



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE  
MÉXICO**

---

---

**FACULTAD DE INGENIERÍA**

**DIVISIÓN DE INGENIERÍA EN CIENCIAS DE LA TIERRA**

**IDENTIFICACIÓN DE LINEAMIENTOS Y MINERALES  
ASOCIADOS A ALTERACIONES HIDROTERMALES EN LA  
BAHÍA DE LA PAZ, BAJA CALIFORNIA SUR, MÉXICO,  
MEDIANTE IMÁGENES SATELITALES LANDSAT ETM**

**TESIS**

**QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:**

**INGENIERA GEOFÍSICA**

**PRESENTA:**

**BEATRIZ VALDÉS MORENO**

**DIRECCIÓN DE TESIS:**

**DRA. ROSA MARÍA PROL LEDESMA**



**MÉXICO, D.F. FEBRERO 2015**



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

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

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

# AGRADECIMIENTOS

El desarrollo de este trabajo fue posible gracias al apoyo otorgado por el proyecto CeMIE-Geo P-01 "Mapas de Gradiente Geotérmico y Flujo de Calor para la República Mexicana" que incluyó una beca para realizar esta tesis de licenciatura.

De manera muy especial le agradezco a la Dra. Rosa María Prol Ledesma por la dirección invaluable y acertada a lo largo del desarrollo de este trabajo.

¡Gracias doctora!

Le agradezco a Juan Ramón Ruíz y a Alejandra Membrillo por su paciencia, enseñanzas y el tiempo dedicado.

A mis sinodales:

Dr. Osvaldo Sánchez Zamora.

Dra. Claudia Arango Galván.

Ing. Francisco Alejandro Arroyo Carrasco.

Ing. Juan Sánchez Pérez.

Por sus valiosos comentarios, sugerencias y correcciones que ayudaron a mejorar de manera significativa éste trabajo.

Le agradezco especialmente a mi mamá Margarita, por apoyarme en todo momento. A mis hermanos Eduardo y Jorge y a mi papá José. ¡Gracias a todos!

A mis compañeros de la Facultad, gracias por todos los momentos juntos y las experiencias vividas.



UNIVERSIDAD NACIONAL  
AUTÓNOMA DE  
MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA  
DIVISIÓN DE INGENIERÍA EN  
CIENCIAS DE LA TIERRA  
OFICIO/FING/DICT/1248/2014

SRITA. BEATRIZ VALDÉS MORENO  
Presenta

En atención a su solicitud, me es grato hacer de su conocimiento que la opción de titulación POR TESIS, así como el tema y contenido propuestos por la Dra. Rosa Ma. Prol Ledesma, en calidad de Director de Tesis, han sido aprobados por el comité de titulación de la carrera de Ingeniería Geofísica y se muestran a continuación

IDENTIFICACION DE LINEAMIENTOS Y MINERALES ASOCIADOS A ALTERACIONES HIDROTHERMALES EN LA BAHÍA DE LA PAZ, BAJA CALIFORNIA SUR, MÉXICO, MEDIANTE IMÁGENES SATELITALES LANDSAT ETM

- I INTRODUCCIÓN
- II FUNDAMENTOS
- III GEOLOGÍA DE LA ZONA
- IV METODOLOGÍA
- V RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS
- VI DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES
- VII BIBLIOGRAFÍA

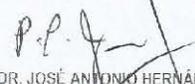
Por otra parte, le comunico que le ha sido asignado el siguiente jurado que tendrá como función básica, avalar su trabajo escrito y autorizar la replica oral requerida para la obtención del título profesional, de acuerdo al Reglamento de Opciones de Titulación vigente.

PRESIDENTE: DR. OSVALDO SÁNCHEZ ZAMORA  
VOCAL: DRA. ROSA MA. PROL LEDESMA  
SECRETARIO: DRA. CLAUDIA ARANGO GALVÁN  
1ER. SUPLENTE: ING. FRANCISCO A. ARROYO CARRASCO  
2DO. SUPLENTE: ING. JUAN SÁNCHEZ PÉREZ

Ruego a usted cumplir con la disposición de la Dirección General de Administración Escolar, en el sentido que se imprima en lugar visible de cada ejemplar del trabajo escrito, el título de este.

Asimismo, le recuerdo que para optar por el título profesional, es necesario haber acreditado el 100% de los créditos establecidos en el plan de estudios, haber realizado el Servicio Social de acuerdo con la Legislación Universitaria y haber aprobado el examen de comprensión de lectura de un idioma extranjero, en términos de lo dispuesto por el Consejo Técnico.

Atentamente  
"POR MI RAZA HABLARÁ EL ESPÍRITU"  
CD. Universitaria, D. F. a 7 de Noviembre de 2014  
El Presidente del Comité de Titulación de Ingeniería Geofísica

  
DR. JOSÉ ANTONIO HERNÁNDEZ ESPRIÚ

ccp Coordinador de la Carrera  
ccp Interesado



# ÍNDICE

<b>RESUMEN .....</b>	<b>6</b>
<b>1.INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>7</b>
1.1 Antecedentes .....	7
1.2 Definición del problema .....	8
1.3 Justificación.....	9
1.4 Objetivos.....	9
<b>2. FUNDAMENTOS .....</b>	<b>10</b>
2.1 Percepción remota .....	10
2.1.1 Definición .....	10
2.1.2 Espectro electromagnético .....	12
2.1.3 Leyes de la radiación .....	13
2.1.4 Interacciones con la atmósfera .....	14
2.1.5 Interacciones con la superficie.....	15
2.1.6 Adquisición de los datos .....	16
2.1.7 Firmas espectrales.....	22
2.1.8 Pre procesamiento de imágenes satelitales .....	23
2.2 Sistemas Hidrotermales.....	26
2.2.1 Sistemas hidrotermales activos.....	26
2.2.2 Características utilizadas para la identificación de sistemas hidrotermales mediante percepción remota.....	29
<b>3. GEOLOGÍA DE LA ZONA .....</b>	<b>36</b>
3.1 Zona de estudio.....	36
3.2 Marco tectónico .....	36
3.3 Litología .....	38
3.4 Potencial geotérmico.....	39
<b>4. METODOLOGÍA.....</b>	<b>40</b>
4.1 Realce espacial .....	40
4.2 Pre procesamiento de las imágenes satelitales .....	40
4.3 Realce espectral .....	41
4.3.1 Cocientes de bandas.....	42

4.3.2 Análisis de componentes principales .....	43
4.3.3 Análisis de componentes principales dirigidas .....	44
4.3.4 Composiciones RGB.....	45
4.4 Integración de la información .....	46
<b>5. RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS .....</b>	<b>47</b>
5.1.Resultados.....	47
5.1.1 Mapas de lineamientos.....	47
5.1.2 Mapas de alteraciones hidrotermales .....	52
5.1.3 Mapas integrados.....	67
5.2 Análisis de resultados .....	71
<b>6. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES .....</b>	<b>73</b>
6.1.Discusión.....	73
6.2.Conclusiones .....	75
<b>7. BIBLIOGRAFÍA.....</b>	<b>76</b>

## **RESUMEN**

En el presente trabajo se utilizaron imágenes del satélite Landsat 7 (sensor ETM+) de la bahía de La Paz, Baja California Sur, del día 26 de octubre del 2001, con el objetivo de identificar zonas que presentan alteraciones hidrotermales, empleando diferentes técnicas para el realce espectral como: cocientes de bandas, análisis de componentes principales, la técnica de Crosta y el método de Loughlin (Crosta y Moore 1989; Loughlin 1991). También se utilizó un modelo digital de elevación (MDE) realizando una iluminación artificial en diferentes direcciones para identificar lineamientos. Posteriormente se integró la información de lineamientos y alteraciones hidrotermales y se relacionaron con la información geológica que brinda el Servicio Geológico Mexicano, lo que permitió proponer al menos dos zonas, que cumplen con ambas características estructurales y geoquímicas para posteriormente realizar en ella estudios geológicos, geofísicos y geoquímicos a detalle, con el fin de determinar la presencia de anomalías geotérmicas.

## **ABSTRACT**

In this thesis were used Landsat 7 satellite images (ETM + sensor) from La Paz bay, Baja California Sur, taken on October 26<sup>th</sup>, 2001, with the objective to identify areas with hydrothermal alteration, through the use of different spectral enhancement techniques as band ratios, principal component analysis, Crosta technique and Loughlin method (Crosta and Moore 1989; Loughlin 1991). Furthermore, it was employed a digital elevation model (DEM) performing artificial lighting in different directions to identify guidelines. Subsequently information guidelines and hydrothermal alteration were integrated and related to the geological information provided by the Mexican Geological Survey, which allowed to propose at least two areas that fulfill both geochemical and structural characteristics to perform subsequent detail geological, geophysical and geochemical studies, in order to determine the presence of geothermal anomalies.

# 1. INTRODUCCIÓN

## 1.1 Antecedentes.

La percepción remota es una herramienta de exploración terrestre donde se adquieren, procesan e interpretan imágenes y datos obtenidos a partir de fotografías aéreas e imágenes de satélites para diferentes fines. Las imágenes satelitales son utilizadas en la exploración geotérmica para: 1) Identificar y localizar fallas y fracturas que pueden ayudar a localizar los sistemas hidrotermales y 2) Reconocer rocas alteradas hidrotermalmente usando sus firmas espectrales (Sabins, 1999).

El uso de imágenes satelitales en la exploración de sistemas hidrotermales ha tenido un gran éxito, porque se pueden delimitar zonas que presentan las características estructurales y la ocurrencia de alteraciones hidrotermales, las cuales pueden indicar la presencia de sistemas geotérmicos (Ruiz-Armenta y Prol-Ledesma, 1995).

El método propuesto por Moore y Waltz (1983) para realzar los rasgos espaciales y facilitar la identificación de fallas y fracturas, consiste en un procedimiento para la extracción de bordes y segmentos de línea por medio de una convolución digital de cinco pasos.

Loughlin (1991) realizó un análisis de componentes principales para el mapeo de alteraciones, en el cual emplea la técnica de Crosta que utiliza un análisis de componentes principales dirigidas para el realce espectral de hidroxilos y óxidos de hierro.

Otro ejemplo más reciente de la aplicación de percepción remota en la identificación de zonas con actividad hidrotermal fósil lo reporta Pour *et al.* (2011) quien utiliza imágenes ASTER (*Advanced Spaceborne Thermal Emissions and Reflection radiometer*) para discriminar las zonas de alteración hidrotermal y la identificación de un alto potencial de unidades litológicas mineralizadas en pórfidos de cobre en el Cinturón Volcánico Central Iraní, en el cual muestra las técnicas para distinguir zonas de alteración hidrotermal específicas como las zonas argílica, filica y propilítica.

Actualmente se han desarrollado diversas técnicas que tienen como objetivo mejorar los métodos de clasificación para la agrupación de los píxeles, uno de ellos es la aplicación de redes neuronales (Villman *et al.*, 2003).

## 1.2 Definición del problema.

Debido a la actividad volcánica y tectónica reciente en toda la región donde se encuentra la zona de estudio, es probable encontrar ambientes hidrotermales activos y fósiles. Con esto se plantea la idea que en la zona se pueden encontrar anomalías térmicas además de sistemas hidrotermales fósiles.

Los trabajos realizados por Prol-Ledesma *et al.*, (2010) han generado información acerca de las manifestaciones geotérmicas en esta zona, lo cual indica un ambiente hidrotermal activo.

La exploración por medio de imágenes satelitales Landsat ETM en la región permitirá delimitar zonas cuyas características geológicas y geoquímicas presenten potencial geotérmico.

El área de investigación está delimitada por las coordenadas UTM extremas 528072,9 mE, 2694018,6 mN; 587339,6 mE, 2694018 mN; 587339,6 mE, 2642583,5 mN y 528072,9 mE, 2642583,5 mN (Fig. 1.1). Esta zona se encuentra en la parte sur de la península de Baja California.

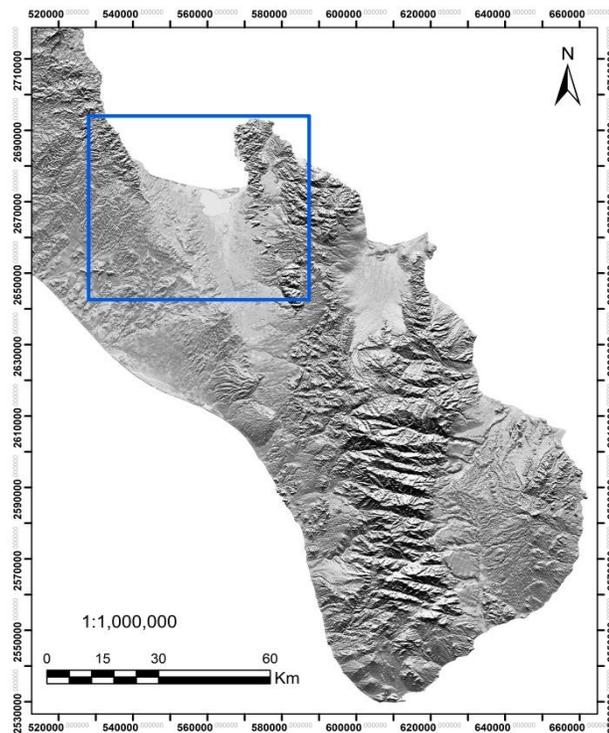


Fig. 1.1. Mapa que incluye la zona de la bahía de La Paz. El recuadro azul delimita la zona de estudio.

### **1.3 Justificación.**

El uso de imágenes satelitales para la exploración geotérmica ha cobrado gran importancia recientemente, pues permite una exploración de bajo costo en áreas extensas y de difícil acceso, delimitando la exploración terrestre a zonas específicas que cumplan con las características superficiales geológicas y geoquímicas relevantes para la identificación de zonas geotérmicas.

Gran parte de la vida económica, cultural y social de la capital del estado de Baja California Sur está ligada a la bahía de La Paz, es por ello que su estudio es necesario para aprovechar y preservar los recursos que posee (Álvarez *et al.*, 1997). Hasta ahora, el sector minero había sido una de las bases económicas para la entidad pero los recursos geotérmicos pueden agregar un nuevo potencial económico.

### **1.4 Objetivos.**

#### **Objetivo general.**

Identificar mediante imágenes satelitales Landsat ETM, alteraciones hidrotermales y lineamientos asociados a actividad hidrotermal en la bahía de La Paz, Baja California Sur, México.

#### **Objetivos particulares.**

- Cartografiar lineamientos superficiales empleando el modelo digital de elevación de la zona de estudio.
- Identificar la presencia de óxidos e hidroxilos asociados a alteraciones hidrotermales.
- Delimitar zonas que presentan las características estructurales y mineralógicas con potencial para encontrar actividad hidrotermal.

## 2. FUNDAMENTOS

### 2. 1 Percepción remota

#### 2.1.1 Definición

El término “Percepción remota” comprende un conjunto de técnicas que utilizan la información acerca de las propiedades de la superficie y los objetos a distancia (Bhattarai, 1983). De manera general se define como la adquisición de datos físicos de un objeto sin tener contacto alguno con él (Lintz y Simonett, 1976). Estas técnicas involucran la obtención de información a partir de la medición de la energía electromagnética que proviene de los objetos distantes, compuestos por diversos materiales y de esta forma se pueden identificar y clasificar los objetos por clase o tipo, materiales que los componen y su distribución espacial. Esto se realiza analizando la radiación electromagnética en una o más regiones del espectro electromagnético, ya sea ésta reflejada, dispersada o emitida desde la superficie de la Tierra (Campbell *et al.*, 2011).

#### Energía electromagnética

Es la energía relacionada con las variaciones de campos electromagnéticos que viaja en forma de una onda armónica. El concepto de onda explica cómo se propaga la energía electromagnética y sólo puede ser detectada cuando interactúa con alguna materia (Sabins, 1996). Debido a su calidad de onda, puede ser descrita en términos de: a) Longitud de onda b) Frecuencia y c) Amplitud (Fig. 2.1).

- a) Longitud de onda ( $\lambda$ ). Es la distancia entre dos puntos en la misma fase de la onda, puede ser medida en cualquier unidad de longitud.
- b) Frecuencia ( $\nu$ ). Es medida como el número de crestas que pasan por un punto fijo en un periodo de tiempo definido. Las unidades de medición son Hertz, el cual equivale a un ciclo por segundo.
- c) Amplitud. Es el equivalente a la intensidad de cada pico, generalmente es medida como niveles de energía, expresada como Watts por metro cuadrado por micrómetro.

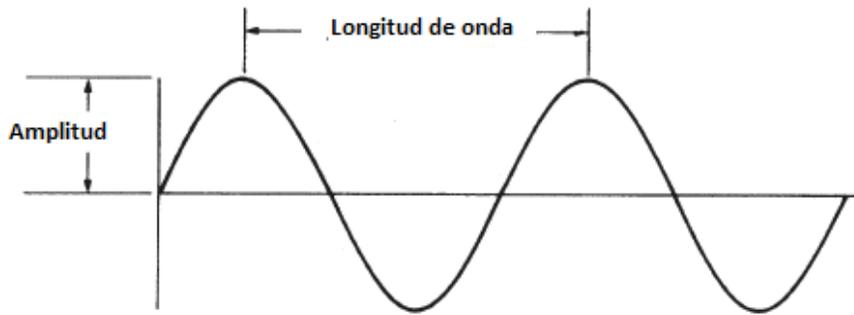


Fig. 2.1. Se muestran las características de longitud de onda y amplitud de las ondas (Campbell *et al.*, 2011).

La energía electromagnética es generada por diversos mecanismos entre los cuales se incluyen los cambios en los niveles de energía de los electrones, la aceleración de las cargas eléctricas, el decaimiento radioactivo de sustancias y el movimiento térmico de los átomos y las moléculas (Campbell *et al.*, 2011).

Las reacciones nucleares dentro del sol producen un espectro de radiación electromagnética, la cual es transmitida a través del espacio sin cambios importantes (Campbell *et al.*, 2011).

La radiación electromagnética consiste en un campo eléctrico (E), que varía en magnitud en una dirección perpendicular a la dirección de propagación. Este campo eléctrico está acoplado a un campo magnético (H) orientado de forma perpendicular al campo eléctrico el cual se propaga en fase con el campo eléctrico (Fig. 2.2).

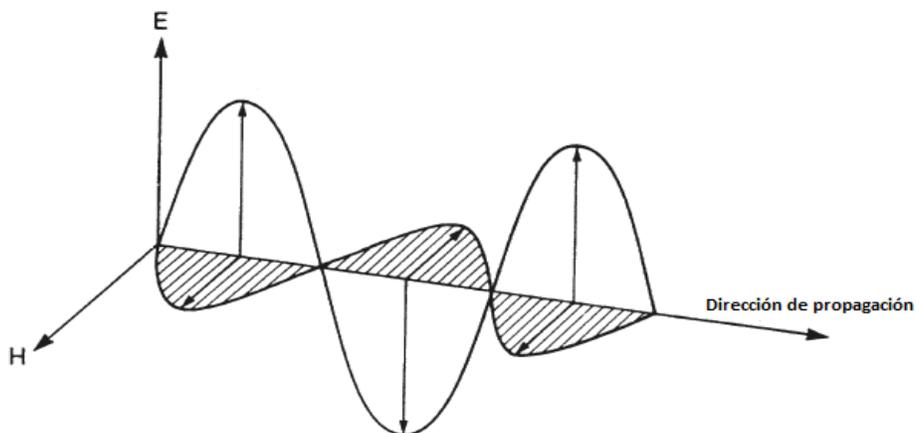


Fig. 2.2. Las componentes del campo eléctrico (E) y el campo magnético (H) de la radiación electromagnética, están orientados perpendicularmente entre si y en ángulo recto con respecto a la dirección de propagación. (Campbell *et al.*, 2011).

Todas las ondas electromagnéticas viajan a la misma velocidad en el vacío ( $c = 299,972$  km/s), ésta es comúnmente mencionada como velocidad de la luz siendo la luz una forma de denominar a la energía electromagnética en la región del espectro electromagnético que corresponde al visible (Sabins, 1996).

La frecuencia y la longitud de onda están relacionadas por la ec. 2.1 y por lo tanto las características de la energía electromagnética pueden ser especificadas en términos de la frecuencia o la longitud de onda.

$$c = \lambda \cdot \nu \quad (\text{ec. 2.1})$$

### 2.1.2 Espectro electromagnético

Es la representación de las ondas electromagnéticas basándose en la frecuencia y la longitud de onda que presentan. Todas las divisiones son establecidas por conveniencia y tradición entre las diferentes disciplinas y se pueden encontrar diferentes definiciones en diversas fuentes de consulta.

Las principales divisiones del espectro electromagnético se muestran en la Tabla 2.1

Tabla 2.1. Principales divisiones del Espectro Electromagnético. En esta tabla se presenta una subdivisión para el caso de la radiación infrarroja.

DIVISIÓN	LONGITUD DE ONDA
<b>Rayos gamma</b>	<0,03 [nm]
<b>Rayos X</b>	0,03-300 [nm]
<b>Radiación ultravioleta</b>	0,30-0,38 [ $\mu\text{m}$ ]
<b>Luz visible</b>	0,38-0,72 [ $\mu\text{m}$ ]
<b>Radiación infrarroja</b>	
<b>Infrarrojo cercano</b>	0,72-1,3 [ $\mu\text{m}$ ]
<b>Infrarrojo medio</b>	1,3-3,0 [ $\mu\text{m}$ ]
<b>Infrarrojo lejano</b>	7,1-1000 [ $\mu\text{m}$ ]
<b>Microondas</b>	1 [mm]-30 [cm]
<b>Radio</b>	>30 [cm]

Dos categorías importantes que no se muestran en la Tabla 2.1 son: 1) El espectro óptico que comprende desde 0,3-15  $\mu\text{m}$ , las cuales son las longitudes de onda que pueden ser reflejadas y refractadas con lentes y espejos y 2) El espectro de reflexión, el cual se extiende desde 0,38-3,0  $\mu\text{m}$  que corresponde a la porción del espectro solar utilizado directamente en percepción remota (Campbell *et al.*, 2011).

La porción visible del espectro electromagnético constituye una parte muy pequeña, sus límites están definidos por la sensibilidad visual de los humanos. Las propiedades ópticas de la radiación visible fueron investigadas por Isaac Newton, quien realizó experimentos entre los años de 1665-1666, los cuales revelaron que la luz visible se puede dividir en tres segmentos. Hoy en día estos segmentos son conocidos en función de los colores primarios aditivos, que se encuentran contenidos en las siguientes categorías: azul (0,4-0,5  $\mu\text{m}$ ), verde (0,5-0,6  $\mu\text{m}$ ) y rojo (0,6-0,7  $\mu\text{m}$ ). Los colores primarios están definidos de forma tal, que no pueden ser formados a partir de ninguna combinación de los otros colores.

### **2.1.3 Leyes de radiación.**

La propagación de la energía electromagnética sigue ciertas leyes físicas. Algunas de ellas son mencionadas a continuación.

- 1) Max Planck descubrió que la energía electromagnética es absorbida y emitida en unidades discretas llamadas cuantos o fotones. El tamaño de cada unidad es directamente proporcional a la frecuencia de la radiación de la energía. Planck definió una constante ( $h$ ) para relacionar la frecuencia ( $\nu$ ) con la energía radiante (ec. 2.2). Este modelo explica el efecto foto eléctrico, la generación de corrientes por la exposición de ciertas sustancias a la luz, como el efecto del impacto de estas unidades discretas de energía (cuantos) sobre la superficie de ciertos metales, causando la emisión de electrones.

$$Q=h\nu\dots\dots\dots (ec. 2.2)$$

- 2) Ley de Kirchhoff establece que el cociente de radiación emitida entre el flujo radiante es la misma para todos los cuerpos negros a la misma temperatura.

Esta ley forma la base para la definición de *Emisividad* ( $\epsilon$ ), definida en la ec. 2.3 como, el cociente entre la emitancia de un objeto cualquiera (M) y la de un cuerpo negro a la misma temperatura ( $M_b$ ):

$$\epsilon = M / M_b \dots \quad (\text{ec. 2.3})$$

La emisividad de un cuerpo negro real sería 1, y la de un reflector perfecto (un cuerpo claro) sería 0. Los cuerpos negros y los cuerpos claros son conceptos hipotéticos, aproximados en los laboratorios bajo condiciones forzadas.

### 2.1.4 Interacciones con la atmósfera.

Toda la radiación usada en los sensores remotos debe pasar a través de la atmósfera de la Tierra y bajo estas condiciones los efectos atmosféricos pueden tener un impacto en la calidad de las imágenes y los datos registrados por el sensor. Es por ello que se requiere del conocimiento de la interacción de la energía electromagnética con la atmósfera (Campbell *et al.*, 2011).

La dispersión es la redirección de la energía electromagnética debido a las partículas suspendidas en la atmósfera o por moléculas de gases atmosféricos. La cantidad de esta dependerá de los tamaños de las partículas, su abundancia, la longitud de onda de la radiación y de la profundidad de la atmósfera a través de la cual la energía se está desplazando (Fig. 2.3).

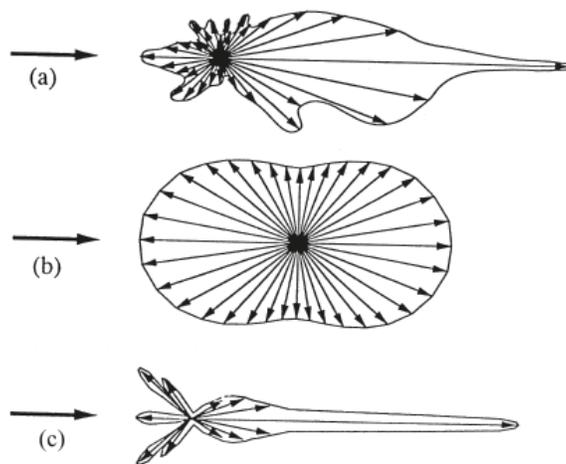


Fig. 2.3. Muestra el comportamiento de la dispersión de tres tipos de partículas atmosféricas: a) Partículas de polvo y humo de forma irregular, estas dispersan la energía formando un pico hacia adelante. b) Moléculas que muestran simetrías parecidas. c) Gotas grandes de agua dispersan la energía formando un pico hacia adelante (Campbell *et al.*, 2011).

Lord J.W.S. Rayleigh a finales de 1890 descubrió una de las formas más común de dispersión. Demostró que, en una atmósfera perfectamente limpia que consiste solo de gases atmosféricos, se provoca la dispersión de la luz de tal forma que la cantidad de dispersión aumenta en gran medida conforme la longitud de onda disminuye.

La dispersión de Rayleigh se produce cuando las partículas atmosféricas tienen diámetros muy pequeños en relación con la longitud de onda de la radiación, es por ello que esta dispersión es dependiente de la longitud de onda, lo cual implica que la dispersión será diferente en cada uno de las regiones del espectro electromagnético (Campbell *et al.*, 2011). La dispersión Mie es causada por partículas atmosféricas de mayor tamaño, las cuales incluyen polvo, polen, humo y gotas de agua.

La dispersión no selectiva es causada por partículas de mayor tamaño.

Refracción. Es el cambio de dirección del rayo de luz en el área de contacto entre dos medios con diferentes índices de refracción.

Absorción. Esta ocurre cuando la atmósfera impide o atenúa fuertemente la transmisión de la radiación a través de la atmósfera. Los gases responsables de la mayor absorción de radiación solar son el ozono, dióxido de carbono y vapor de agua (Campbell *et al.*, 2011).

### **2.1.5 Interacciones con la superficie**

Cuando la energía electromagnética alcanza la superficie de la tierra, esta será: reflejada, dispersada, absorbida o transmitida. La proporción de energía que sufre cada proceso dependerá de la naturaleza de la superficie, la longitud de onda de la energía y el ángulo de iluminación.

La reflexión ocurre cuando un rayo de luz es redirigido al impactar con una superficie no transparente. La naturaleza de la reflexión dependerá del tamaño de las irregularidades de la superficie en comparación a la longitud de onda de la radiación considerada.

De acuerdo a esto puede ocurrir:

a) Reflexión especular. Si la superficie es relativamente suave para la longitud de onda, ésta redirigirá toda o casi toda la radiación incidente en una sola dirección, en la cual el ángulo de incidencia será igual al ángulo de reflexión.

b) Reflexión difusa (o isotrópica). Si la superficie es relativamente rugosa para la longitud de onda la energía será dispersada más o menos equitativamente en todas las direcciones (Fig. 2.4).

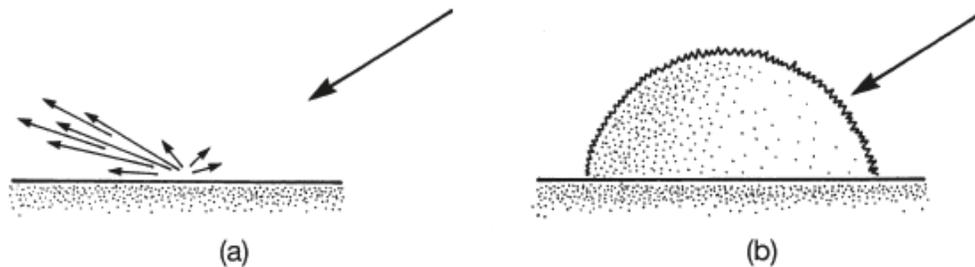


Fig. 2.4. a) Esquema que muestra la reflexión especular y b) muestra la reflexión difusa.

Para evaluar la proporción de energía que sufre este proceso se define la reflectancia, que es el cociente de la radiación reflejada entre la radiación incidente.

La transmisión ocurre cuando la radiación pasa a través de una sustancia sin tener una atenuación significativa.

### 2.1.6 Adquisición de los datos

La adquisición geoespacial de datos ocupa un papel sumamente importante en la observación de la Tierra. Como se vio en el tema anterior, la energía electromagnética interactúa con la superficie terrestre de diversas formas y ésta proporciona información acerca de los materiales que se encuentran sobre la superficie. Dicha información es captada por sensores que se encuentran en plataformas (aviones satélites, globos, etcétera). Posteriormente la información es digitalizada y los valores son transformados, de energía captada por el sensor a brillantez de píxel, para formar una imagen que, posteriormente podrá ser procesada, con el fin de identificar el o los materiales presentes. La Fig. 2.5 muestra un esquema del proceso de adquisición de los datos en PR (Percepción Remota) hasta la obtención de un producto.

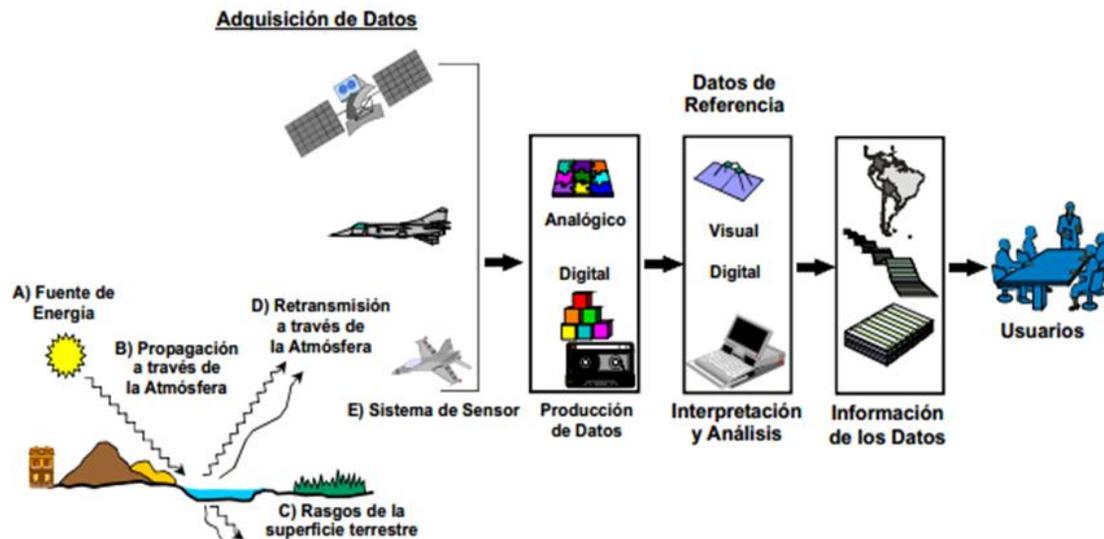


Fig. 2.5. El esquema muestra cada uno de los elementos necesarios para obtener un producto a partir de las imágenes satelitales. A) Fuente de energía, B) Propagación a través de la atmósfera, C) Rasgos superficiales, D) Retransmisión a través de la atmósfera, E) Sistema de sensor (Pérez, 2007).

Con el fin de entender el proceso de la adquisición de datos se presentan algunos conceptos básicos en PR.

## Plataformas

Una plataforma es un vehículo en movimiento, el cual generalmente es una aeronave o satélite donde es colocado un sensor. Ocasionalmente, las plataformas estáticas son usadas (Bakker *et al.*, 2009).

Las aeronaves alcanzan una altura aproximada de 20 kilómetros, con el fin de obtener una visión más amplia para los sensores.

El satélite Landsat 1 fue puesto en órbita en 1972 y por primera vez permitió una observación repetida sistemáticamente de la Tierra (Campbell *et al.*, 2011).

Landsat ha tenido dos generaciones de satélites lanzados: la primera generación (Landsat 1, 2 y 3 operaron desde 1972 a 1985), posteriormente fue remplazada por la segunda generación (Landsat 4, 5 y 7) la cual inició operaciones en 1982 (Sabins, 1999), para marzo del 2003 el sensor TM (*Thematic Mapper*) del satélite Landsat 7 presentó fallas.

El 11 de febrero del 2013 se lanzó el satélite Landsat 8.

## Sensores

Los sensores son dispositivos que reciben información. Pueden clasificarse según el origen de la fuente de radiación en: a) Sensor Pasivo y b) Sensor Activo (Fig.2.6).

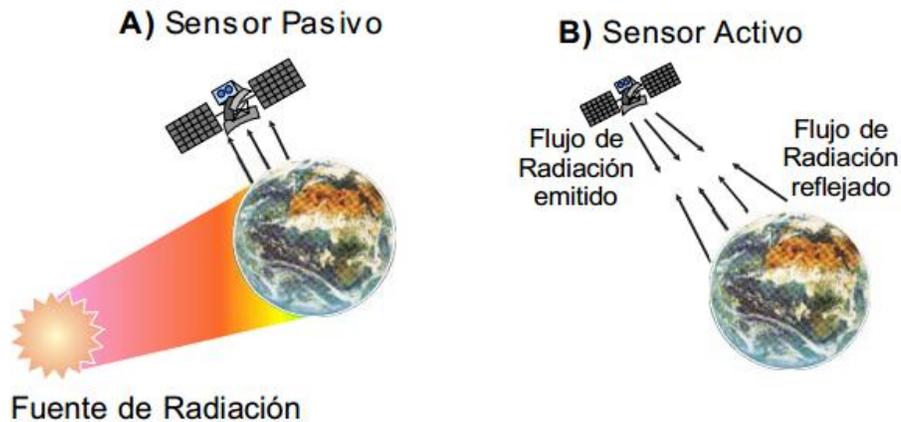


Fig. 2.6. El esquema muestra los tipos de sensores, de acuerdo al origen de la fuente de radiación; A) Sensor pasivo y B) Sensor activo (Pérez, 2007).

- a) Sensor Pasivo. Detectan la radiación emitida y/o reflejada por la superficie terrestre, proveniente de una fuente externa, en éste caso la radiación emitida por el sol, pues no poseen radiación propia.
- b) Sensor Activo. Poseen una fuente propia de energía que interactúa con la superficie terrestre y la radiación reflejada es captada por el sensor, por ejemplo el radar.

Según el diseño del escáner se clasifican en:

- a) Escáner de espejo de barrido mecánico. Éste contiene un espejo que se mueve mecánicamente, el movimiento puede ser oscilatorio o rotatorio. Colecta una línea de datos a través del espejo para “barrer” la vista perpendicular a la línea de vuelo. El sensor TM de Landsat tiene este mecanismo. Cada sensor contiene al menos un detector por banda y cada detector produce una línea de imágenes (Fig. 2.7).

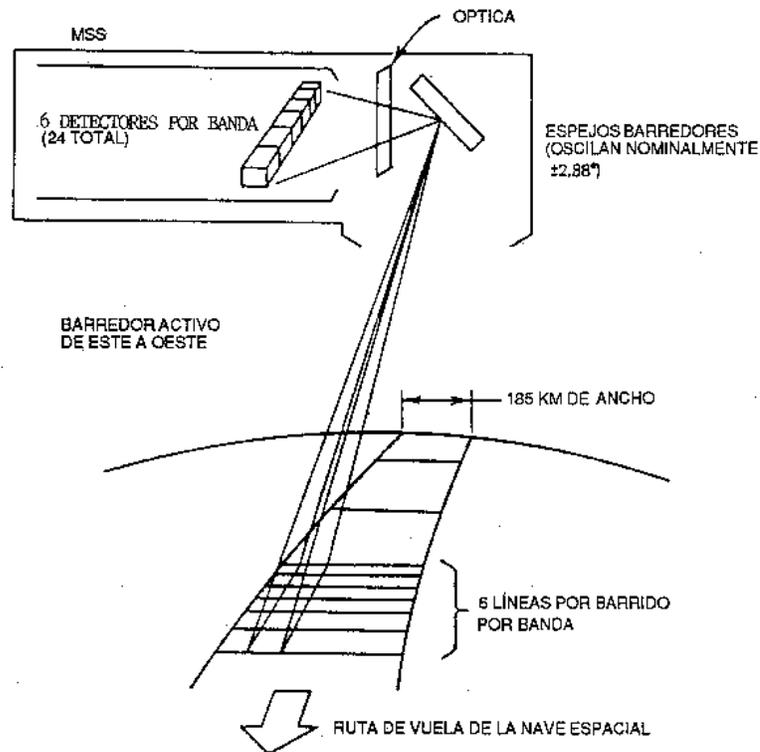


Fig. 2.7. El esquema muestra el escáner de barrido mecánico (Sensor MSS), en el cual los espejos barredores oscilan con el fin de obtener seis líneas de datos por barrido.

- b) Escáner de barrido accionado. Este contiene uno o varios arreglos de detectores, donde una línea de adquisición es vista instantáneamente sin ningún movimiento mecánico. El sensor HRV de SPOT tiene este tipo de escáner y es el mejor escáner hasta ahora (Fig. 2.8).

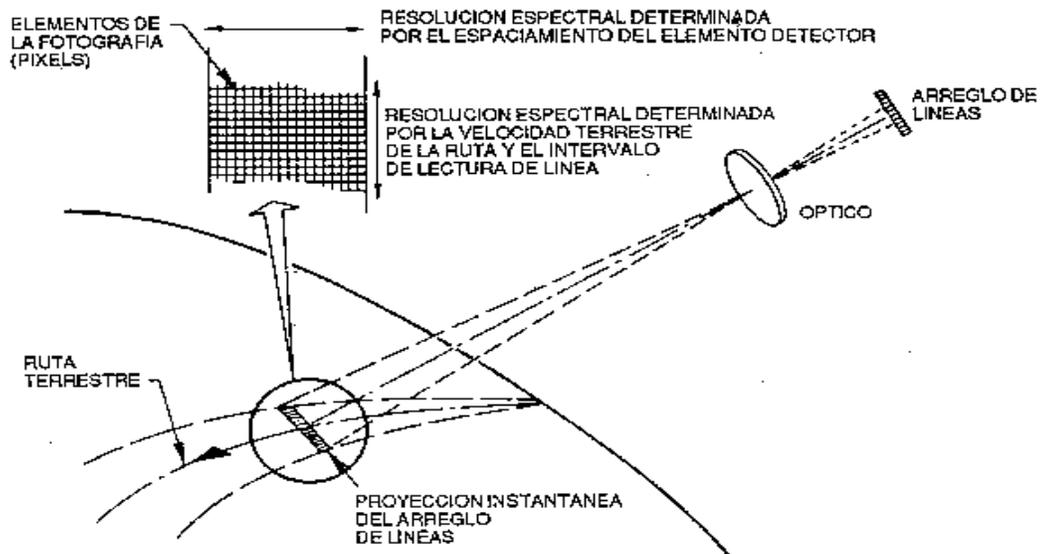


Fig. 2.8. El esquema muestra el escáner de barrido accionado, en el cual se tiene un arreglo de líneas que son proyectadas instantáneamente (Avery y Berlin, 1985).

A diferencia de las cámaras, las cuales utilizan filtros para separar las longitudes de onda. Los escáneres utilizan un prisma como un divisor de haz de luz, separándola en diferentes longitudes de onda y los detectores están hechos de distintos materiales los cuales detectan ciertas longitudes de onda; Por ejemplo algunos fotodiodos hechos de silicón son usados para las bandas de espectro visible y del infrarrojo cercano. Otros de Te-Cd-Ag son usados en escáneres termales.

Una vez adquirida la información por los sensores es digitalizada en píxeles, en cada píxel se observa un promedio de la radiación captada en esa área, la radiancia es el total de energía por unidad de área de cada elemento.

Cada sensor posee distintos tipos de resoluciones de acuerdo a su diseño, éstas son: a) Resolución espacial, b) Resolución espectral, c) Resolución temporal y d) Resolución radiométrica (Campbell *et al.*, 2011).

- a) Resolución espacial. Se refiere al tamaño del objeto más pequeño que puede ser identificado en una imagen.
- b) Resolución espectral. Indica la capacidad del sensor para definir intervalos de longitud de onda finos.
- c) Resolución temporal. Es la capacidad para grabar secuencias de imágenes, es decir, indica la periodicidad entre las observaciones; de este modo se pueden presentar cambios en el paisaje a través del tiempo.

d) Resolución radiométrica. Puede ser definida como la capacidad de un sistema de imágenes para grabar muchos niveles de brillantez.

En la Tabla 2.2 se presentan algunos sensores y sus respectivas resoluciones.

Tabla 2.2. Indica algunos de los satélites que se han puesto en órbita, su fecha de lanzamiento, el tipo de sensor y sus resoluciones temporales, espectrales, espaciales y radiométricas. (\*)B= Banda (Campbell *et al.*, 2011; Lillesand *et al.*, 1999).

Satélite	Fecha de lanzamiento	Resolución Temporal [días]	Sensor	Resolución espectral[ $\mu\text{m}$ ]	Resolución Espacial [metros]	Resolución radiométrica [bits]	
Landsat 1	23/07/1972	18	RBV	B1 (verde) 0.475-0.575	80x80	6	
				B2 (rojo) 0.580-0.680	80x80		
				B3 (IR cercano) 0.690-0.830	80x80		
			MSS	B4 (verde) 0.5-0.6	79x79		
				B5 (rojo) 0.6-0.7	79x79		
				B6 (IR cercano) 0.7-0.8	79x79		
				B7 (IR cercano) 0.8-0.11	79x79		
Landsat 7	05/ 04/1999 Falló el sensor TM desde Mayo del 2003	16	ETM+	B1 (azul) 0.45-0.52	30x30	9	
				B2 (verde) 0.52-0.6	30x30		
				B3 (rojo) 0.63-0.69	30x30		
				B4 (IR cercano) 0.76-0.9	30x30		
				B5 (IR medio) 1.55-1.75	30x30		
				B6 (IR térmico) 10.4-12.5	60x60		
				B7 (IR cercano) 2.08-2.35	30x30		
				B8 (Pancromática)0.5-0.9	15x15		
Landsat 8	11/02/2013 En órbita	16	OLI	B1 (Coastal) 0.433-0.453	30x30	12	
				B2 (azul) 0.45-0.515	30x30		
				B3 (verde) 0.525-0.60	30x30		
				B4 (rojo) 0.63-0.68	30x30		
				B5 (IR cercano) 0.845-0.885	30x30		
				B(SW IR) 1.56-1.66	30x30		
				B7 (SW IR) 2.1-2.3	30x30		
				B8(Pancromática)0.5-0.68	15x15		
				B9(Cirrus) 1.36-1.39	30x30		
				TIRS	B10 (LWIR) 10.6-11.2		100x100
					B11 (LWIR) 11.5-12.5		100x100
SPOT-4	23/03/1998 En órbita	26	HRVIR	Verde 0.50-0.59	20x20	8	
				Rojo 0.61-0.68	20x20		
				IR cercano 0.79-0.89	20x20		
				IR medio 1.58-1.75	20x20		
				Pancromática 0.49-0.73	10x10		
Vegetation Instrument				Azul 0.43-0.47	1000x1000		
				Rojo 0.61-0.68	1000x1000		
				IR cercano 0.79-0.89	1000x1000		
				IR medio1.58-1.75	1000x1000		
SPOT-5	05/ 2002 En órbita	26	HGR	Verde 0.50-0.59	10x10	8	
				Rojo 0.61-0.68	10x10		
				IR cercano 0.79-0.89	10x10		
				IR medio 1.58-1.75	10x10		
				Pancromática 0.49-0.73	5x5		
IRS-1D	1997	24	LISS-III	Verde 0.52-0.59	23x23	7	
				Rojo 0.62-0.68	23x23		
				IR cercano 0.77-0.86	23x23		
				IR medio 1.55-1.7	70x70		
Panchromatic				Pancromática 0.5-0.75	5.8x5.8		
RESURS-01	1985-1988	4	MSU-SK	Rojo 0.62-0.68	188x188	8	
				IR cercano 0.77-0.86	188x188		
				Verde 0.5-0.6	170x170		
				Rojo 0.6-0.7	170x170		

				IR cercano 0.7-0.8	170x170	
				IR cercano 0.8-1.1	170x170	
				IR térmico 10.4-12.6	600x600	
<b>ADEOS</b>	17/08/1996	3	AVNIR	B1 0.42-0.5	16000x16000	10
				B2 0.52-0.6	16000x16000	
				B3 0.61-0.69	16000x16000	
				B4 0.76-0.89	16000x16000	
				Pancromática 0.52-0.69	8x8	
			OCTS	B1 0.402-0.422	700x700	10
				B2 0.433-0.453	700x700	
				B3 0.479-0.501	700x700	
				B4 0.511-0.529	700x700	
				B5 0.555-0.575	700x700	
				B6 0.66-0.68	700x700	
				B7 0.745-0.785	700x700	
				B8 0.845-0.885	700x700	
				IR térmico 1 3.35-3.88	700x700	
				IR térmico 2 8.25-8.80	700x700	
				IR térmico 3 10.3-11.4	700x700	
				IR térmico 4 11.4-12.7	700x700	
<b>JERS-1</b>	11/02/1992	44	OPS	Verde 0.52-0.6	18x24	8
				Rojo 0.63-0.69	18x24	
				IR cercano 0.76-.86	18x24	
				IR medio 1.6-1.71	18x24	
				IR medio 2.27-2.4	18x24	
<b>NOAA-18</b>	20/05/2005 En órbita	12 horas	AVHRR	B1 0.58-0.68	1100x1100	10
				B2 0.72-1.1	1100x1100	
				B3A 1.58-1.64	1100x1100	
				B3B 3.55-3.93	1100x1100	
				B4 10.5-11.3	1100x1100	
				B5 11.5-12.5	1100x1100	

## 2.1.7 Firmas espectrales

Un concepto importante para entender qué es una firma espectral es la reflectancia espectral, esta es el cociente entre la energía reflejada sobre la energía incidente como función de la longitud de onda (ec. 2.4).

$$\rho(\lambda) = [E_R(\lambda) / E_I(\lambda)] \times 100 \dots (\text{ec. 2.4})$$

Donde:

$\rho(\lambda)$  Es la reflectancia espectral en una longitud de onda particular.

$E_R(\lambda)$  Es la energía en la longitud de onda reflejada desde el objeto.

$E_I(\lambda)$  Es la energía de la longitud de onda incidente sobre el objeto.

La reflectancia espectral tiene diferentes valores en diferentes longitudes de onda para un elemento dado del terreno.

Cada material posee características espectrales, con las cuales se pueden categorizar e identificar, esto se debe a que los átomos y las moléculas absorben energía en función de sus estructuras atómicas y por lo tanto, cada material tendrá una firma espectral única.

El término firma espectral (Fig. 2.9) es usado para definir un patrón de respuesta espectral único, el cual es característico de un elemento del terreno.

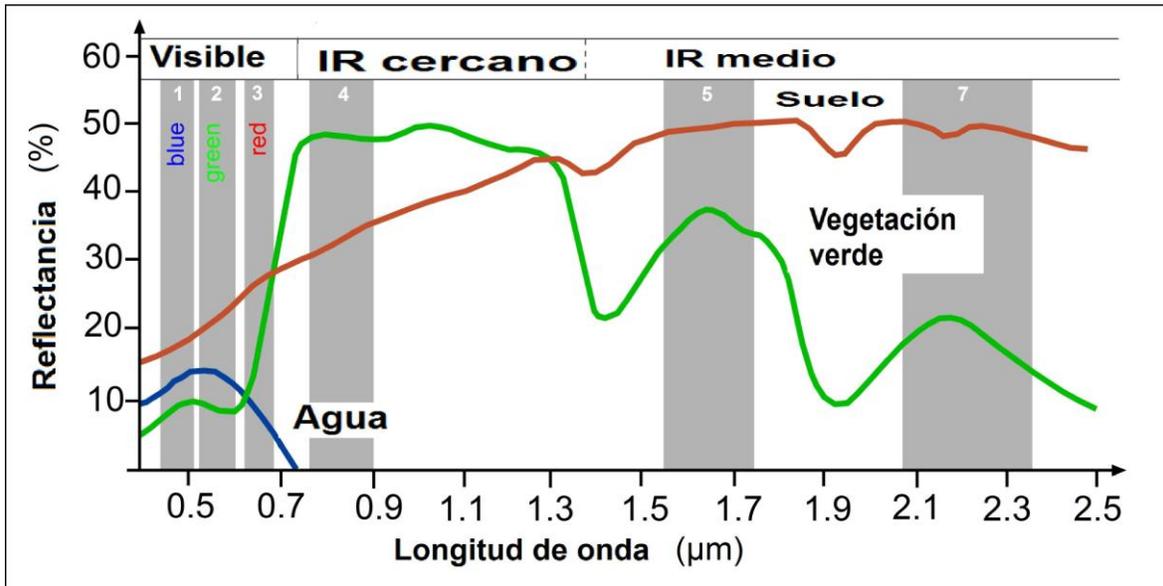


Fig. 2.9. El esquema muestra la forma espectral de vegetación (verde), suelo (rojo) y agua (azul). Los números 1, 2, 3, 4, 5 y 7 corresponden a las bandas del sensor TM de Landsat. (McCloy *et al.*, 2009).

### 2.1.8 Pre procesamiento de imágenes satelitales

El pre procesamiento de las imágenes satelitales se refiere a todas las operaciones preliminares al análisis principal.

Debido al proceso de adquisición de los datos se deben realizar algunas correcciones con el fin de restaurar la imagen, debido a distorsiones y ruido. De manera tal que se mejore la calidad de la imagen que será la base para realizar diversos análisis y extraer información proporcionada por la misma.

#### a) Pre procesamiento radiométrico

Los valores de brillantez en una imagen puede ser influenciadas por diversos factores como: la respuesta del instrumento, la iluminación de la escena, un mal funcionamiento en el sensor y las condiciones atmosféricas.

La corrección atmosférica tiene el objetivo de identificar y separar la brillantez derivada de la superficie terrestre de los efectos de la dispersión atmosférica. Existen diferentes métodos que pueden ser usados para este fin como lo son:

- i. Código de Transferencia Relativa. Conocida por sus siglas en inglés como RTC (*Radiative Transfer Code*). En el cual se cuenta con un modelo físico del comportamiento de la radiación, así como de su paso a través de la atmósfera, el cual permite ajustar los valores reales, como si se observaran bajo una atmósfera limpia. Sin embargo este método requiere una medición *in situ* de la energía proveniente de la zona que se está escaneado con el sensor y simultánea con la adquisición de la imagen.
- ii. Sustracción del cuerpo oscuro. Se basa en que se conoce el espectro de algún objeto como un cuerpo oscuro, por ejemplo un cuerpo de agua (debido a que el agua limpia absorbe fuertemente en el infrarrojo cercano). Analizando los histogramas de los valores digitales de la escena se pueden observar valores más bajos, los cuales generalmente, son distintos para cada banda y pueden ser sustraídos, de tal forma que cada histograma comenzará en cero.

Actualmente existen diversas técnicas y herramientas más avanzadas para realizar esta corrección, sin embargo requieren una mayor capacidad del equipo de cómputo para su tratamiento y una gran cantidad información meteorológica para su uso (Campbell *et al.*, 2011).

Algunos sensores pueden presentar problemas debido a un mal funcionamiento, entre los errores más comunes son; problemas en el inicio de línea, pérdida de línea y bandeamiento. Existen diferentes filtros y algoritmos que ayudan a mejorar la calidad de las imágenes que presenten dichos problemas donde se reemplazan los píxeles malos con valores basados en promedios de píxeles adyacentes que no presenten problemas o el reemplazo con nuevos valores basados en la media y desviación estándar de la banda en cuestión o en desarrollos estadísticos para cada sensor (Campbell *et al.*, 2011).

Sin embargo, el uso de alguna técnica específica para el pre proceso dependerá de los objetivos del proyecto, la información disponible y la capacidad del equipo de cómputo.

## **b) Pre procesamiento Geométrico**

Debido a la adquisición de los datos en PR las características geométricas de una imagen están determinadas por la órbita y altitud de la plataforma, las propiedades del escáner y la rotación y la forma de la Tierra (Schowengerdt, 2006), las cuales pueden generar distorsiones, muchas de ellas pueden ser corregidas utilizando fórmulas matemáticas.

Una forma de realizar la corrección geométrica es utilizando puntos de control en la tierra, los cuales son puntos dentro de la imagen que pueden ser localizados con precisión en la tierra sobre un mapa. La localización de estos puntos, establece la geometría de la imagen de la salida y la relación con la imagen de entrada, así se realiza una regresión de mínimos cuadrados para determinar las ecuaciones que logran la transformación de coordenadas (Campbell *et al.*, 2011). La mayoría de las imágenes Landsat ya cuentan con este pre procesamiento utilizando puntos de control en la Tierra.

## 2.2 SISTEMAS HIDROTERMALES

### 2.2.1 Sistemas hidrotermales activos

#### Introducción

La energía geotérmica es la energía contenida como calor en el interior de la Tierra. La extracción y utilización de grandes cantidades de calor requiere la transferencia de calor desde varios kilómetros de profundidad a regiones sub superficiales, primero por conducción y después por convección, con los fluidos geotermales actuando como medio de transporte (Barbier, 2002).

Los sistemas geotermales se presentan frecuentemente en regiones de vulcanismo activo (Fig. 2.10), la mayor parte ésta actividad volcánica se encuentra localizada cerca de los límites de las placas asociadas a centros de expansión y zonas de subducción.

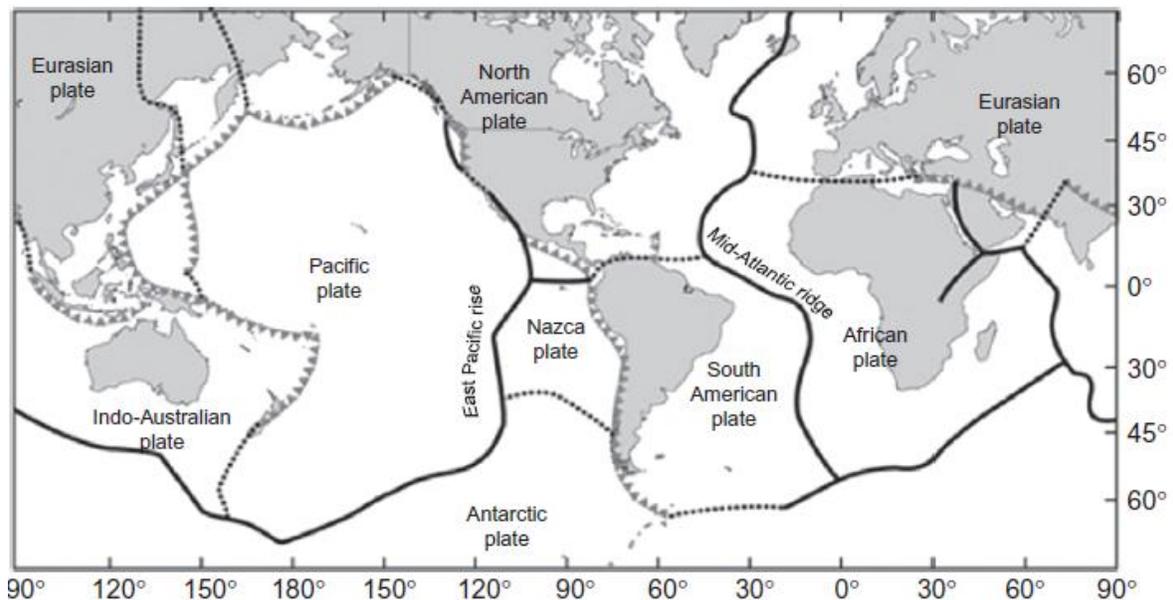


Fig. 2.10. Principales placas tectónicas en el mundo. Las líneas sólidas indican los límites extensionales, las líneas con triángulos indican las zonas de convergencia y las líneas punteadas los límites de placas transicionales o difusas. (DiPippo *et al.*, 2014).

Muchos de estos sistemas son objeto de una exploración intensiva para la utilización de energía (por ejemplo: Kenia, Filipinas, Japón, Islandia, Indonesia, México, Centroamérica, Sudamérica y Nueva Zelanda) y una serie de sistemas ya están siendo explotados para la generación de electricidad o directamente para el sector de la energía industrial. En los sistemas geotérmicos volcánicos las temperaturas pueden llegar a  $\sim 350$  ° C a las profundidades explotables (<2.5 km) (Henley *et al.*, 1983).

## Componentes de un sistema geotermal

Un sistema geotermal contiene tres elementos principales: a) Una fuente de calor, b) Un reservorio y c) Un fluido por el cual ocurre la transferencia de calor.

- a) La fuente de calor ya sea una intrusión magmática de alta temperatura ( $> 600^{\circ}\text{C}$ ) alcanzando pocas profundidades (5-10 km) o como un sistema de bajas temperaturas en el que la temperatura se incrementa con la profundidad de acuerdo con el gradiente geotérmico local. La actividad intrusiva continua o el enfriamiento de los grandes plutones dentro de la corteza superior a los 10 kilómetros proporcionan energía termal (Henley *et al.*, 1983).
- b) El reservorio es un volumen de rocas calientes permeables donde circulan los fluidos que extraen el calor, este generalmente está cubierto por una roca impermeable conectada a un área superficial de recarga a través de la cual las aguas meteóricas pueden remplazar los fluidos que escapan desde el reservorio naturalmente o son extraídos por pozos (Dickson *et al.*, 2004).
- c) Los fluidos geotérmicos, en la mayoría de los casos se componen principalmente de agua meteórica en fase líquida o vapor depende de la presión y la temperatura. Esta agua, en la mayoría de los casos contiene diversos compuestos y algunos gases como  $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{S}$ , etcétera (Fig. 2.11).

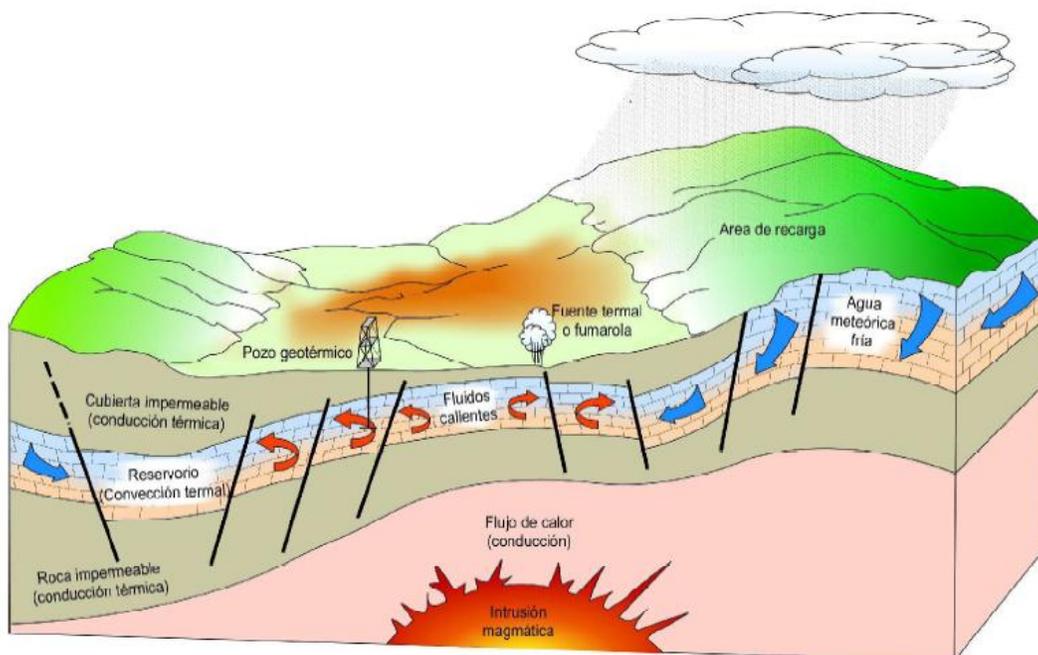


Fig. 2.11. Modelo esquemático de un sistema geotérmico hidrotermal. (Dickson *et al.*, 2004).

La Fig. 2.12 muestra otro ejemplo de las características generales de un sistema geotérmico hipotético donde la recarga principal de agua es proporcionada por las aguas subterráneas y meteóricas, el calor junto con algunos gases, cloruro, agua magmática y otros solutos es suministrado por un sistema magmático enterrado profundamente que conduce a la columna convectiva de agua clorurada de *pH* casi neutro. Además los procesos de separación de vapor dan lugar a fumarolas y la adsorción de vapor de agua subterránea con la oxidación de  $H_2S$  en el nivel freático da lugar a vapor caliente, sulfato ácido y aguas bicarbonatadas. La mezcla puede producirse entre el agua profunda de *pH* casi neutro y la calentada por vapor para obtener  $Cl-SO_4$  relativamente oxidante (Henley *et al.*, 1983).

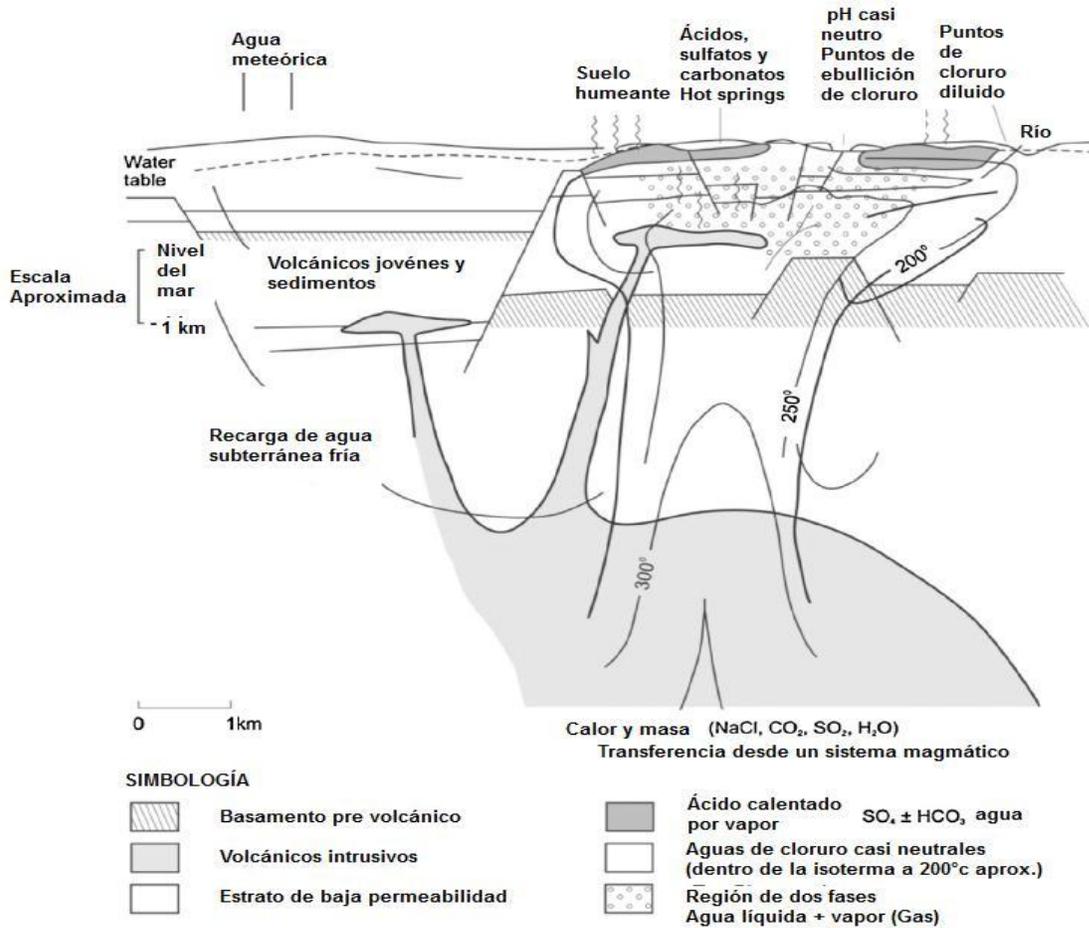


Fig. 2.12. El esquema presenta las principales características de un típico sistema geotérmico silíceo-volcánico terrestre (Henley *et al.*, 1983).

Se han identificado cuatro tipos de sistemas geotermiales: hidrotermales, roca seca caliente, geopresurizados y magmáticos.

## Flujo de Calor

El flujo de calor de la Tierra se deriva de dos componentes: a) El calor generado durante la formación de la Tierra y b) El calor generado por el decaimiento radioactivo de los elementos en la corteza terrestre (DiPippo *et al.*, 2014).

En Ciencias de la Tierra la energía y la temperatura de la Tierra se cuantifican en términos de flujo de calor y el gradiente de temperatura.

El gradiente geotérmico expresa el incremento de la temperatura con la profundidad de la corteza de la Tierra. El promedio del gradiente geotérmico es cerca de los  $2,5-3^{\circ}\text{C} / 100 \text{ m}$ . La variación de temperatura con la profundidad es medida en pozos profundos para evitar las perturbaciones en el gradiente que son debidas a las variaciones diurnas y estacionales de temperatura.

Existen dos formas de la transferencia de calor dentro de la Tierra: a) Conducción y b) Convección (Barbier, 2002).

- a) Conducción. Ésta involucra la transferencia aleatoria de energía cinética entre las moléculas sin transferencia de material, el movimiento de las moléculas causa una vibración más rápida y transfiere el calor. La conducción es el principal modo de transferencia de calor en sólidos.
- b) Convección. Es el proceso común en la transferencia de calor en líquidos o gases y consiste en el movimiento de fluidos calientes de un lugar a otro. La convección es un proceso más eficiente de transferencia de calor en comparación con la conducción.

El calor puede estar relacionado al movimiento del magma dentro de la corteza, particularmente cuando está asociado a un vulcanismo reciente o a la circulación de fluidos en zonas de fallamiento.

### **2.2.2 Características utilizadas para la identificación de sistemas hidrotermales mediante percepción remota**

Debido a las características que controlan tanto estructural como químicamente los sistemas hidrotermales, estos pueden ser identificados realizando una exploración regional con sensores remotos identificando la presencia de alteraciones hidrotermales y patrones estructurales como fallas y fracturas.

## Alteraciones Hidrotermales

Los fluidos hidrotermales causan alteraciones en las rocas donde pasan fluidos calientes y cambian su composición; agregando, removiendo o redistribuyendo componentes. La composición de los fluidos es extremadamente variable y contienen diferentes tipos de gases, sales, agua y metales; además provienen de diversas fuentes (Lagat, 2010).

Un amplio rango de minerales hidrotermales ha sido reconocido en sistemas geotermales activos. Esto se debe a que existen diversos factores que afectan la formación de minerales hidrotermales y varían en importancia relativa de campo a campo, algunos de ellos están íntimamente relacionados, tanto que es casi imposible separar un factor de otro; estos factores son: temperatura, presión, el tipo de roca, permeabilidad, composición del fluido y duración de la actividad (Browne, 1978).

En la Tabla 2.3 se muestran algunos minerales de alteración en ciertos campos geotérmicos.

Tabla 2.3. Indica algunos minerales de alteración en diferentes campos geotérmicos. Imperial Valley California\* incluye el campo de Cerro Prieto en Baja California (Browne, 1978).

	Imperial Valley, California <sup>a</sup>	Yellowstone, Wyoming	The Geysers, California	Pauzhetsk, Kamchatka	Matsukawa, Japan	Onake, Japan	Tongonan, Philippines	Kawah Kamojiang, Java	NZ Volcanic Zone	El Tatio, Chile	Low temp. Iceland	High temp. Iceland	Larderello, Italy
Alófano				x									
Cuarzo	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	r?	x	x
Crisobalita		x		x	x	x	x	x	x	x			
Grupo del caolín	d	x	x	x	x	x	x	x	x	x			
Montmorilonita	d	x		x	x	x	x	x	x	x	x	x	
Illita-Montmorilonita inter.	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	
Illita	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x			
Biotita	x			x									
Clorita	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x		x	x
Celadonita		x		x							x		
Alunita			x	x	x	x	x	x	x				
Anhidrita	x			x	x	x		x	x	x		x	x
Sulfuros			x	x	r	x	r	r	x				
Pirofilita					r								
Talco	x												
Diásporo					x	x		x					
Calcita	x	x	x	x	x	x		x	x	x	x	x	x
Aragonita	x <sup>b</sup>				x	x		x	x <sup>b</sup>				
Siderita			x	x			x		x	x			
Ankerita	x			x					x	x			
Dolomita	d											x	
Erionita		x											
Laumontita		x		x	x				x	x	x	x	
Filipsita				x									
Thompsonita											x		
Clinoptinolita		x					x						
Heulandita		x		x		x			x		x	x	
Estilbita											x	x	
Mordenita		x		x					x		x	x	
Prehnita	x			x					x		r?	x	
Anfibol	x			x			x				x	x	
Granate	x			?								r	
Epidota	x			x		x		x	x		r	x	x
Clinozoisita									x				
Pectolita		x							x <sup>b</sup>				
Titanita	x			x			x	x	x				
Adularia	x	x	x	x		x	x	x	x	x			x
Albita	x			x		x	x	x	x			x	
Rutilo				x	x	x							
Magnetita							x						
Hematita	x	x		x			x	x	x	x	x		
Pitita	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	
Pirrotina	x												
Marcasita													
Sulfuros de base metal	x								x				

La alteración hidrotermal está indicada frecuentemente por la presencia de óxidos de hierro e hidroxilos, los cuales son identificados en manifestaciones superficiales de zonas mineralizadas. Los minerales tienen rasgos espectrales en la parte visible y del infrarrojo del espectro electromagnético.

En algunas zonas se pueden presentar problemas por la cubierta de vegetal que existe, la cual muestra características de absorción desde 0,45 a 0,68  $\mu\text{m}$  y alta reflectancia en el infrarrojo cercano entre 1,6 y 2,2  $\mu\text{m}$  (Fig. 2.13), ambas son debidos al contenido de clorofila en las hojas. Los rasgos de absorción observados cerca de 1,4 y 1,9  $\mu\text{m}$  por la vegetación están relacionados al contenido de agua (Fernández De La Vega-Márquez y Prol-Ledesma, 2001).

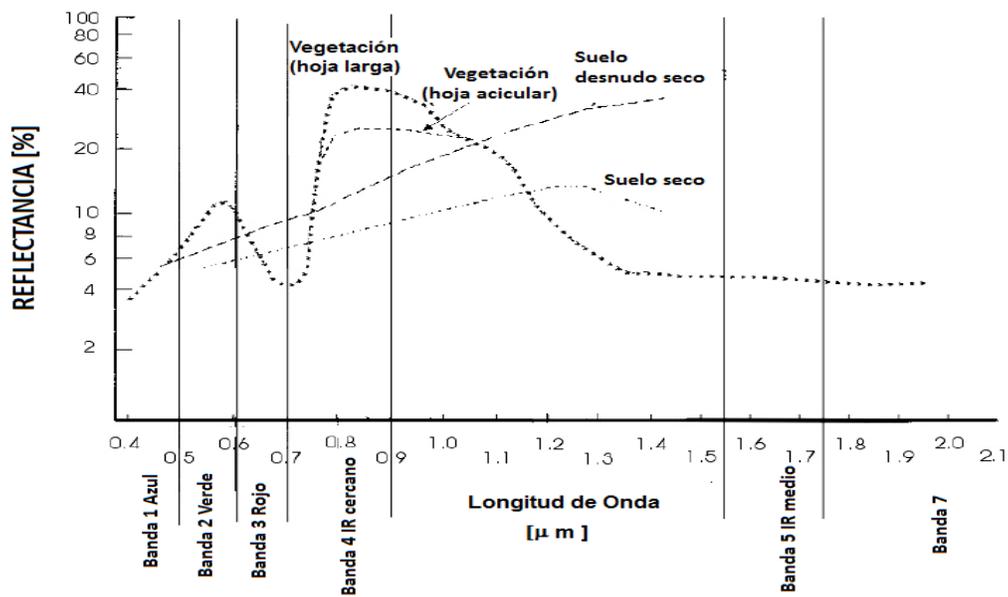


Fig. 2.13. Muestra la firma espectral de dos tipos de vegetación: hoja larga, hoja acicular y de dos tipos de suelo: suelo seco y suelo seco desnudo. Las bandas indicadas en el eje horizontal pertenecen al sensor TM de Landsat. (Hunt y Ashley, 1979).

La absorción del agua también es observada en el espectro de minerales que contienen agua u OH- en su estructura cristalina.

Los óxidos se superponen a las alteraciones hidrotermales y son una guía de la exploración geotérmica. Este grupo de minerales puede ser identificado a través de sus firmas espectrales

Los óxidos de hierro y la vegetación tienen reflectancia similar en la banda 1 del sensor TM del satélite Landsat (0,45-0,52  $\mu\text{m}$ ) y la banda 2 del sensor TM de Landsat (0,52-0,60  $\mu\text{m}$ ) por lo tanto estas bandas no son utilizadas para la separación de dichos materiales. En el caso de las gráficas de reflectancia para minerales y vegetación se ha observado que la región del espectro cubierta por la banda 3 del sensor TM de Landsat (0,63-0,69  $\mu\text{m}$ ) muestra una alta reflectancia para óxidos de hierro y una fuerte absorción para la vegetación, esta característica puede ser usada para diferenciar óxidos de la vegetación (Fernández De La Vega-Márquez y Prol-Ledesma, 2001).

Analizando la firma espectral de los óxidos (Fig. 2.14). Por ejemplo la jarosita muestra rasgos de absorción bien definidos en 4,3  $\mu\text{m}$  y 9,2  $\mu\text{m}$ , la hematita tiene una reflectancia mínima en 0,85  $\mu\text{m}$  y la goethita cerca de 0,94  $\mu\text{m}$  (Hunt y Ashley, 1979).

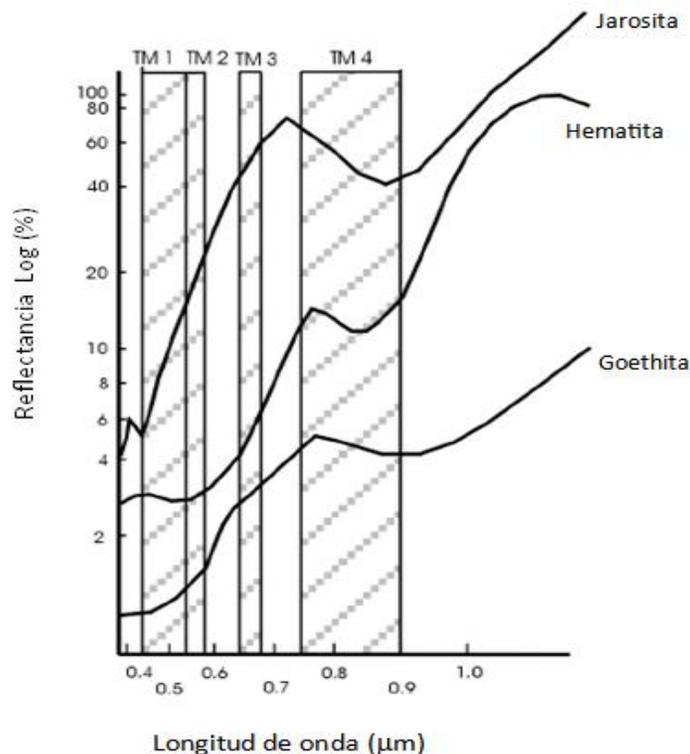


Fig. 2.14. Muestra la firma espectral de minerales pertenecientes al grupo de los óxidos. Jarosita, hematita y goethita. Las bandas TM1, TM2, TM3 y TM4, pertenecen al sensor TM de Landsat. En el eje horizontal está la longitud de onda y el eje vertical el porcentaje de reflectancia en escala logarítmica. (Hunt y Ashley, 1979).

Debido a sus características espectrales, los óxidos de hierro pueden ser identificados por medio de un cociente entre las bandas 3 y 1 del sensor TM de Landsat (TM3/TM1), pues muestra un porcentaje alto de la reflectancia TM3 y uno bajo en la banda TM1.

En los hidroxilos se encuentran minerales como: alunita, yeso, talco, clorita pirofilita, caolín, muscovita, montmorillonita e illita; los cuales son formados a partir de una reacción de descomposición química que involucra la descomposición del agua llamada hidrólisis.

Los hidroxilos también pueden ser identificados utilizando el sensor TM de Landsat, por las características espectrales que presentan: un alto porcentaje de reflectancia en la banda 5 del sensor TM y una alta absorbancia en la banda 7 del sensor TM (Fig. 2.15).

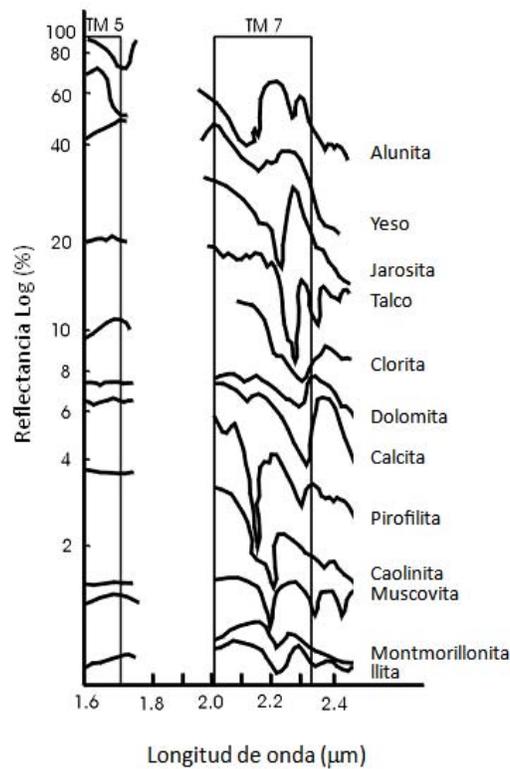


Fig. 2.15. Muestra la firma espectral de algunos minerales arcillosos, filosilicatos, carbonatos y sulfatos. Las bandas TM5 y TM7, pertenecen al sensor TM de Landsat; en el eje horizontal se encuentra la longitud de onda y el eje vertical el porcentaje de reflectancia en escala logarítmica. (Hunt y Ashley, 1979).

Las bandas TM5 y TM7 corresponden a la parte del infrarrojo medio en el espectro electromagnético.

Una técnica utilizada para la identificación de hidroxilos mediante sensores remotos son los cocientes de bandas, en este caso de utilizará el cociente TM5/TM7.

En la Tabla 2.4 se muestran las características espectrales de los óxidos de hierro, hidroxilos y vegetación.

Tabla 2.4. Características espectrales para óxidos de fierro, hidroxilos y vegetación. (\*)Bandas con los rasgos espectrales más característicos del sensor TM de Landsat. (Ruiz-Armenta y Prol-Ledesma, 1995).

<b>MATERIALES</b>	<b>REFLECTANCIA</b>	<b>ABSORCIÓN</b>
<b>Minerales arcillosos, carbonatos, filosilicatos y sulfatos.</b>	TM5*	TM7*
<b>Hematita.</b>	TM3	TM2* Y TM1
<b>Goethita.</b>	TM3* y TM2	TM1
<b>Jarosita.</b>	TM3*, TM2 y TM1	
<b>Vegetación.</b>	TM4*, TM2, TM5 y TM7	TM3 y TM1

### **Estructuras geológicas**

La reconstrucción del marco estructural en áreas geotermales es fundamental para entender las relaciones entre la roca sello, el depósito y la circulación de los fluidos, sobre todo donde la circulación de fluidos está controlada por una permeabilidad secundaria (Giordano *et al.*, 2012).

Realizar un estudio de los patrones de fracturamiento es clave para entender las vías de flujo en los sistemas hidrotermales (Giordano *et al.*, 2012). Los rasgos geológicos como fallas y fracturas pueden controlar el movimiento convectivo de los fluidos geotermales (Yamaguchi, 1992), sirviendo como: canales para el transporte de fluido y canales de recarga de agua fría (Van der Meer *et al.*, 2014).

Los sistemas geotérmicos se asocian a menudo con las estructuras de la caldera, las cuales reúnen condiciones de agua y calor debido al remanente de la cámara magmática (Petrinovic *et al.*, 2010) por ejemplo, sistemas en el Rotorua y Okataina Calderas, Nueva

Zelanda, Yellowstone Valley, Long Valley, Coso, EE.UU. y Krafla, Islandia. Muchos de los sistemas hidrotermales fósiles de formación mineral se asocian de manera similar, por ejemplo, la Caldera McDermitt, Nevada, Creede y Silverton, Colorado y Vatukoula, Fiji. Es probable que la penetración profunda de fluidos meteóricos para el establecimiento de la actividad geotérmica, esté relacionada con un extenso período de fracturamiento de la corteza profunda, relacionada con la formación de la caldera (Henley *et al.*, 1983).

Por lo tanto existe una estrecha relación entre las aperturas en las rocas como: fallas, fracturas, grietas, etcétera., que servirán como canalizadores de las soluciones hidrotermales en su ascenso a la superficie.

En la literatura existen diversos trabajos del uso de imágenes satelitales en la exploración geotérmica como un primer paso en el programa integral de exploración. Donde utilizando diversos filtros de realce espacial se pueden identificar lineamientos a diferentes escalas para encontrar estructuras como fallas y fracturas que permitan la identificación de zonas por las que circulan fluidos hidrotermales.

### **Algunos casos de Estudio**

Recientemente se la incrementado el uso de las imágenes satelitales para la exploración de diversos recursos. En el caso de la energía geotermal se usa en las primeras etapas de exploración.

Yamaguchi *et al.* (1992) Indica que la percepción remota puede contribuir en el estudio y la exploración geotérmica detectando anomalías térmicas superficiales usando imágenes en la parte del infrarrojo térmico, cartografiando lineamientos y delineando áreas alteradas hidrotermalmente.

En México:

Prol-Ledesma *et al.* (1992) realizan exploración geotérmica en Los Humeros, Puebla, donde utilizan imágenes Landsat MSS, modelos digitales de elevación, mapas geológicos y tectónicos.

Fernández De la Vega-Márquez y Prol-Ledesma (2001) realizan la cartografía de estructuras y alteraciones hidrotermales en el campo geotérmico La Primavera utilizando imágenes Landsat TM.

### 3 GEOLOGÍA DE LA ZONA

#### 3.1 Zona de estudio

La zona de estudio está ubicada en el municipio de La Paz, colinda al norte con el municipio de Comondú y el golfo de California; al este, con el golfo de California y el municipio de Los Cabos; al sur, con el municipio de Los Cabos y el Océano Pacífico y al oeste con el Océano Pacífico y el municipio de Comondú (INEGI, 2006).

#### 3.2 Marco tectónico

El sistema tectónico de la zona está estrechamente asociado a los procesos de apertura del Golfo de California, iniciados hace 5,5 millones de años aproximadamente durante el Mioceno Superior-Plioceno. Existen diversos modelos que tratan de explicar la evolución tectónica del Golfo de California, uno de ellos es el modelo de Fletcher *et al.*, (2007) donde la deformación es acomodada de manera oblicua al *rift*. (Fig.3.1).

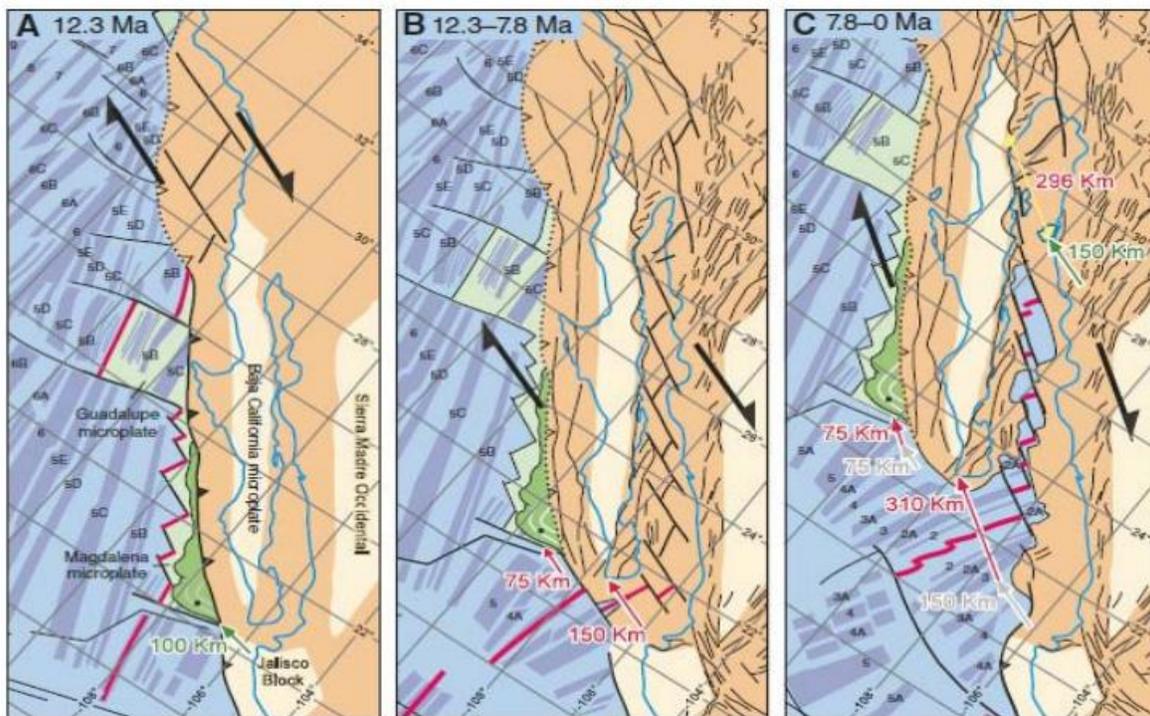


Fig. 3.1. Muestra el modelo a cerca de la apertura del Golfo de California propuesto por Fletcher *et al.*, (2007) en una sola fase (Fletcher *et al.*, 2007).

La Bahía de la Paz es un graben tectónico con orientación Norte-Sur (Fig. 3.2), las fallas de La Paz y el Carrizal son los límites del graben al oriente y occidente respectivamente (Álvarez, 1997). Gaitán-Morán (1986) indica que son el producto del desplazamiento diferencial (*en echelon NW-SE*) que se presentó entre las fallas transformantes en la boca del golfo asociadas a los procesos su formación. De acuerdo a las edades de las rocas asociadas, al graben se le asigna una edad pleistocénica (Arzate, 1986).

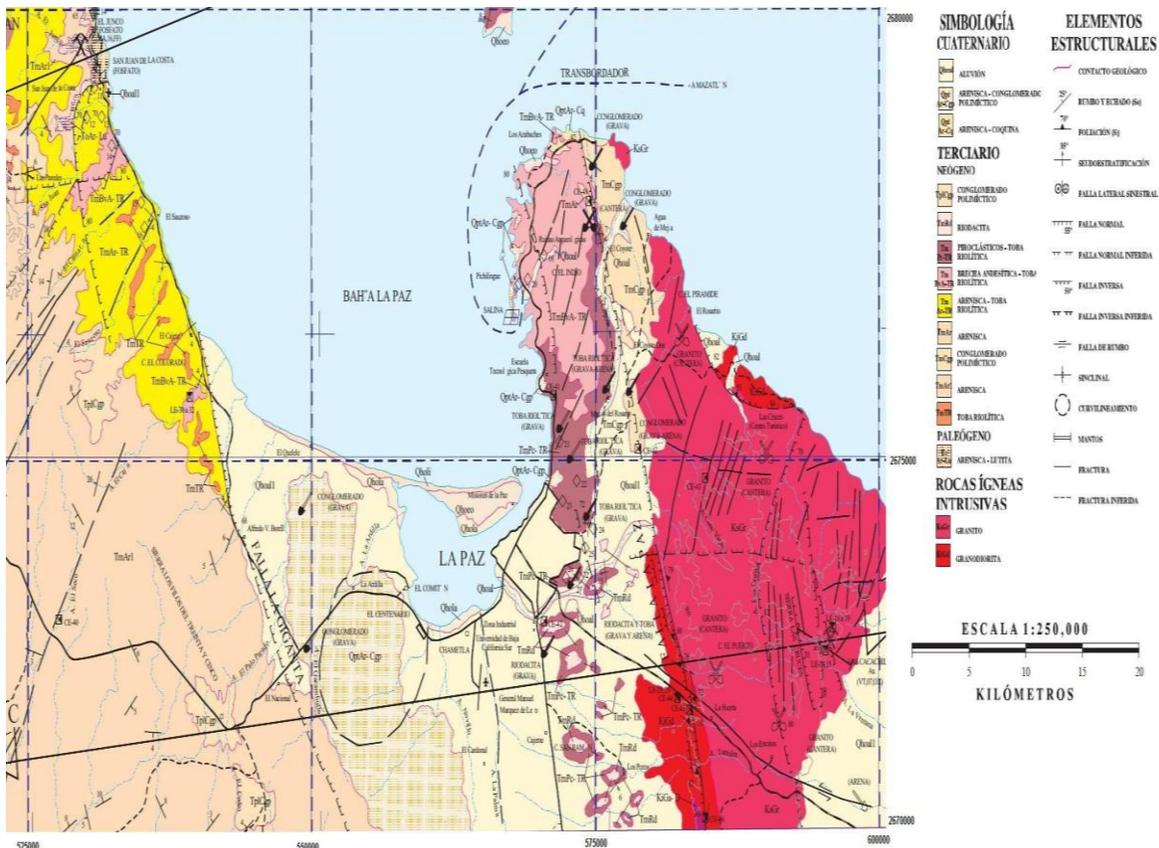


Fig. 3.2. Servicio Geológico Mexicano (1999). Carta Geológico-Minera modificada de La Paz, Baja California Sur. G12-10-11.

El sistema de fallas El Carrizal, tiene una extensión de más de 20 kilómetros. Este sistema se encuentra activo actualmente, debido a que muestra escarpes en sedimentos del cuaternario y un relieve morfológicamente joven (Gaitán, 1986; Aranda y Pérez, 1989)

El sistema de fallas La Paz, considerada como el límite entre dos provincias geológicas; al oeste se encuentran rocas volcano-sedimentarias y sedimentarias de Neógeno, mientras que al este se encuentran rocas metamórficas y graníticas de batolito de edad cretácica.

### 3.3 Litología

En la parte occidental de la bahía de La Paz afloran rocas que van desde el terciario medio al reciente y constituyen las formaciones San Gregorio, San Isidro y Comondú.

En la formación San Gregorio (Paleógeno, Oligoceno Tardío), Beal (1948) indicó que su litología consiste en rocas terciarias que afloran en el arroyo La Purísima. Consiste en lutitas cafés con abundantes diatomeas y fragmentos de peces, los cuerpos de roca están interestratificados con estratos silicificados cuya coloración varía de verde a negra. Además contiene intercalaciones de lutita y arenisca fosfática.

Hausback (1984) considera que esta formación se depositó en una zona marina cercana a la costa debido a la abundante presencia de mamíferos marinos y pocos corales y coquinas de pelecípodos.

La Formación San Isidro (Neógeno, Mioceno Temprano-Mioceno Medio). Heim (1922) señala que la formación está constituida por una intercalación de arenisca arcillosa y lutita. Además sugiere un ambiente de depósito costero, sin embargo Hausback (1984) sugiere un ambiente lagunar.

La Formación Comondú (Paleógeno, Oligoceno Tardío-Mioceno Medio) está formada por areniscas y conglomerados volcanoclásticos, tobas riolíticas, lahares andesíticos y flujos de lava coronando la secuencia.

En la zona central se encuentran rocas del periodo cuaternario, como aluvión, sedimentos de origen eólico, lacustre y de litoral.

La costa sur se caracteriza por una secuencia de sedimentos marinos aluviales recientes. En el graben tectónico se han depositado sedimentos de los cuales, los más comunes son arenas, limolitas y arcillas, que provienen de las elevaciones montañosas al oriente y occidente (Fig. 3.2).

En la zona oriental se encuentran algunas rocas volcánicas intrusivas como granitos y granodioritas.

### 3.4 Potencial Geotérmico

En la península de Baja California se encuentran dos de los principales campos geotérmico del país: 1) Cerro Prieto (inició en 1973) con una capacidad anual de 720 MW y 2) Las Tres Vírgenes en Baja California Norte (inició en el 2001) con una capacidad anual de 10 MW.

Actualmente la zona de estudio no ha tenido programas de exploración de sistemas geotérmicos, sólo los trabajos realizados por Prol-Ledesma *et al.* (2010) han generado información acerca de las manifestaciones geotérmica en la zona.

Sin embargo, en la zona termal de Agua Caliente en el municipio de Comondú se han identificado cuatro eventos tectónicos, algunos de ellos se consideran activos, dicho eventos favorecieron un fracturamiento intenso de las rocas.

Además la actividad volcánica relativamente reciente en la zona de estudio puede dar lugar a una fuente de calor y grandes posibilidades de encontrar sistemas geotérmicos en la región.

## 4. METODOLOGÍA

### 4.1 Realce espacial.

Para realizar el realce espacial se utilizó el *software* especializado ArcMap 10.1 de ArcGIS.

Como datos de entrada se utilizó el Continuo de Elevaciones Mexicano (CEM) 3.0 del Estado de Baja California Sur, descargado del INEGI con una resolución de 15 metros.

La metodología utilizada para el procesamiento del CEM fue la siguiente:

- a. El CEM fue re proyectado a coordenadas UTM.
- b. Se recortó la zona de estudio del CEM re proyectado.
- c. Se aplicó el filtro *hill-shade* en las direcciones : N, NE, E, SE, S, SW y NE con un azimut de 45°.
- d. Los lineamientos fueron definidos manualmente a diferentes escalas: 1:500000, 1:250000, 1: 100000, 1:80000 y 1:50000 con el fin de cubrir la mayor cantidad de lineamientos en la zona.
- e. Se realizaron mapas con todos los lineamientos obtenidos en las diferentes direcciones y a diferentes escalas.

### 4.2 Pre procesamiento de las imágenes satelitales.

Para éste trabajo se utilizaron imágenes obtenidas por el satélite Landsat 7 con el sensor ETM, las que fueron limitadas a una subimagen de aproximadamente 3046,653 km<sup>2</sup> del *Path* 34 y *Row* 43. Dichas imágenes fueron adquiridas el 26 de Octubre del 2001, se descargaron por cortesía de *U. S. Geological Survey*.

Además se utilizó el *software* especializado IDRISI 17.0 versión Selva de *Clark University*

De acuerdo a los objetivos del estudio sólo se utilizaran las bandas del sensor ETM: banda 1, banda 2, banda 3, banda 4, banda 5 y banda 7. Las bandas 6 y 8 no se utilizarán, debido a que la banda 6 pertenece a la parte del infrarrojo térmico del espectro electromagnético y la banda 8 es pancromática y no son útiles para los procesos que se realizan en este trabajo.

### Corrección Atmosférica.

Esta corrección se realizó debido a los errores causados por la dispersión atmosférica, donde se identificó el valor mínimo para cada banda y fue restado (Tabla 4.1).

Tabla 4.1. Muestra los valores máximos y mínimos de cada una de las bandas originales. Se extrajo el valor mínimo de cada una de las bandas originales para obtener las bandas corregidas.

<b>Bandas originales</b>	<b>Mínimo</b>	<b>Máximo</b>	<b>Bandas corregidas</b>	<b>Mínimo</b>	<b>Máximo</b>
ETM1	53	244	ETM1	0	191
ETM2	29	235	ETM2	0	206
ETM3	17	255	ETM3	0	238
ETM4	7	154	ETM4	0	147
ETM5	3	255	ETM5	0	252
ETM7	1	255	ETM7	0	254
ETM8	7	176	ETM8	0	169

### 4.3 Realce espectral.

Para el realce espectral se utilizó el software especializado IDRISI 17.0 versión Selva de *Clark University*, con el fin de identificar la presencia de óxidos e hidroxilos los cuales son minerales que pueden indicar actividad hidrotermal. También se busca el realce de la vegetación, pues en algunos casos, la cantidad de vegetación presente en la zona puede impedir la identificación de óxidos e hidroxilos.

Para este proceso se utilizaron tres técnicas: cocientes de bandas, análisis de componentes principales y componentes principales dirigidas. En el caso de las técnicas de cocientes de bandas y el análisis de componentes principales se identifican: óxidos de hierro, hidroxilos y vegetación. Para la técnica de componentes dirigidas sólo se identifican: óxidos de hierro e hidroxilos.

Además se realizaron composiciones en falso color RGB para representar los resultados obtenidos de las tres técnicas aplicadas.

### 4.3.1 Cocientes de bandas.

En seguida se describen los procedimientos realizados para la obtención de los cocientes de bandas donde se busca realizar la respuesta espectral de óxidos, hidroxilos y vegetación.

#### Identificación de óxidos

Para la identificación de óxidos se utiliza el cociente de bandas: bandas 3/1. A continuación se describe el procedimiento realizado para la obtención del cociente de bandas.

- a. Reclasificación de la banda 1. Al realizar la corrección atmosférica la banda 1 contiene píxeles cuyo ND (número digital) es cero y al realizar un cociente, existe un problema de indeterminación; por lo tanto se realiza una reclasificación donde todos los píxeles con ND=0 ahora serán igual a 1.
- b. Se realiza el cociente de bandas donde la banda 3 está en el numerador y la banda 1 reclasificada en el denominador.
- c. Se realiza un ajuste al histograma de la imagen del cociente de bandas, debido a que los números digitales de la imagen disminuirán drásticamente (al realizarse el cociente), por eso se ajusta el histograma. En este caso se utiliza una deformación lineal del histograma con saturación del 1%, esto significa que el 1% de los píxeles se saturarán, 0,5% del valor mínimo y 0,5% del valor máximo.

#### Identificación de hidroxilos

Para la identificación de hidroxilos se utiliza el cociente de bandas: bandas 5/7. A continuación se describe el procedimiento para la obtención del cociente de bandas.

- a. Reclasificación de la banda 7. Al realizar la corrección atmosférica la banda 7 contiene píxeles cuyo ND (número digital) es cero y al realizar un cociente, existe un problema de indeterminación; por lo tanto se realiza una reclasificación donde todos los píxeles con ND=0 ahora serán igual a 1.
- b. Se realiza el cociente de bandas donde la banda 5 está en el numerador y la banda 7 reclasificada en el denominador.
- c. Se realiza un ajuste lineal al histograma con una saturación del 1% a la imagen del cociente de bandas

## **Identificación de vegetación**

Para la identificación de vegetación se utiliza el cociente de bandas: bandas 4/3. A continuación se describe el procedimiento para la obtención del cociente de bandas.

- a. Reclasificación de la banda 3. Al realizar la corrección atmosférica la banda 1 contiene píxeles cuyo ND (número digital) es cero y al realizar un cociente, existe un problema de indeterminación; por lo tanto se realiza una reclasificación donde todos los píxeles con ND=0 ahora serán igual a 1.
- b. Se realiza el cociente de bandas donde la banda 4 está en el numerador y la banda 3 reclasificada en el denominador.
- c. Se realiza un ajuste lineal del histograma con una saturación del 1% a la imagen del cociente de bandas obtenido.

## **Realce de óxidos e hidroxilos**

Una vez obtenidos los cocientes de bandas para la identificación de óxidos e hidroxilos se realiza una suma de las imágenes obtenidas con el fin de resaltar en la misma imagen ambos grupos minerales.

- a. Se suman las dos imágenes obtenidas con los cocientes de bandas TM3/TM1 y TM5/TM7.
- b. Se realiza un ajuste lineal al histograma de la nueva imagen para mejorar su visualización.

### **4.3.2 Análisis de componentes principales**

A continuación se describen los procedimientos realizados para la obtención de las componentes principales y su análisis.

- a. Realizar una máscara para eliminar el ruido producido por el mar contenido en la imagen. Usando la banda 4 (Infrarrojo cercano) donde el agua presenta una mayor absorción, para ello se obtiene una imagen booleana, donde el mar tiene ND=0 y el resto de la imagen ND=1.
- b. Para realizar el análisis de componentes principales se utilizan las bandas 1, 2, 3, 4, 5 y 7 corregidas, donde también se utiliza la máscara creada para eliminar el ruido producido por el mar, obteniendo como resultado seis nuevas componentes.

- c. Analizar la matriz de carga obtenida del análisis de componentes principales para determinar qué componente o componentes principales son los apropiados para el realce de los materiales.

#### **4.3.3 Componentes principales dirigidas**

Utilizando la técnica de Crosta, propuesta por Crosta y McM. Moore (1989) donde describe una metodología llamada FPCS (*Feature Oriented Principal Components*) basada en el análisis de la matriz de carga para decidir en cuál componente principal se concentra la información directamente relacionada con la firma espectral teórica de materiales específicos y el método de Loughlin (1991), se realizan los siguientes procedimientos.

##### **Identificación de hidroxilos.**

- a. Utilizando las bandas 1, 4, 5 y 7 corregidas, se realiza un análisis de componentes principales donde también se utiliza la máscara creada anteriormente. Obteniendo como resultado cuatro nuevas componentes.
- b. Analizar la matriz de carga obtenida del análisis de componentes principales para determinar qué componente se utiliza para la identificación de hidroxilos.
- c. Una vez identificada la componente que permita un mejor realce de hidroxilos se realiza un ajuste lineal del histograma para mejorar su visualización.

##### **Identificación de óxidos.**

- a. Utilizando las bandas 1, 3, 4 y 5 corregidas, se realiza un análisis de componentes principales utilizando la máscara creada anteriormente. Obteniendo como resultado cuatro nuevas componentes.
- b. Analizar la matriz de carga obtenida del análisis de componentes principales para determinar cuál componente se utiliza para la identificación de óxidos.
- c. Una vez identificada la componente que permita un mejor realce de óxidos se realiza un ajuste lineal del histograma para mejorar su visualización.

### **Realce de óxidos e hidroxilos.**

- a. Se realiza una suma de las dos imágenes obtenidas con las componentes principales para la identificación de óxidos e hidroxilos para obtener una imagen con ambos realces espectrales.
- b. Se realiza un ajuste lineal del histograma de la imagen para mejorar su visualización.

#### **4.3.4 Composiciones RGB.**

Una vez obtenidos los cocientes de bandas y las componentes principales donde se identifican las imágenes que presentan un mejor realce de los grupos de minerales, se realizan composiciones RGB en falso color.

- a. Composiciones RGB para los cocientes de bandas.
  - i. Se realiza una composición en falso color RGB (Red, Green, Blue): en la banda del color rojo está el cociente  $TM3/TM1$  (óxidos), en la banda de color verde el cociente  $TM4/TM3$  (vegetación) y en la banda del color azul el cociente  $TM5/TM7$  (hidroxilos).
  - ii. Se realiza una composición en falso color RGB: en la banda del rojo está el cociente  $TM3/TM1$ , en la banda de color verde el cociente  $TM5/TM7$  y en la banda del color azul la imagen obtenida de la suma de las dos anteriores
- b. Composiciones RGB del análisis de componentes principales.
  - i. Se realiza una composición en falso color RGB: en la banda del color rojo, está la componente principal que indica óxidos, en la banda de color verde, la componente principal que indica vegetación y en la banda del color azul, la componente principal que indica hidroxilos.
  - ii. Se realiza una composición en falso color RGB: en la banda del color rojo está la componente principal que indica óxidos, en la banda de color verde, la componente principal que indica hidroxilos y en la banda del color azul, la imagen de la suma de las dos componentes principales anteriores.

La Tabla 4.2 Muestra en resumen los procesos descritos anteriormente para el realce espectral aplicado a las imágenes.

Tabla 4.2. Procesos realizados para el realce espectral de las imágenes. (\*) Se realizó un ajuste lineal del histograma.

<b>Cocientes de bandas</b>	Óxidos* TM3/TM1	
	Hidroxiolos* TM5/TM7	
	Vegetación* TM4/TM3	
	Óxidos + Hidroxiolos*	
<b>Análisis de componentes principales</b>	Usando 6 bandas (1, 2, 3, 4, 5 y 7) 1. Analiza la matriz de carga 2. Escogen las componentes principales apropiadas*	
<b>Componentes principales dirigidas</b>	Óxidos (usando las bandas 1, 3, 4 y 5)	1. Se analiza la matriz de carga. 2. Se escoge la componente principal apropiada*.
	Hidroxiolos (usando las bandas 1, 4, 5 y 7)	1. Se analiza la matriz de carga. 2. Se escoge la componente principal apropiada*.
	Óxidos + Hidroxiolos*	
<b>Composiciones RGB</b>	Cocientes de Bandas	R=óxidos G=vegetación B=hidroxiolos
		R=óxidos G=hidroxiolos B=óxidos + hidroxiolos
	Componentes principales	R=óxidos G=vegetación B=hidroxiolos
		R=óxidos G=hidroxiolos B=óxidos + hidroxiolos

#### 4.4 Integración de la información.

La información fue integrada en mapas; los realces espectrales y el realce espacial para la identificación y definición de zonas con actividad hidrotermal.

- a. Mapas integrados con el realce espectral obtenido a partir de los cocientes de bandas y los lineamientos.
- b. Identificación y definición de zonas con actividad hidrotermal relacionada a los lineamientos.
- c. Mapas integrados con el realce espectral obtenido a partir del análisis de componentes principales y los lineamientos.
- d. Identificación y definición de zonas con actividad hidrotermal, relacionada a los lineamientos.

## 5. RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

### 5.1 RESULTADOS

Los resultados de los procedimientos aplicados al modelo digital de elevación y la imagen satelital se presentan a continuación.

#### 5.1.1 Mapas de lineamientos

En los mapas de lineamientos se muestran, todos los lineamientos encontrados en las direcciones: norte, noreste, este, sureste, sur, suroeste, oeste y noroeste, usando el CEM. En cada mapa, los lineamientos están indicados en color rojo.

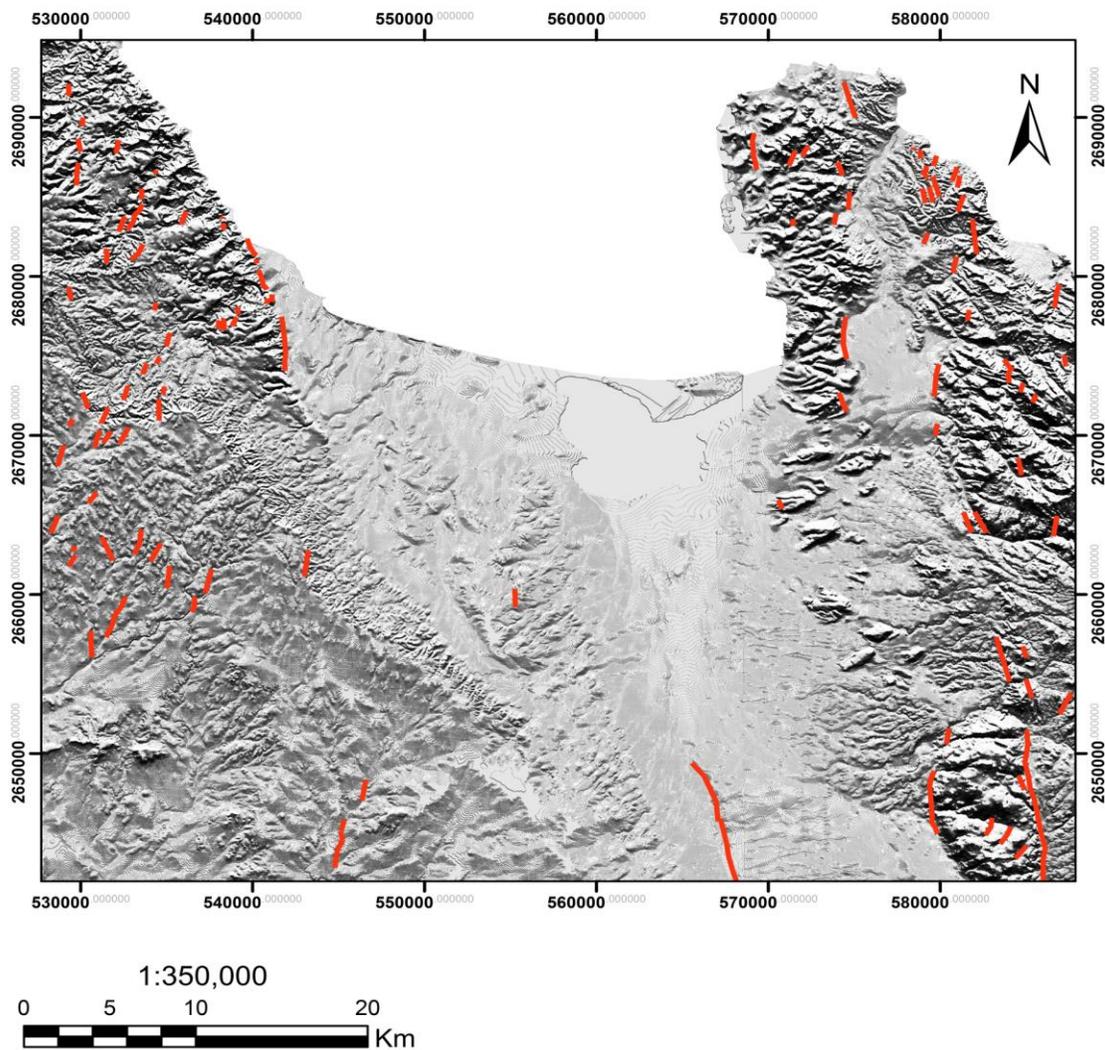


Fig. 5.1.1. Mapa de los lineamientos obtenidos en la dirección norte.

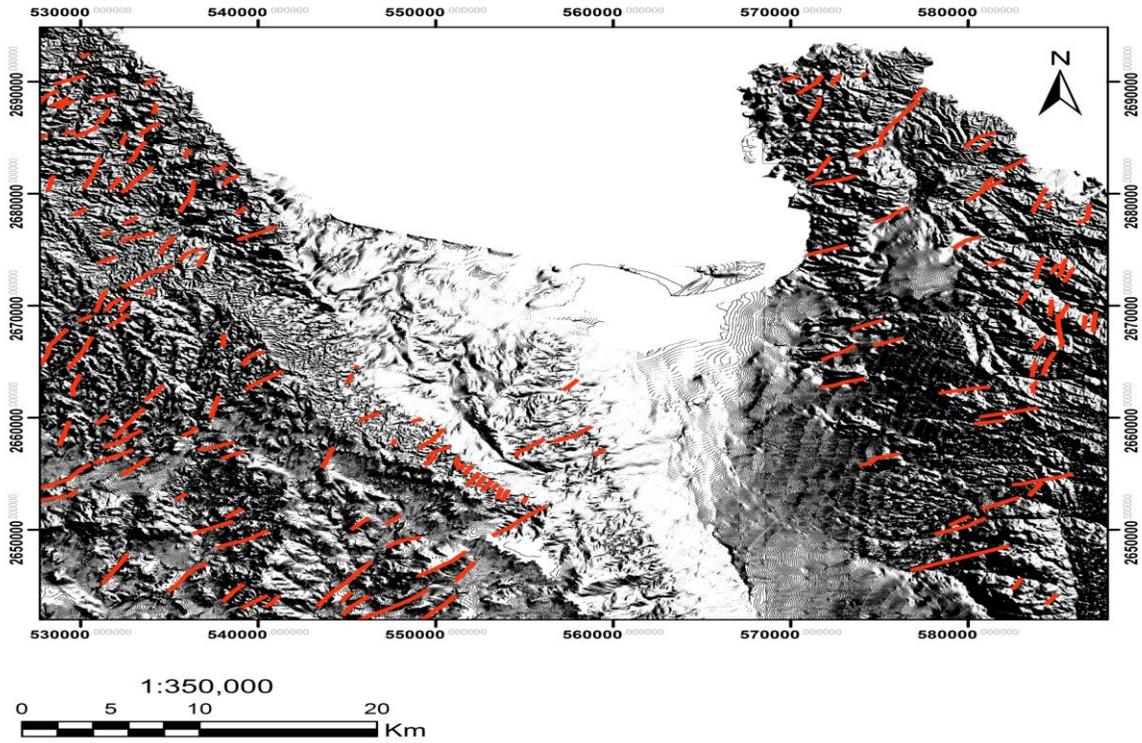


Fig. 5.1.2. Mapa de los lineamientos obtenidos en la dirección noreste.

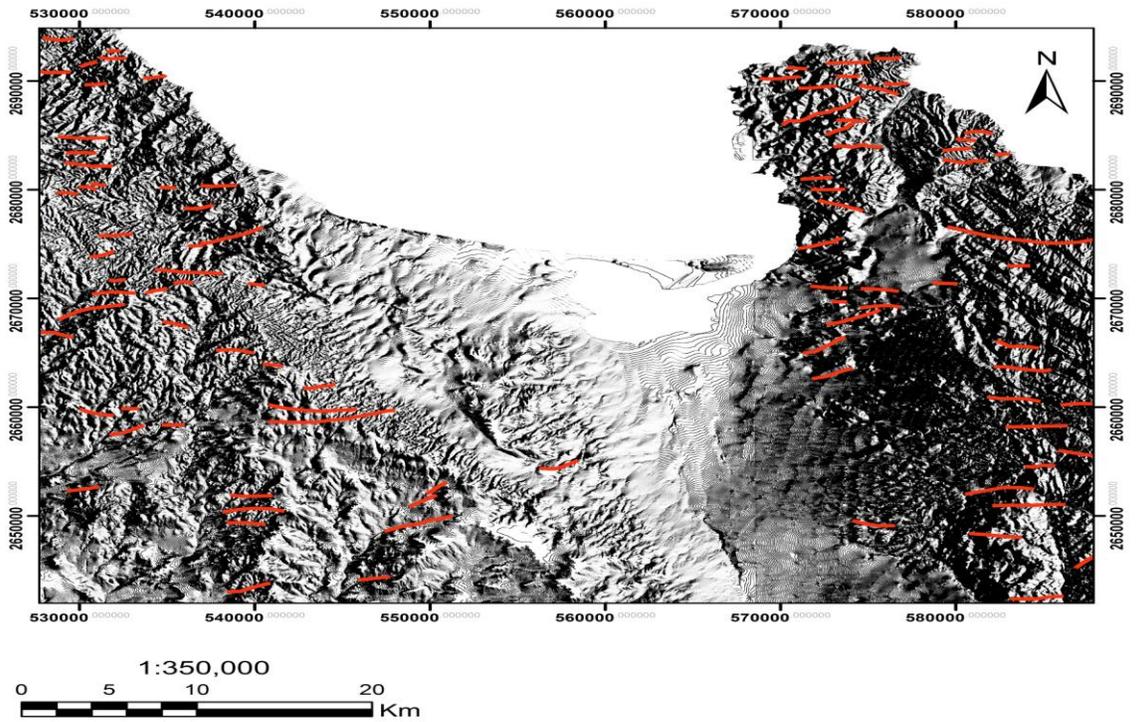


Fig. 5.1.3. Mapa de los lineamientos obtenidos en la dirección este.

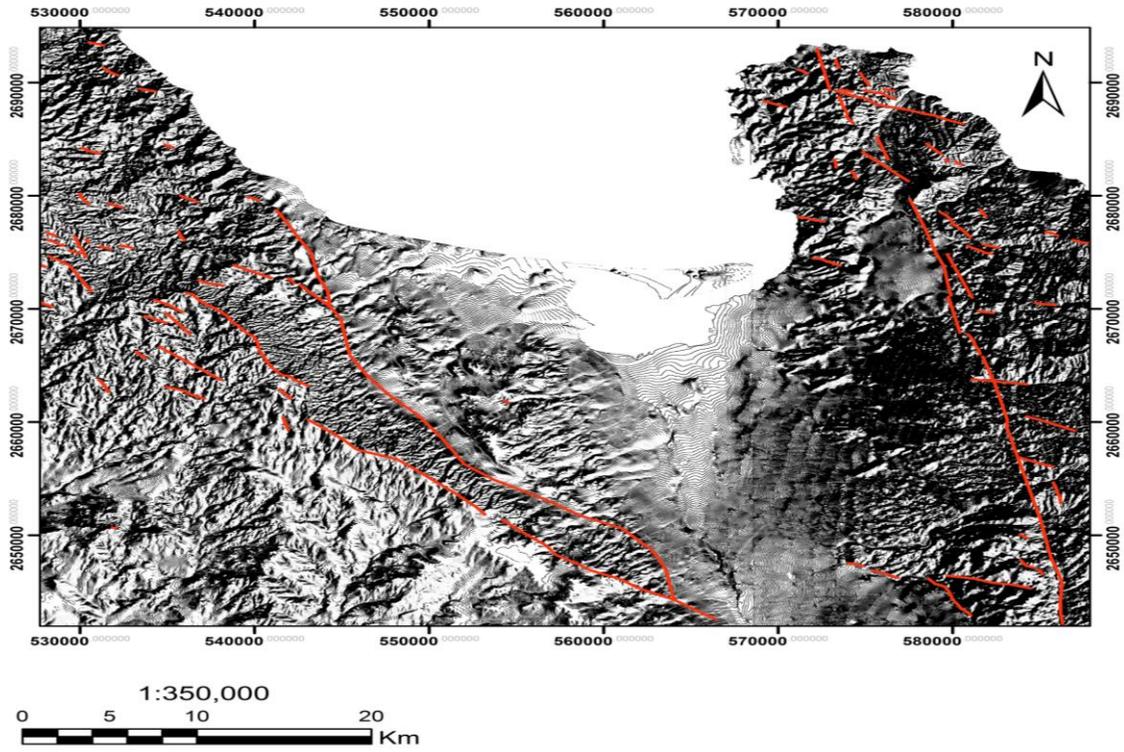


Fig. 5.1.4. Mapa de los lineamientos obtenidos en la dirección sureste.

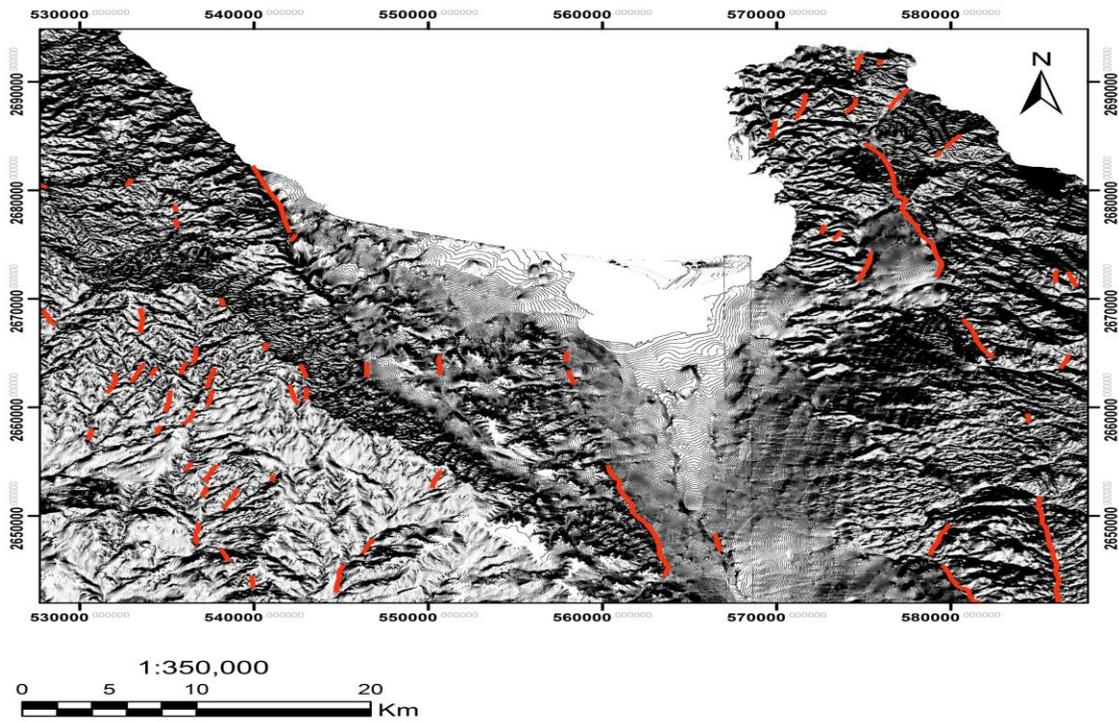


Fig. 5.1.5. Mapa de los lineamientos obtenidos en la dirección sur.

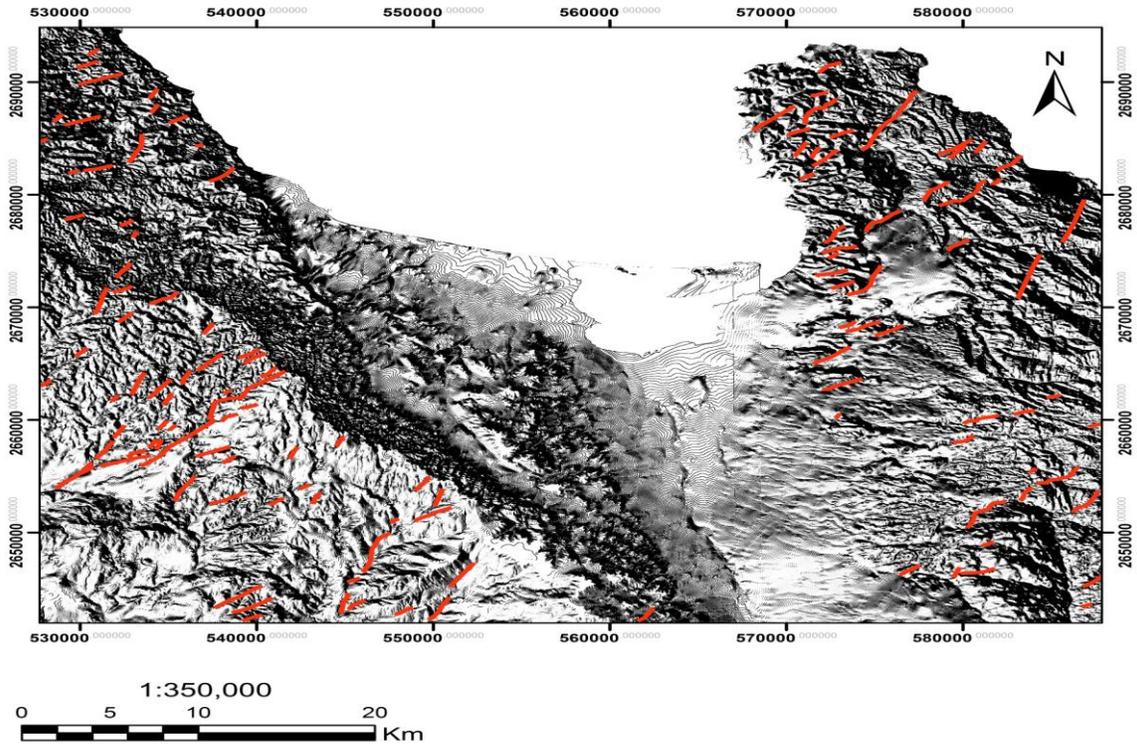


Fig. 5.1.6. Mapa de los lineamientos obtenidos en la dirección suroeste.

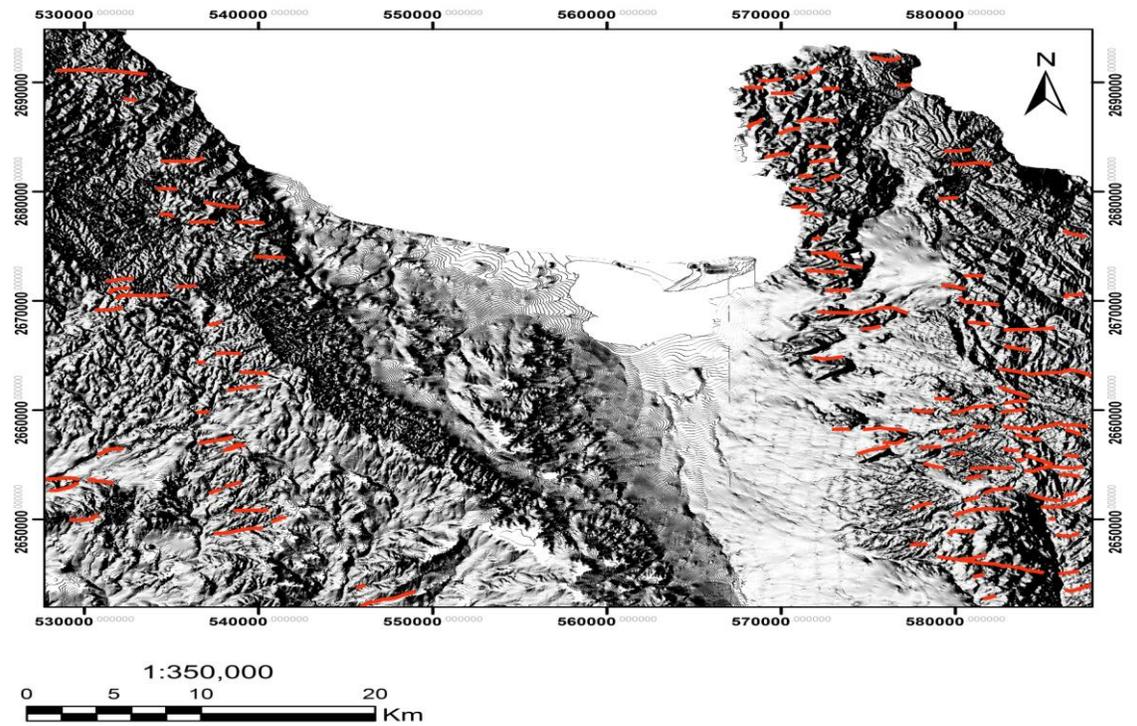


Fig. 5.1.7. Mapa de los lineamientos obtenidos en la dirección oeste.

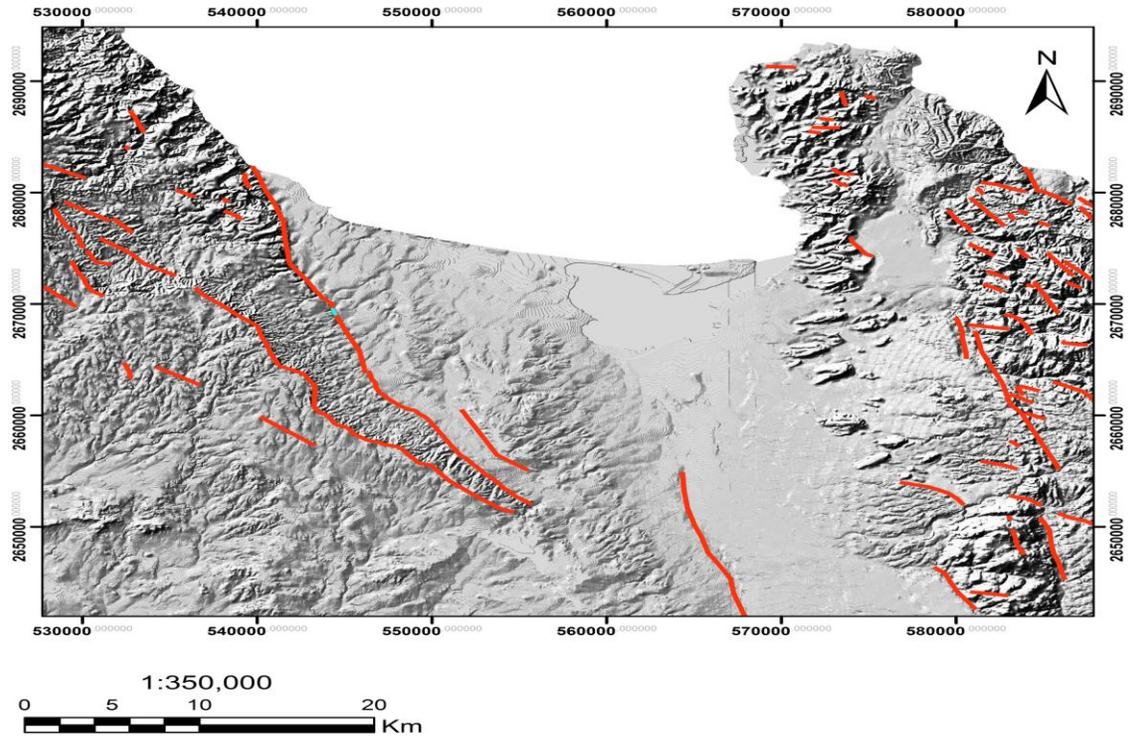


Fig. 5.1.8. Mapa de los lineamientos obtenidos en la dirección noroeste.

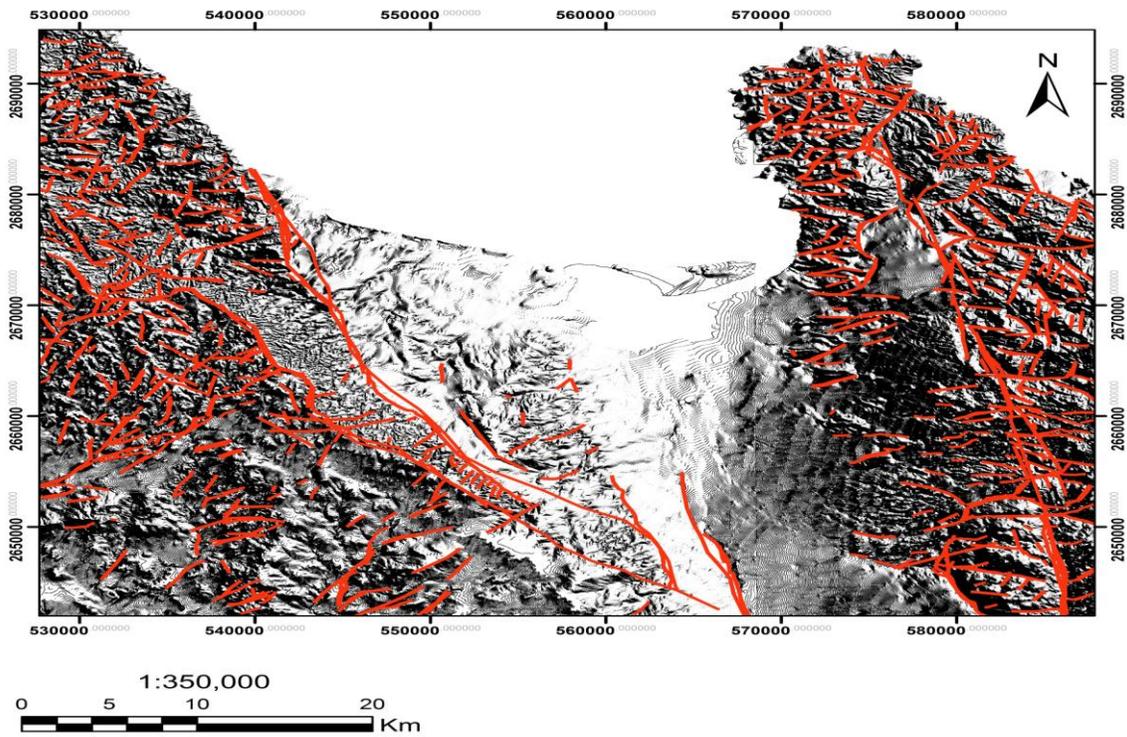


Fig. 5.1.9. Mapa de los lineamientos obtenidos en todas las direcciones.

### 5.1.2 Mapas de alteraciones hidrotermales.

A continuación se muestran los mapas obtenidos a partir del realce espectral con las diferentes técnicas.

#### Mapas de cocientes de bandas.

En la Fig. 5.2.1 se muestra el realce espectral de hidroxilos utilizando el cociente de bandas TM5/TM7 y se aplicó un ajuste lineal con saturación del 1% de los datos para mejorar su visualización. La zona más brillante indica el lugar donde hay un mayor contraste entre ambas bandas y está delimitada por el rectángulo rojo.

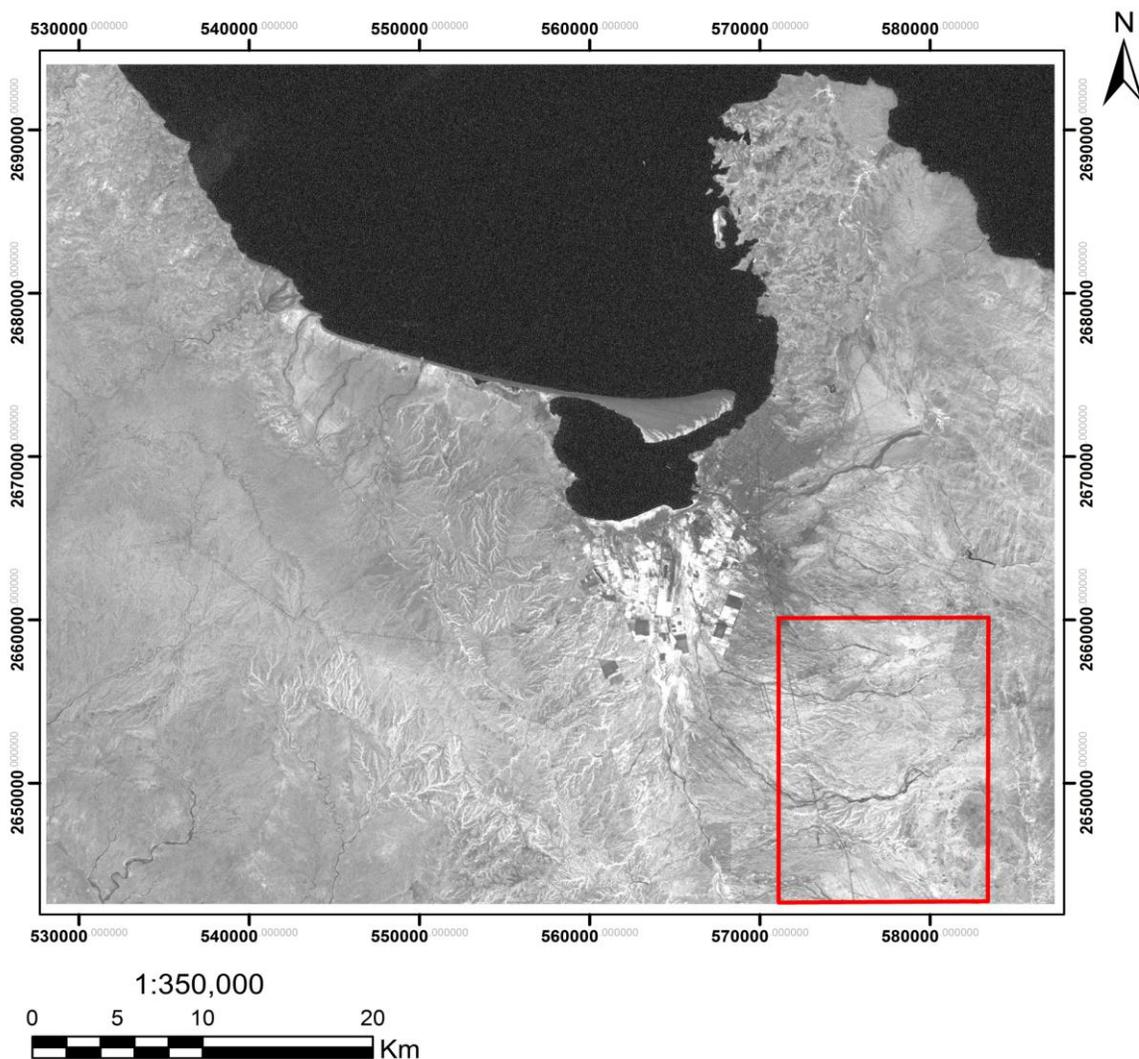


Fig. 5.2.1. Mapa del cociente de bandas para el realce de hidroxilos.

En la Fig. 5.2.2 se muestra el mapa del realce espectral de óxidos utilizando el cociente de bandas TM3/TM1 y además se aplicó un ajuste lineal del histograma con una saturación del 1% de los datos para mejorar su visualización. La zona más brillante indica el lugar donde hay un mayor contraste entre ambas bandas y está delimitada por el rectángulo rojo.

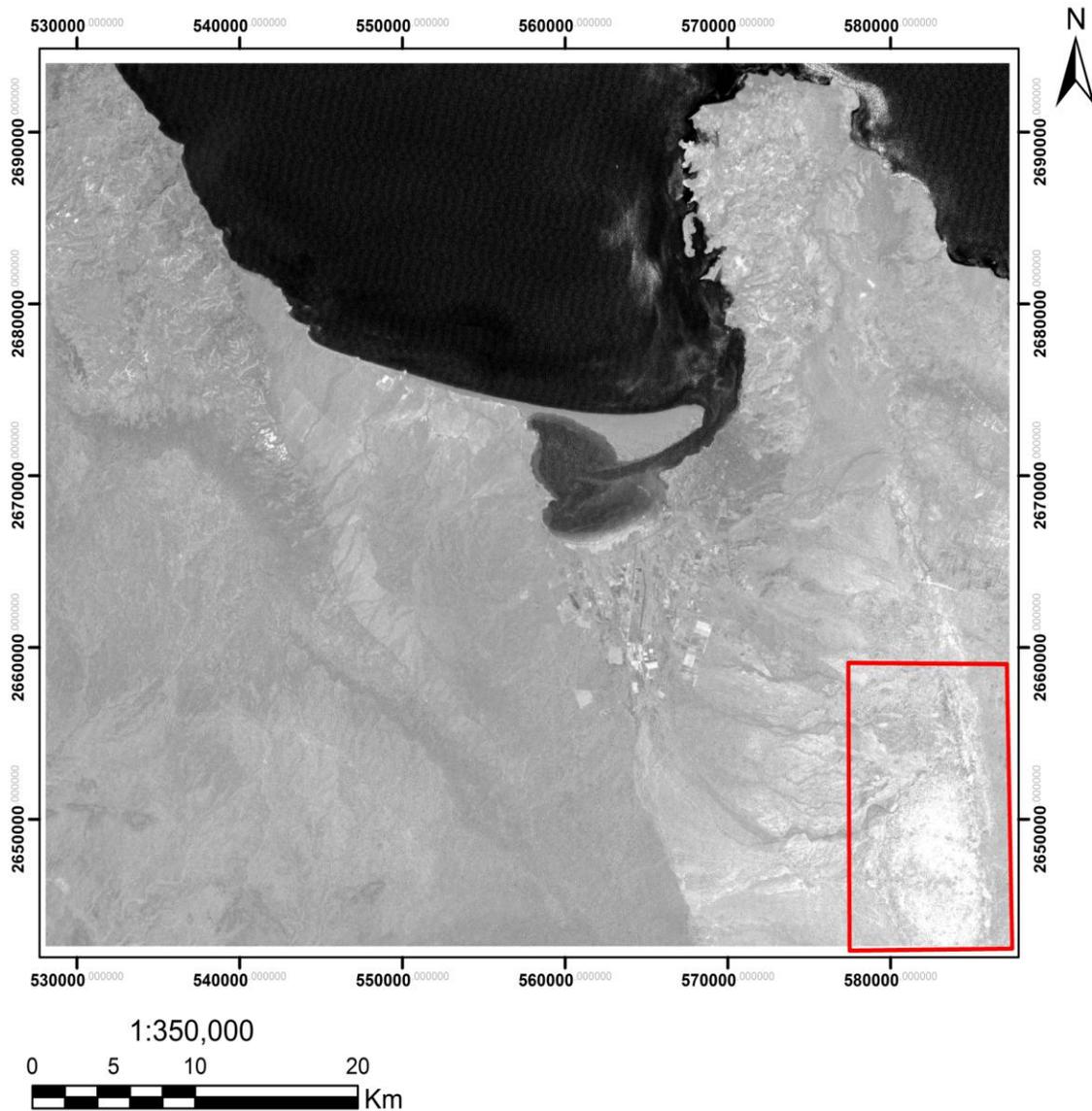


Fig. 5.2.2. Mapa del cociente de bandas para el realce de óxidos.

En la Fig. 5.2.3 se muestra el mapa del realce espectral de la vegetación utilizando el cociente de bandas TM4/TM3 y además se aplicó un ajuste lineal con saturación del 1% de los datos para mejorar su visualización. Las zonas más brillantes indican los lugares donde hay un mayor contraste entre dichas bandas, las cuales fueron delimitadas por los rectángulos rojos.

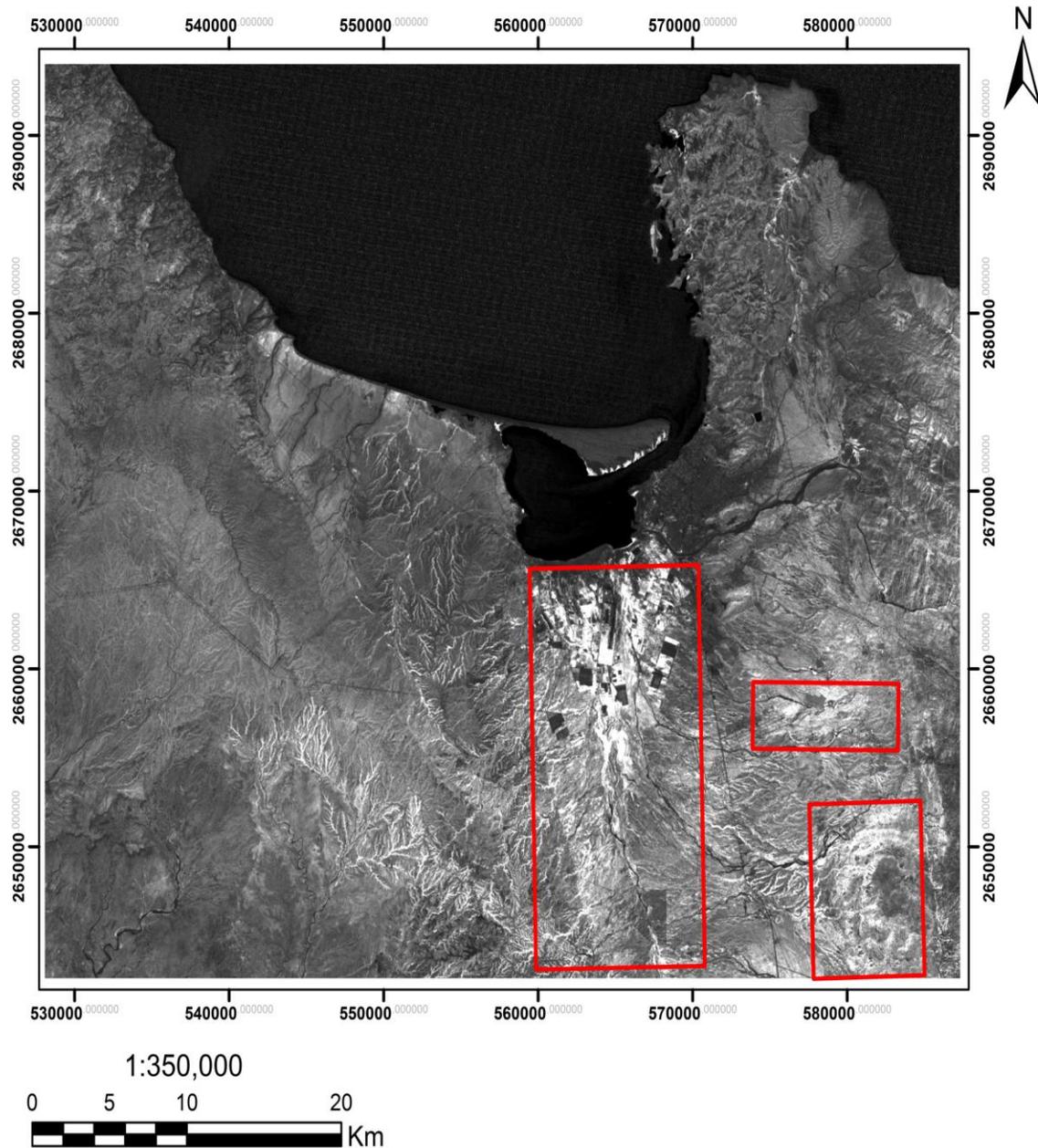


Fig. 5.2.3. Mapa del cociente de bandas para el realce de vegetación.

La Fig. 5.2.4 muestra una suma de las imágenes de los mapas de la Fig. 5.2.1 y la Fig. 5.2.2 con el objetivo de resaltar las zonas donde se encuentren óxidos e hidroxilos, además se realizó un ajuste lineal con saturación del 1% para mejorar la visualización de los datos, la zona más brillante fue delimitada por el rectángulo rojo.

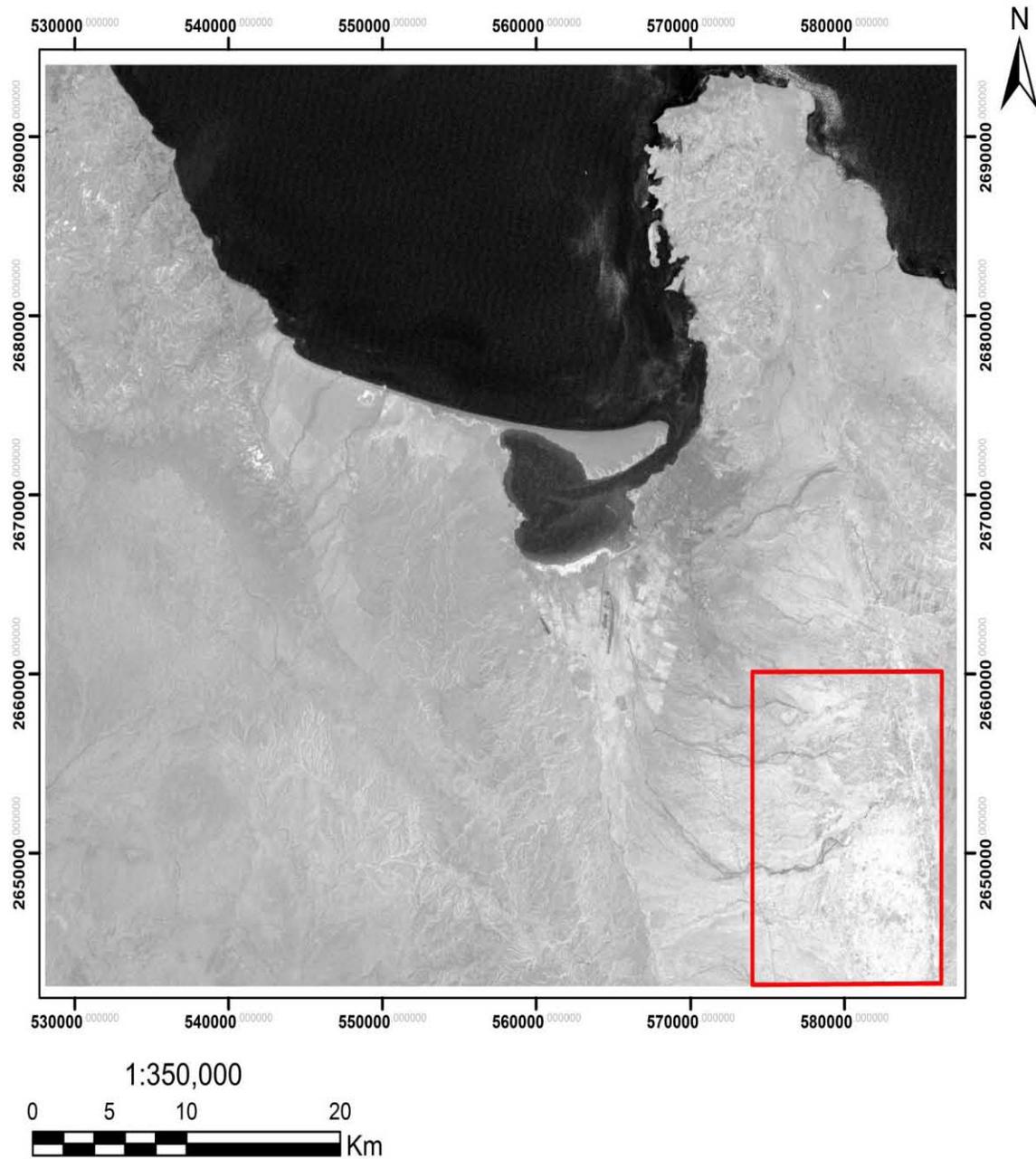


Fig. 5.2.4. Mapa de la suma de los cocientes de bandas para el realce de óxidos e hidroxilos.

## Mapas utilizando el análisis de componentes principales.

Los mapas obtenidos a partir del análisis de componentes principales y componentes principales dirigidas se muestran a continuación.

### Análisis de componentes principales.

La Tabla 5.1 muestra la matriz de carga como resultado del análisis de componentes principales donde se utilizaron las bandas 1, 2, 3, 4, 5 y 7 y se obtuvieron 6 nuevas componentes.

Tabla 5.1. Matriz de carga obtenida a partir del análisis de componentes principales.

T-MOD LOADIG	C 1	C 2	C 3	C 4	C 5	C 6
% Varianza	89.053812	7.360512	2.887584	0.319217	0.298732	0.080146
BPC_B1	0.928008	-0.326760	0.115138	-0.078761	0.099639	0.051387
BPC_B2	0.965078	-0.211996	0.132519	-0.024347	0.034438	-0.065889
BPC_B3	0.967009	-0.240926	0.038172	0.030759	-0.065714	0.011250
BPC_B4	0.648238	0.559688	0.510991	0.069929	0.018737	0.013601
BPC_B5	0.951578	0.289778	-0.076503	-0.062343	-0.028072	-0.000031
BPC_B7	0.974478	0.089763	-0.185491	0.070258	0.054693	0.000497

La primera componente (C1), representa la información debida a la topografía y al albedo, ésta es una mezcla positiva de todas las bandas teniendo el 89,05% de la varianza.

La segunda componente (C2) con un 7,36 % de la varianza, está relacionada a la vegetación, debido a los rasgos de absorción que presenta en la banda 3 con una contribución negativa de -0,240926 y la alta reflectancia en la banda 4 con una contribución positiva de 0,559688. Por lo tanto, en la C2 la vegetación se observará en tonos brillantes.

La componente 3 (C3) muestra una contribución positiva de las bandas 1,2 3 y 4 y negativa en las bandas 5 y 7; por lo tanto ésta, no podrá ser utilizada para la identificación de ningún grupo mineral o vegetación.

En la componente 4 (C4) se presentan algunos rasgos para la identificación de óxidos e hidroxilos. En el caso de los hidroxilos existe una contribución negativa en la banda 5 con -0,062342 y una positiva en la banda 7 con 0,070258 y por lo tanto estos se observan en

tonos oscuros. Para la identificación de óxidos, en la banda 3, se tiene una contribución positiva con 0,030759 y una negativa en la banda 1 con -0,078761, éstos se observan en tonos claros.

La componente 5 (C5) presenta contribuciones mayores que la C4 en las bandas 1 y 3 por lo que podría utilizarse para la identificación de óxidos en lugar de la C4, sin embargo, muestra una contribución menor que la observada en el análisis de componentes dirigidas.

La componente 6 presenta contribuciones muy pequeñas por lo que la mayor parte es ruido y no es conveniente utilizarla en la identificación de minerales.

La Fig. 5.2.5 es un mapa de la segunda componente del análisis de componentes principales con seis bandas además se realizó un ajuste lineal con saturación del 1%, los píxeles más brillantes indican las zonas donde existe vegetación y están delimitadas por los rectángulos rojos.

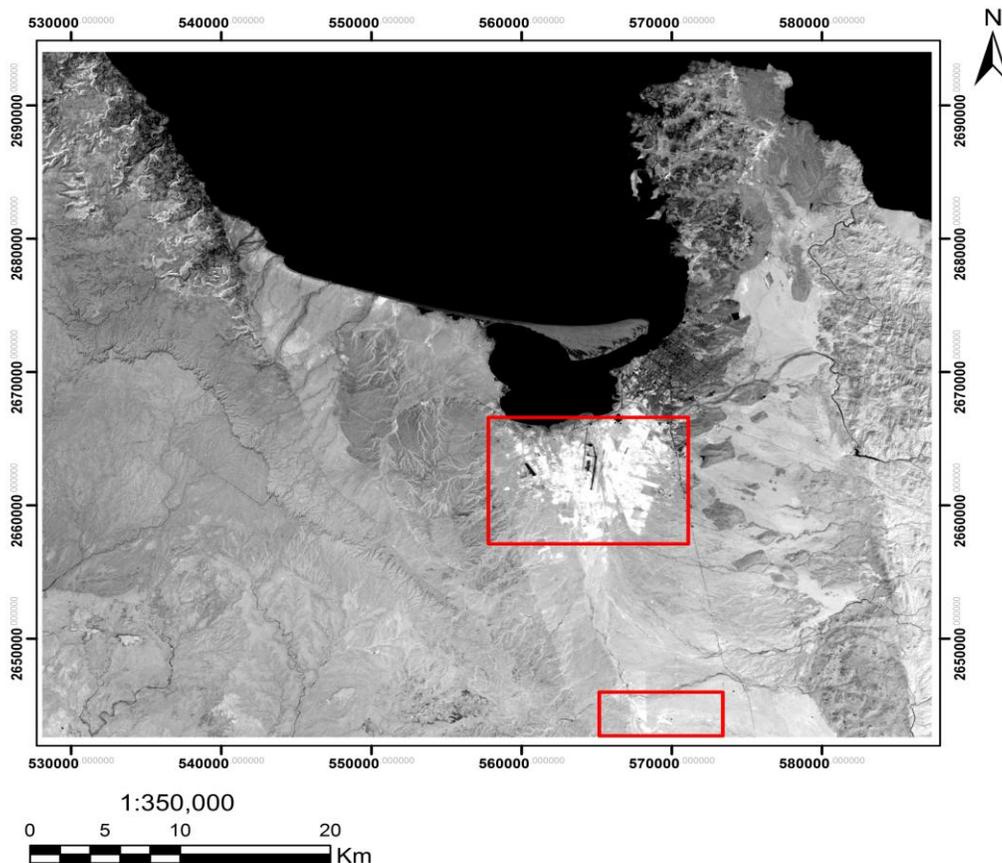


Fig. 5.2.5. Mapa del realce espacial para vegetación utilizando la segunda componente del análisis de componentes principales con 6 bandas con un *stretch* lineal con saturación del 1%.

## Componentes principales dirigidas para la identificación de hidroxilos

En la Tabla 5.2 se muestra la matriz de carga obtenida en el análisis de componentes principales dirigidas con cuatro bandas para el realce de hidroxilos, estas bandas fueron las banda 1, 4, 5 y 7

Tabla 5.2. Matriz de carga obtenida en el análisis de componentes principales dirigidas para el realce de hidroxilos.

T-MODE LOADING	C 1	C 2	C 3	C 4
% Varianza	89.022509	7.144104	3.321133	0.512256
BPC_B1	0.855311	-0.361803	0.368903	-0.038111
BPC_B4	0.709999	0.643169	0.278261	0.069326
BPC_B5	0.989196	0.096026	-0.087379	-0.068079
BPC_B7	0.983220	-0.134225	-0.088535	0.086159

En la primera componente (C1) se encuentra un 89,022509 % de la varianza de las cuatro bandas, dicha información puede ser atribuida a la topografía y el albedo, por lo tanto esta componente no será utilizada en la identificación de minerales de alteración.

La segunda componente (C2) tiene un 7,144104 % de la varianza. La contribución de la banda 4 es mayor que cualquier otra banda, por lo tanto esta componente está dominada por la vegetación.

La tercera componente (C3) con un 3,321133% de la varianza de las cuatro bandas, muestra una carga balanceada en las bandas 5 y 7 con el mismo signo y por lo tanto no puede ser utilizada para la identificación de hidroxilos.

La cuarta componente (C4) con un 0,512256% de la varianza de las cuatro bandas, puede ser usada para la identificación de hidroxilos, hay una contribución negativa (-0,068079) de la banda 5 donde los hidroxilos presentan rasgos de reflectancia y una contribución positiva de la banda 7 (0,086159) donde los hidroxilos presentan rasgos de absorción; por lo tanto los hidroxilos se presentan en tonos oscuros. Para que los hidroxilos se presenten en tonos brillantes se obtiene la imagen inversa de la cuarta componente (Fig. 5.2.6).

En la Fig. 5.2.6 se muestra el mapa de la cuarta componente obtenida a partir del análisis de componentes principales usando cuatro bandas, las zonas más brillantes son asociadas a hidroxilos las cuales se encuentran delimitadas por los rectángulos rojos.

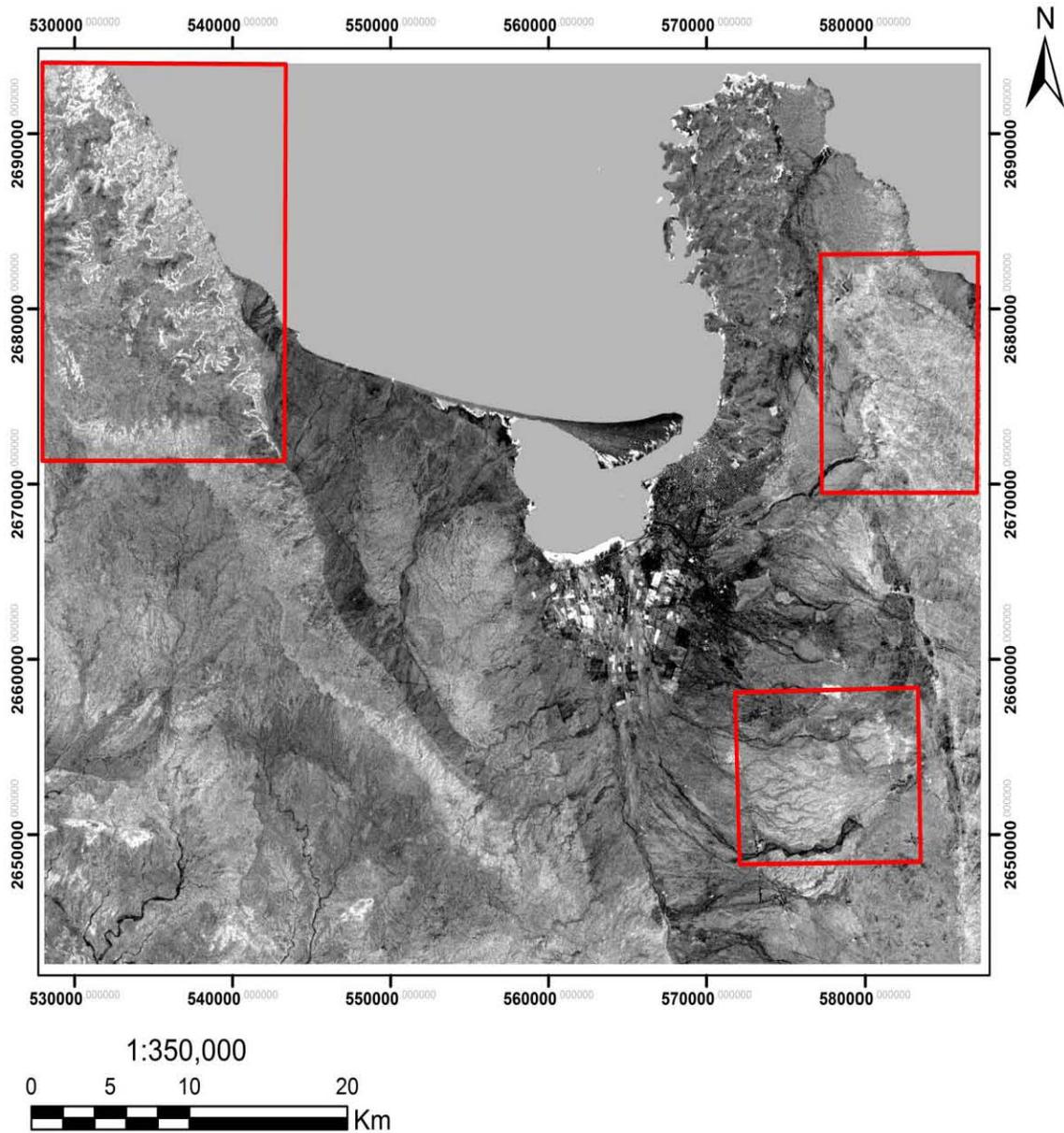


Fig. 5.2.6. Mapa del realce espectral para hidroxilos utilizando la imagen inversa de la cuarta componente del análisis de componentes dirigidas con 4 bandas y un ajuste lineal con saturación del 1%.

## Componentes principales dirigidas para la identificación de óxidos

En la Tabla 5.3 se muestra la matriz de carga obtenida en el análisis de componentes principales dirigidas con cuatro bandas para el realce de óxidos de hierro, estas bandas son la 1, 3, 4 y 5.

Tabla 5.3 Matriz de carga obtenida en el análisis de componentes principales dirigidas para el realce de óxidos de hierro.

T-MODE LOADING	C 1	C 2	C 3	C 4
% Varianza	86.777536	9.973474	2.827767	0.021227
BPC_B1	0.926133	-0.325059	-0.122119	0.147312
BPC_B3	0.964987	-0.252934	-0.038540	-0.057780
BPC_B4	0.672707	0.607818	-0.421627	-0.015948
BPC_B5	0.953295	0.260376	0.152434	0.013997

En la primera componente (C1) tiene un 86,77 % de la varianza de las cuatro bandas, por lo tanto la información puede ser interpretada como el efecto topográfico y el albedo.

La segunda componente (C2) con un 9,973473% de la varianza, tiene la contribución más grande en la banda 4, es por ello que la vegetación se presenta en tonos brillantes en la imagen de dicha componente.

La tercera componente (C3) con un 2,827767 % de la varianza, al igual que la C2 tiene la contribución más grande en la banda 4 (pero de signo negativo), además contiene información similar en las bandas del visible (1 y 3).y no puede ser usada para la identificación de óxidos de hierro.

La cuarta componente (C4) puede ser utilizada para la identificación de óxidos de hierro pues la contribución positiva más grande está contenida en la banda 1 con 0,147312 donde los óxidos presentan rasgos característicos de absorción y una contribución negativa de -0,57780, por lo tanto los óxidos de hierro se presentarán en tonos oscuros.

Para que los óxidos de hierro se presenten en tonos brillantes se obtiene la imagen inversa de la C4 (Fig. 5.2.7), donde la zona con los píxeles más brillantes fue delimitada por el rectángulo rojo.

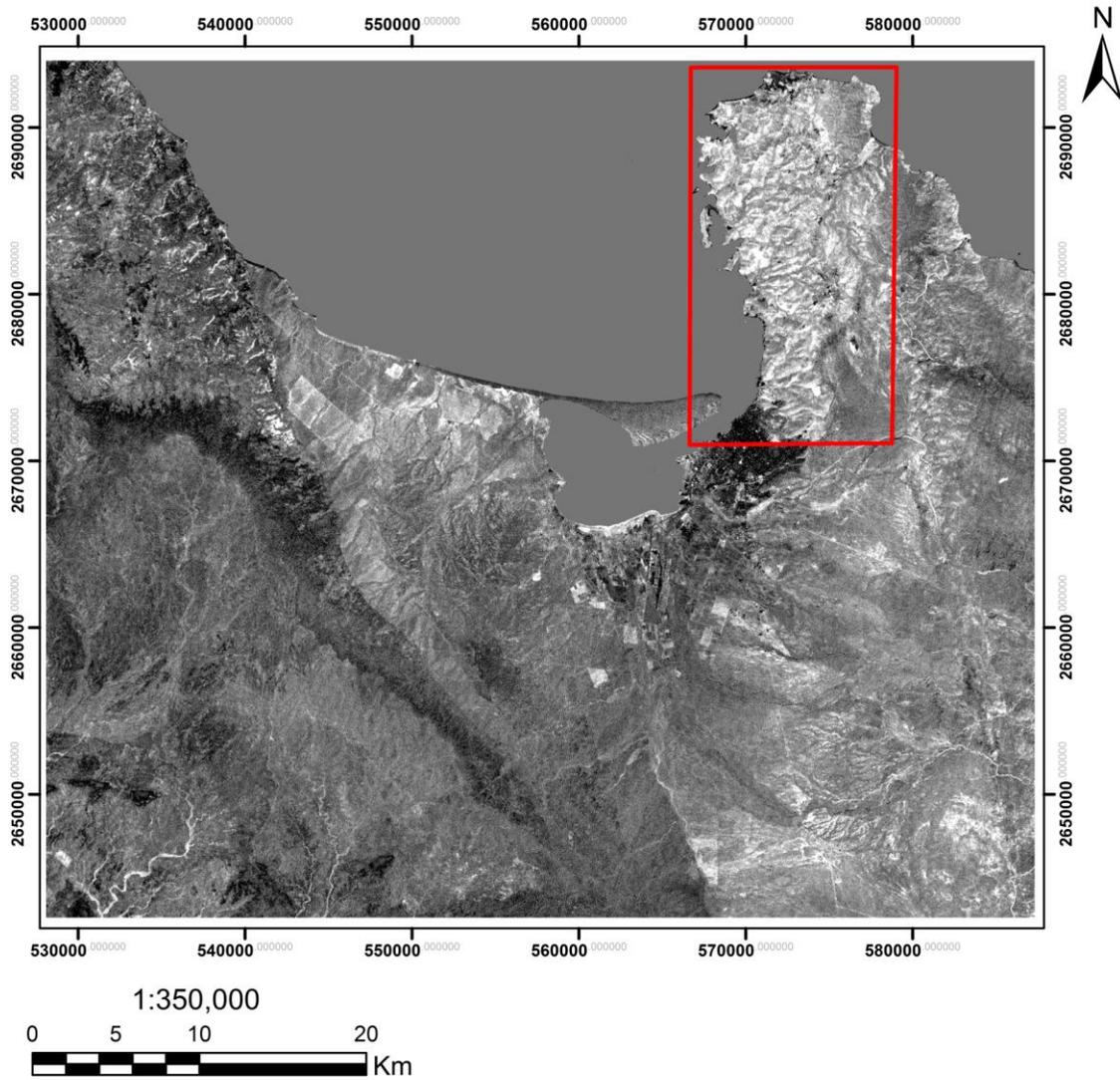


Fig. 5.2.7. Mapa del realce espectral para óxidos utilizando la imagen inversa de la cuarta componente del análisis de componentes dirigidas con 4 bandas y un ajuste lineal con saturación del 1%.

La Fig. 5.2.8 muestra el mapa de la suma de las imágenes de la Fig. 5.2.6 y la Fig. 5.2.7 para obtener la suma de óxidos e hidroxilos, en donde las mayores concentraciones, tanto de óxidos de hierro, como de hidroxilos están en las zonas más brillantes delimitadas por los rectángulos rojos.

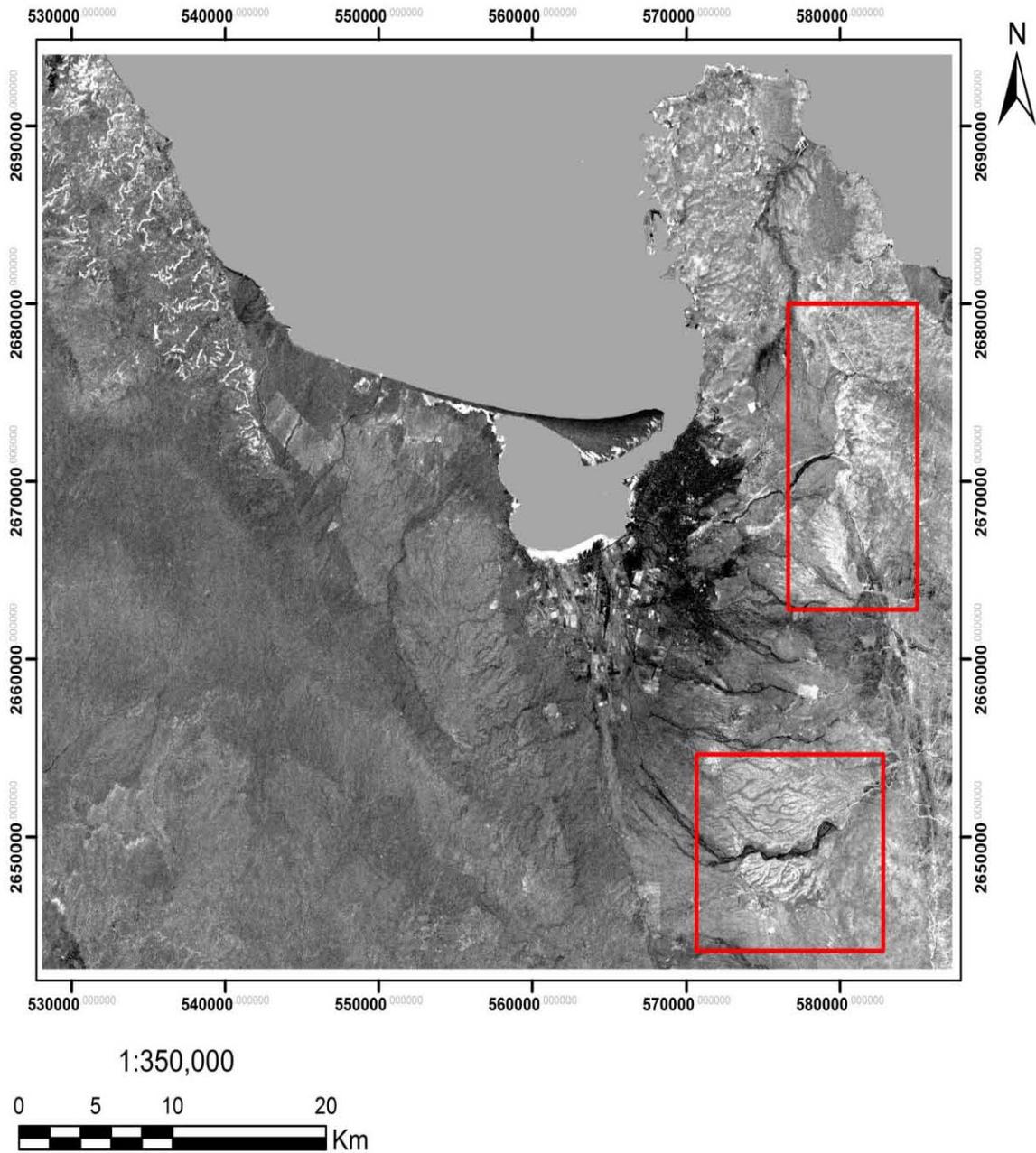


Fig. 5.2.8. Mapa del realce espectral para óxidos e hidroxilos. Obtenida a partir de la suma de las imágenes de la Fig. 5.2.6 y la Fig. 5.2.7 y un ajuste lineal con saturación del 1%.

## Mapas de composiciones RGB

### Mapas RGB obtenidos a partir de los cocientes de bandas

Una vez obtenidos los cocientes de bandas de vegetación, óxidos, hidroxilos y la suma de óxidos e hidroxilos se obtienen mapas de composición en falso color. En los cuales en la banda del color rojo están los óxidos, en la verde la vegetación y en la azul los hidroxilos (Fig. 5.2.9).

Por lo tanto las rocas alteradas hidrotermalmente estarán en color rojo, azul y magenta. El color cian en la zona central de la imagen, se debe a una alta contribución de las bandas en el azul y el verde, esta zona corresponde áreas con vegetación. El color amarillo es una combinación entre vegetación y óxidos de hierro.

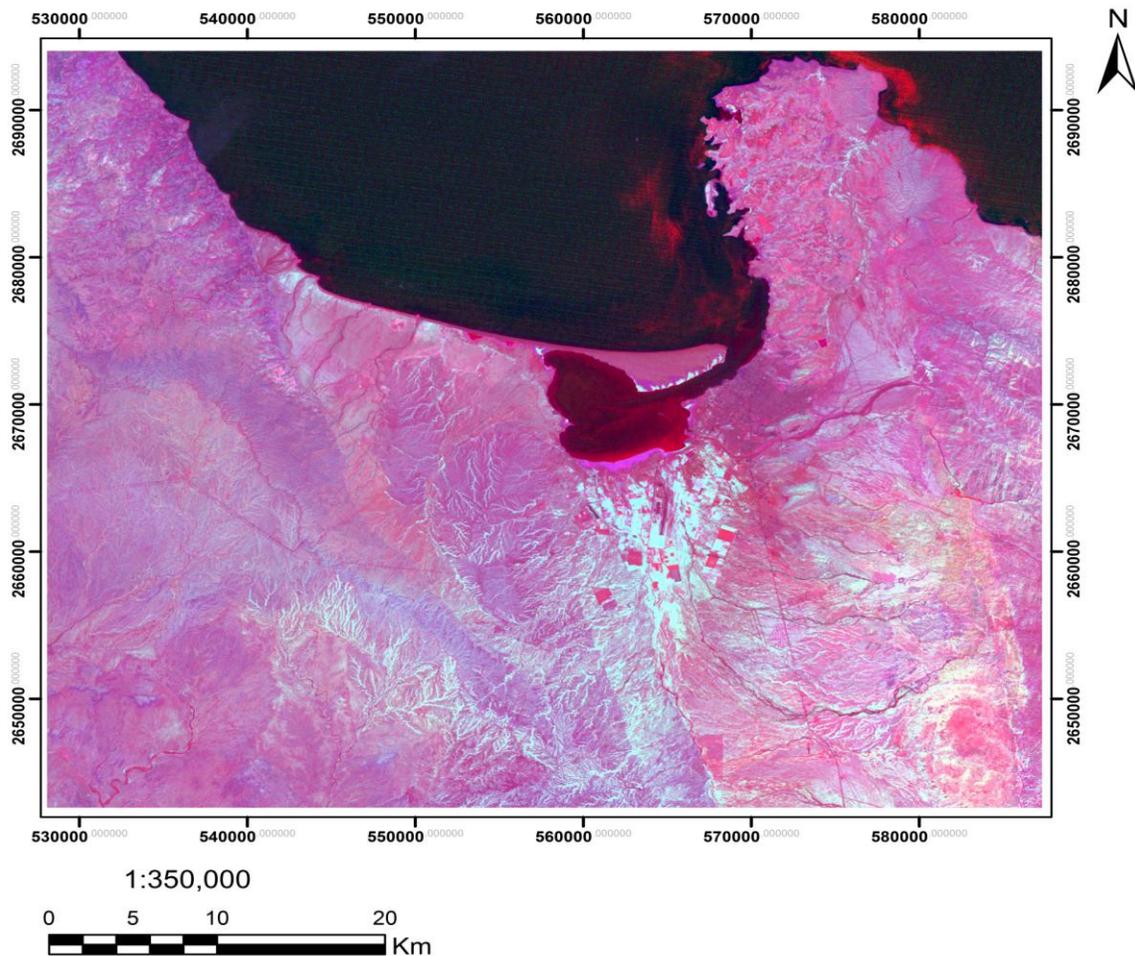


Fig. 5.2.9. Mapa de la composición RGB-O/V/H en falso color para los cocientes de bandas.

En el mapa de la Fig. 5.2.10 se muestra la composición RGB en falso color, donde en la banda del color rojo están los óxidos, en la verde los hidroxilos y en la azul óxidos más hidroxilos.

En color verde (hidroxilos) y magenta se encontraran las rocas alteradas hidrotermalmente, por la contribución de la banda roja (óxidos) y azul (óxidos e hidroxilos).

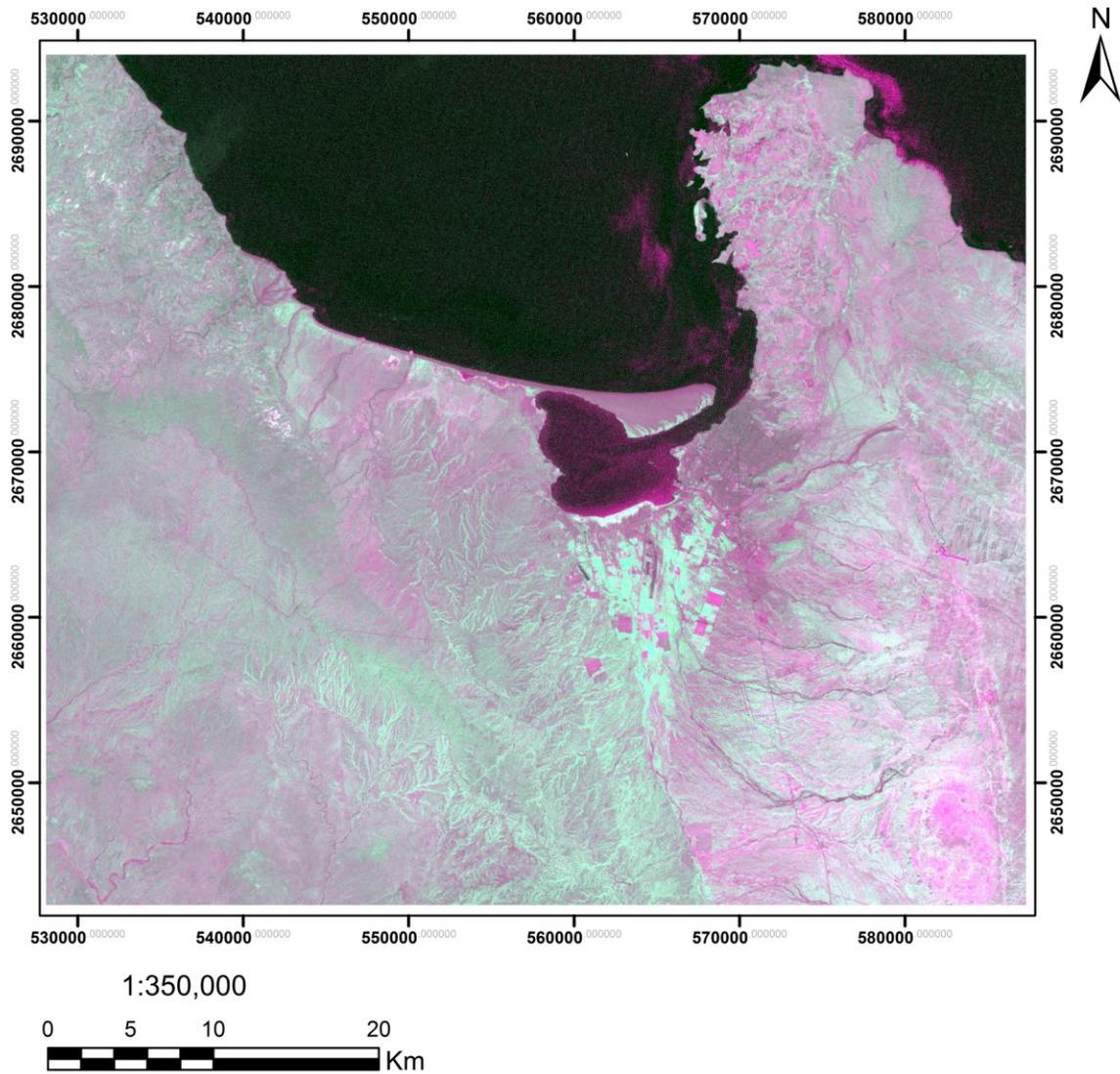


Fig. 5.2.10. Mapa de la composición RGB-O/H/O+H en falso color para los cocientes de bandas.

### Mapas RGB obtenidos a partir del análisis de componentes principales.

Utilizando las componentes elegidas del análisis de componentes principales y el análisis de componentes principales dirigidas se realizaron las composiciones RGB en falso color, en la Fig. 5.2.11 se tiene en la banda del color rojo los óxidos, en la verde vegetación y en la azul hidroxilos. El color amarillo se debe a la combinación de vegetación y óxidos de hierro, mientras que el color magenta corresponde a óxidos de hierro e hidroxilos.

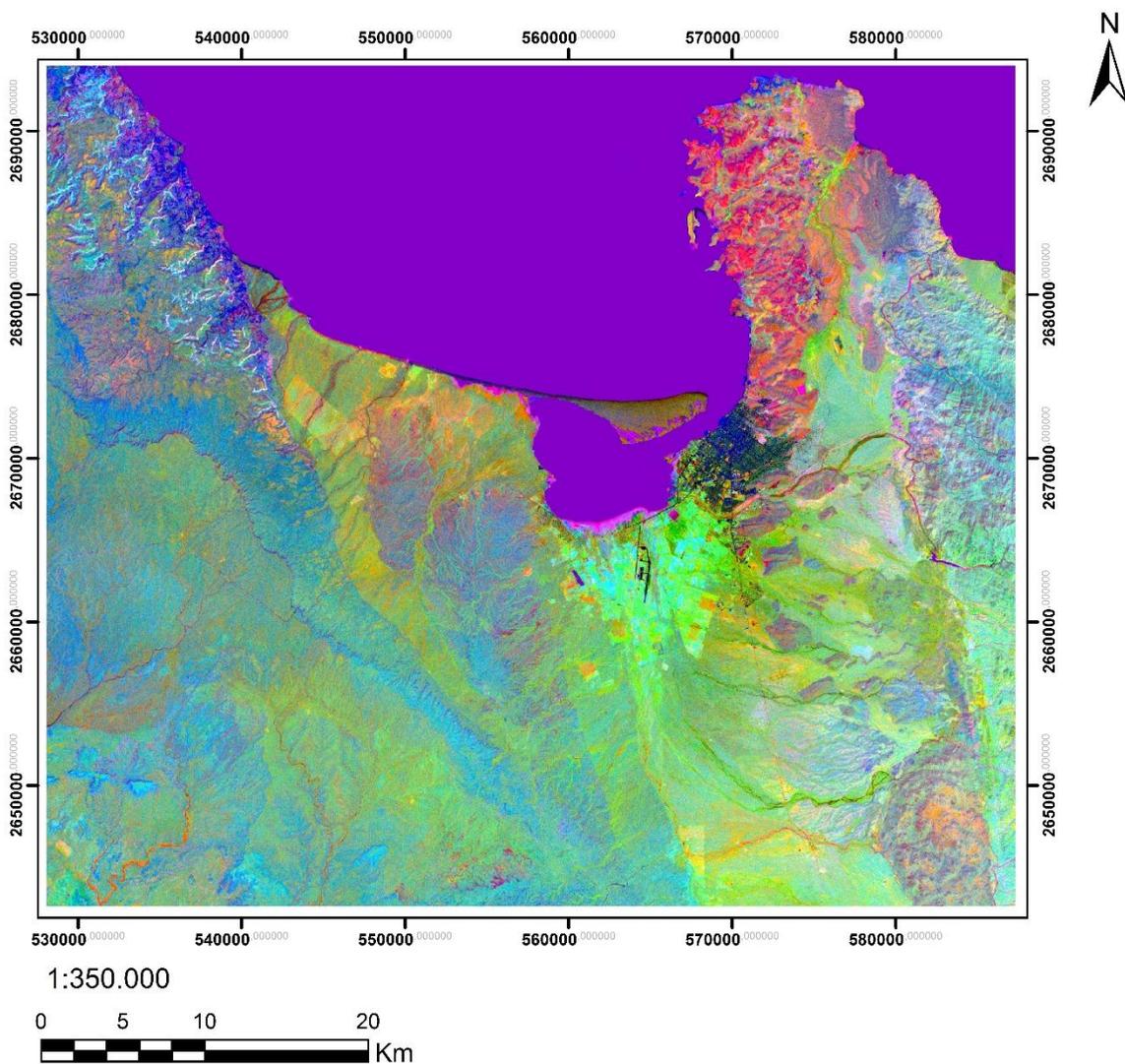


Fig. 5.2.11. Mapa de la composición RGB-O/V/H en falso color para en análisis de componentes principales.

En la Fig. 5.2.12 se muestra el mapa de la composición RGB en falso color en la cual, en la banda del color rojo están los óxidos, en la verde los hidroxilos y en la azul óxidos más hidroxilos, en dicho mapa en la zonas con píxeles de color magenta se encuentran las rocas alterada hidrotermalmente.

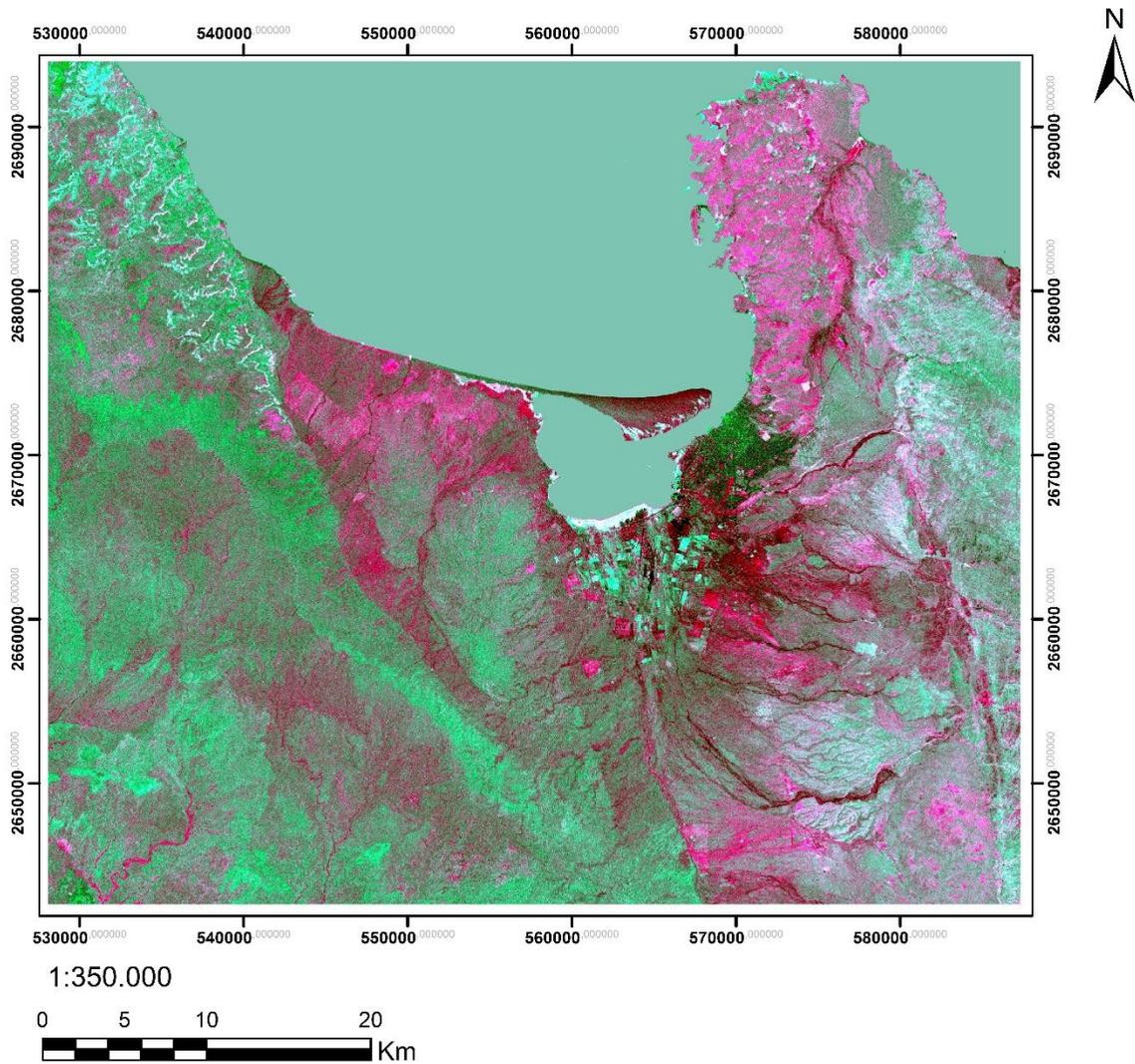


Fig. 5.2.12. Mapa de la composición RGB-O/H/O+H en falso color para en análisis de componentes principales.

### 5.1.3 Mapas integrados.

A continuación se presentan los mapas obtenidos como resultado de integrar la información surgida del realce espacial y las composiciones en falso color realizadas con los cocientes de bandas y el análisis de componentes principales, presentadas anteriormente.

#### Mapas de la integración de los cocientes de bandas y los lineamientos obtenidos.

En la Fig. 5.2.13 se muestra un mapa con los lineamientos obtenidos en todas las direcciones, (líneas en color negro) y la imagen obtenida con la composición en falso color RGB para óxidos, vegetación e hidroxilos, respectivamente, de los cocientes de bandas,

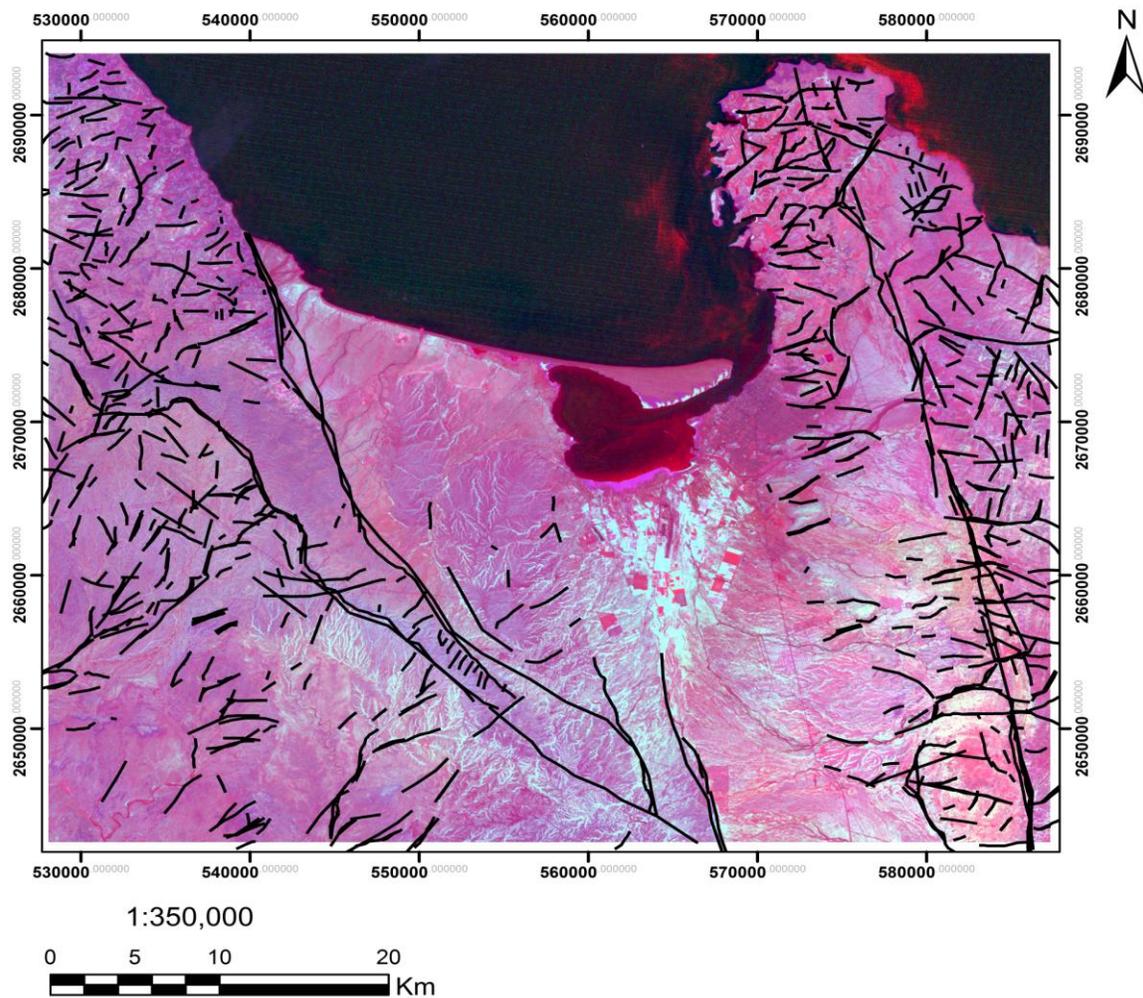


Fig. 5.2.13. Mapa integrado con lineamientos y la composición RGB-O/V/H en falso color.

En la Fig. 5.2.14 se muestra un mapa con los lineamientos obtenidos en todas las direcciones (líneas en color negro) y la imagen obtenida con la composición en falso color RGB para óxidos, hidroxilos y óxidos más hidroxilos respectivamente, de los cocientes de bandas. Además el rectángulo rojo indica una zona donde se presentan lineamientos y píxeles de color magenta estos últimos representan rocas alteradas hidrotermalmente.

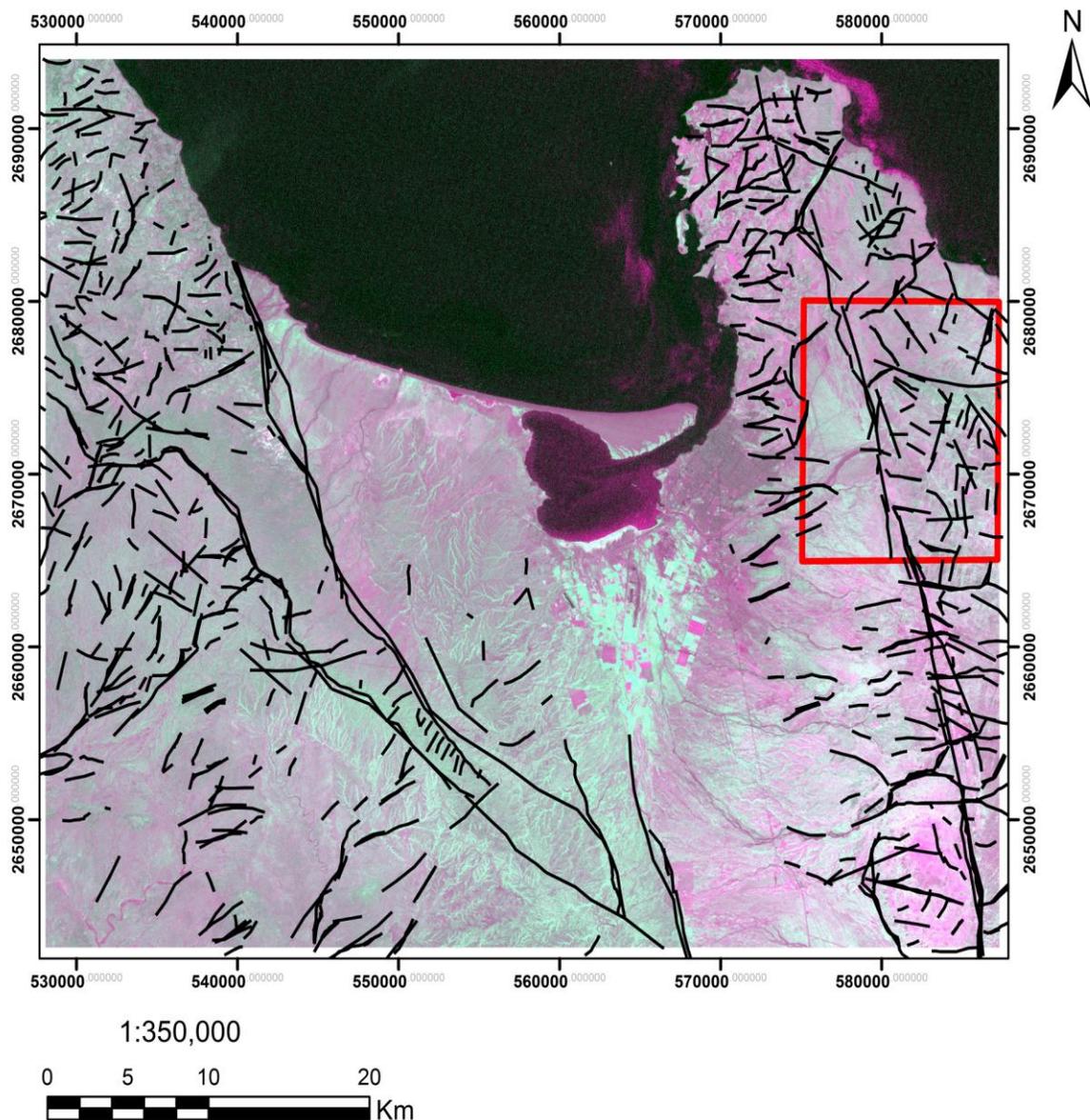


Fig. 5.2.14. Mapa integrado con lineamientos y la composición RGB-O/H/O+H en falso color.

## Mapas de la integración del análisis de componentes principales y los lineamientos obtenidos.

En la Fig. 5.2.15 se muestra un mapa con los lineamientos obtenidos en todas las direcciones (líneas en color negro) y la imagen obtenida con la composición en falso color RGB para óxidos, vegetación e hidroxilos respectivamente, del análisis de componentes principales. Además el rectángulo rojo indica una zona donde se presentan lineamientos y píxeles que representarían rocas alteradas hidrotermalmente.

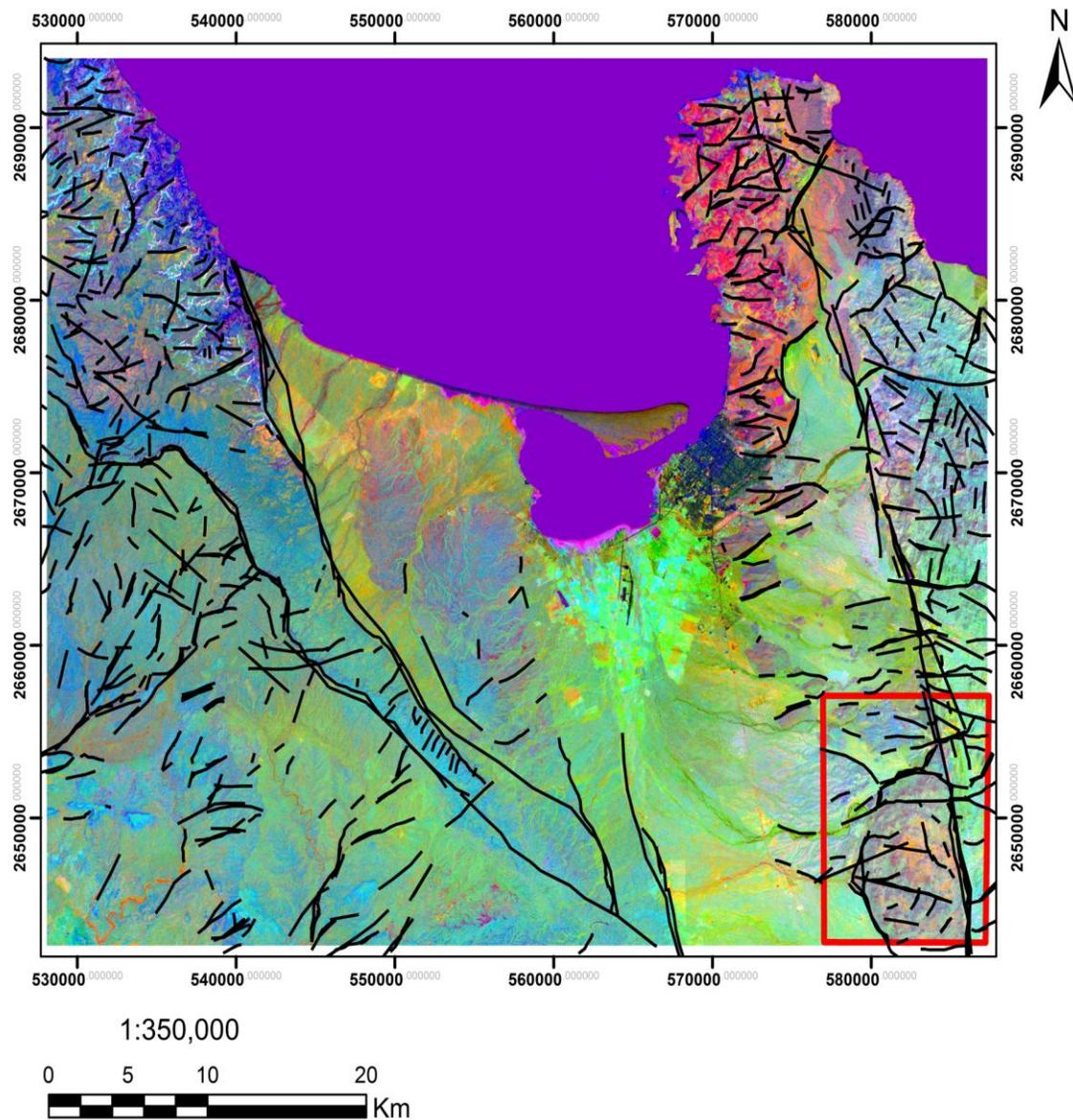


Fig. 5.2.15. Mapa integrado con lineamientos y la composición RGB-O/V/H en falso color.

En la Fig. 5.2.16 se muestra un mapa con los lineamientos obtenidos en todas las direcciones (líneas en color negro) y la imagen obtenida con la composición en falso color RGB para óxidos, hidroxilos y óxidos más hidroxilos respectivamente, del análisis de componentes principales.

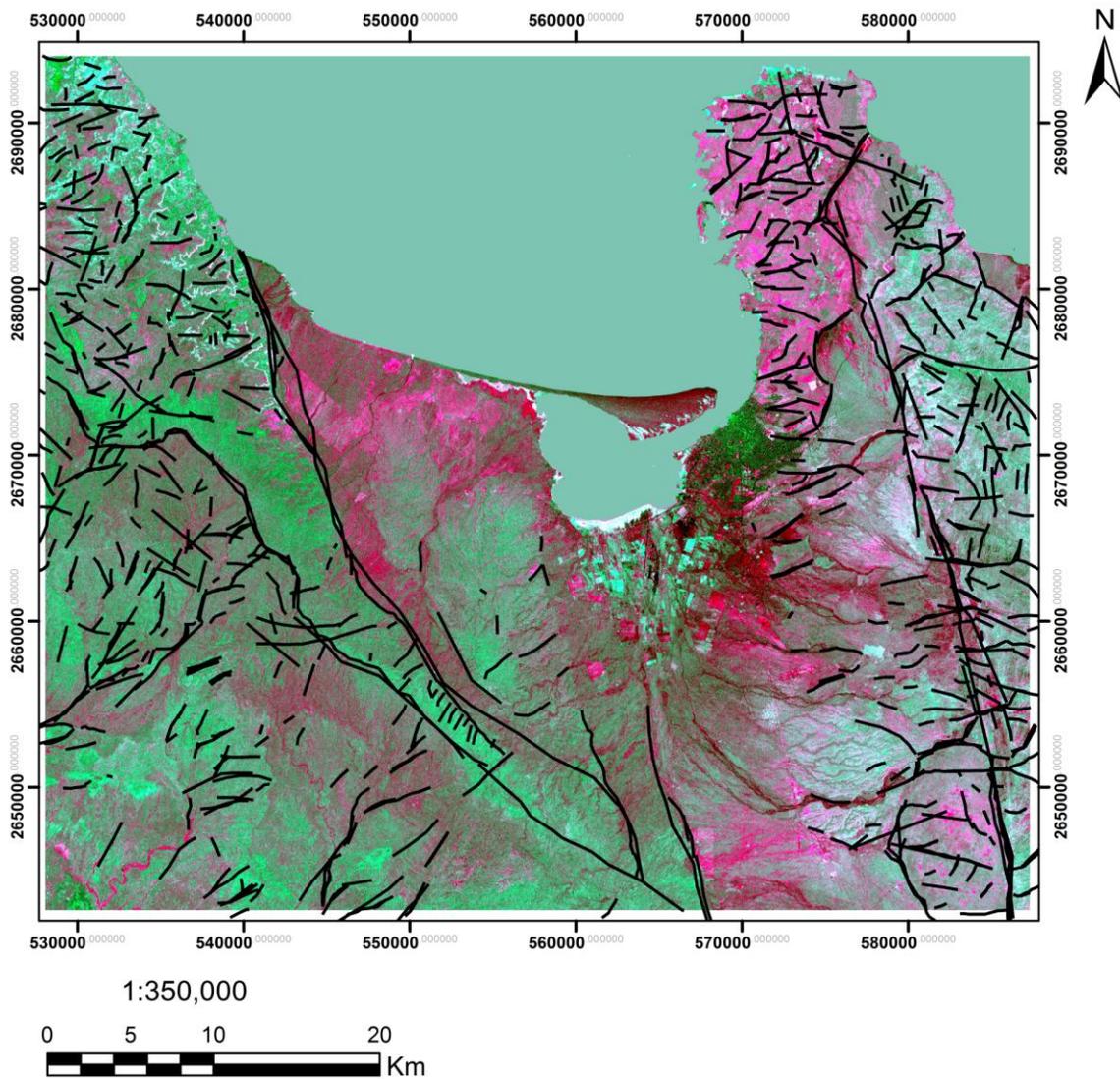


Fig. 5.2.16. Mapa integrado con lineamientos y la composición RGB-O/H/O+H en falso color.

## 5.2 Análisis de Resultados.

En los mapas correspondientes al realce espacial de la Fig. 5.1.1 a la Fig. 5.1.8 se identificaron los lineamientos en las diferentes direcciones (norte, noroeste, este, sureste, sur, suroeste, oeste y noroeste), algunos de ellos correspondieron al sistema de fallas La Paz y El Carrizal (Carta Geológica-Minera de La Paz) con dirección noroeste-sureste.

En los mapas correspondientes al realce espectral de óxidos de hierro e hidroxilos por medio de cocientes de bandas de la Fig. 5.2.1, la Fig. 5.2.2 y la Fig. 5.2.4, se pueden observar áreas muy brillantes en la zona oriental delimitada por el rectángulo rojo en los mapas.

En la Fig. 5.2.3 se observan tonos oscuros en gran parte de la imagen, sin embargo también se encuentran píxeles brillantes, en la zona central, al sur y al sureste de la imagen, los cuales indica la presencia de vegetación en la zona.

Con el análisis de componentes principales utilizando 6 bandas, en la Fig. 5.2.5 se observan píxeles muy brillantes en el área urbana de la bahía de La Paz correspondientes a vegetación y otros no tan brillantes, en la parte inferior, que también pueden ser parte de la misma.

En el análisis de componentes principales dirigidas, usando 4 bandas, en la Fig. 5.2.6, se observa; en la parte superior oriental de la imagen, los píxeles más brillantes para el realce de hidroxilos. También se pueden observar otras zonas brillantes, en la parte central, al este de la bahía de La Paz y al sureste de la imagen como lo muestran los rectángulos rojos.

En la Fig. 5.2.7 en la parte occidental de la imagen se encuentran píxeles brillantes que corresponden a concentraciones anómalas de óxidos de hierro.

En la Fig. 5.2.8 se observan píxeles brillantes en la zona central oriental y en la zona inferior oriental al igual que en las imágenes anteriores corresponden a concentraciones anómalas de óxidos de hierro e hidroxilos.

En las composiciones en falso color realizadas con los cocientes de bandas se observa lo siguiente:

De la Fig. 5.2.9, la mayor parte de la imagen muestra colores magenta y rojos, esto se debe principalmente, a la contribución de los píxeles brillantes de los óxidos. Además muestra un color cian, en la zona central de la imagen, cerca de la costa de la bahía de La Paz, que corresponde a un área con vegetación.

En la Fig. 5.2.10 se observa una mayor concentración de color magenta en la zona oriental con coordenadas extremas: 2680000 mN, 575000 mE, 2680000 mN, 587000 mE, 2665000 mN, 587000 mE y 2665000 mN y 575000 mE y al sureste que corresponde a una contribución de la banda del color rojo (óxidos) y el azul (óxidos más hidroxilos). En la cual, la banda del color verde corresponde a los hidroxilos.

En las composiciones en falso color realizadas con el análisis de componentes principales se observa lo siguiente:

La Fig. 5.2.11 muestra en color rojo, los óxidos de hierro, distribuido en la zona oriental de la imagen donde se encuentran rocas volcánicas del periodo terciario. Al sureste se observa un color amarillo, debido a la combinación de los óxidos de hierro y en menor medida a la vegetación. En esta zona también se observan píxeles azules que corresponden a la contribución de los hidroxilos y finalmente, los colores verdes corresponden a una combinación entre vegetación e hidroxilos.

En la Fig. 5.2.12 se observan principalmente tres colores: magenta, verde y rojo. El color magenta se debe a la combinación entre la banda del color rojo y la banda del color azul, correspondiente a óxidos de hierro y la suma de óxidos de hierro e hidroxilos, respectivamente. El color verde corresponde a los hidroxilos y el rojo a óxidos de hierro. Al noreste y al sureste, al igual que en la Fig. 5.2.7, la Fig. 5.2.9, la Fig. 5.2.11 y la Fig. 5.2.12, se observan concentraciones anómalas de óxidos de hierro. Al sureste también se presentan concentraciones anómalas de hidroxilos en la Fig. 5.2.1, la Fig. 5.2.4, la Fig. 5.2.6 y la Fig. 5.2.11.

En los mapas donde se integró la información de los realces espaciales y espectrales realizados (Fig. 5.2.13, Fig. 5.2.14, Fig. 5.2.15 y Fig. 5.2.16) se observa que en la zona sureste con coordenadas extremas 2657000 mN, 577000 mE, 2657000 mN, 587500 mE, 2642000 mN, 577000 mE, 2642000 mN, 587500 mE; se encuentra un lineamiento con dirección NW-SE que corresponde a la falla La Paz y en sus alrededores se observan

óxidos de hierro e hidroxilos, además hay un lineamiento casi paralelo a esta falla donde se observan algunos hidroxilos.

## 6. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

### 6.1 Discusión.

El uso de las imágenes satelitales como herramienta en la exploración de sistemas hidrotermales han sido empleadas ampliamente, alrededor del mundo: Abdelsalam *et al.* (2000); Podwysocki *et al.* (1983); Bhattarai (1983); Pour *et al.* (2011); Talaat M. *et al.* (2004); Sabins (1999); Fernández *et al.* (2001), Ruiz *et al.* (2010); Prol-Ledesma *et al.* (1992) y Mia *et al.* (2014). Yamaguchi *et al.* (1992) indica la utilidad de los sensores remotos en la exploración geotérmica; determinando anomalías térmicas superficiales, lineamientos y detección de alteraciones hidrotermales

En este trabajo analizando imágenes satelitales del sensor remoto Landsat 7 y el modelo digital de elevación del terreno; de la bahía de La Paz, Baja California Sur, ha sido posible la identificación de al menos dos zonas que presentan características geológicas y geoquímicas que son indicadoras de actividad hidrotermal.

La primera se localiza siguiendo la falla La Paz hacia el sur, al oriente se encuentran algunas concentraciones anómalas de hidroxilos y algunos óxidos de hierro, los hidroxilos se encuentran a lo largo de un lineamiento perpendicular a la falla y los óxidos se localizan alrededor de la falla La Paz; ésta zona delimitada por las coordenadas extremas: 2680000 mN, 575000 mE, 2680000 mN, 587000 mE, 2665000 mN, 587000 mE y 2665000 mN y 575000 mE en la Fig. 5.2.14, litológicamente dicha zona corresponde a granito y actualmente hay prospectos de minas para la explotación de cantera y algunas minas de grava en explotación (GeoInfoMex, Base de datos del SGM). Éste resultado es muy importante pues el Servicio Geológico Mexicano (SGM) no ha reportado alteraciones hidrotermales en esta región.

Al occidente de mapa de la Fig. 5.2.6 se encuentran píxeles brillantes que corresponden a concentraciones anómalas de hidroxilos, en dicha zona se encuentra el distrito minero San Juan de la costa donde se tiene una mineralización no metálica en la que actualmente se explota: manganeso, fosforita y magnesita (Carta Geológica-Minera de La

Paz). En esta zona, antes de este trabajo, tampoco se habían reportado manifestaciones de la presencia de alteración hidrotermal

Al occidente de la Fig. 5.2.7, se encuentran regiones con píxeles brillantes correspondientes a óxidos de hierro. Actualmente en ésta área, se encuentra una mina de grava inactiva (GeoInfoMex, Banco de datos del SGM) y donde tampoco se había reportado alteración hidrotermal por parte del SGM.

La segunda zona se localiza en la parte oriental del mapa de la Fig. 5.2.15; con coordenadas extremas 2657000 mN, 577000 mE, 2657000 mN, 587500 mE, 2642000 mN, 577000 mE, 2642000 mN, 587500 mE, se observaron concentraciones anómalas tanto de hidroxilos como de óxidos, los óxidos rodean la falla La Paz y hay hidroxilos cerca de un lineamiento paralelo a la misma, con dirección NW-SE. En ésta zona se encuentra cerca del distrito minero El Triunfo-San Antonio y la zona mineralizada San Juan de los Planes (GeoInfoMex, Banco de datos del SGM y Carta Geológica-Minera de San José del Cabo).

Actualmente al sur de esta zona se encuentran diversos prospectos de minas y una mina abandonada. Un prospecto es la mina San Isidro de Au, Ag, Pb y Zn (GeoInfoMex, Banco de datos del SGM) cuya mineralización es de origen hidrotermal, sin embargo, donde se encuentra la zona de estudio no se tenían reportes de alteraciones hidrotermales, hasta éste estudio.

Estos dos sitios pueden ser propuestos para realizar estudios geológicos, geofísicos y geoquímicos a detalle, con el fin de determinar si existe algún potencial geotérmico. Debido a que dichas zonas presentan alteraciones hidrotermales cerca de lineamientos como ha sido reportado por Prol-Ledesma *et al.* (1992) en el campo geotérmico de Los Humeros, Puebla; en donde encuentran que existe correlación entre los lineamientos obtenidos a partir de imágenes satelitales con algunos datos de las principales zonas de descarga del yacimiento geotérmico, tomando en cuenta la presencia de minerales de alteración.

La identificación de estas zonas fue posible por la aplicación de métodos de realce espectral como cocientes de bandas y la técnica de Crosta *et al.* (1989) a las imágenes satelitales y la composiciones en falso color, como en el trabajo realizado por Fernández de la Vega-Márquez y colaboradores (2001) en el campo geotérmico de La Primavera en

donde además, ellos logran correlacionar las áreas identificadas como alteraciones hidrotermales, con los flujos de descarga del yacimiento geotérmico.

Aunque es necesario la integración de los resultados obtenidos del análisis de las imágenes, con la información: geológica, geofísica, geoquímica y tectónica disponibles de la región.

## **6.2 Conclusiones**

El uso de imágenes satelitales y el modelo digital de elevación en la exploración de recursos potenciales geotérmicos y mineros se ha incrementado actualmente, pues permite realizar una exploración con bajo costo económico en áreas con grandes extensiones, delimitando la exploración a zonas que cumplan con las características estructurales, geológicas y geoquímicas para realizar exploraciones detalladas de trabajo de campo.

En el presente trabajo se identificaron al menos dos zonas que presentan alteraciones hidrotermales que no se habían reportado anteriormente y algunos lineamientos que tampoco se observan en las cartas geológicas utilizadas para éste estudio.

En la exploración de recursos geotérmicos, además de los estudios de alteraciones hidrotermales, es necesario realizar análisis termales superficiales, para determinar si la zona presenta potencial geotérmico. Posteriormente, corroborar la prospección con trabajos de campo (estudios geológicos, geofísicos y geoquímicos) a detalle y así determinar su potencial de explotación.

En la exploración de recursos mineros, además del procesamiento de imágenes satelitales, que permiten identificar de manera económica y extensiva zonas con probable potencial minero, es necesario realizar trabajos de campo, geofísicos y geoquímicos a detalle para determinar si los recursos descubiertos son económicamente viables.

Actualmente gran parte de la economía de la bahía de La Paz se centra en la minería, sin embargo, el potencial geotérmico que tiene la península de Baja California puede permitir, la producción de energía eléctrica para el abastecimiento propio de la región y la exportación, además puede resolver algunos de los problemas que se presentan por la falta de agua dulce mediante la implementación de procesos que permitan la desalinización de aguas salobres con energía geotérmica.

## 7. BIBLIOGRAFIA

Abdelsalam, M. G., Stern, R. J. Berhane, W. G., 2000. Mapping gossans in arid regions with Landsat TM and SIR-C images: the Beddaho Alteration Zone in northern Eritrea.

Journal of African Earth Sciences, 30 (4), 903-916.

Álvarez, D. A., Rojas, H., Prieto, J. J., 1997. Geología de Bahía de La Paz y áreas adyacentes. En: Urban, J., Ramírez, M. (Eds.), Bahía de la Paz, investigación y Conservación. Universidad Autónoma de Baja California Sur, México, pp. 13-29

Álvarez A., Schwennicke T., Rojas H., De la O F., 1999. Carta Geológico-Minera La Paz G12-10-11, Baja California Sur. Servicio Geológico Mexicano.

American Society of Photogrammetry, 1983. Manual of Remote Sensing. Theory, Instruments and Techniques. Vol. I, Virginia, USA, 951 p.

Arzate, J., 1986. Geophysical reconnaissance for geohydrological evaluation in the La Paz- El Carrizal Valley, Baja California Sur México. Tesis de Maestría. International Institute for Aerospace Survey and Earth Sciences, University of Twente. Enschede, The Netherlands, 60 p.

Avery, T. E., 1985. Interpretation of aerial photographs. (3° Edición). Burgess Publishing, Minneapolis, 554 p.

Bakker H. W., Feringa, W., Gieske, A., Gorte, B., Grabmaier, K., Hecker, C., Horn, J., Huurneman, G., Janseen, L., Kerle, N., Meer, F., Parodi, G., Pohl, C., Reeves, C., Ruitenbeek, F., Schetselaar, E., Tempfli, K., Weir, M., Westinga, E., Woldai T, 2009. Principles of Remote Sensing. An introductory textbook. The International Institute for Geo-Information Science and Earth Observation. Enschede, The Netherlands, 591 p.

Barbier, E., 2002. Geothermal energy technology and current status: an overview. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 3-65.

BEAL, C. H., 1948. Reconnaissance of the geology and oil possibilities of Baja California, México. Geological Society of America, 31, 138.

- Bhattarai, K. D., 1983. Mineral Exploration by Remote Sensing Techniques in Nepal. Department of Mines and Geology, Lainchaur, Kathmandu, Nepal. *Adv. Space Res.*, 3 (2), 49-54.
- Browne, P. R. L., 1978. Hydrothermal alteration in active geothermal fields. *Annual Reviews Earth Planet*, 229-260.
- Campbell, J. B., Wynne, R.H., 2011. Introduction to REMOTE SENSING. (5° Ed). The Guilford Press, New York, USA, 683 p.
- Camprubí, A., González, E., Levresse, G., Tritlla, J., Carrillo, A., 2003. Depósitos epitermales de alta y baja sulfurización: una tabla comparativa. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*. 16 (1), 10-18.
- Canet, C., Camprubí I Cano, A., 2006. Yacimientos minerales: Los tesoros de la Tierra. FCE, SEP CONACyT CAB. Colección: La ciencia para todos, México, 214 p.
- Cendejas, F., Aldana, M. (2008). Monografía Geológico-Minera del Estado de Baja California Sur. Secretaría de Economía. Pachuca, Hidalgo, México, 282 p.
- Crosta, A. P. A., Moore, J. McM., 1989. Enhancement of Landsat Thematic Mapper Imagery for Residual Soil Mapping in SW Minas Gerais State, Brazil: A Prospecting Case History in Greenstone Belt Terrain. En: *Proceedings of the Seventh Thematic Conference on Remote Sensing for Exploration Geology*, Calgary, Alberta, Canada, Oct. 2-6, 1173-1187 p.
- Dickson, M.H., Fanelli, M., 2004. What is Geothermal energy?. Istituto di Geoscienze e Georisorse, CNR, Pisa, Italia. International Geothermal Association, 62.
- Dipippo, R., Rennel, J. L., 2014. Geothermal Energy. En: Letcher, T. (Ed.), *Future Energy. Improved, Sustainable and Clean Options for our Planet*. (2° Edición), Elsevier, Londres, Inglaterra, pp. 471-492.
- Fernández De La Vega, T., Prol, R. M., Orozco, G., 2001. Hydrothermal alteration and main structures mapping using TM images in La Primavera geothermal field (México). *Geofísica Internacional*. 40, No. 3, 147-162.
- Fletcher, J. M., Grove, M., Kimbrough, D., Lovera, O., Gehrels, G. E., 2007. Ridge-trench interactions and the Neogene tectonic evolution of the Magdalena shelf and southern Gulf

of California: Insights from detrital zircon U-Pb ages from the Magdalena fan and adjacent areas. Geological Survey of America Bulletin, Vol. 119, 1313-1336.

Gaitán-Moran, J., 1986. On neotectonic evidences in the southern peninsular region, Baja California Sur, México. Tesis de Maestría. International Institute for Aerospace Survey and Earth Sciences, University of Twente. Enschede, The Netherlands, 110 p.

Giordano, G., Pinton, A., Cianfarra, P., Baez, W., Chiodi, A., Viramonte, J., Norini, G., Gropelli, G., 2012. Structural control on geothermal circulation in the Cerro Tuzgle-Tocomar geothermal volcanic area (Puna Plateau, Argentina). Journal of Volcanology and Geothermal Research, 249, 77-94.

Hausback B. P., 1984. Cenozoic volcanic and tectonic evolution of Baja California Sur, Mexico. Geology of Baja California Peninsula: Pacific Section S. E. P. M., Vol. 39, 219-236

Heim, A., 1922. Notes on the Tertiary of southern Lower California. Geologic Magazine 59 (12), 529-547.

Henley, R. W., Ellis, A. J., 1983. Geothermal systems ancient and modern: a geochemical review. Earth-Science Reviews. Vol. 19,1-50.

Hunt, G. R., Ashley, R. P., 1979. Spectra of Altered Rocks in the Visible and Near Infrared. Economic Geology, Vol. 74, 1613-1629.

Hunt, G. R., 1977. Spectral Signatures of Particulate Minerals in the Visible and Near Infrared. Geophysics, Vol. 44, 501-513.

Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática, 2006. Cuaderno Estadístico Municipal. La Paz, Baja California Sur. INEGI.

Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática, 2013. Anuario estadístico y geográfico de Baja California Sur. Gobierno del Estado de Baja California Sur, 381p.

Lagat, J. 2010. Hydrothermal alteration mineralogy in Geothermal Fields with case examples from Olkaria Domes geothermal field, Kenya. Short Course on Exploration for Geothermal Resources, 1-24.

Lillesand, T., Kiefer, R., 1999. Remote Sensing and Image Interpretation (4° Edición). John Wiley and Sons, Inc. USA, 724 p.

Loughlin, W. P., 1991. Principal Component Analysis for Alteration Mapping. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, Vol. 57, No. 9, 1163-1169.

Maraver, D., Sevilla, V., Melendres, A., Aguilera, J., 2002. Carta Geológico-Minera San José del Cabo F12.2.3.5.6 Baja California Sur. Servicio Geológico Mexicano.

M. B, Mia., Nishijima, J., Fujimitsu, Y., 2014. Exploration and monitoring geothermal activity using Landsat ETM+ images. A case study at Aso volcanic area in Japan. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 275, 14-21.

McCloy, K., Severiens, T., 2009. Classification algorithms and methods. Recuperado de <http://www.seos-project.eu/modules/classification/classification-c00-p00.html>

Moore, G. K., 1983. Objective Procedures for Lineament Enhancement and Extraction. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, Vol. 49, No. 5, 641-647.

Pérez, D. J., 2007. Introducción a los sensores remotos-Aplicaciones en geología. Dpto. Cs, Geológicas, F.C.E.N., U.B.A.

Petrinovic, I. A., Martí, J., Aguirre, G.J., Guzmán, S., Geyer, A., Salado, N., 2010. The Cerro Aguas Calientes caldera, NW Argentina: An example of a tectonically controlled, polygenetic collapse caldera, and its regional significance. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 194,15-26.

Pirajno, F., 2009. Hydrothermal Processes and Mineral Systems. Geological Survey of Western Australia, Springer. East Perth, Australia, 1250 p.

Podwysocky, M.H., Segal, D. B., Jones, O. D., 1983. Mapping of hydrothermally altered rocks using airborne multispectral scanner data, Marysvale, Utha, mining district. *Advances in Space Research*. Vol. 3, No. 2, 101-112

Prol-Ledesma, R. M., Alcántara, A., Chávez, M., 1993. Exploración geotérmica utilizando imágenes de satélite en Los Humeros, Puebla, México. *Geofísica Internacional*, Vol. 32, No. 1, 99-109.

Pour, A. B., Hashim, M., Marghany, M., 2011. Using spectral mapping techniques on short wave infrared band of ASTER remote sensing data for alteration mineral mapping in SE Iran. *International Journal of the Physical Sciences*, Vol. 6, No. 4, 917-929.

Talaat, M. R., Agnes, K., 2004. Mineralogical and structural characterization of alteration zones detected by orbital remote sensing at Shalatein District, SE Desert, Egypt. *Journal of African Earth Sciences* 40, 89-99.

Universidad politécnica de Baja California, 2011. Evaluación de los Recursos Geotérmicos de Baja Entalpía de la Península de Baja California, México, 199 p.

Ruiz-Armenta, J. R., Prol- Ledesma, R. M., 1995. Técnicas de procesamiento de imágenes en la exploración de yacimientos minerales de origen hidrotermal. *Universidad Complutense. Física de la Tierra. No. 7*, 105-137.

Ruiz-Armenta, J. R., Prol- Ledesma, R. M., 2010. Techniques for enhancing the spectral response of hydrothermal alteration minerals in Thematic Mapper images of Central Mexico. *International Journal of Remote Sensing*, Vol. 19, No. 10, 1981-2000.

Sabins, F.F, 1999. Remote sensing for mineral exploration. *Ore Geology Reviews* 14, 157-183.

Sabins, F.F., 1996. REMOTE SENSING. Principles and Interpretation (3° Edición). Waveland Press, Inc., Illinois, USA, 512 p.

Santoyo, G. E., Torres, A. I., 2010. Escenario futuro de la explotación geotérmica: Hacia un desarrollo sustentable. *Revista Digital Universitaria*, Vol. 11, No. 10, 26.

Servicio Geológico Mexicano. GeolInfoMex, El Banco de Datos del SGM. (<http://mapasims.sgm.gob.mx/GeolInfoMexDB/>). Consultado el día 15 de Octubre del 2014.

Schowengerdt, R., 2006. Remote Sensing. Models and Methods for Image Processing (3° Edición) Academic Press, California, USA, 560 p.

Shefali, A. Principles of Remote Sensing. *Satellite Remote Sensing and GIS Applications in Agricultural Meteorology*, 23-38.

Van Der Meer, F., Hecker, C., Van Ruitenbeek, F., Van Der Werff, H., Wijkerslooth, C., Wechsler, C., 2014. Geologic remote sensing for geothermal exploration: A review. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 33, 255-269 .

Villmann, T., Merényi, E., Hammer, B., 2003. Neural Maps in remote sensing image analysis. *Neural Networks* 16, 389-403.

Yamaguchi Y., Hase H., Ogawa K., 1992. Remote Sensing for geothermal applications. *Episodes*, Vol. 15, no. 1, 62-67.