de datos ligada a los polígonos y creada por el SGM.

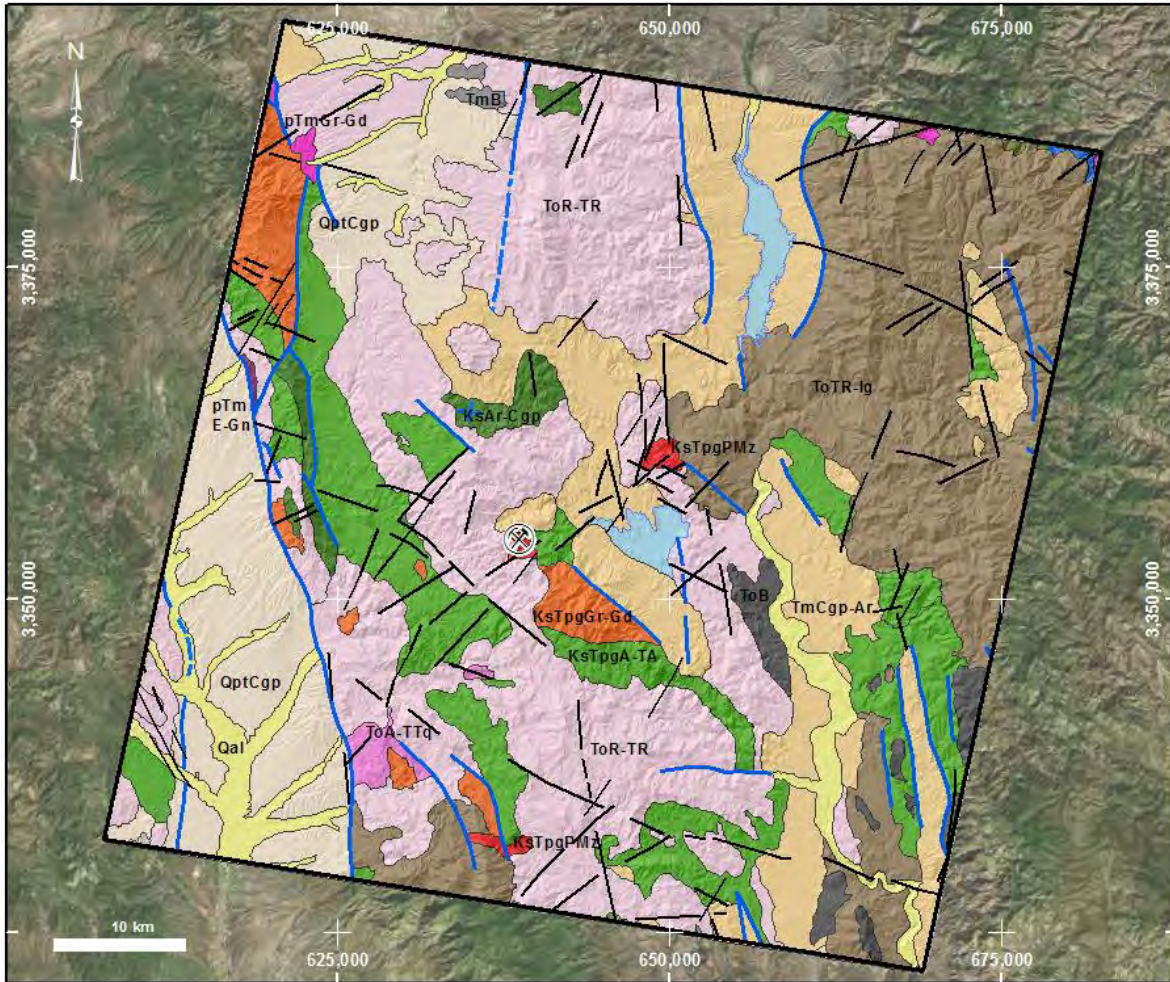


Fig. 15. Mapa geológico del área de estudio recortado del SGM. Qal: Cuaternario- Aluvión, QB: Cuaternario-Basaltos, QptCgp: Cuaternario (Pleistoceno)- Conglomerado polimíctico, TmCgp-Ar: Terciario (Mioceno)- Conglomerado polimíctico, Areniscas, TmB: Terciario (Mioceno)- Basaltos, ToTR-Ig: Terciario (Oligoceno)-Tobas riolíticas, Ignimbritas, ToB: Terciario (Oligoceno)- Basaltos, ToR-TR: Terciario (Oligoceno)- Riolitas – Tobas riolíticas, ToA-TTq: Terciario (Oligoceno)- Andesitas – Tobas andesíticas, KsTpgPMz: Cretácico tardío-Terciario (paleógeno)- Pórfido monzonítico, KsTpgGr-Gd: Cretácico tardío-Terciario (Paleógeno)- Granito, Granodiorita, KsTpgA-Ta: Cretácico tardío-Terciario (Palógeno)- Andesitas, Tobas andesíticas, KsAr-Cgp: Cretácico tardío- Areniscas, Conglomerado polimíctico, pTmGr-Gd: Proterozoico medio- Granito, Granodiorita, pTmE-Gn: Proterozoico medio-Cámbrico- Gneises. Modificado del SGM, 1998.

Los datos estructurales añadidos al SIG fueron también clasificados basándose en el campo “TIPO” de su base de datos asociada. Para este caso, las líneas clasificadas como “fracturas” (líneas negras en la Figura 15) fueron reclasificadas como “lineamientos”, esto debido a que no se encontraron argumentos dentro de la información de la carta que justificaran la aplicación del término “fractura” que el SGM utilizó originalmente.

## **6.2 Muestreo de zonas de alteración**

Con el fin de hacer un reconocimiento en diferentes sectores del área de estudio, así como para efectuar la verificación de campo previo al proceso espectral de las imágenes, se colectaron en campo un total de 25 muestras de roca en zonas estratégicas (Fig. 16, Tabla 3). Estas muestras se tomaron en zonas de anomalías de color observadas en las imágenes de color natural, previas al proceso espectral, en donde la información disponible sugería la presencia de zonas de posible alteración. Estas muestras varían en tamaño, composición y alteración.

Durante la colección de las muestras se hizo un registro para cada una, documentando su identificación y localización en coordenadas geográficas usando un GPS portátil marca Garmin. En este mismo registro se capturó una descripción megascópica inicial tratando de definir el tipo de roca y, en su caso, la alteración presente. Cada muestra fue empacada de manera individual para ser debidamente transportada y preparada para futuros análisis.

Con el posterior objetivo de correlacionar las muestras de campo con los diferentes resultados del análisis espectral de la imagen, las muestras fueron analizadas usando el espectrómetro infrarrojo portátil *OreXpress*, del fabricante Spectral Evolution ([www.spectralevolution.com/spectrometers\\_oreXpress.html](http://www.spectralevolution.com/spectrometers_oreXpress.html)), de ahí se obtuvieron las firmas espectrales de puntos específicos en cada muestra, para luego ser comparadas con firmas de laboratorio y definir con ello los minerales de alteración presentes en la roca.

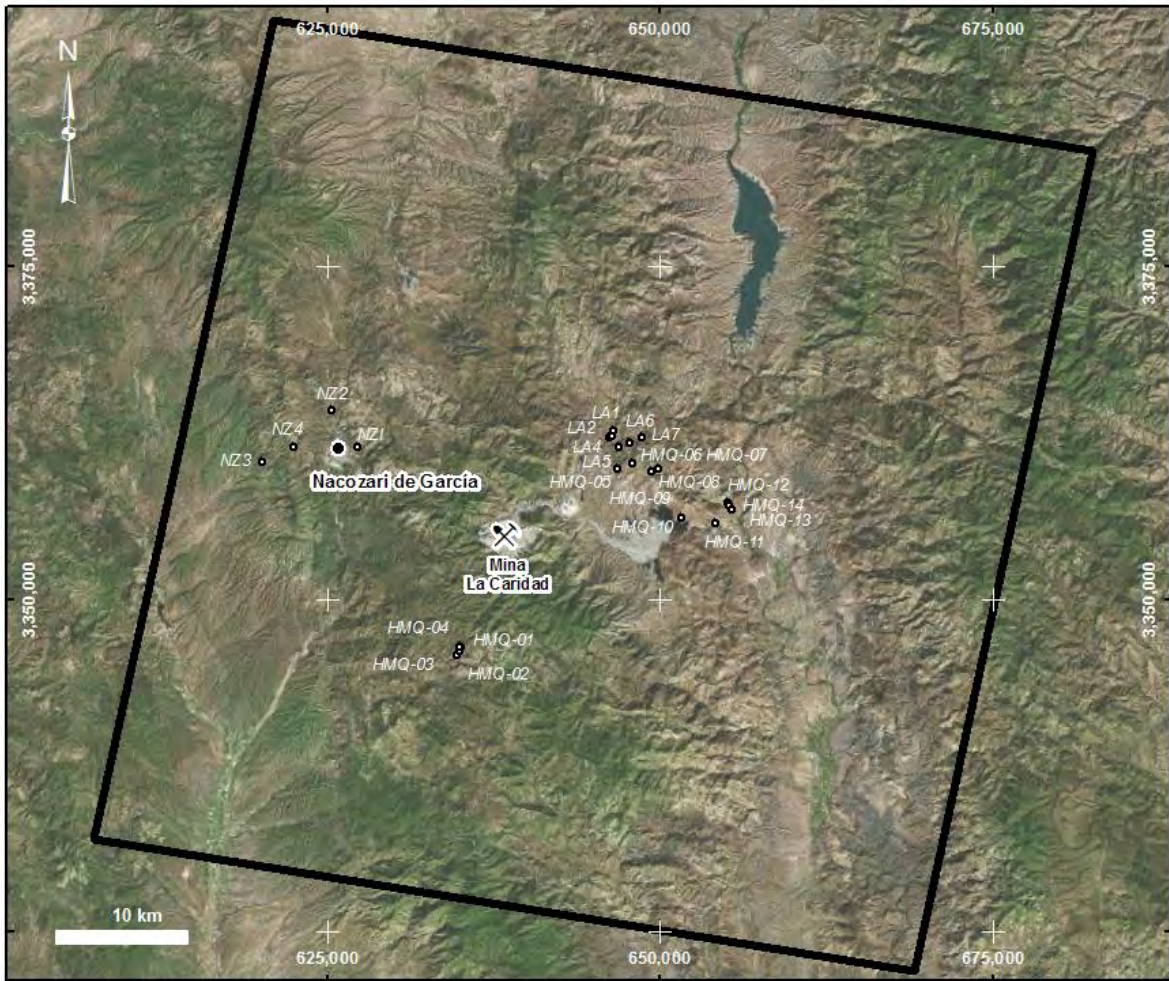


Fig. 16. Localización de las muestras colectadas en campo indicando su código de identificación único.



Tabla 3.-Coordenadas y descripción de las muestras colectadas en campo (coordenadas referidas al datum WGS84)

Muestra	Latitud N	Longitud W	Descripción
LA1	30.3828	109.4784	Roca volcánica moderadamente alterada a arcillas (¿sericita?). Hematita estañada en fracturas.
LA2	30.3837	109.4763	Roca volcánica moderadamente alterada a cuarzo-sericita y vetillas de hematita en forma de enjambre con diámetros de mm hasta varios cm.
LA4	30.3872	109.4749	Roca volcánica con alteración pervasiva a arcillas (sericita). La parte superficial y las fracturas se observan con limonita de color amarillo ocre.
LA5	30.3759	109.4707	Toba con alteración moderada cuarzo-sericita con óxido de Fe (hematita y jarosita).
LA6	30.3782	109.4621	Roca volcánica alterada de moderada a fuerte, cuarzo-sericita.
LA7	30.3817	109.4529	Roca volcánica pseudo-estratificada, con alteración moderada a fuerte cuarzo-sericita.
NZ1	30.3781	109.6755	Muestra de zona alterada con arcillas de color blanco y óxidos de Fe en las fracturas.
NZ2	30.4031	109.6953	Tobas y flujos riolíticos, arcillas y alteración selectiva de los feldespatos.
NZ3	30.3690	109.7499	Oxidación de Fe y alteración cuarzo-sericita.
NZ4	30.3783	109.7259	Alteración cuarzo-sericita y arcillas. Zona de óxidos de Fe. Alteración de la roca aparentemente pervasiva.
HMQ-01	30.2365	109.5995	Roca volcánica tobácea (?), oxidación de Fe.
HMQ-02	30.2388	109.5972	Roca alterada por silicificación, con vetillas de cuarzo de 0.5 cm, cristalizando de fuera hacia adentro.
HMQ-03	30.2415	109.5964	Toba lítica oxidada.
HMQ-04	30.2419	109.5981	Roca volcánica (tobácea), vetillas con sulfuros.
HMQ-05	30.3608	109.4727	Roca volcánica parte de la Fm. Tarahumara, silicificada y oxidada.
HMQ-06	30.3650	109.4604	Roca volcánica parte de la Fm. Tarahumara, con vetillas de color blanco, posiblemente alunita o arcillas.
HMQ-07	30.3650	109.4604	Roca con vetillas color negro rellenando espacios y aislando partes de roca volcánica.
HMQ-08	30.3606	109.4405	Roca volcánica equivalente a Fm. Tarahutara, silicificada y con oxidación de Fe. Zona de alteración muy extensa. Sobreyaciendo estas rocas se encuentran las rocas volcánicas del grupo superior de la SMO.
HMQ-09	30.3592	109.4459	Toba con silicificación pervasiva, con fragmentos de roca, algunos redondeados de 2 cm de diámetro.
HMQ-10	30.3275	109.4232	Roca volcánica con fenocristales de pirita. Vetillas oxidadas.
HMQ-11	30.3234	109.3966	Roca volcánica similar a basalto. Se observan fenocristales siendo alterados.
HMQ-12	30.3369	109.3867	Roca volcánica oxidada.
HMQ-13	30.3347	109.3857	Roca volcánica con alteración arcillas
HMQ-14	30.3322	109.3834	Roca volcánica oxidada.

### 6.3 Imágenes de satélite

Una escena del sensor ASTER (Fig. 17) fue seleccionada, adquirida y procesada para obtener zonas con posible presencia de minerales de alteración hidrotermal y de grupos de alteración afines a depósitos de tipo magmato-hidrotermales en el área del Distrito Minero de Nacozari. Este sensor es operado en un esfuerzo conjunto por la NASA JPL (*Jet Propulsion Laboratory*) y el Ministerio de Economía, Comercio e Industria de Japón METI (*Ministry of Economy Trade and Industry*). El sensor cuenta con catorce bandas distribuidas en tres subsistemas que se ubican en los rangos del visible + infrarrojo cercano, infrarrojo de onda corta e infrarrojo térmico. Este sensor es uno de los cinco instrumentos a bordo del satélite Terra, que orbita el planeta a una altitud de 705km sobre el nivel del mar.

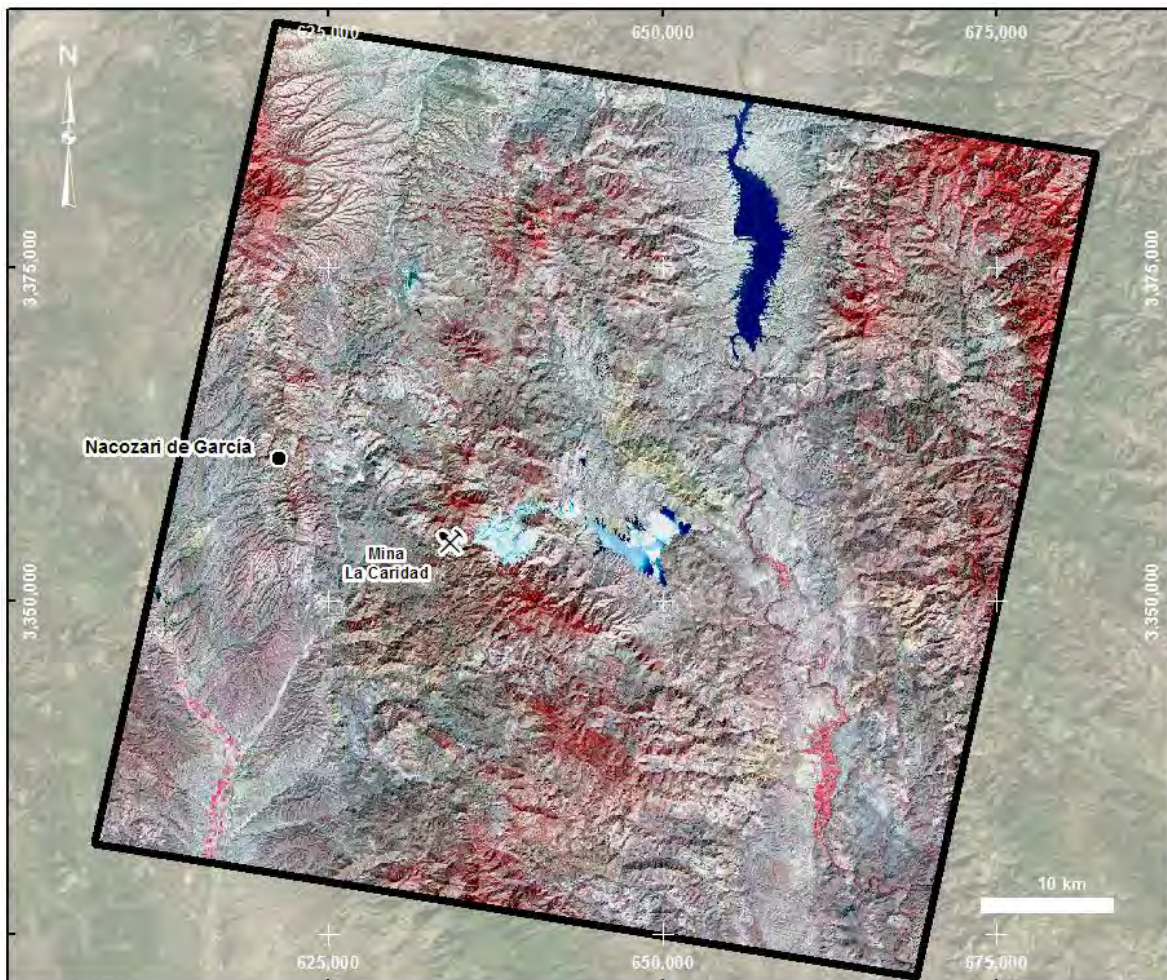


Fig. 17. Escena del sensor ASTER colectada el 8 de marzo de 2007. Se muestra en una composición de falso color (321). Los colores rojizos indican presencia de vegetación, que para esta imagen se ubicó en el canal rojo.

Por medio de una consulta en el inventario digital de la ERSDAC (*Earth Remote Sensing Data Analysis Center*, <http://www.jspacesystems.or.jp/ersdac/eng/index.E.html>), se revisó y adquirió una escena del sensor ASTER. En mayo de 2007 este sensor tuvo un fallo irreparable en el sub-sistema SWIR, por lo que las imágenes colectadas después de esa fecha ya no son útiles para el análisis espectral en el sector del infrarrojo de onda corta del espectro electromagnético (<https://asterweb.jpl.nasa.gov/swir-alert.asp>), debido a lo anterior, la imagen seleccionada para el presente trabajo fue seleccionada con una fecha previa al fallo del sensor.

La escena adquirida representa el área de interés para este estudio (Fig. 11), cuya superficie es de 360,000 Has. Utilizando el software ENVI 5.3, técnicas especializadas, metodologías probadas y procedimientos propios, se procesó la escena multiespectral, para obtener como resultado imágenes con diferentes productos.

Una de las finalidades de este análisis es el estudio a mayor detalle en zonas regionales, produciendo imágenes que representen zonas de alteración hidrotermal (minerales de arcillas específicos como alunita y caolinita o grupos de alteración como filica y argílica así como de óxidos de hierro y sílice).

Las características de la escena adquirida son:

- Imagen (granule ID): 1AST\_L1T\_00303082007181012\_20150518141741\_64789
- Coordenadas centrales: UTMZ12 645,148mE 3'357,800mN WGS84
- Fecha de colección: Marzo 08 de 2007
- Dimensiones de la escena: 60km x 60km
- Rotación de la huella de la escena respecto al 0°N: 11.4776°CW
- Número de bandas: 14

En la tabla 4 se muestran los datos para cada banda de este sensor, incluyendo su sector en el espectro electromagnético, longitud de onda y resolución espacial.

Tabla 4. Características de las bandas del sensor ASTER (modificada de [https://lpdaac.usgs.gov/dataset\\_discovery/aster](https://lpdaac.usgs.gov/dataset_discovery/aster))

Número de banda (sector)	Rango en longitud de onda ( $\mu\text{m}$ )	Resolución espacial (m)	Número de banda (sector)	Rango en longitud de onda ( $\mu\text{m}$ )	Resolución espacial (m)
1 (VIS)	0.52 – 0.60	15	8 (SWIR)	2.295 – 2.365	30
2 (VIS)	0.63 – 0.69	15	9 (SWIR)	2.360 – 2.430	30
3N* (NIR)	0.76 – 0.86	15	10 (TIR)	8.125 – 8.475	90
3B* (NIR)	0.76 – 0.86	15	11 (TIR)	8.475 – 8.825	90
4 (SWIR)	1.600 – 1.700	30	12 (TIR)	8.925 – 9.275	90
5 (SWIR)	2.145 – 2.185	30	13 (TIR)	10.25 – 10.95	90
6 (SWIR)	2.185 – 2.225	30	14 (TIR)	10.95 – 11.65	90
7 (SWIR)	2.235 – 2.285	30			

\*La banda 3N tiene su telescopio en posición normal a la órbita. Para la banda 3B está posicionado con un ángulo hacia atrás de la trayectoria del satélite para proporcionar capacidad estéro, con lo que se pueden generar modelos de elevación por aerotriangulación.

La imagen del sensor ASTER utilizada para el análisis está originalmente conformada por valores en número digital (DN, *Digital Numbers*), a este formato se le conoce también como “imagen cruda”. Tal y como se vio en el apartado 3.1, antes de usarse en técnicas de análisis espectral, la imagen es sometida a un proceso de calibración radiométrica para obtener con ello valores de radiación. Posterior a la calibración radiométrica, y para la correcta detección de zonas de alteración y contrastes litológicos, la imagen se somete a un proceso de corrección atmosférica, que convierte los valores de radiación a valores de reflexión. Para ello, se aplicó a la imagen una conversión usando la técnica de Corrección de Campo Plano (*Flat Field Correction*), que convierte los datos de radiación a reflexión relativa.

La corrección atmosférica es necesaria para eliminar las distorsiones espectrales provocadas tanto por la composición natural de la atmósfera como por los compuestos suspendidos en ella (aerosoles y vapor), estos parámetros deben ser corregidos para compensar la dispersión de la energía reflejada al sensor, produciendo con ello una imagen con datos de reflexión en la superficie.

Una vez aplicadas las correcciones necesarias a la imagen, se utilizaron técnicas de índices espectrales y álgebra de bandas, así como de composición y transformación de

bandas. Estas técnicas se utilizaron para generar los diferentes productos necesarios para este trabajo de investigación.

Los índices espectrales son imágenes pancromáticas generadas a partir de álgebra de bandas, operando matemáticamente imágenes de reflexión de distintas longitudes de onda, estos índices muestran la posible abundancia relativa a la escena del material de interés. Los índices de vegetación son el tipo más popular, pero otros índices están disponibles para áreas incendiadas, rasgos antropogénicos, agua y rasgos geológicos (sección de ayuda del software ENVI 5.3).

La técnica de índices espectrales fue aplicada a las diferentes bandas de la imagen para realzar información relevante, uno de ellos fue el del cálculo del índice de arcillas usando el cociente  $SWIR4 / SWIR6$ , este cociente realza las rocas alteradas con posible presencia de arcillas. Un segundo proceso para el índice de óxido férrico, se aplicó a la imagen para el realce de zonas de oxidación, esto se consiguió usando el cociente  $VNIR2 / VNIR1$ , obteniéndose con ello la localización de las áreas afectadas por óxido férrico ( $Fe^{+3}$ ) en la imagen. Otro índice aplicado a la imagen fue el índice de óxido ferroso ( $Fe^{+2}$ ), el cual se consigue mediante el cociente de las bandas  $SWIR4 / VNIR3$ . El índice utilizado para generar las imágenes de abundancia de posible sílice fue el  $TIR13 / TIR12$ . Para el índice de caolinita se usó la multiplicación de los cocientes  $SWIR4 / SWIR5$  por  $SWIR8 / SWIR6$ , el índice de alunita fue calculado mediante la operación  $SWIR7 / SWIR5$  por  $SWIR7 / SWIR8$ . Por último, el índice de calcita se obtuvo de multiplicar los cocientes  $SWIR6 / SWIR8$  por  $SWIR9 / SWIR8$ . Todos los procesos anteriores se ejecutaron con el fin de conseguir imágenes que pudieran correlacionarse a diferentes niveles dentro de los modelos de pórfido de cobre y epitermal, cabe aclarar que con esta técnica no es posible diferenciar el origen en procesos primarios o secundarios de los minerales detectados.

Por otro lado, la técnica de composición se refiere a la combinación de tres bandas seleccionadas, previamente corregidas, para ubicarlas en los canales rojo, verde y azul del dispositivo de salida para después interpretar los resultados. Las imágenes para las alteraciones filica, argílica y propilítica fueron generadas con los cocientes  $SWIR7 / SWIR6$ ,  $SWIR5 / SWIR6$  y  $SWIR9 / SWIR8$  respectivamente, luego, estos índices fueron generados en composición de bandas para obtener una imagen compuesta a color. Para la imagen

compuesta de arcillas-óxido férrico-óxido ferroso se usaron las bandas resultados de los cocientes antes calculados en una composición de bandas para producir la imagen en color. La imagen en color RGB para el contraste sílice-alteración-roca resultó de la composición de las bandas del TIR14, SWIR7 y VNIR2.

La transformación de bandas es un proceso digital que transforma los valores de pixel originales de la imagen generando una nueva, en este caso con el mismo número de bandas, consiguiendo con ello un mayor contraste entre las respuestas espectrales de los materiales presentes en la imagen digital. Para un mejor contraste litológico, y poder hacer la comparación con la información publicada por el SGM, se transformó la imagen utilizando el algoritmo de MNF (*Minimum Noise Fraction*). El algoritmo MNF es un método similar al de componentes principales (PCA, *Principal Components Analysis*). Este método es utilizado para determinar la dimensionalidad inherente de los datos de la imagen, segregando el ruido en los datos y reduciendo los requerimientos computacionales para procesos subsecuentes (Pour & Hashim, 2012). Para crear la imagen de contraste litológico MNF se utilizó la composición RGB para las bandas transformadas TIR14, SWIR7 y VNIR2.

Con la finalidad de generar productos de apoyo para la detección preliminar de posibles zonas de alteración y oxidación, así como para la interpretación de lineamientos (además del modelo de elevación del apartado 6.4), se descargaron de la página EarthExplorer del Servicio Geológico de Estados Unidos (<https://earthexplorer.usgs.gov/>) dos escenas del sensor Landsat 8 OLI-TIRS. Fue necesaria la descarga de dos imágenes ya que la cobertura del área de estudio quedó localizada entre dos escenas de este sensor (Fig. 18). Luego de una búsqueda para elegir las de menor presencia de vegetación y concentración nubosa, las imágenes descargadas fueron las identificadas con los “Entity ID” LC80350392016100LGN00 (sector oeste del área de estudio) y LC80340392016109LGN00 (sector este del área de estudio). La figura 18 muestra la localización de las escenas respecto al área de estudio.

Las características de las escenas adquiridas son, para el sector oeste:

- Imagen (Entity ID): LC80350392016100LGN00
- Coordenadas centrales: 30°18'21.89"N, 110°13'10.38"W WGS84

- Fecha de colección: Abril 9 2016
- Dimensiones de la escena: 185km x 185km
- Rotación de la huella de la escena respecto al 0°N: 14.9614°CW
- Número de bandas: 11

Para el sector este:

- Imagen (Entity ID): LC80340392016109LGN00
- Coordenadas centrales: 30°18'22.43"N, 108°40'43.97"W, WGS84
- Fecha de colección: Abril 18 2016
- Dimensiones de la escena: 185km x 185km
- Rotación de la huella de la escena respecto al 0°N: 14.9614°CW
- Número de bandas: 11

En la tabla 5 a continuación, se muestran los datos de sector en el espectro electromagnético, longitud de onda y resolución espacial de cada banda del sensor Landsat 8 OLI-TIRS.

Tabla 5. Características de las bandas del sensor Landsat 8 OLI-TIRS (modificada de <http://landsat.gsfc.nasa.gov/landsat-8/landsat-8-bands/>)

Número de banda (sector)	Rango en longitud de onda (µm)	Resolución espacial (m)	Número de banda (sector)	Rango en longitud de onda (µm)	Resolución espacial (m)
1 (VIS)	0.433–0.453	30 m	7 (SWIR)	2.100–2.300	30 m
2 (VIS)	0.450–0.515	30 m	8* (VIS)	0.500–0.680	15 m
3 (VIS)	0.525–0.600	30 m	9** (SWIR)	1.360–1.390	30 m
4 (VIS)	0.630–0.680	30 m	10 (TIR)	10.6–11.2	100 m
5 (NIR)	0.845–0.885	30 m	11 (TIR)	11.5–12.5	100 m
6 (SWIR)	1.560–1.660	30 m			

\*Banda pancromática.

\*\*Banda para la detección de nubes cirrus.

Las bandas del sensor Landsat 8 fueron diseñadas para coleccionar información en las partes del Visible, Infrarrojo cercano, Infrarrojo de onda corta e Infrarrojo térmico del

espectro electromagnético y pueden usarse en aplicaciones de riesgos, geología o monitoreo agrícola. Entre estas bandas, el sensor cuenta también con la banda 8, que va de los 0.50 a los 0.68  $\mu\text{m}$  y que se presenta sólo en escala de grises y con la mayor resolución espacial (15m). La banda 9 cubre una muy delgada porción de longitudes de onda: sólo  $1.370 \pm 10 \mu\text{m}$ . Pocos instrumentos espaciales colectan esta parte del espectro porque la atmósfera en esta longitud de onda absorbe la mayor parte de la energía (<http://landsat.gsfc.nasa.gov/landsat-8/landsat-8-bands/>). Dado que la cobertura del área de interés (huella la escena ASTER) quedó localizada entre dos escenas del sensor Landsat, se hizo necesario hacer un mosaico de éstas en una sola imagen para cada subsistema (VIS, NIR, SWIR y TIR) para luego ser recortados al polígono del área de interés.



*Fig. 18. Cobertura de las escenas del sensor Landsat 8 OLI-TIRS, cada escena se indica en polígonos color cian. El recuadro negro (al centro), representa el área de interés de este trabajo de investigación. El polígono al oeste del área de interés pertenece a la cobertura de la escena LC80350392016100LGN00. El polígono localizado al este corresponde a la escena LC80340392016109LGN00.*



Una vez generado el mosaico y de haberse recortado al área de estudio, 3 bandas del sector visible de la imagen Landsat se combinaron para producir una imagen en color natural (Fig. 19), esto se consiguió mediante la composición RGB de las bandas 4-3-2 que pertenecen a la porción del rojo, verde y azul en este sensor.

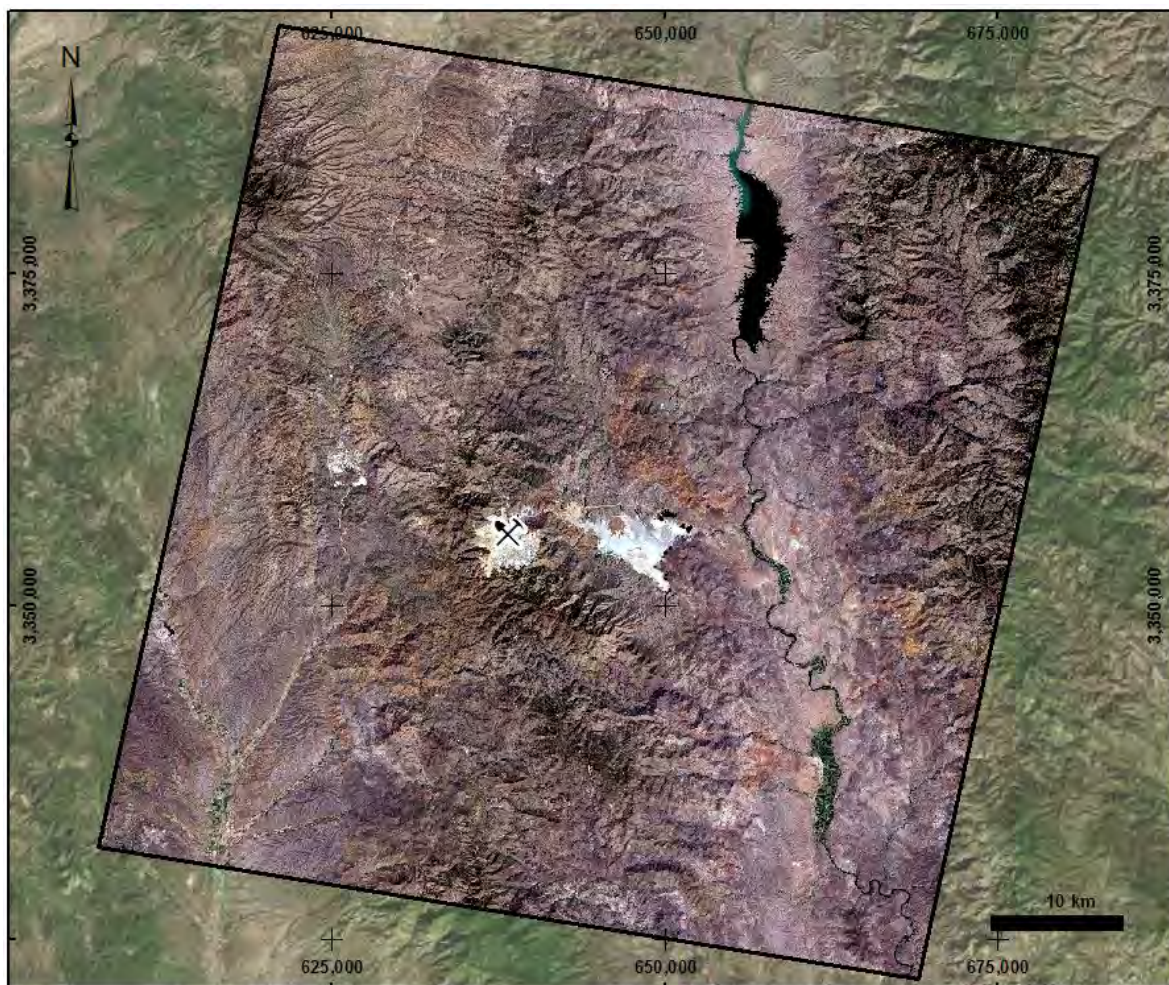


Fig. 19. Imagen del sensor Landsat 8 recortada a la cobertura del área de estudio. La imagen se muestra en color natural mediante la composición de bandas RGB 432.

Usando una de las bandas de este mismo sensor, y por medio del software *Geomatica PCI* (del fabricante PCI Geomatics, <http://www.pcigeomatics.com/>), se extrajeron los lineamientos de la imagen recortada del sensor Landsat. Para esto, primero fue necesario ejecutar una corrección atmosférica a la imagen, misma que posteriormente fue fusionada a la banda pancromática de este mismo sensor, consiguiéndose con ello una imagen

multiespectral en alta resolución (15 m). Antes de la extracción, se calcularon los componentes principales de la imagen fusionada para obtener la banda de mayor contraste, que dejara ver o realzara la mayor cantidad de lineamientos posible; las bandas generadas fueron desde la PC1 hasta la PC8.

La banda seleccionada (PC1) fue procesada en el software antes mencionado ejecutando la función de extracción de lineamientos, los cuales, una vez obtenidos, fueron convertidos al formato *shapefile*. Asimismo, basándose en la imagen fusionada y en color natural, se digitalizaron lineamientos que el proceso automatizado no reconoció, éstos se añadieron al archivo *shapefile* de la extracción. Los lineamientos resultados (Fig. 24) se procesaron en el software ArcGIS para la crear una imagen clasificada con la definición de zonas de alta densidad de lineamientos (Fig. 25).

Dado que este sensor tiene mayor resolución espectral en la porción visible del espectro electromagnético que ASTER, se generó con la imagen recortada (no fusionada) de este sensor un proceso espectral para modelar el índice de óxido férrico. Al igual que con ASTER, se usó un cociente de bandas, pero esta vez con las bandas VIS4 y VIS2 (roja y azul respectivamente), donde la banda roja de este sensor está entre los 0.630 y 0.680  $\mu\text{m}$  y la azul entre los 0.450 y los 0.515  $\mu\text{m}$ , obteniéndose con ello la localización de áreas afectadas por oxidación de hierro férrico. El índice de óxido férrico funciona mejor con el sensor Landsat 8 ya que ASTER no cuenta con una banda en el color azul, necesaria para el cociente, por lo que la imagen resultado para este proceso reportada en el apartado 7.3 pertenece a la de Landsat.

#### **6.4 Modelo de elevación**

Además de las imágenes de satélite multiespectrales, otros productos pueden ser utilizados para apoyar las deducciones, discusiones o conclusiones derivadas de un análisis espectral, ejemplos de estos productos utilizados en la exploración por yacimientos minerales son los métodos geofísicos, modelos de terreno así como imágenes de satélite de alta resolución espacial (Sabins, 2007). Con el fin de apoyar la interpretación de lineamientos, un modelo de elevación en formato de imagen BIL (*Band Interleaved by Line*) obtenido de

INEGI (<http://www.inegi.org.mx/geo/contenidos/datosrelieve/continental/default.aspx>) fue usado para recortarlo al área de interés. Fue necesario transformar su sistema de coordenadas original, del Sistema Geográfico referido al datum ITRF92, al Sistema Proyectado UTM Zona 14 referido al datum NAD27 México, para asegurar los datos de elevación original del modelo, el método de re-muestreo de pixel aplicado en esta transformación fue el NN (*Nearest Neighbor*). La técnica utilizada para la transformación del datum original del modelo al datum local fue el de traslación geocéntrica de 3 parámetros de traslación con  $dX=-12$ ,  $dY=130$  y  $dZ=190$ . Una vez que el modelo de elevación se ha transformado se le aplicó una corrección hidrográfica para eliminar artefactos propios del modelo de elevación como depresiones o picos erróneos.

Para conseguir una mejor interpretación de lineamientos se generó un modelo de relieve (Fig. 23) con direcciones de luz a  $45^\circ/0^\circ$  (inclinación/azimut) para realzar lineamientos E-W,  $45^\circ/45^\circ$  para enfatizar lineamientos NW-SE,  $45^\circ/90^\circ$  para remarcar lineamientos N-S y  $45^\circ/135^\circ$  para destacar lineamientos NE-SW. Este modelo sirvió de base para mejorar la extracción automática de lineamientos de las imágenes Landsat 8, interpretando visualmente lineamientos que el proceso automático no generó o agrupando diferentes lineamientos de direcciones preferenciales como uno sólo. Asimismo el modelo de relieve sirvió para ser utilizado como base en algunos mapas e imágenes procesadas, produciendo con ello un efecto topográfico que ayudara y diera soporte la interpretación de las diferentes imágenes.

## Capítulo 7. Resultados

Diversas imágenes se obtuvieron como resultado de los procesamientos espectrales especificados en el Capítulo 6. Estas imágenes fueron utilizadas para la interpretación de las zonas de alteración, estructuras y rasgos litológicos para localizar espacialmente áreas de interés para exploración de yacimientos minerales. Además de las imágenes, se obtuvieron como resultado un mapa geológico y otro de lineamientos + estructuras, modificados del Servicio Geológico Mexicano, los cuales fueron recortados sólo al área de interés para con ello correlacionar la litología y estructuras con las zonas de alteración interpretadas en este trabajo.

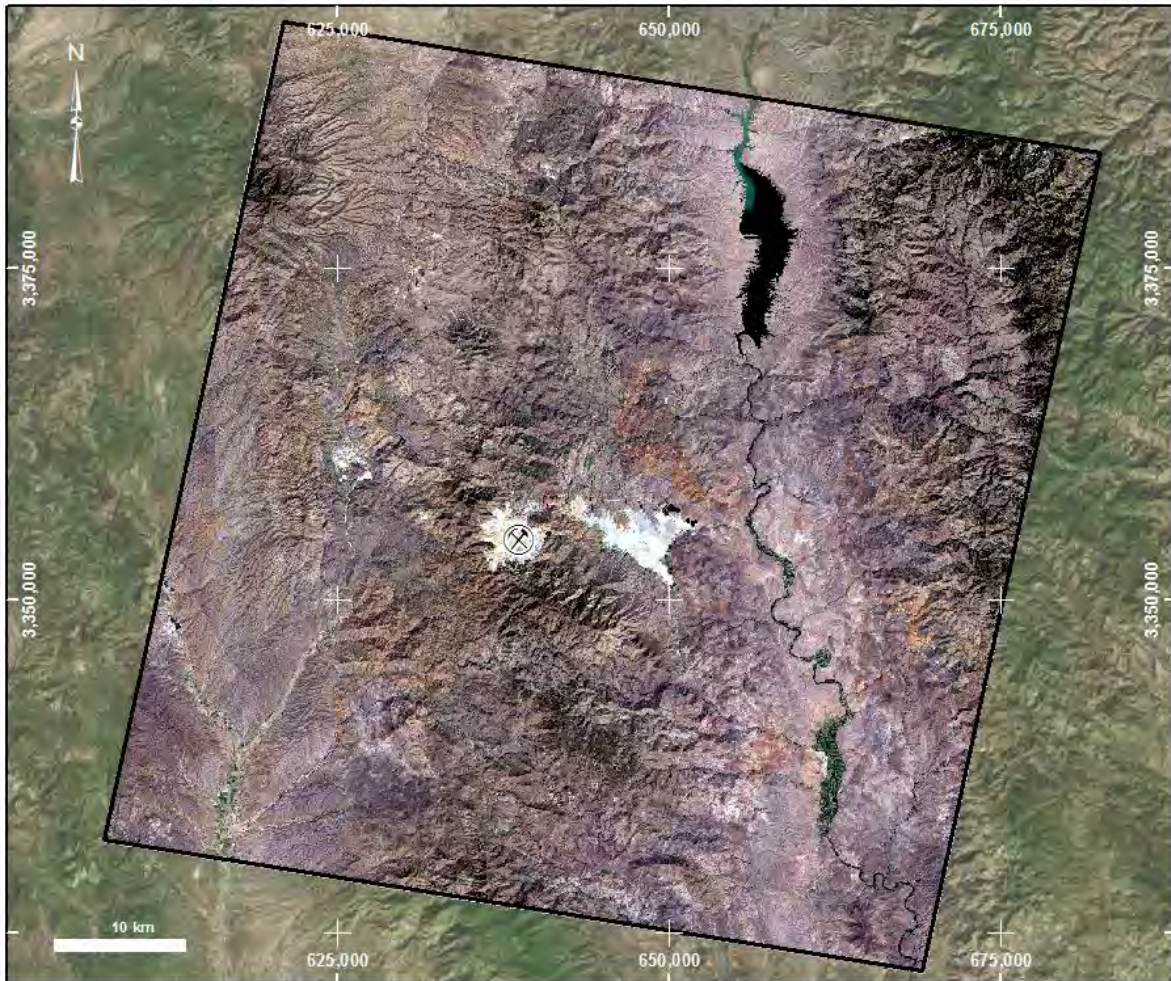
Las imágenes, resultado de los procesos, se generaron en formato GeoTIFF, formato de imagen que puede ser leído por cualquier software SIG o CAD. La referencia espacial de las imágenes está en el sistema de coordenadas UTM (Universal Transversa de Mercator) Zona 12 y referidas al datum WGS84.

Las imágenes para los contrastes litológicos y definición de grupos de alteración fueron generadas como composiciones RGB a partir de álgebra de bandas. Las imágenes para la localización de potenciales zonas de alunita, caolinita, calcita y sílice fueron generadas como imágenes de una sola banda con asignación de rampas continuas de color, desde azul para los valores nulos o muy bajos hasta rojo para la más alta probabilidad de abundancia para el mineral en cuestión.

Las figuras siguientes muestran las imágenes procesadas y referenciadas como mapas sobre una base de imagen obtenida de la plataforma ESRI *OnLine* (<http://www.esri.com/software/arcgis/arcgisonline>). Algunas de las figuras han sido mostradas en capítulos anteriores y se repiten aquí ahora con los lineamientos del SGM sobrepuestos para facilidad de lectura y como referencia.

## 7.1 Análisis exploratorio de imágenes satelitales Landsat 8 y ASTER

Imagen Landsat 8 color natural (Fig. 20): Como parte de los productos de apoyo, se generó un recorte en alta resolución (15 m) de la fusión de las bandas multiespectral y pancromática del sensor Landsat 8 en el área de estudio, esta imagen fue procesada para exhibir el color natural del terreno, así mismo, esta imagen se obtuvo también con el fin de apoyar la interpretación del resto de las imágenes.



*Fig. 20. Imagen resultado del proceso de fusión espacial y composición de bandas para color natural mediante la composición RGB de las bandas 432 del sensor Landsat 8 recortada a la cobertura del área de estudio.*

Contraste sílice – Zonas de alteración – Roca circundante (Fig. 21): Mediante técnicas de composición de bandas y asignación RGB se obtuvo una imagen que destaca el contraste entre zonas con alto contenido de sílice, zonas de alteración y la roca circundante.

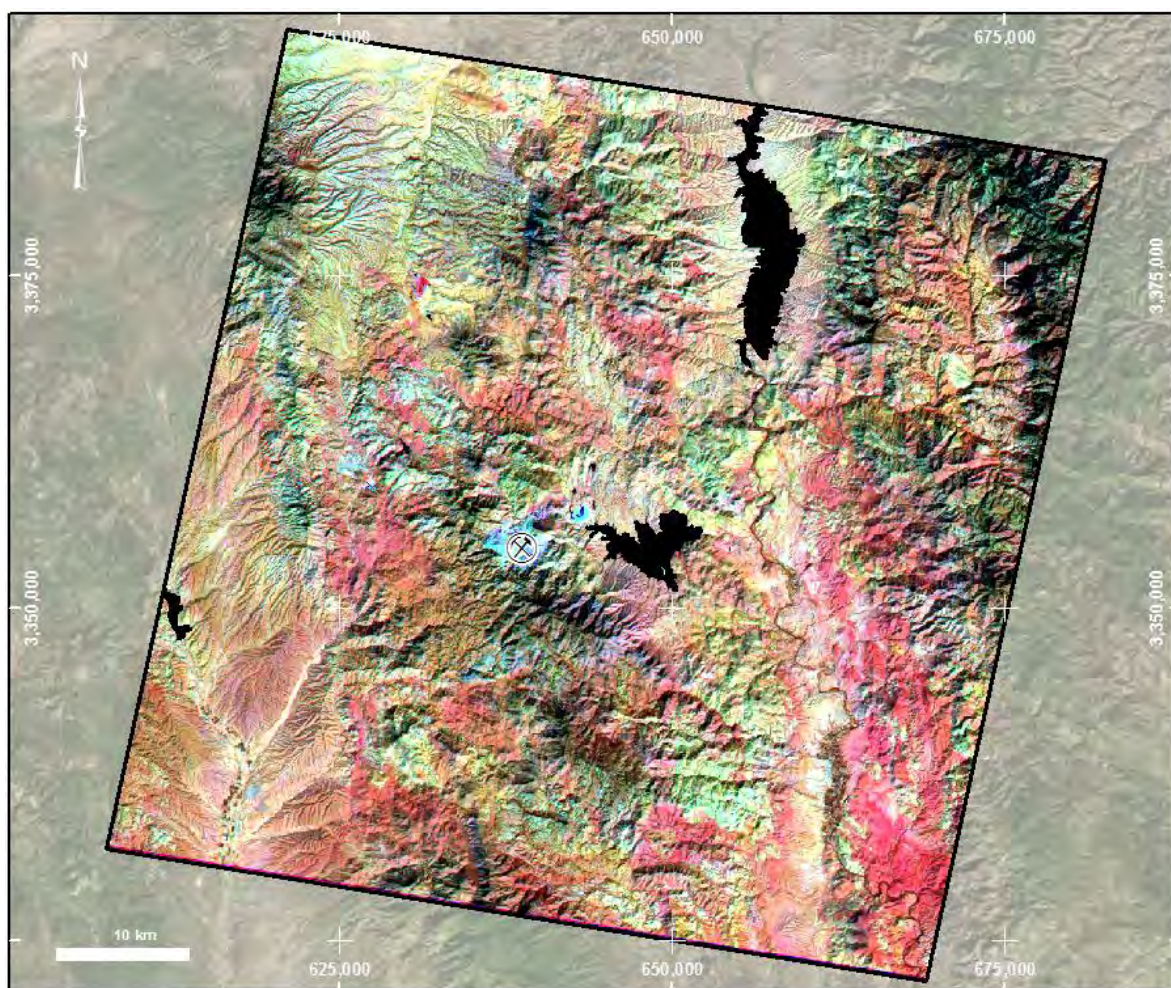
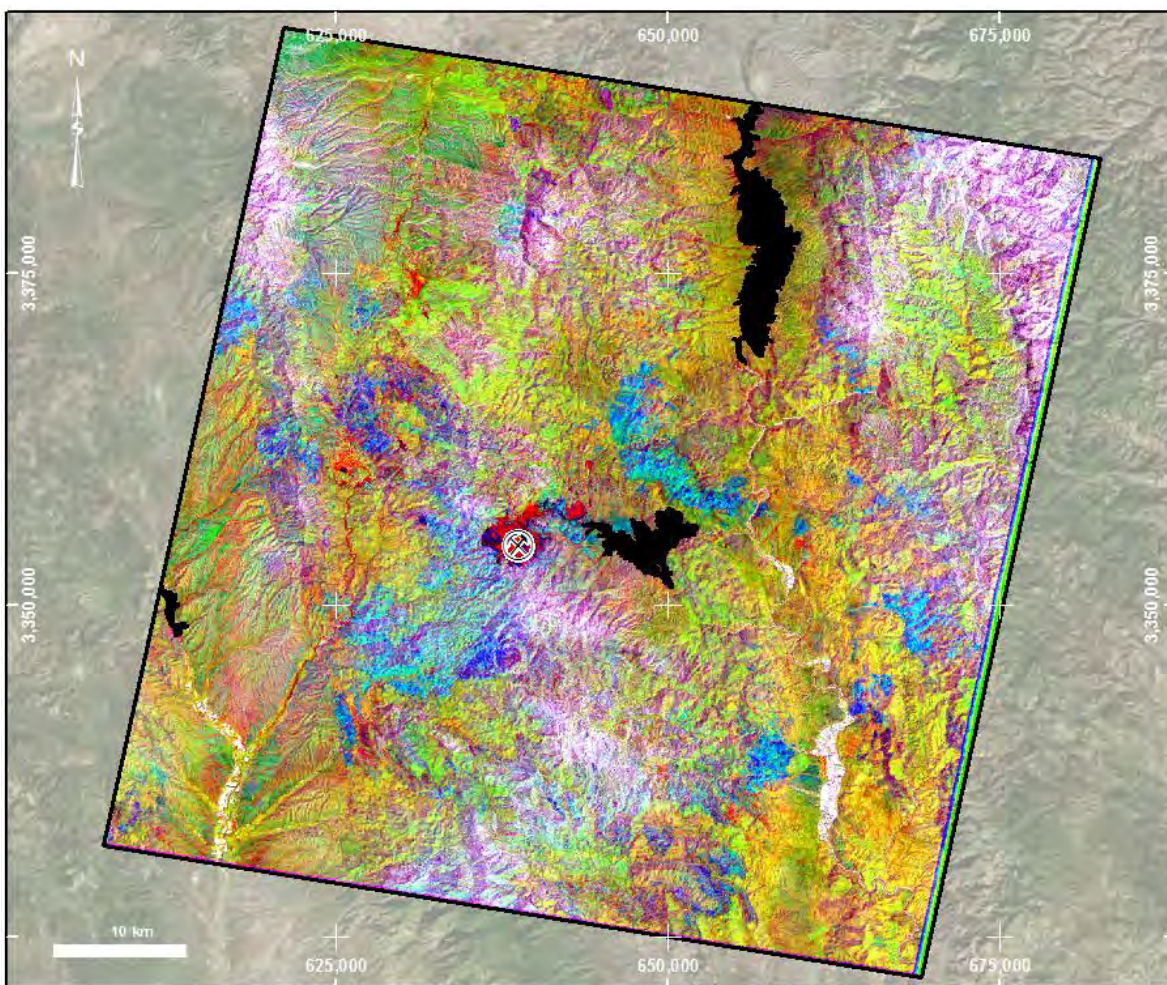


Fig. 21. Imagen resultado del proceso para contraste sílice- alteración-roca huésped por composición RGB de las bandas TIR14, SWIR7 y VNIR2. Las coloraciones rojizas indican zonas con alto contenido en sílice. Las tonalidades pardas a verde-azules (en afloramientos) indican posibles zonas de alteración.

Contraste litológico (Fig. 22): Mediante técnicas de composición de bandas, asignación RGB y transformación de bandas por la técnica de MNF se obtuvo una imagen de contraste litológico, la cual enfatiza el contraste entre las diferentes unidades litológicas en el área.



*Fig. 22. Imagen resultado de composición RGB procesada y transformada con el método MNF para crear contrastes litológicos en el área de interés.*

## 7.2 Análisis de lineamientos.

Modelo de relieve (Fig. 23): A partir del modelo de elevación de INEGI se obtuvo un modelo de relieve que sirviera de apoyo tanto en la interpretación de lineamientos como en la interpretación de las imágenes resultado de los procesos espectrales.

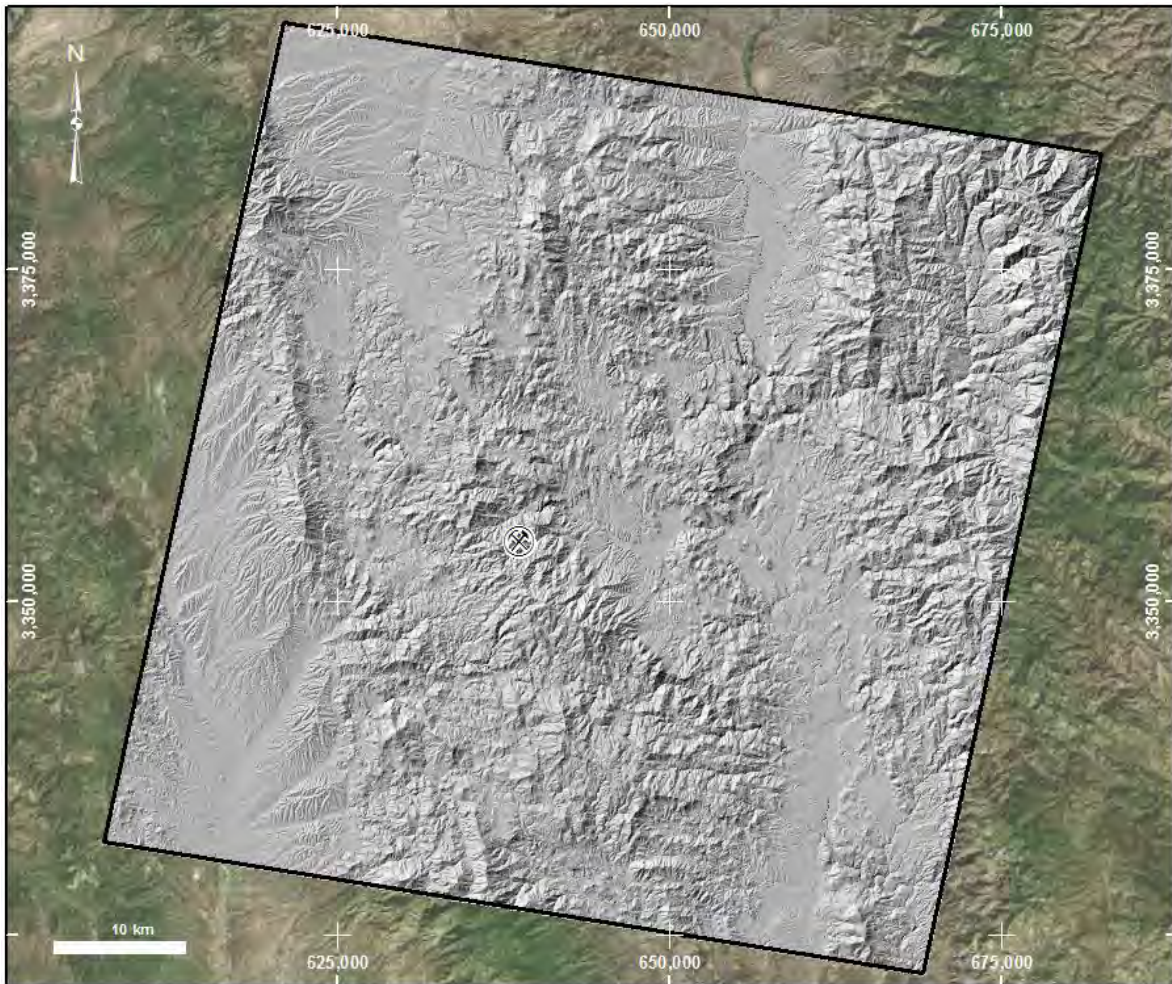


Fig. 23. Imagen resultado del modelo de relieve procesado a partir de modelo de elevación INEGI. Los ángulos de inclinación y dirección azimutal de la iluminación de terreno en esta escena están configurados a  $45^\circ / 135^\circ$ .



Extracción automatizada de lineamientos (Fig. 24): La extracción de lineamientos desde una banda seleccionada del sensor Landsat 8, y transformada con la técnica de componentes principales (PCA), fue ejecutada por medio de software, de este proceso resultaron lineamientos en formato vectorial los cuales fueron editados y complementados con base en el modelo de relieve para 4 diferentes direcciones de luz.

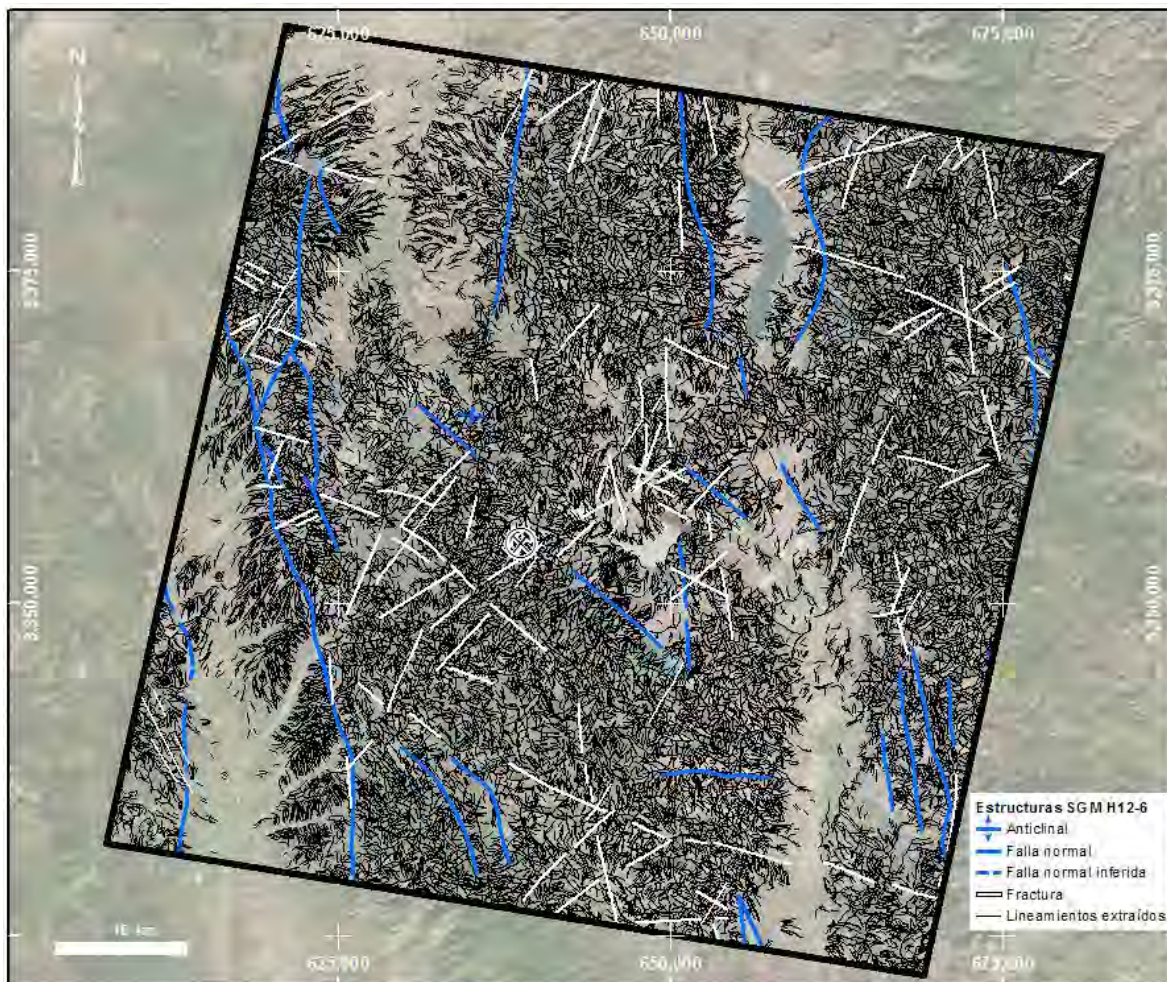


Fig. 24. Mapa resultado del análisis de extracción de lineamientos. En color azul y líneas gruesas en blanco se aprecian las fallas y fracturas obtenidas del mapa interactivo del SGM. En líneas negras y delgadas, se presentan los lineamientos que resultaron de la extracción por software, así como de los que se interpretaron con base en la imagen procesada de alta resolución.

Mapa de densidad de lineamientos (Fig. 25): Mediante un análisis digital de los lineamientos extraídos, se generó una imagen que muestra las zonas de mayor densidad de lineamientos en el área de estudio.

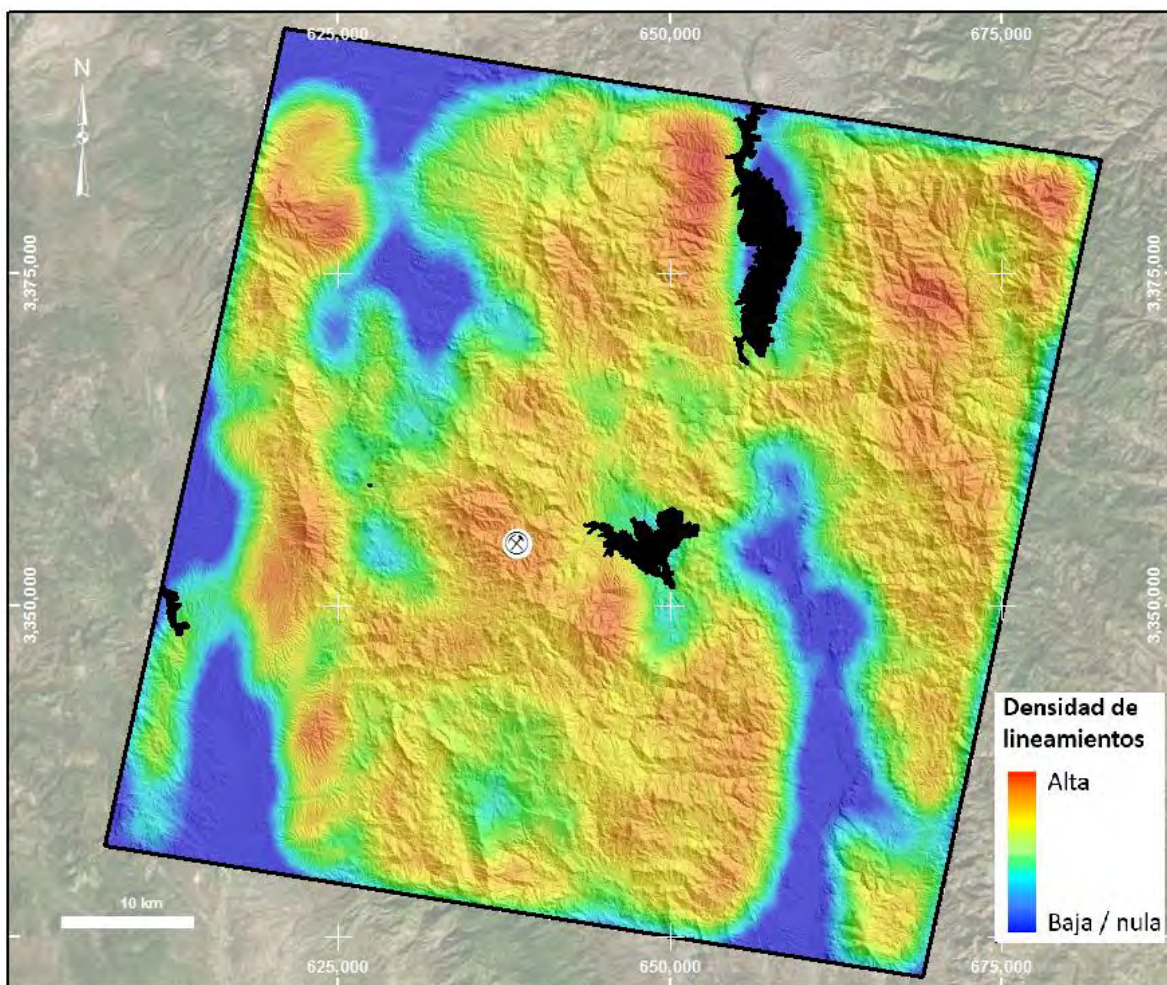


Fig. 25. Mapa resultado del cálculo de densidad de lineamientos, los colores rojos indican una mayor densidad de lineamientos. Para este cálculo de densidad sólo se tomaron los datos extraídos e interpretados, sin considerar los datos originales del SGM.

### 7.3 Mapas de alteraciones a partir del análisis de la escena ASTER.

Imagen índice de arcillas (Fig. 26): Utilizando técnicas de índices espectrales, se generó una imagen para realzar las zonas de posible presencia de arcillas, esta imagen no identifica minerales de alteración o grupos de minerales de alteración específicos.

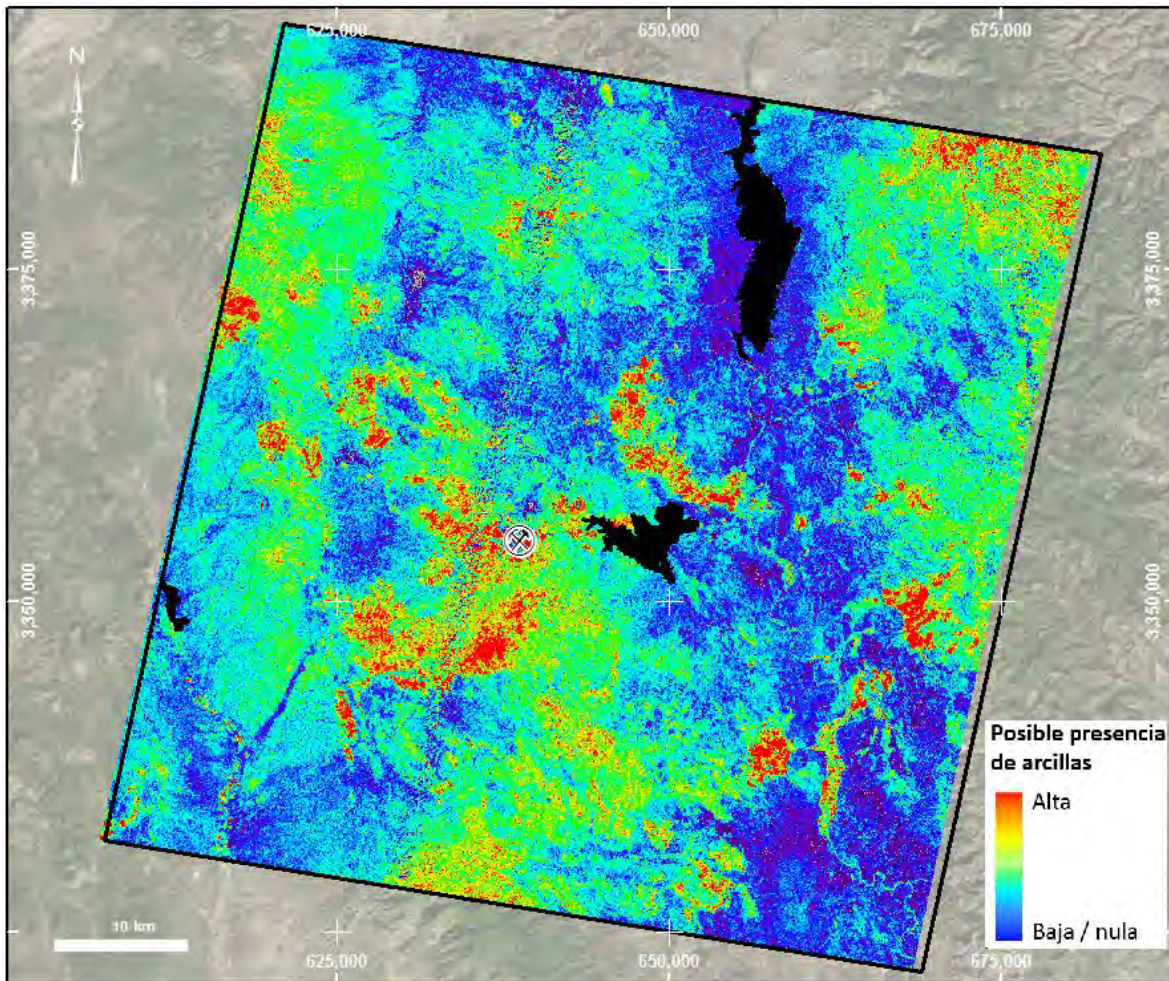


Fig. 26. Imagen resultado del proceso para el índice de arcillas, resultado de cocientes de bandas del infrarrojo de onda corta. Las coloraciones azules a cian indican baja probabilidad de presencia de arcillas, las áreas con colores naranja a roja denotan zonas con alta a muy alta probabilidad de concentraciones de arcillas. Los cuerpos de agua se representan en color negro.

Imagen índice de óxido férrico (Fig. 27): Por medio de álgebra de bandas del subsistema VIS del sensor Landsat 8, se generó una imagen de una sola banda para identificar zonas con posible presencia de óxido férrico (probablemente hematita / goethita). Esta imagen es luego matizada por rampas continuas de color para realzar zonas de baja probabilidad contra las de alta probabilidad de contener este material.

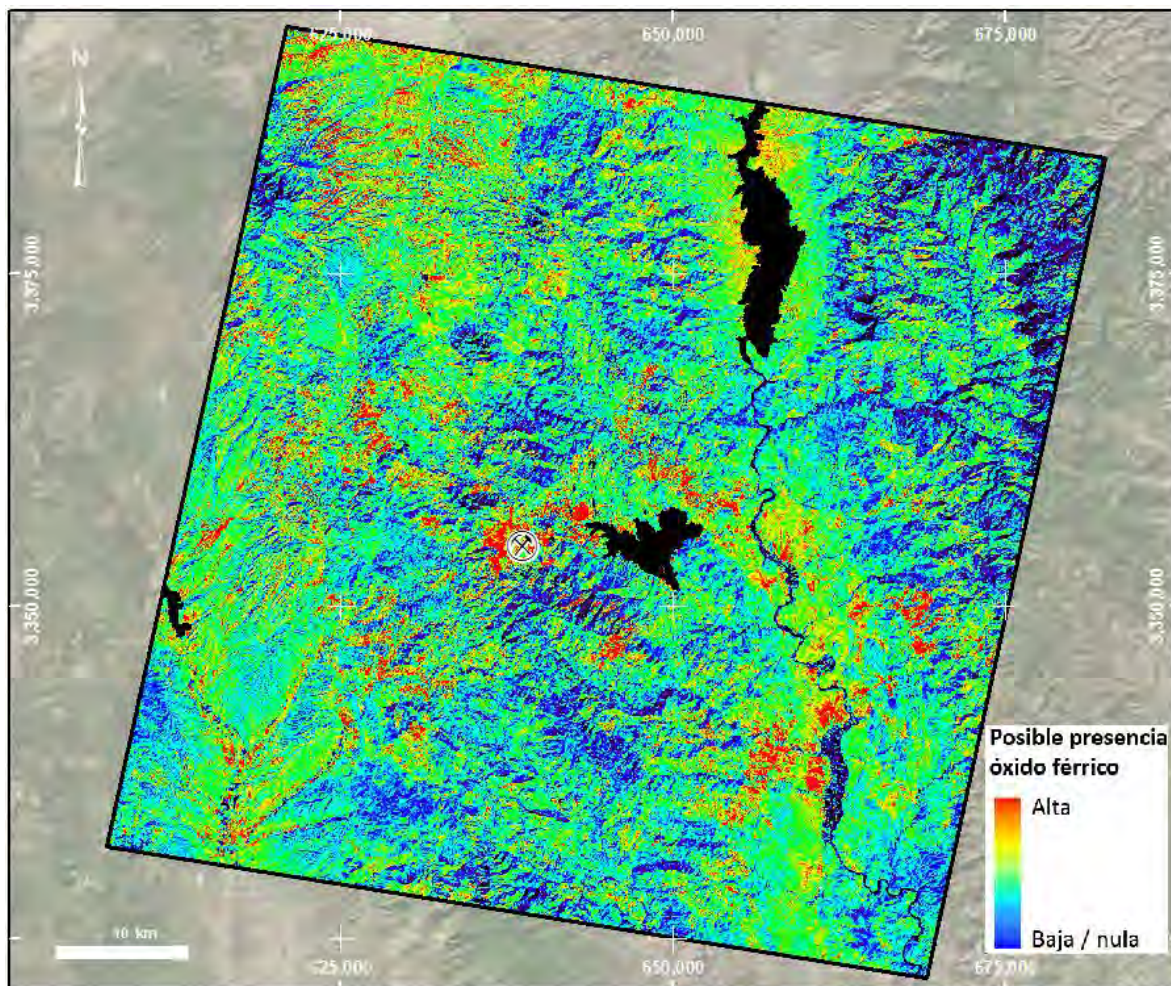


Fig. 27. Imagen resultado del proceso para el índice para óxido férrico a partir de cociente de bandas del subsistema VIS del sensor Landsat. Las coloraciones rojas indican alta probabilidad de tratarse de zonas de oxidación.

Imagen índice de óxido ferroso (Fig. 28): Al igual que la imagen índice de óxido férrico, se generó una imagen índice para óxido ferroso (probablemente magnetita), ésta se logra también por medio de álgebra de bandas, ahora utilizando las del infrarrojo de onda corta y del infrarrojo cercano.

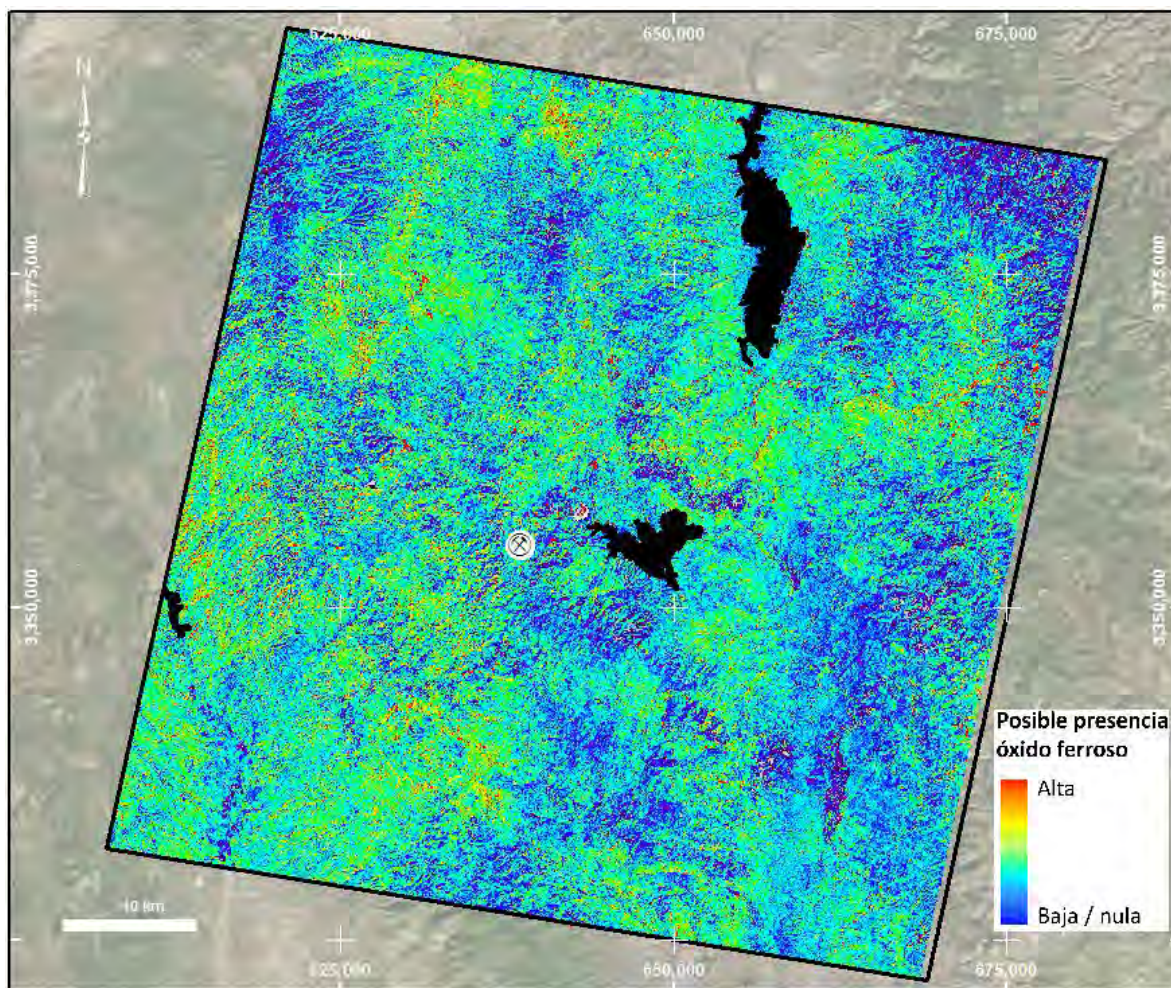


Fig. 28. Imagen resultado del proceso para el índice de óxido ferroso. Las coloraciones rojas indican alta probabilidad de tratarse de zonas de con posible presencia de óxido ferroso.

Imagen índice de sílice (Fig. 29): Para la generación de esta imagen se utilizaron técnicas de álgebra de bandas del sector del infrarrojo térmico. Esta imagen también fue graduada en rampa de colores de azul a rojo como lo indica la leyenda.

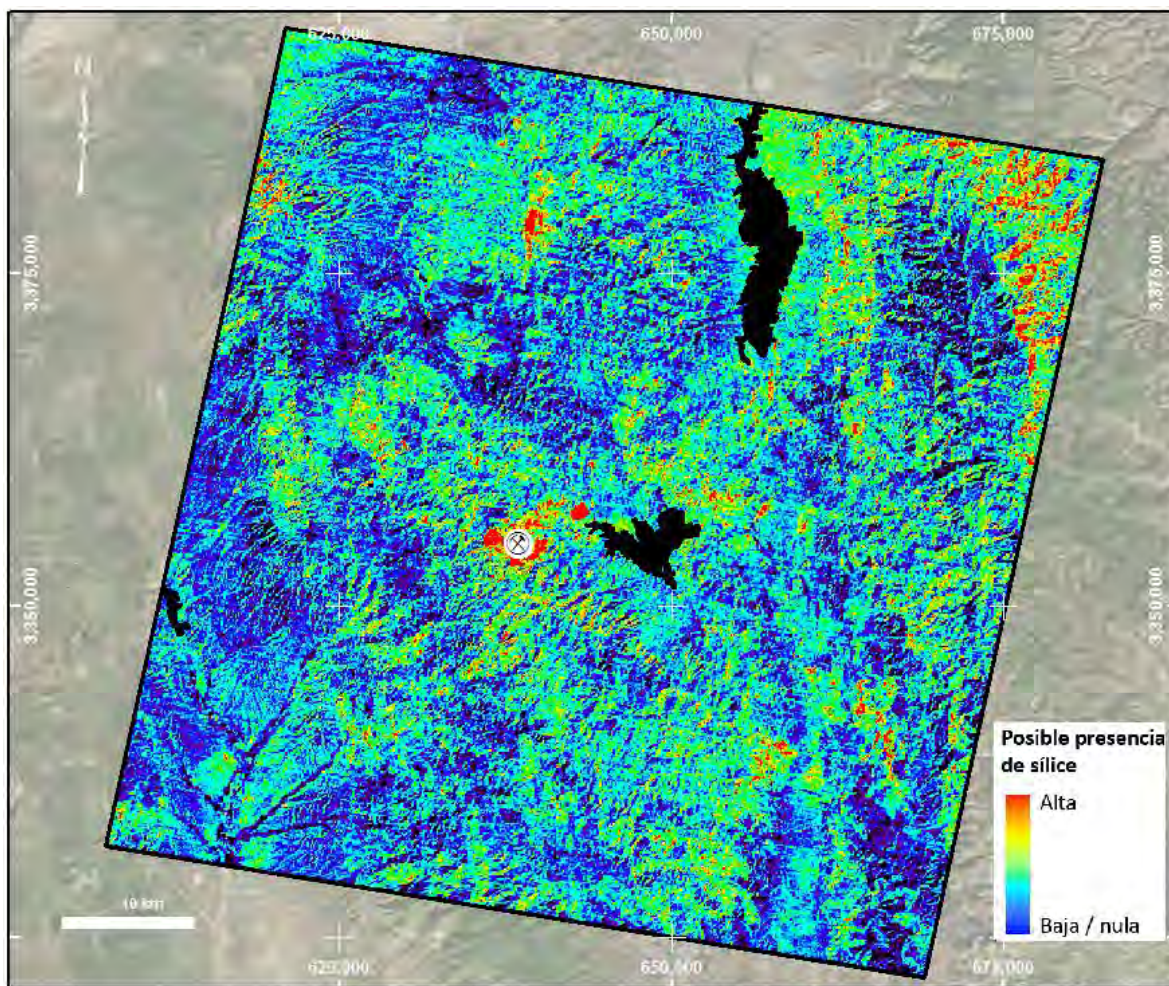
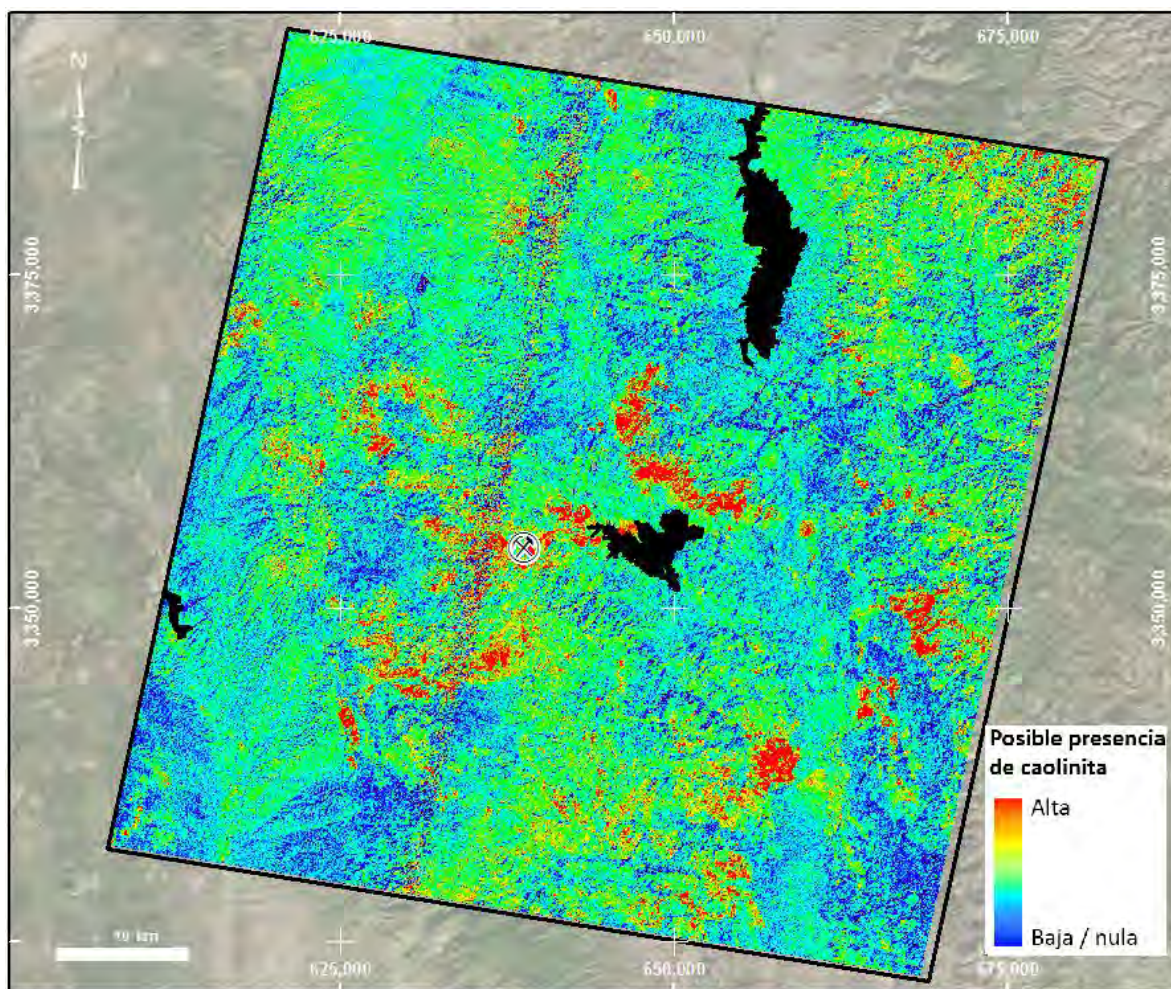


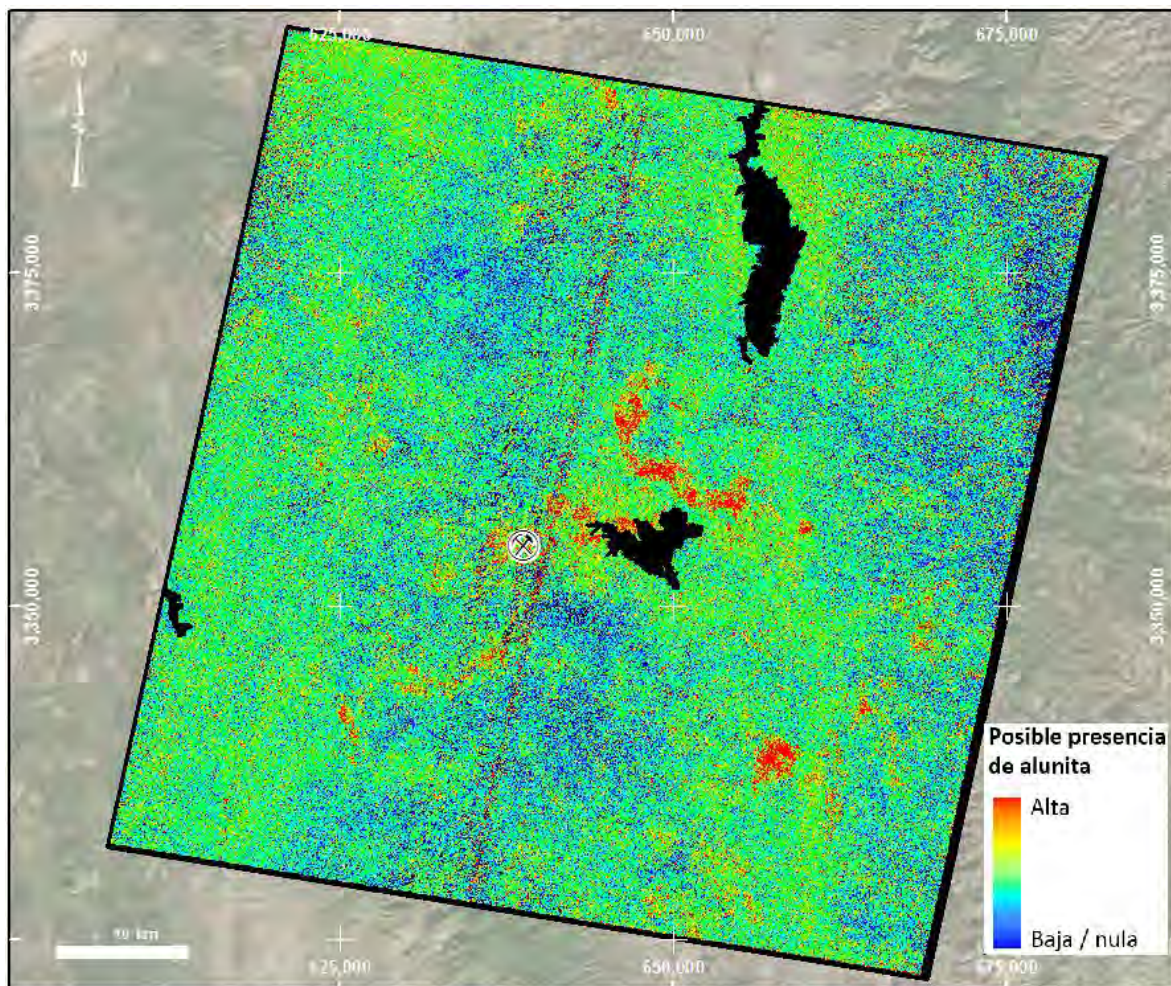
Fig. 29. Imagen resultado del índice de sílice por cociente de bandas del infrarrojo térmico; en colores rojos se presenta la más alta posibilidad de presencia de sílice. La interferencia en forma de líneas WNE-ESE presente en toda la imagen se debe al efecto de barrido de la imagen original, esto es normal en los procesos donde intervienen las bandas del TIR, como es este caso.

Imagen índice de caolinita (Fig. 30): La imagen mono-banda para el índice de caolinita se obtuvo a partir de álgebra de las bandas del sector SWIR de la imagen ASTER. Al igual que los índices anteriores, fue matizada en rampa continua de color. En la parte medio-oeste de la imagen aparece una franja de interferencia, probablemente por algún artefacto en la escena, por lo que el área que cubre esta franja se debe considerar como un falso positivo (que son anomalías positivas para el proceso específico, pero que no representan el material de interés), el resto de la imagen se puede considerar como correcta.



*Fig. 30. Imagen resultado del índice de caolinita a partir de álgebra de bandas del SWIR. La línea de interferencia que cruza la imagen en dirección NNE-SSW se debe a un artefacto en la imagen cruda original, esta interferencia suele aparecer al procesar ciertas bandas del SWIR. Esta línea deberá considerarse como "falsos positivos".*

Imagen índice de alunita (Fig. 31): Una imagen índice para el mineral alunita fue generada también por medio de álgebra de bandas como imagen de una sola banda y coloreada en rampa continua de color. Se presenta también en esta imagen una franja de interferencia como en el caso de la caolinita (Fig. 30), de la misma forma en esta imagen el sector de esa franja se considera como falso positivo.



*Fig. 31. Imagen resultado del índice de alunita, en color rojo se representa la más alta posibilidad de presencia de alunita. La franja anómala de dirección NNE-SSW es resultado de un falso positivo.*



Imagen índice de calcita (Fig. 32): Para la generación de la imagen índice de calcita se operaron matemáticamente bandas seleccionadas del sector SWIR de la imagen ASTER, el producto final fue creado como imagen de una sola banda y coloreada en rango de azul a rojo.

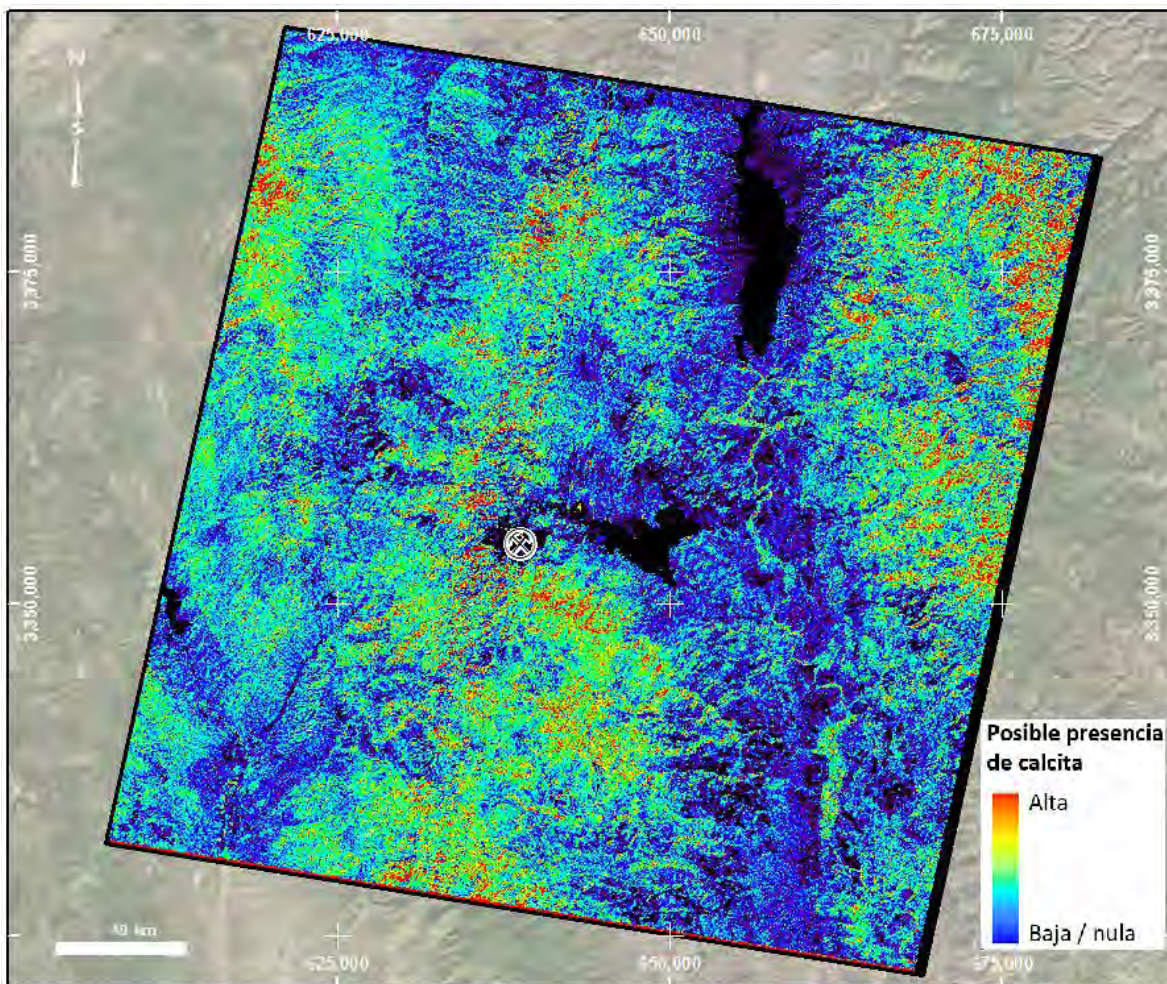


Fig. 32. Imagen resultado del índice de calcita que muestra en color rojo la más alta posibilidad de presencia de calcita.

Composición RGB arcillas + óxido férrico + óxido ferroso (Fig. 33): Esta imagen se consiguió por medio de composición de bandas a partir de las imágenes pancromáticas generadas anteriormente con álgebra de bandas para cada tipo de alteración. El índice de arcillas se colocó en el canal rojo, el índice de óxido férrico en el canal verde y la de óxido ferroso en el canal azul, tal y como lo indica la leyenda.

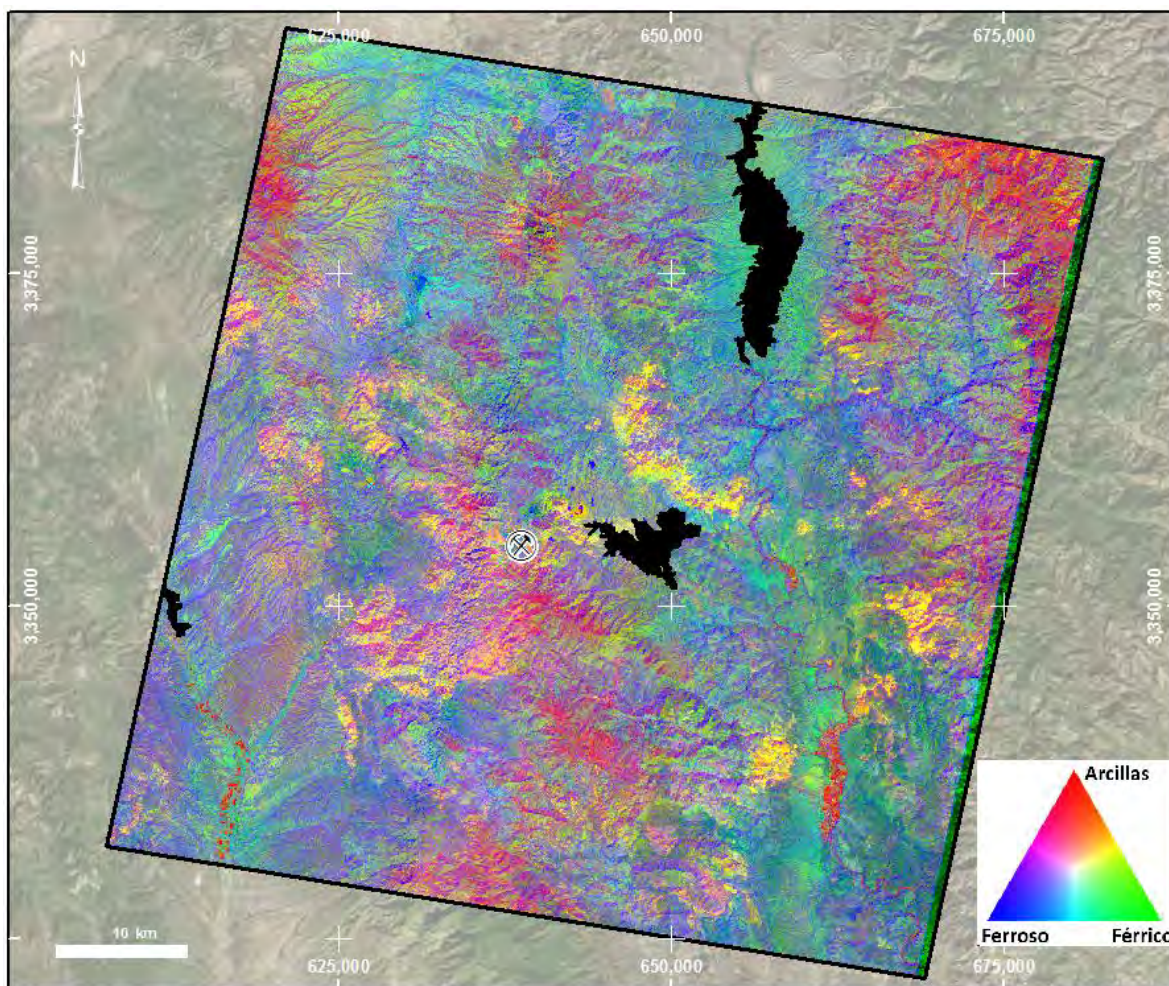


Fig. 33. Imagen resultado de la composición RGB arcillas – óxido férrico – óxido ferroso. La respuesta de color para cada material y sus combinaciones se presenta en el triángulo RGB de la leyenda.

Composición RGB de alteraciones filica-argílica-propilítica (Fig. 34): La imagen de composición RGB para la alteración filica, argílica y propilítica se generó mediante la combinación digital de las imágenes pancromáticas independientes obtenidas de los procesos de álgebra de bandas espectrales para estas alteraciones.

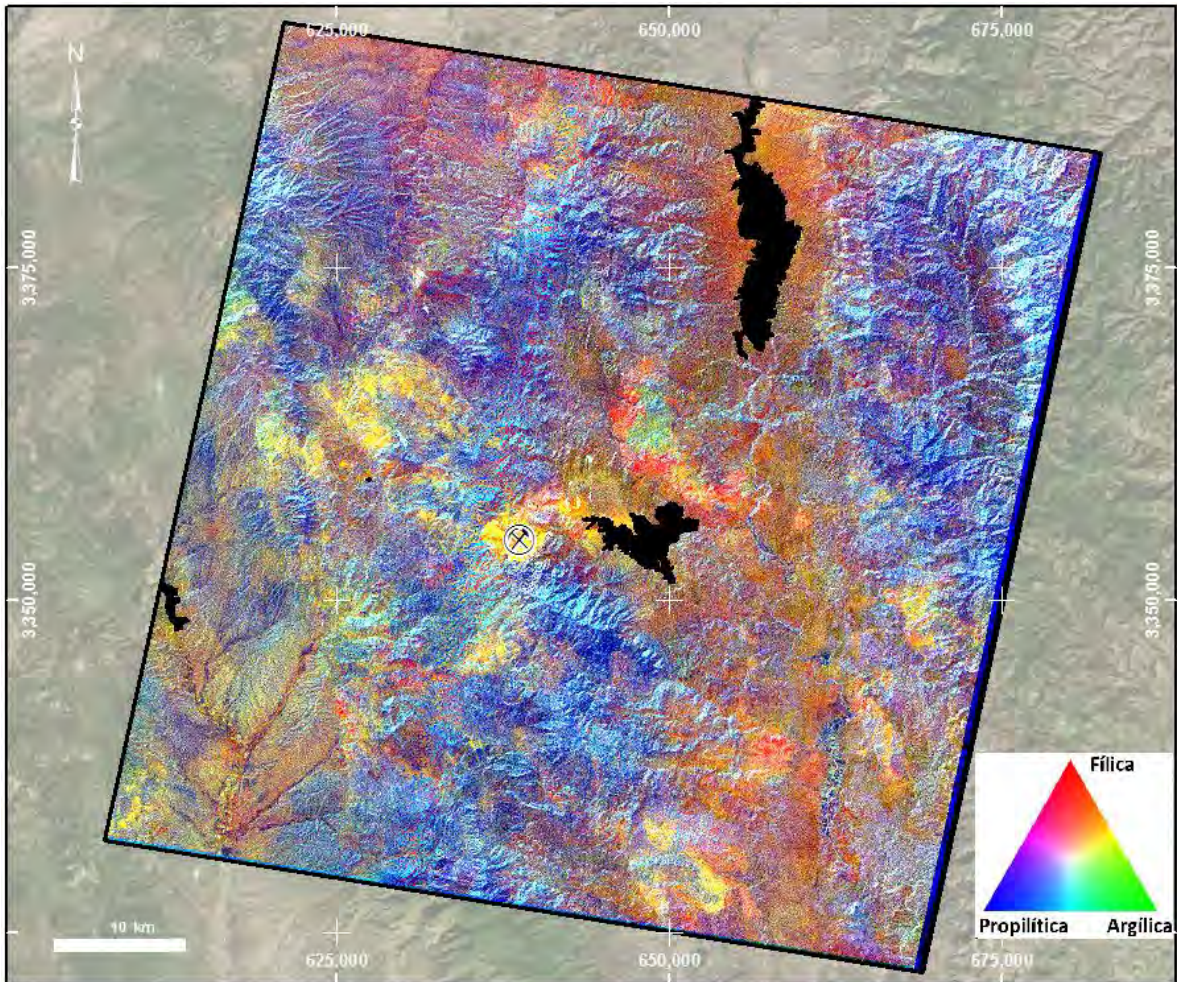


Fig. 34. Imagen resultado de la composición RGB alteraciones filica – argílica - propilítica. La respuesta de color para cada material y sus combinaciones se presenta en el triángulo RGB de la leyenda.

## Capítulo 8 Discusión

Usando la información generada en este trabajo de investigación es posible definir interpretaciones que apoyen la solución de los diferentes objetivos planteados al inicio del escrito. Por ejemplo, los datos generados para contraste litológico ayudaron a delinear con mejor definición contactos litológicos y también a realzar la coloración de la posible roca alterada. El análisis de lineamientos, usando en conjunto los datos del SGM y los lineamientos extraídos e interpretados a partir de imágenes y modelo de relieve, permitió relacionar lineamientos y estructuras que limitan tanto unidades litológicas como zonas de alteración.

Con el resultado de la imagen en color natural del sensor Landsat 8 se lograron identificar y correlacionar anomalías de color, evidentes en la escena, con la imagen resultado del índice de óxido férrico. Por otro lado, con la imagen de índice de sílice se consiguió interpretar relaciones entre este mineral y las características de algunos yacimientos conocidos. La imagen para el índice de óxido férrico contra el de óxido ferroso aportó importante información que apoya algunos de los objetivos planteados en este trabajo de investigación. Por otro lado, la comparación de las imágenes de índice de arcillas y la composición RGB de arcillas + óxido férrico + óxido ferroso permitió reforzar los resultados del proceso de arcillas así como establecer algunas relaciones con modelos de yacimientos así como con estudios previos como el de Rascón-Heimpel *et al.* (2012) en el área de Los Alisos.

Con una composición RGB a partir de las imágenes resultado para los grupos de alteración filica, argílica y propilítica y con el resultado de la interpretación de lineamientos, se consiguieron establecer relaciones espaciales entre estos dos análisis. Por último, las imágenes de abundancia para los minerales caolinita, alunita y calcita arrojaron importante información acerca de los niveles de exposición de acuerdo a modelos reconocidos de yacimientos.

A continuación se presentan las interpretaciones que se lograron analizando las relaciones espaciales entre los distintos temas resultado de los procesos espectrales y de interpretación.

## 8.1 Contraste litológico MNF y conciliación con geología del SGM.

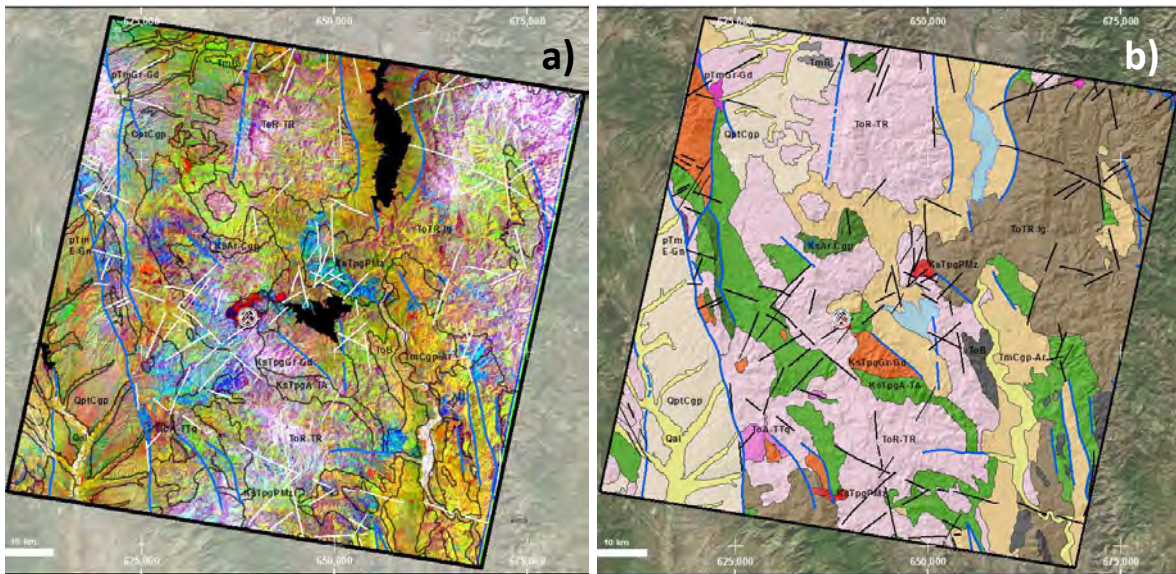


Fig. 35. Comparación de las imágenes a) de contraste litológico MNF con los contactos litológicos del SGM sobrepuestos para referencia y b) mapa geológico modificado del SGM.

La imagen procesada para contraste litológico, usando el proceso MNF a partir de la composición R14G7B2, muestra en coloraciones amarillas a naranja y pardo áreas que podrían corresponder a unidades sedimentarias (equivalentes en el mapa del SGM a conglomerados polimícticos y areniscas). De la misma manera, los datos sugieren que los colores magenta a blanco podrían representar rocas intrusivas o extrusivas félsicas (equivalentes en el mapa del SGM a granito, granodiorita, riolita, toba riolítica o ignimbrita); dado que uno de los principales minerales esenciales en este tipo de rocas es el  $\text{SiO}_2$  y que estas mismas coloraciones (magenta a blanco) corresponden a la respuesta espectral de una combinación entre alto contenido de  $\text{SiO}_2$  y roca fresca, el resultado de los procesos espectrales se puede aceptar como correcto dada su correlación espacial con los datos del SGM. Por otro lado, las tonalidades azules sugieren posibles zonas de alteración, las cuales están correlacionadas espacialmente con sectores dentro de las unidades volcánicas, teniendo una nula presencia en los intrusivos, lo que podría indicar, a esta escala del trabajo, que estos últimos no han sido alterados, por lo menos en grado tal que tengan una amplitud en superficie que el sensor pueda detectar. Por último, las áreas de verde a multicolor representan sedimentos recientes (equivalentes a conglomerados y aluvión en el SGM), esta

respuesta con diferentes coloraciones indica la variada composición de los sedimentos. Los polígonos litológicos de la carta H12-6 se presentan sobrepuestos en líneas negras sobre la imagen procesada para referencia (Fig. 35a). Si bien es cierto que es evidente una clara correlación entre el proceso espectral y las unidades reportadas por el SGM (Fig. 35b) en la mayor parte del área de estudio, también es cierto hay sectores donde la información del mapa geológico es más generalizada, el proceso espectral ayuda a delinear con mayor precisión estas zonas para así mejorar la información pública.

## 8.2 Análisis de lineamientos

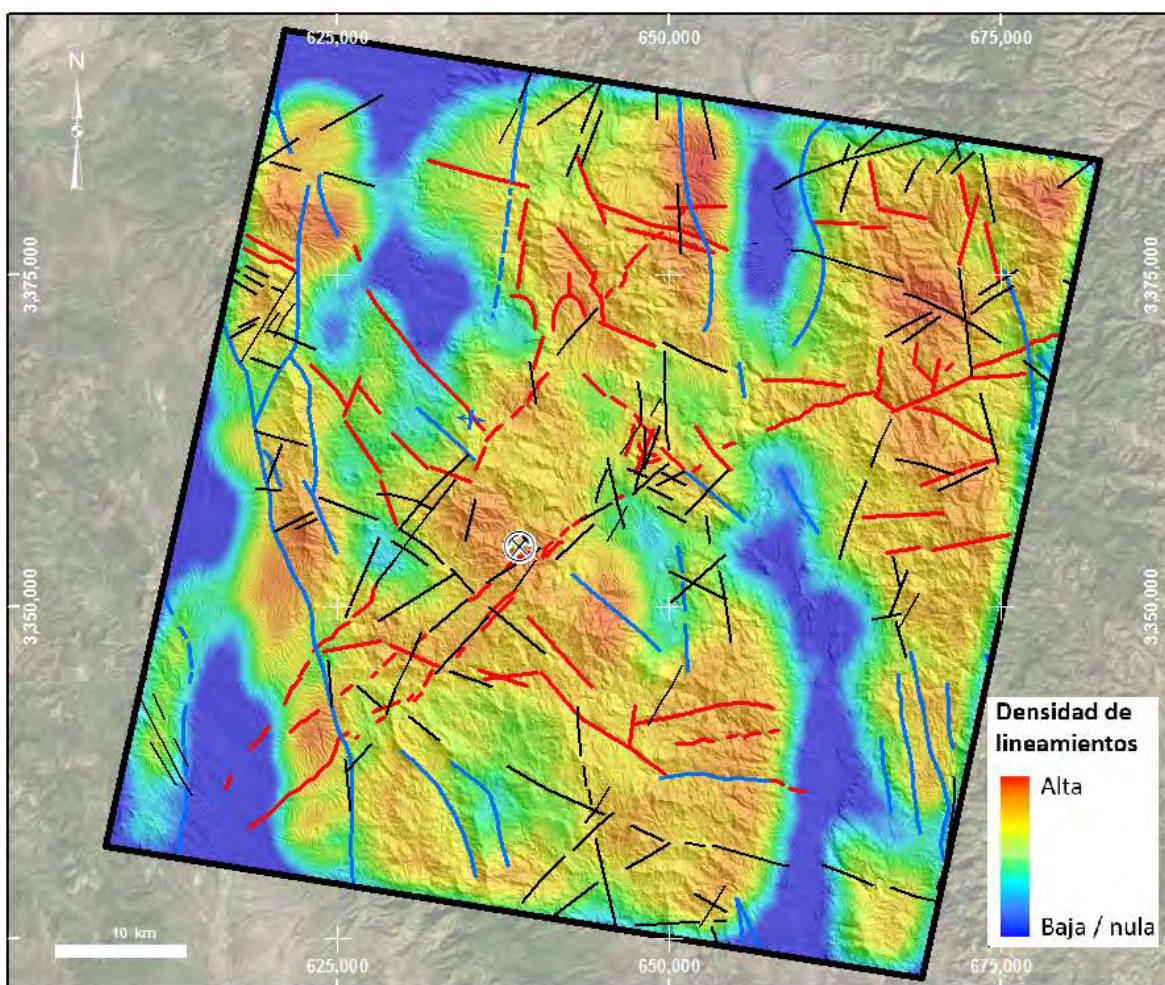
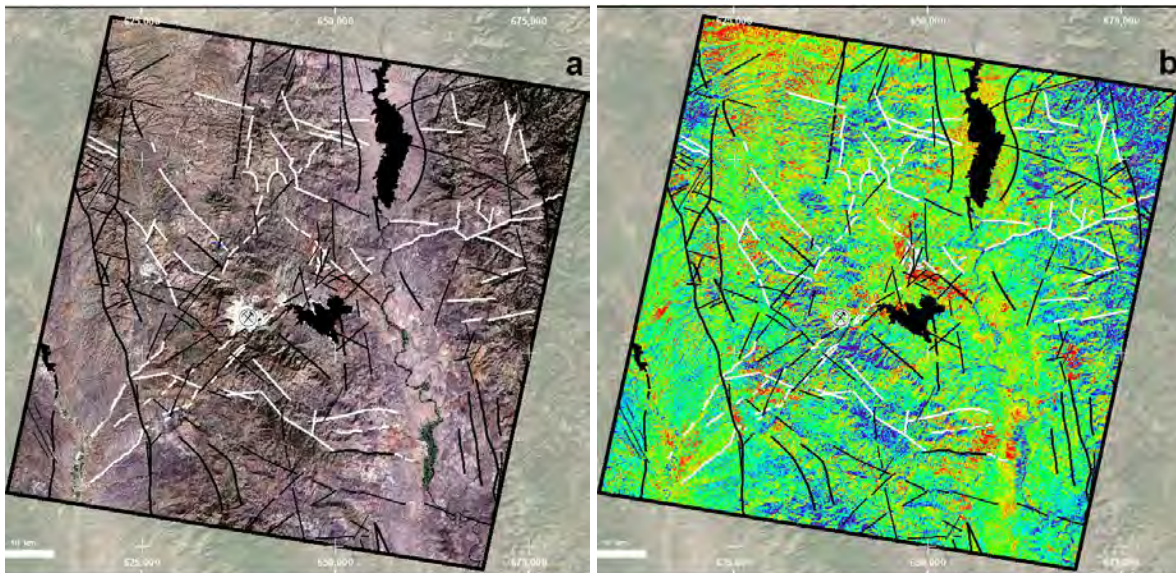


Fig. 36. Mapa de estructuras obtenidas del SGM (líneas azules y negras) sobrepuestas con el resultado de la interpretación a partir de la extracción automática de lineamientos (líneas rojas) en la imagen de densidad de lineamientos.

En la Figura 36 se muestran las estructuras obtenidas de la información del SGM, estas se presentan sólo en líneas gruesas de color azul y negro. La interpretación, resultado del análisis espacial de la imagen Landsat 8 en conjunto con el modelo de relieve, se muestra en líneas rojas, éstas pertenecen en su mayoría a la extracción automática y muy pocas de ellas fueron interpretadas a mano. Las líneas rojas fueron generadas a partir de la selección de líneas extraídas que coincidían en dirección y ubicación con las estructuras originales de la carta del SGM, con ello se consiguió ampliar o complementar la información existente y de igual forma interpretar la correlación espacial entre el sistema estructural y las zonas de alteración, donde los datos sugieren que es posible que exista en el área de estudio un control estructural para la disposición de las zonas de alteración. Por otro lado, la imagen generada para la densidad de lineamientos sugiere que las grandes estructuras en el área provocan mayor fracturamiento o creación de lineamientos dentro de los límites de estas grandes estructuras.

### 8.3 Correlación entre imagen de color natural y el índice para óxido férrico.



*Fig. 37. Comparación de los procesos para la escena Landsat 8 a) imagen en color natural contra b) imagen extraída del índice para óxido férrico. Ambas imágenes tienen sobrepuestas las estructuras del SGM (en color negro) y la extracción e interpretación de lineamientos (en color blanco).*

Comparando la imagen del sensor Landsat 8, procesada para obtener color natural (Fig. 37a), y la imagen resultado del proceso de índice para óxido férrico (Fig. 37b) generada a partir de la misma escena, se puede ver que hay una clara relación entre las coloraciones café-rojizas de la imagen de color natural y las zonas de mayor posibilidad de presencia de óxido férrico. Casos evidentes son las áreas de Los Alisos, noroeste y oeste de Villa Hidalgo, oeste de Bella Esperanza entre otras. Esta correlación positiva soporta el procesamiento espectral para el índice ya que, tanto la imagen en color natural como el índice para óxido férrico, se procesaron usando la porción del visible del sensor Landsat 8.

#### 8.4 Índice de sílice.

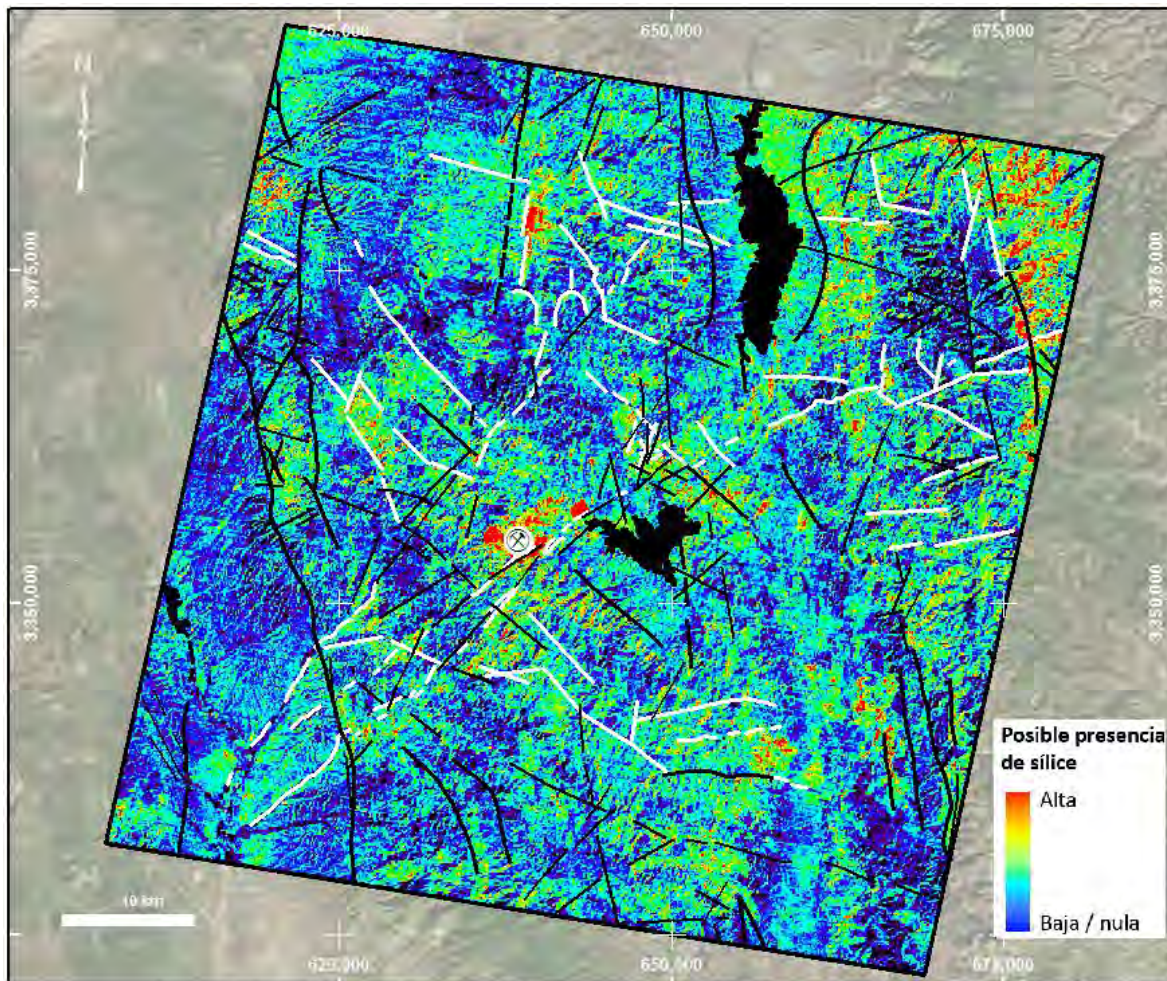


Fig. 38. Imagen de relación del índice de sílice con las estructuras del SGM (en líneas de color negro) y los lineamientos extraídos e interpretados (en líneas de color blanco).



La imagen de índice de sílice, creada a partir del procesamiento de las bandas del infrarrojo térmico del sensor ASTER, muestra la posible presencia de sílice en diferentes sectores del área de estudio. Es evidente el posible alto contenido de sílice (Fig. 38) en el sector inmediatamente al noreste de La Caridad y sus inmediaciones, así como en el sector de la Sierra La Púrica y entre ésta y la Presa General Lázaro Cárdenas. El área alrededor de Nacozari de García muestra relativamente pequeñas manifestaciones de sílice limitadas por estructuras NW-SE, más al oeste, se aprecia un sector claramente limitado por grandes estructuras NNW-SSE y otras NNE-SSW y NE-SW, lo que se pudiera interpretar como un bloque levantado. Las áreas de El Tigre y aledañas, muestran también grandes manifestaciones de sílice, probablemente asociadas a las rocas volcánicas félsicas presentes en el sector, esto no descarta que la presencia de sílice esté también relacionada la presencia de depósitos de tipo epitermal o pórfidos cupríferos en el área de estudio. También se observa posible presencia de sílice en los sectores al oeste y este de Villa Hidalgo.

El área de Los Alisos presenta una característica importante en esta imagen, ya que se aprecia en ella que estructuras N-S y NE-SW están limitando un área aparentemente carente de sílice en el centro de esta zona y con respuesta positiva en los bordes exteriores de las mismas estructuras. Por último, es posible notar una relación entre la respuesta positiva del sílice en la imagen con las estructuras y lineamientos ENE-WSW que cruzan toda la escena pasando por la Mina La Caridad.

## 8.5 Correlación del índice de óxido férrico con el índice de óxido ferroso.

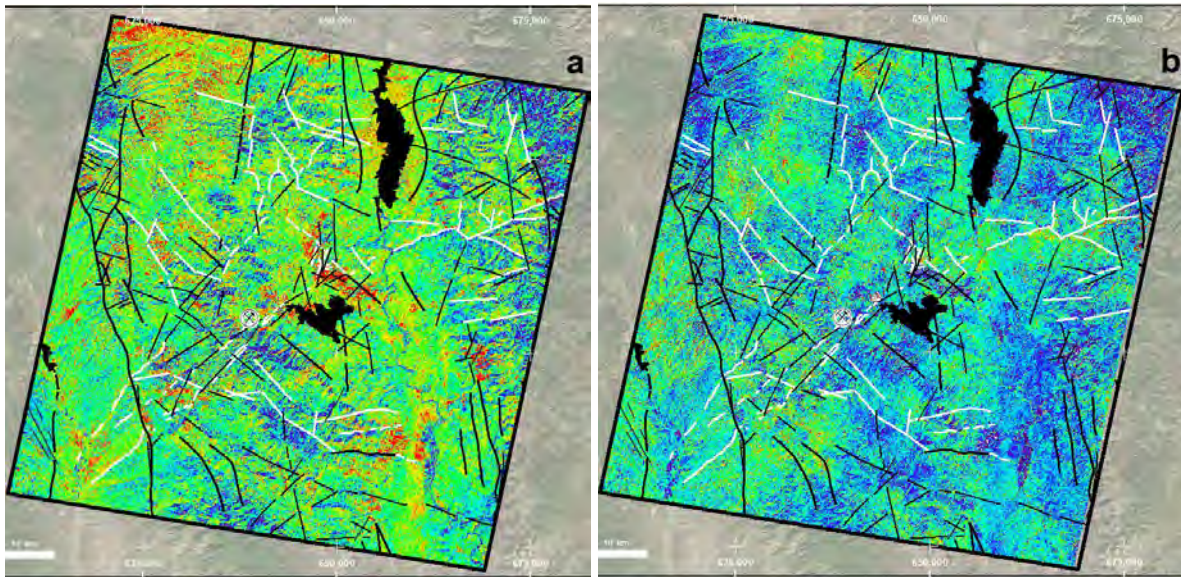


Fig. 39. Imágenes de comparación para a) óxido férrico (posible hematita) y b) óxido ferroso (posible magnetita).

En la Figura 39a se pueden observar grandes extensiones con respuesta positiva a la posible presencia de óxido férrico, aunque esta presencia se hace mucho más evidente en sectores específicos como Los Alisos, NE de la Mina La Caridad, sectores al NE y W de Villa Hidalgo, entre otros, sugiriendo la posible presencia de hematita. Se ha documentado que las rocas de la Formación Tarahumara (que están presentes en la mayor parte del área) presenta una oxidación posiblemente a partir de minerales ferro magnesianos, esto sugeriría que la oxidación que se muestra dispersa en el área se atribuye a una influencia volcánica y que las extensiones con respuesta positiva al NW del área de estudio pertenecen a sedimentos oxidados transportados; sin embargo, la evidencia de mineralización en la zona de Los Alisos (Rascón-Heimpel *et al.*, 2012) sugiere que la presencia de óxido férrico en sectores específicos es debida a actividad hidrotermal, esto podría extrapolarse también a los sectores de Bella Esperanza, NE y W de Villa Hidalgo, así como en El Batamote y Florida-Barrigón. Es notable la correlación negativa de la imagen del óxido férrico con la del óxido ferroso (Fig. 39b). Sólo algunos sectores locales, especialmente en la porción SW del área de estudio, presentan una correlación positiva entre ambos óxidos.

Es posible también notar que en el área de El Tigre se aprecian la posible presencia muy puntual (puntos rojos) de óxido ferroso, que si se le asigna como magnetita, se podría presumir una posible relación con depósitos epitermales de baja sulfuración. Además de lo anterior, esta disposición del óxido ferroso puede ser también un indicador de un nivel de exposición más somero para este sector, sin decir que este sector está relacionado genéticamente con los pórfidos en el SW del área de estudio.

### **8.6 Correlación de la imagen índice de arcillas con la composición RGB arcillas-óxido férrico-óxido ferroso.**

La imagen de índice de arcillas (Fig. 40a) muestra que las zonas de arcillas están más concentradas en sectores como Los Alisos, S y SW de la Mina La Caridad, NE y W de Villa Hidalgo y El Batamote, por otro lado, en el área de El Tigre, las zonas de arcillas se notan más dispersas, esto sugiere que la alteración en este sector es menos intensa probablemente por tratarse de sistemas más someros y de menores dimensiones, mientras que los sistemas pórfido de cobre, como la Mina La Caridad y Los Alisos, son depósitos más profundos y de mayor volumen.

La comparación entre las imágenes para el índice de arcillas (Fig. 40a) y la composición RGB de arcillas-óxido férrico-óxido ferroso (Fig. 40b), sugieren que las zonas de alteración por arcillas están mayormente relacionadas con el óxido férrico, esto se puede ver en la Figura 40b, donde estos sectores se presentan como zonas de color amarillo a naranja débil, lo que indica que hay una correlación fuerte y positiva de las arcillas con el óxido férrico (ver leyenda RGB para esta imagen en la Figura 33). Como un ejemplo, en el área de Los Alisos, Rascón-Heimpel *et al.* (2012) reporta zonas de oxidación que están correlacionadas positivamente con parches de alteración argílica.

En otras áreas como en la Sierra La Púrica, SW de la Mina La Caridad, NW de Los Alisos y El Tigre, entre otras, las arcillas están más correlacionadas con el óxido ferroso, estos sectores se muestran en la Figura 40b como áreas en tonalidades rojas.

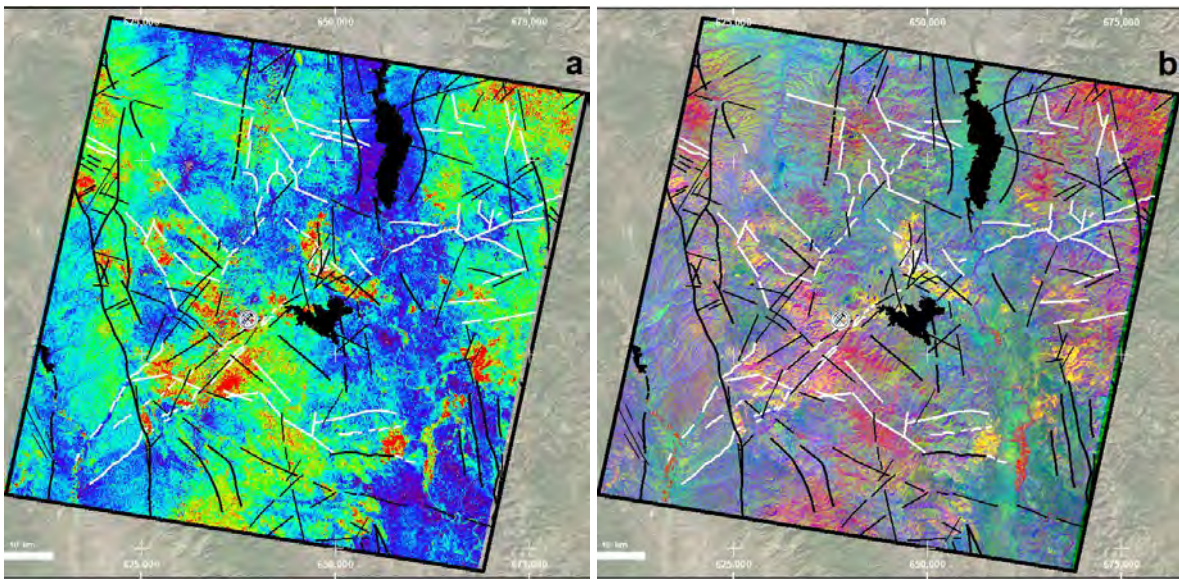
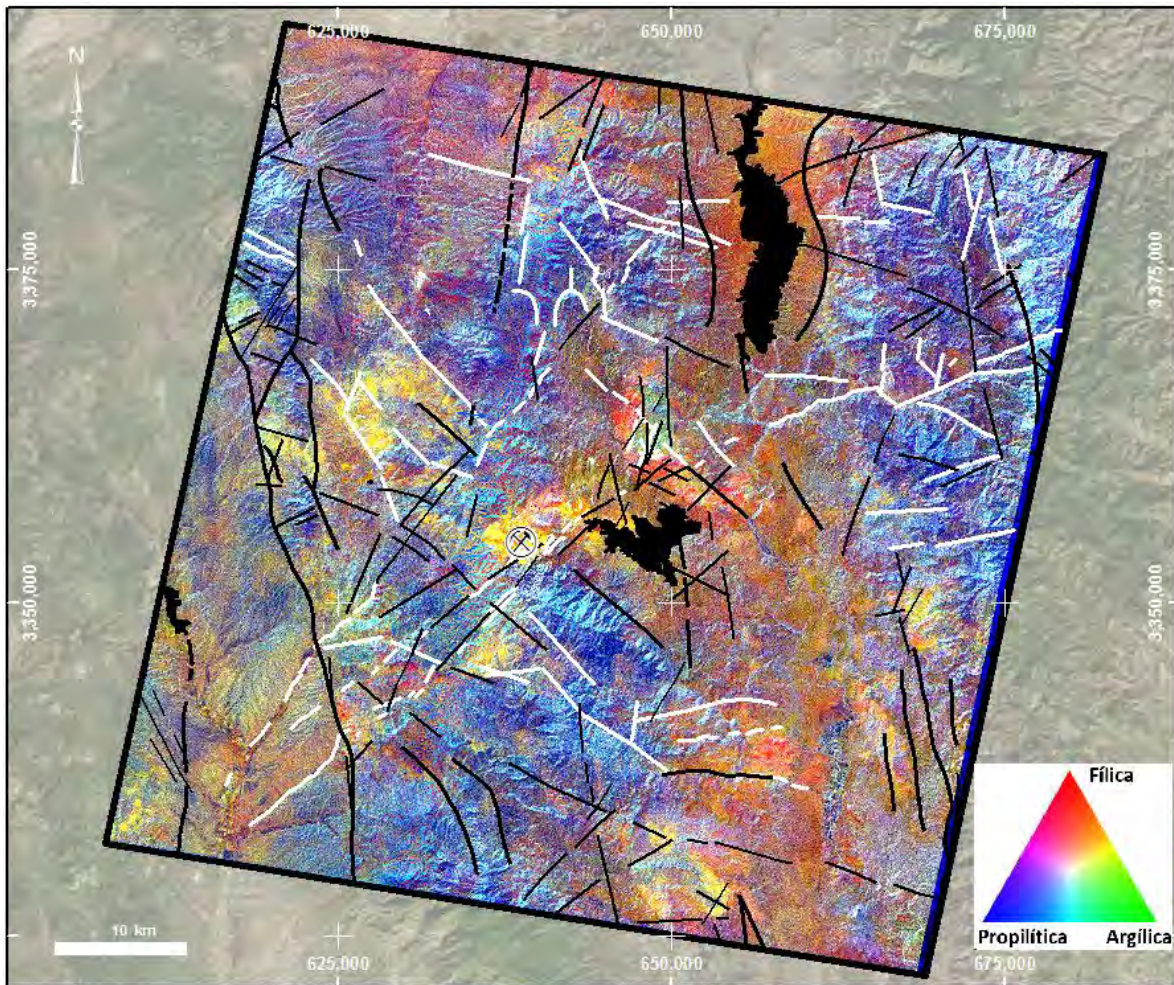


Fig. 40. Imágenes de comparación para las imágenes a) índice de arcillas y b) composición RGB arcillas - óxido férrico - óxido ferroso (ver leyenda para esta imagen en la Figura 33).

### 8.7 Imagen composición RGB alteración filica – argílica – propilítica.

La imagen de composición RGB de la Figura 41 muestra en colores rojizos las zonas de posible alteración filica, en verde denota la posible alteración argílica y en azul la probable alteración propilítica, las posibles combinaciones entre los tres grupos de alteración se indican en los colores de la leyenda triangular de la misma figura. El rasgo más evidente en el área de estudio es la respuesta del sector de Los Alisos, donde se muestra un claro borde de alteración filica con un centro de alteración argílica, esta última pareciera estar limitada por fallas NNW-SSE y otras NNE-SSW sugiriendo la existencia de un horst. Esta distribución de alteraciones sugiere también un nivel de exposición superior en un modelo para pórfido cuprífero (ver Figura 7a).

En el área de la Mina La Caridad, la imagen muestra colores amarillos a naranja, lo cual indica, según la leyenda, proporciones parecidas de alteración filica y argílica, esto podría explicarse ubicando el depósito en partes más intermedias para un pórfido de cobre según el modelo de Seedorff *et al.* (2005) (Fig.7a).

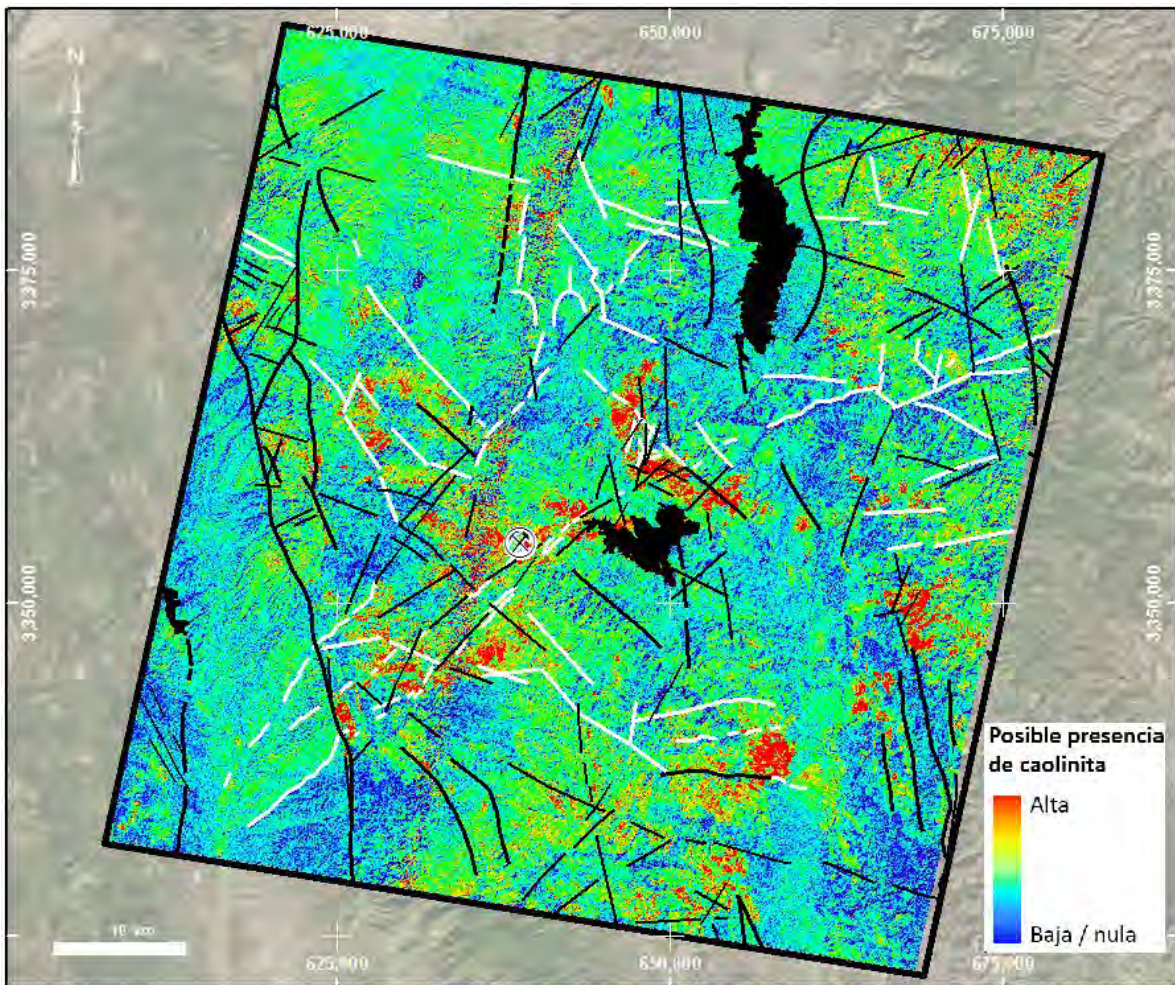


*Fig. 41. Imagen de relación de la composición RGB de alteraciones fílica, argílica y propilítica con las estructuras del SGM y lineamientos interpretados.. Las tonalidades verdosas indican la posible presencia de alteración argílica, la coloración roja es indicador de posible alteración fílica y los colores azules denotan una posible alteración propilítica.*

Como se puede apreciar en la imagen, y basándose en su leyenda, la alteración propilítica se muestra presente en la mayor parte del área de estudio, lo que se le podría atribuir a la presencia de las rocas de la Formación Tarahumara que afloran en el sector, donde es común encontrar este tipo de alteración asociado esta Formación.

## 8.8 Imagen índice de caolinita.

La Figura 42 muestra el resultado del proceso de índice de caolinita, el cual sugiere altas concentraciones (relativas a la cobertura de la escena) en la porción centro y SE del área de estudio, diferenciándose claramente del sector NE (El Tigre), donde la presencia de posible caolinita es menor y más dispersa donde, para este sector, la aparente abundancia de caolinita indicaría una posición relativamente somera en un sistema epidermal (Fig. 7b), sugiriendo al mismo tiempo la naturaleza de baja sulfuración (Fig. 8) de este depósito.



*Fig. 42. Imagen de relación del índice de caolinita con las estructuras del SGM y lineamientos interpretados. La franja de interferencia que cruza la imagen de NNE a SSW es un artefacto de la imagen cruda que provoca falsos positivos.*

La figura muestra también áreas de posible caolinita limitadas, en prácticamente todos los casos, por estructuras o lineamientos de considerables dimensiones, lo que sugiere que se podría tratar de sectores tectónicamente levantados exponiendo estos niveles de alteración.

## 8.9 Imagen índice de alunita.

El índice de alunita (Fig. 43) muestra una menor abundancia relativa de posible alunita, y sólo aparece más concentrada en el área de Los Alisos, en el sector al W de Villa Hidalgo, en una pequeña área al E de la Presa de Jales y en un sector entre la Sierra La Púrica y la presa General Lázaro Cárdenas. Estos sectores tienen prácticamente la misma respuesta positiva por sílice (Fig. 38) lo cual sugiere que posiblemente todos ellos están en un mismo nivel de exposición. El área de El Tigre ofrece una respuesta baja y muy dispersa a alunita lo que resulta coherente con su clasificación como epitermal de baja sulfuración, ya que se conoce que la alunita está más relacionada a depósitos epitermales de alta sulfuración (Fig. 8).

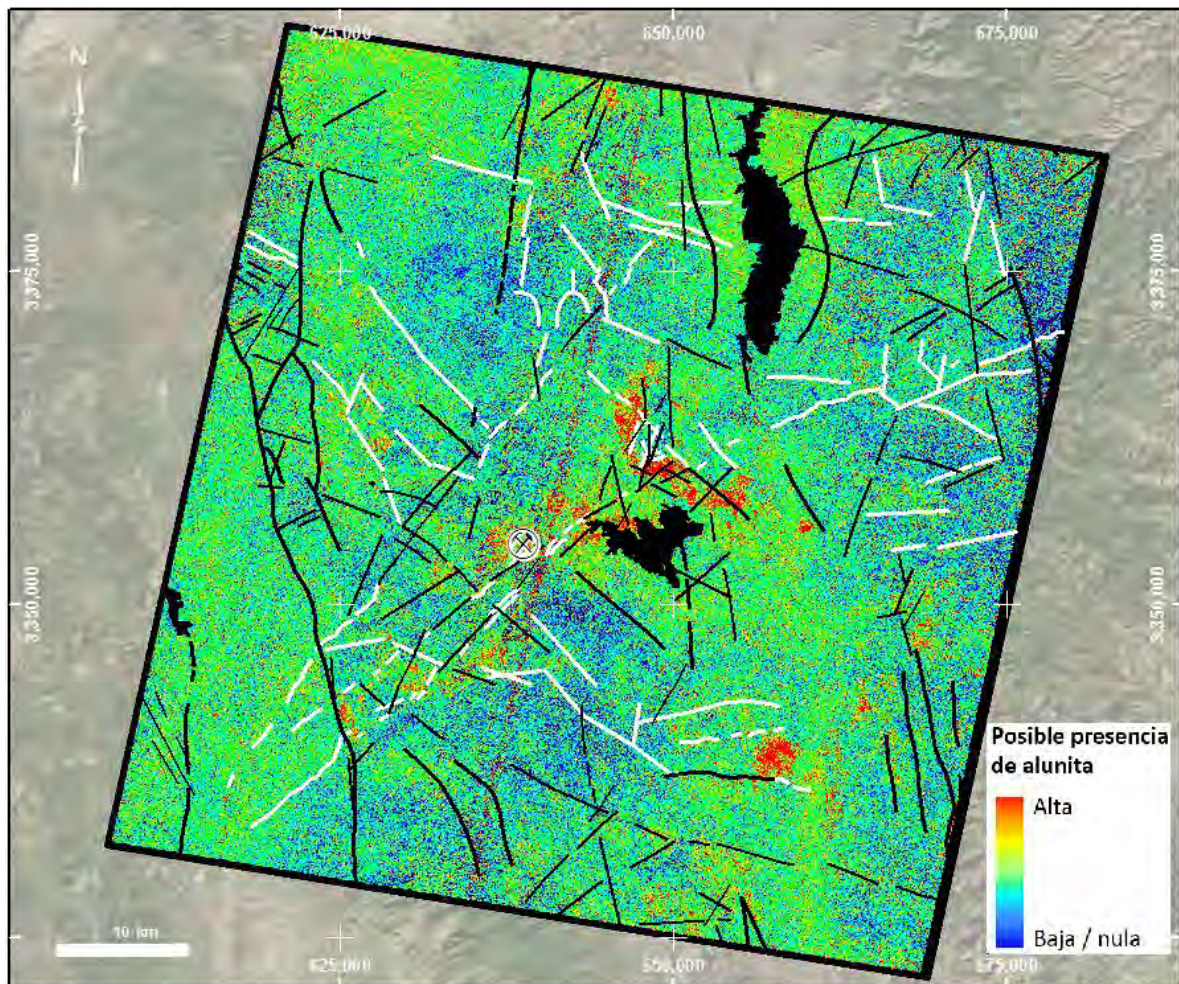


Fig. 43. Imagen de relación del índice de alunita con las estructuras del SGM y lineamientos interpretados. En esta imagen se aprecia también el artefacto de "ruido" espectral alineado NNE-SSW.

## 8.10 Imagen índice de calcita

La imagen procesada para determinar la posible presencia de calcita muestra grandes extensiones con respuesta positiva en el área de interés para este mineral, los datos sugieren que esto podría deberse a la extensa presencia de alteración propilítica, y en parte, a la posible presencia de parches de caliche, evidentes en el sector W de la presa Gral. Lázaro Cárdenas.

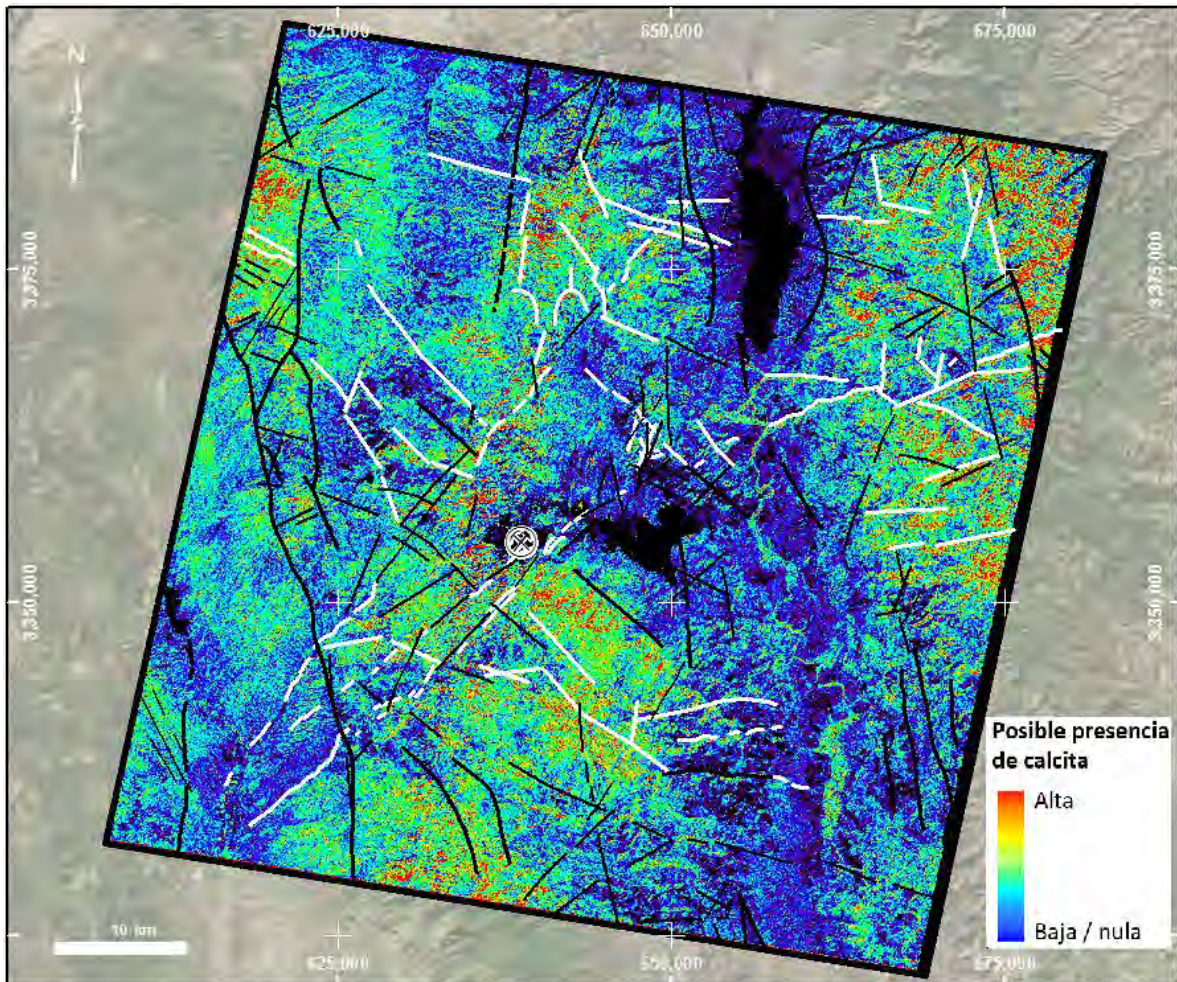


Fig. 44. Imagen de relación del índice de calcita con las estructuras del SGM y lineamientos interpretados. En rojo se muestran las relativas altas concentraciones para este mineral.

También es importante reconocer que la calcita es un mineral característico de sistemas epitermales de baja sulfuración (Figura 8) por lo que la presencia de calcita en el límite NE



del área de estudio podría estar relacionada a este tipo de depósitos. El SGM no reporta roca caliza o unidades calcáreas en el área de estudio (Fig. 15) por lo que la respuesta positiva por calcita en la Figura 44 no se le atribuye específicamente a la litología del área.

Una característica evidente en esta imagen de la Figura 44 es que la respuesta positiva al índice de calcita está limitada, en los más de los casos, por lineamientos o estructuras.

## Capítulo 9 Conclusiones

De los resultados de los diferentes procesos y de la discusión de los mismos se llega a las siguientes conclusiones:

1. Como se ha podido demostrar en la discusión, los sensores satelitales multiespectrales son una herramienta de extrema utilidad en la exploración de yacimientos minerales, sobre todo en áreas extensas (como es el caso del distrito minero de Nacozari), logrando definir zonas de mayor interés geológico y posiblemente también económico.
2. La metodología también demuestra su utilidad para descartar zonas en áreas extensas, permitiendo enfocar la exploración a blancos más concretos y directos.
3. Este trabajo demuestra también el beneficio del análisis automatizado de lineamientos como un complemento importante para la interpretación y definición de zonas de interés, correlacionándolo con los resultados de los análisis espectrales y apoyándose en datos existentes, esta metodología ayuda a mejorar de una manera notable la información disponible.
4. La composición RGB para las alteraciones filica- argílica-propilítica, derivada del análisis espectral, resultó de gran relevancia ya que permitió obtener información clara y evidente de las diferentes zonas de alteración en el área de estudio, consiguiéndose con ello interpretar posibles niveles de exposición de las diferentes áreas de interés localizadas.
5. El resultado del análisis de lineamientos, combinado con las imágenes de grupos de alteraciones, alunita, caolinita, calcita y sílice, concluye que en la gran mayoría de los

casos existe una clara relación espacial entre los lineamientos o estructuras con las zonas de alteración en el área de estudio.

6. En la imagen de composición RGB para alteraciones filica-argílica-propilítica y así como en la de arcilla-óxido férrico-óxido ferroso, se presentan zonas de igual respuesta en diferentes sectores dentro de una franja que corren en dirección NW-SE desde Villa Hidalgo hasta la Sierra La Púrica, en toda esta franja resultaron zonas con anomalías positivas de posible caolinita, posible alunita y posible sílice, así como una respuesta proporcionada de alteración filica + argílica, lo que lleva a concluir que todos estos sectores dentro de esta franja tienen el mismo nivel de exposición.
  
7. Por último, el análisis espectral por medio de imágenes de satélite para determinar zonas de alteración, en conjunto con la extracción automatizada de lineamientos usando imágenes y modelos de relieve, muestra diferentes niveles de exhumación en el Distrito de Nacozari, donde se puede observar evidencia de zonas más profundas expuestas, como en el sector SW del área de estudio, zonas relativamente más superiores, como en el centro y NE del área y zonas relativamente someras (relacionadas a la provincia de epitermales de baja sulfuración), lo cual ayuda comprender de una mejor manera el sistema de alteración – mineralización en el Distrito y con ello verlo con un nuevo enfoque y perspectiva.

## **Agradecimientos**

Un agradecimiento muy especial al Dr. Lucas Ochoa Landin, por compartir siempre su conocimiento sin ningún interés, por sus invaluable aportaciones a este trabajo, por su ayuda y guía en los trabajos de campo, por concederme el privilegio de tenerlo como guía y Director, pero más, mucho más por ser mi amigo.

Al Dr. Rafael del Río Salas, “*Le Rafê*”, por su empuje e insistencia, por sus consejos y correcciones, ¡por hacerme entender el  $\text{Fe}^{+3}$ !, por dejarme ser su amigo antes que colega.

Al M.C. Mario Arturo Rascón Heimpel, por sus comentarios y críticas para mejorar la discusión y entendimiento en el área de Los Alisos, Sur de Florida-Barrigón así como ciertos aspectos del tema estructural en el área de estudio, pero por sobre todo, un sincero agradecimiento por su indiscutible amistad y soporte.

Al Dr. Thierry Calmus, por sus comentarios que me ayudaron a entender mucho de la parte estructural (entre otras cosas), por darme la oportunidad de formar parte de su grupo de amigos, *Merci Monsieur*.

Al Dr. Martín Valencia, por ceder su conocimiento en los sistemas pórfidos de cobre, por sus comentarios para entender muchas de las referencias, por ser un amigo con el que se puede contar siempre.

Al Dr. Inocente Gpe. Espinoza y al M.C. Ismael Minjarez, por haber aceptado fungir como parte de los sinodales y por sus atinadas sugerencias para mejorar el escrito.

A la empresa minera mexicana Grupo México, por permitirme el uso del espectrómetro portátil OreXpress y de sus oficinas en Hermosillo para la lectura de las muestras de campo, así como por los permisos de acceso a la Mina La Caridad y su amable hospedaje en el Globo, Nacozari. A la compañía mexicana Geo Digital Imaging de México, SA de CV por el financiamiento económico y por la cesión de tiempo para la elaboración de esta tesis.

Al Ing. Oscar Jiménez, “*Jefazo*”, al Ing. Luis Arturo Navarro y a la compañía Argonaut Gold, por su comprensión, tiempo y apoyo para permitirme finalizar este trabajo.

A Javier Alberto Espinoza, por su apoyo en la transcripción y dibujo de algunas figuras importantes en este trabajo. A Cristal Palafox, por su desinteresada ayuda en las lecturas de *OreXpress* de la mayoría de las muestras. A Jairo Treviño, por su apoyo en el muestreo de campo.

A Don Julio César Palomino Moreno, por haberme empujado al mundo de las imágenes de satélite, por haber sido mi mentor, mi socio y mi amigo, gracias.

A todos los que de una u otra manera me ayudaron, apoyaron y animaron a empezar, continuar y terminar el trabajo de tesis, son muchos para mencionarlos a todos, pero saben que les agradezco de verdad, espero haberles cumplido.

Pero especialmente le agradezco a Lizette, Ana Paula, José Miguel, Juan Pablo y Jesús Héctor por haberme tenido tanta paciencia y sobre todo la comprensión por no haber podido estar con ustedes muchas veces.

## Referencias bibliográficas

*Alfultis, M.*, 2003. Scientific Background for Studying Polar Sea Ice Processes, [http://www.ccpo.odu.edu/SEES/polar/pi\\_class.htm](http://www.ccpo.odu.edu/SEES/polar/pi_class.htm)

*Arozarena Villar, A.*, “Teledetección y sistemas de tratamiento digital de imágenes” ([ocw.upm.es/ingenieria-cartografica-geodesica-y-fotogrametria/topografia-cartografia-y-geodesia/contenidos/tema\\_11\\_fotogrametria\\_y\\_teledeteccion/Teledeteccion/microsoft-word-teledeteccion\\_y\\_sist\\_tratamiento\\_digital\\_imagenes.pdf](http://ocw.upm.es/ingenieria-cartografica-geodesica-y-fotogrametria/topografia-cartografia-y-geodesia/contenidos/tema_11_fotogrametria_y_teledeteccion/Teledeteccion/microsoft-word-teledeteccion_y_sist_tratamiento_digital_imagenes.pdf)).

*Bejarano, C. R.*, 2017. Geología, mineralización y alteración del sistema transicional pórfido de cobre - epitermal de alta sulfuración de Cu-Au La Caridad Vieja, Distrito Minero de Nacozari, municipio de Nacozari, Sonora, México. Tesis de Maestría, Universidad de Sonora. Departamento de Geología.

*Paez, C.*, 2013. Geocronología y caracterización geoquímica del sistema epitermal de alta sulfuración de Au: La India, Distrito Minero de Mulatos, Sahuaripa Sonora, México”, Tesis de Maestría, Universidad de Sonora, Departamento de Geología.

*Buchanan, L.J.*, 1981. Precious Metal Deposit associated with Volcanic Environments in the Southwest, in Dickinson, W.R. and Payne, W.D. (eds.), Relations of Tectonics to Ore Deposits in the Southern Cordillera; Arizona Geological Society Digest, Volume XIV, p. 237-262.

*Calmus, T., Bernet, M., Lugo-Zazueta, R., Hardwick, E., Mendivil-Quijada, H.*, 2015. Apatite fission track thermochronology of Laramide plutonic rocks in northwestern Mexico: Basin and Range extension versus Gulf of California rifting imprints, *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, v. 32, 3, 529-541.

*Camprubí, A., González-Partida, E., Jordi Tritlla, G. L. y Carrillo-Chávez, A.*, 2003, Depósitos epitermales de alta y baja sulfuración: una tabla comparativa. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, Tomo LVI, Núm. 1, 2003, P. 10-18

*Clark, R., 1999. Spectroscopy of Rocks and Minerals, and Principles of Spectroscopy, Derived from Chapter 1 in: Manual of Remote Sensing, John Wiley and Sons, Inc A. Rencz, Editor New York 1999.*

*Del Rio Salas, R., Ochoa-Landín, L., Ruiz, J., Eastoe, C., Meza-Figueroa, D., Zuñiga-Hernández, H., Mendivil-Quijada, H. & Quintanar-Ruiz, F., 2013. Geology, stable isotope, and U-Pb geochronology of the Mariquita porphyry copper and Lucy Cu-Mo deposits, Cananea District, Mexico: A contribution to regional exploration. Journal of Geochemical Exploration, vol. 124, pp.*

*Dennis P. Cox and Donald A. Singer, 1992. Mineral deposit models, U.S. Geological Survey Bulletin 1693.*

*Ducart, D. F., Crósta, A. P., de Souza-Filho, C. R., 2005. Discriminación de minerales de alteración hidrotermal mediante la clasificación espectral de imágenes ASTER: Los Menucos, Río Negro. Conference: XVI Congreso Geológico Argentino - Simposio Internacional Avances de la Teledetección en Geología, At La Plata, Argentina.*

*González, O., 2008. Características principales de los depósitos epitermales en el noroeste de México, un análisis y comparación. Tesis de Maestría, Universidad de Sonora, Departamento de Geología.*

*Groves, D. I., Goldfarb, R. J., Gebre-Mariam, M., Hagemann, S. G., 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), 7-27.*

*Johnson, B., 2014, Effects of Pansharpening on Vegetation Indices, ISPRS International Journal of Geo-Information, ISSN 2220-9964, [www.mdpi.com/journal/ijgi/](http://www.mdpi.com/journal/ijgi/), 2014*

*Keith, S.B., Swan, M.M., 1996.* The great Laramide porphyry copper cluster of Arizona, Sonora, and New Mexico: the tectonic setting, petrology and genesis of the world class metal cluster. In: Coyner, A.R., Fahey, P.L. (Eds.), *Geology and ore Deposits of the American Cordillera: Geological Society of Nevada Symposium Proceedings*, Reno- Sparks, Nevada, pp. 1667–1747.

*Kobayashi, C., Orihashi, Y., Hiarata D., Naranjo, J. A., Kobayashi, M., Anma, R., 2010.* Compositional variations revealed by ASTER image analysis of the Viedma Volcano, southern Andes Volcanic Zone. *Andean Geology (formerly Revista Geológica de Chile)* 37 (2): 433-441. July, 2010.

*Lowell, J.D., Gilbert, J.M., 1970.* Lateral and vertical Alteration Mineralization Zoning in Porphyry Ore Deposits: *Economic Geology*, 65, 373-408.

*Mars, J.C. and Rowan, L.C., 2006.* Regional mapping of phyllic- and argillic-altered rocks in the Zagros magmatic arc, Iran, using Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER) data and logical operator algorithms: *Geosphere*, 2, 161-186. doi: 10.1130/GES00044.1.

*Mendivil-Quijada, H., 2012.* Uso de imágenes satelitales aplicadas a la exploración por yacimientos minerales. *Revista GEOMIMET.*, XXXIX Época, Septiembre/Octubre 2012, No. 299, ISSN 0185-1314.

*Ochoa-Landín, L., Pérez-Segura, E., Del Río-Salas, R. y Valencia-Moreno, M., 2011.* Depósitos minerales de Sonora, México, in Calmus, Thierry, ed., *Panorama de la geología de Sonora, México: Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geología*, Boletín 118, cap. 9, p. 299–331, 6 figs., 5 tablas.

*Ochoa-Landín L., Del Río-Salas, R., Espinoza-Maldonado, I., Vega, H., 2014.* Mineralizaciones de Hierro del Depósito El Volcán, Sonora, México, macla nº 19, *Revista de la Sociedad Española de Mineralogía*.



*Ochoa-Landín, L., Valencia-Moreno, M., Calmus, T., Del Rio-Salas, R., Mendivil-Quijada, H., Meza-Figueroa, D., Flores-Vasquez, I., Zúñiga-Hernández, L.G., 2017. Geology and geochemistry of the Suaqui Verde deposit: A contribution to the knowledge of the Laramide porphyry copper mineralization in south-central Sonora, Mexico. Ore Geology Reviews 81, 1158–1171.*

*Pour, A. B., Hashim, M., 2012. The application of ASTER remote sensing data to porphyry copper and epithermal gold deposits. Ore Geology Reviews*

*Rascón-Heimpel, M., Valencia-Moreno, M., Ochoa-Landín, L. y Calmus, T., 2012, Geología y geoquímica del pórfido cuprífero Los Alisos, distrito minero de La Caridad, Sonora, México. Revista Mexicana de Ciencias Geológicas, v. 29, núm. 2, 2012, p. 355-383.*

*Rowan, Lawrence C., Hook, Simon J. and Abrams, Michael J., 2003. Mapping Hydrothermally Altered Rocks at Cuprite, Nevada, using the Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER), a New Satellite-Imaging System, Economic Geology August 1, 2003 vol. 98 no. 5 1019-1027*

*Sabins, F., 2007, Remote Sensing, Principles and Interpretation, Waveland Press, Inc., ISBN 1-57766-507-4, P. 366.*

*Seedorff, E., Dilles, J. H., Proffett, Jr., J. M., Einaudi, M., Zurcher, L., Stavast, W. J. A., Johnson, D. A. and Barton, M. D., 2005. Porphyry Deposits: Characteristics and Origin of Hypogene Features, in Economic Geology 100<sup>th</sup> Anniversary Volume, pp. 251-298.*

*Servicio Geológico Mexicano, 1998. Carta Geológico-Minera escala 1:250,000 Nacozari H12-6.*

*Servicio Geológico Mexicano, 1999. Carta Geológico-Minera escala 1:50,000 El Abanico H12-75.*

*Sillitoe, R.H., 1993*, Epithermal models: genetic types, geometrical controls and shallow features, in Kirkham, R.V., Sinclair, W.D., Thorpe, R.I., Duke, J.M. (eds.), *Mineral Deposit Modeling*: Toronto, Geological Association of Canada, Special Paper, 40, 403- 417.

*Sillitoe, R.H., 2003*, Iron Oxide-Copper Gold deposits: an Andean view. *Mineralium Deposita*, 38, 787-812.

*Swayze, G.A., Smith, K.S., Clark, R.N., Sutley, S.J., Pearson, R.M., Vance, J.S., Hageman, P.L., Briggs, P.H., Meier, A.L., Singleton, M.J., and Roth, S., 2000*, Using imaging spectroscopy to map acidic mine waste, *Environmental Science and Technology*, 34, p. 47-54.

*Tangestani, M.H., Hosseinjani, M., 2008*. Spectral Angle Mapping and Linear Spectral Unmixing of the ASTER data for alteration mapping at Sarduiyeh area, SE Kerman, Iran. MWF09 PN-164.

*Titley, S.R. 1982a*. The style and progress of mineralization and alteration in porphyry copper systems: American Southwest. In: S.R. Titley (Ed.), *Advances in Geology of the Porphyry Copper Deposits, Southwestern North America*, Univ. of Arizona Press, Tucson, Arizona (1982), pp. 93–116

*Titley, S.R., 1982b*. Geologic setting of porphyry copper deposits, Southeastern Arizona. In: Titley, S.R. (Ed.), *Advances in the Geology of the Porphyry Copper Deposits in the Southwestern North America*. University of Arizona Press, Tucson Arizona, pp. 37–58.

*Valencia, V.A., Eastoe, C., Ruiz, J., Ochoa-Landín, L., Gehrels, G., Barra, F., Gonzalez-Leon, C., 2008*. Evolution and transition of an ore-bearing hydrothermal fluid from a porphyry copper to high-sulfidation epithermal deposit at La Caridad, Sonora, Mexico. *Econ. Geol.* 103, 473–491.

*Valencia-Moreno, M., Ochoa-Landín, L., Noguez-Alcántara, B., Ruiz, J., Pérez-Segura, E., 2006. Características metalogenéticas de los depósitos de tipo pórfido cuprífero en México y su situación en el contexto mundial. Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana, Volumen Conmemorativo del Centenario, Revisión de algunas tipologías de depósitos minerales en México, Tomo LVIII, Núm. 1, 2006, P. 1-26*