



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**

---

**FACULTAD DE INGENIERÍA**

**IDENTIFICACIÓN DE GRUPOS  
MINERALÓGICOS ASOCIADOS A LA  
ALTERACIÓN HIDROTERMAL, MEDIANTE  
IMÁGENES LANDSAT 8, EN COMONDÚ BAJA  
CALIFORNIA SUR**

**TESIS**

Que para obtener el título de

**INGENIERO GEOFISICO**

**P R E S E N T A**

ERICK IVAN ACEVEDO CERON

**DIRECTOR(A) DE TESIS**

DRA. ROSA MARIA PROL LEDESMA



Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2017

---

## AGRADECIMIENTOS

Con este apartado deseo expresar mi más sincero agradecimiento a todas aquellas personas que me han prestado su ayuda y apoyo durante la realización de esta tesis de licenciatura.

Un especial agradecimiento a mi directora de tesis la Dra. Rosa María Prol Ledesma por su buena dirección y constante apoyo, por haberme permitido aprender mucho de ella, por toda su ayuda, paciencia, comprensión y comentarios para mi desarrollo profesional y personal.

A mis sinodales el Dr. Aldo Ramos Rosique por el tiempo dedicado a la revisión de mi trabajo, gracias por todos los comentarios y sugerencias hacia este trabajo.

M.C.T. Alejandra Selene Membrillo Abad por sus enseñanzas y consejos prácticos, sobre conceptos y metodologías para el procesamiento de imágenes. También por su tiempo e interés durante todo el proceso de realización de mi tesis.

A la Dra. Claudia Arango Galván por su tiempo destinado a mi trabajo y consejos hacia mi persona.

Al Dr. Josué Tago Pacheco por sus comentarios, y confianza en el desempeño de mi trabajo.

Al instituto de Geofísica por darme las facilidades de utilizar sus instalaciones, apoyarme y proporcionarme el ambiente perfecto para realizar mi trabajo.

A mis padres por darme la vida, y guiarme en mi camino. Un especial aprecio y agradecimiento a mi madre Irma Cerón Tenorio por darme toda su existencia sin medidas. Muchas gracias.

Ingeniera Karla Roció Juárez López gracias por todo el tiempo, consejos hacia mi persona. En gran medida soy una mejor persona por el simple hecho de tener su amistad y cariño. Tengo una gran deuda con usted.

Gracias a mi familia y compañeros que han sido importantes en mi existencia y formación. Gracias abuelos por darme un gran ejemplo.

Y por último gracias a la UNAM por convertirse en mi segunda casa, por ser una parte maravillosa de mi vida.

# Índice

RESUMEN .....	7
1. INTRODUCCIÓN.....	8
1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	8
1.2. DELIMITACIÓN DEL PROBLEMA.....	9
1.3. JUSTIFICACIÓN.....	9
1.4 OBJETIVOS.....	9
2. PERCEPCIÓN REMOTA.....	10
2.1. DEFINICIÓN.....	10
2.2. ENERGÍA ELECTROMAGNÉTICA.....	10
2.3. INTERACCIÓN CON LA ATMÓSFERA.....	13
2.4. INTERACCIÓN CON LA SUPERFICIE.....	13
2.5. SENSORES E IMÁGENES.....	14
2.6. IMAGEN.....	15
2.7. IMÁGENES SATELITALES.....	16
3. AMBIENTE HIDROTHERMAL.....	19
3.1. FUNDAMENTOS.....	19
3.2. RECURSO GEOTÉRMICO.....	22
3.3. IDENTIFICACIÓN DE ZONAS DE ALTERACIÓN HIDROTHERMALES UTILIZANDO IMÁGENES SATELITALES.....	25
4. GEOLOGÍA.....	30
4.1. ZONA DE ESTUDIO.....	30
4.1.1. Tipo de clima y vegetación.....	31
4.2. MARCO TECTÓNICO.....	31
4.3. ESTRATIGRAFÍA.....	34
5. METODOLOGÍA.....	34
5.1 PREPROCESAMIENTO.....	34
5.1.1. Adquisición de las imágenes.....	35
5.1.2. Análisis estadístico.....	35
5.1.3. Recorte de ventana.....	36
5.1.2. Corrección atmosférica.....	36
5.2. PROCESAMIENTO.....	36
5.2.1. Realce espacial.....	36

5.2.2. Realce espectral .....	37
5.1.2. Cocientes de bandas .....	38
5.1.3. Sustracción de bandas.....	38
5.2.4. Componentes principales.....	39
5.2.4. Componentes principales técnica de Crosta y Moore (1989).....	39
5.2.4. Componentes principales dirigidas .....	40
5.2.5 Clasificación no supervisada .....	41
5.3. RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	42
5.3.2. Composiciones RGB.....	61
5.3.3. Clasificación no supervisada .....	67
5.4. Mapas de lineamientos. ....	69
6. INTEGRACIÓN DE INFORMACIÓN.....	73
6.1. MAPAS INTEGRADOS.....	73
7. DISCUSIÓN DE RESULTADOS. ....	76
8. CONCLUSIONES. ....	79
9. BIBLIOGRAFÍA.....	80

# Índice de Figuras

FIGURA 1 SE MUESTRAN LAS CARACTERÍSTICAS DE LONGITUD DE ONDA Y AMPLITUD DE LAS ONDAS (CAMPBELL ET AL., 2011). .....	10
FIGURA 2 ESPECTRO ELECTROMAGNÉTICO, SE COMPARA LA LONGITUD DE ONDA CON EL TAMAÑO DE VARIOS OBJETOS, TAMBIÉN SE ASOCIA CON LA TEMPERATURA A LA CUAL EMITIRÍA LA MATERIA EN CADA LONGITUD DE ONDA. IMAGEN TOMADA DE LA NASA. ....	12
FIGURA 3. SE MUESTRAN DOS TIPOS DE PLATAFORMAS Y SUS CAMPOS DE VISIÓN TOMADO DE (KHORRAM & KOCH, 2012). .....	15
FIGURA 4 ESTRUCTURA INTERIOR DE LA TIERRA IMAGEN TOMADA DE (PROL-LEDESMA, 1988).....	19
FIGURA 5 MODELO DE UN SISTEMA GEOTÉRMICO HIDROTÉRMAL (DICKSON & FANELLI, 2004) .....	24
FIGURA 6 ESQUEMA QUE MUESTRA LA FIRMA ESPECTRAL DE TRES MATERIALES: VEGETACIÓN (VERDE), AGUA (AZUL), SUELO (ROJO), LOS NÚMEROS 1, 2, 3, 4, 5 Y 7 CORRESPONDEN A LAS BANDAS DEL SENSOR TM DE LANDSAT. (MCCLOY & SEVERIENS, 2009) .....	27
FIGURA 7 FIRMA ESPECTRAL DE LA VEGETACIÓN EL EJE VERTICAL ES REFLECTANCIA Y EL EJE HORIZONTAL LONGITUD DE ONDA, SE COLOCARON LAS REGIONES ESPECTRALES CONTENIDAS EN LAS BANDAS DEL SENSOR OLI. SOLO SE UTILIZARÁN 6 BANDAS DE ACUERDO AL ANÁLISIS REALIZADO.....	27
FIGURA 8 REGIONES ESPECTRALES DEL SENSOR OLI, SE GRAFICAN LAS FIRMAS ESPECTRALES CARACTERÍSTICAS DE LOS MINERALES DE OXIDACIÓN MÁS COMUNES. ....	28
FIGURA 9 MUESTRA LA FIRMA ESPECTRAL DE ALGUNOS MINERALES ARCILLOSOS, FILOSILICATOS, CARBONATOS Y SULFATOS LAS BANDAS OLI 6 Y OLI 7, PERTENECEN AL SENSOR OLI DE LANDSAT; EN EL EJE HORIZONTAL SE ENCUENTRA LA LONGITUD DE ONDA Y EL EJE VERTICAL EL PORCENTAJE DE REFLECTANCIA EN ESCALA LOGARÍTMICA.....	29
FIGURA 10 UBICACIÓN DE LA ZONA DENTRO DEL ESTADO DE BAJA CALIFORNIA SUR Y COORDENADAS DEL ÁREA DE ESTUDIO, IMAGEN TOMADA DE INEGI, SE MUESTRA EL ESTADO DIVIDIDO POR MUNICIPIOS. ....	30
FIGURA 11 UBICACIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO ÁREA DENTRO DEL CUADRO ROJO.....	31
FIGURA 12 SERVICIO GEOLÓGICO MEXICANO (1997). CARTA GEOLÓGICO-MINERA MODIFICADA DE LORETO, BAJA CALIFORNIA SUR. G12-5. EN EL CUADRO AZUL SE RESALTA LA ZONA DE ESTUDIO. ....	33
FIGURA 13 FILTROS DIRECCIONES EMPLEADOS.....	37
FIGURA 14 COMPOSICIÓN RGB 543, EN TONOS ROJOS SE RESALTA LA VEGETACIÓN, LOS CUERPOS DE AGUA SE PRESENTAN EN TONOS OSCUROS SI EL AGUA ESTÁ LIMPIA Y TONOS DE AZUL CLARO Y ROSADOS SI SE TIENE PRESENCIA DE SEDIMENTOS EN SUSPENSIÓN O DE VEGETACIÓN.....	42
FIGURA 15 COCIENTE ESPECTRAL DE VEGETACIÓN, SE UTILIZARON LAS BANDAS 5/4. EN TONOS CLAROS SE DESTACA LA PRESENCIA DE VEGETACIÓN, LOS TONOS OSCUROS CORRESPONDEN A OTRO MATERIAL DISTINTO DE VEGETACIÓN. ....	44
FIGURA 16 COCIENTE ESPECTRAL DE HIDROXILOS, SE UTILIZARON LAS BANDAS 6/7. LOS TONOS CLAROS INDICAN LA PRESENCIA DE HIDROXILOS, LOS TONOS OSCUROS CORRESPONDEN A OTRO MATERIAL DISTINTO DE LA COBERTURA DE HIDROXILOS. ....	45
FIGURA 17 COCIENTE ESPECTRAL DE ÓXIDOS (OLI 4/OLI 2). LOS TONOS CLAROS INDICAN LA PRESENCIA DE ÓXIDOS, LOS TONOS OSCUROS CORRESPONDEN A OTRO MATERIAL DISTINTO DE LA COBERTURA DE ÓXIDOS. ....	46
FIGURA 18 SUSTRACCIÓN ESPECTRAL DE VEGETACIÓN, SE UTILIZARON LAS BANDAS 5 - 4. EN TONOS CLAROS SE DESTACA LA PRESENCIA DE VEGETACIÓN, LOS TONOS OSCUROS CORRESPONDEN A OTRO MATERIAL DISTINTO DE VEGETACIÓN. ....	48

FIGURA 19 SUSTRACCIÓN ESPECTRAL DE HIDROXILOS, SE UTILIZARON LAS BANDAS 6 - 7. LOS TONOS CLAROS INDICAN LA PRESENCIA DE HIDROXILOS, LOS TONOS OSCUROS CORRESPONDEN A OTRO MATERIAL DISTINTO DE LA COBERTURA DE HIDROXILOS. ....	49
FIGURA 20 SUSTRACCIÓN ESPECTRAL DE ÓXIDOS OLI 4 - OLI 2. LOS TONOS CLAROS INDICAN LA PRESENCIA DE ÓXIDOS, LOS TONOS OSCUROS CORRESPONDEN A OTRO MATERIAL DISTINTO DE LA COBERTURA DE ÓXIDOS. ..	50
FIGURA 21 COMPONENTE OBTENIDA A PARTIR DEL ANÁLISIS PCA. COMPONENTE 4 PARA ÓXIDOS, EN TONOS CLAROS SE RESALTA EL GRUPO DE LOS ÓXIDOS .....	54
FIGURA 22 COMPONENTE PRINCIPAL DIRIGIDA PARA EL REALCE DE ÓXIDOS (COMPONENTE 1) .....	59
FIGURA 23 COMPONENTE PRINCIPAL DIRIGIDA PARA EL REALCE DE VEGETACIÓN (COMPONENTE 2) .....	60
FIGURA 24 COMPONENTE PRINCIPAL DIRIGIDA PARA EL REALCE DE HIDROXILOS (COMPONENTE 3) .....	61
FIGURA 25 COMPOSICIÓN A COLOR RGB UTILIZANDO LAS SUSTRACCIONES COMO BANDAS. VEGETACIÓN: 5-4 (ROJO), ÓXIDOS: 4-2 (VERDE) Y HIDROXILOS: 6-7 (AZUL).....	63
FIGURA 26 COMPOSICIÓN A COLOR RGB UTILIZANDO COCIENTES COMO BANDAS. VEGETACIÓN: 5/4 (ROJO), ÓXIDOS: 4/2 (VERDE) E HIDROXILOS: 6/7 (AZUL). ....	64
FIGURA 27 COMPOSICIÓN A COLOR UTILIZANDO COMPONENTES PRINCIPALES DIRIGIDAS COMO BANDAS. COMPONENTE 2: VEGETACIÓN (ROJO), COMPONENTE 1: ÓXIDOS (VERDE) Y COMPONENTE 3: HIDROXILOS (AZUL). ....	66
FIGURA 28 MAPA DE LA COMPOSICIÓN RGB O/H/O+H EN FALSO COLOR PARA EN ANÁLISIS DE COMPONENTES PRINCIPALES.....	67
FIGURA 29 CLASIFICACIÓN NO SUPERVISADA, SE UTILIZARON LAS COMPONENTES COMO BANDAS. ....	69
FIGURA 30 MAPA DE LINEAMIENTOS: NNW-SSE, SE, NW. LA IMAGEN CUENTA CON UN FILTRO PRINCIPAL NNW-SSE, ES EL RESULTADO DEL PROCESAMIENTO UTILIZANDO LA METODOLOGÍA PROPUESTA POR (MOORE & WALTZ, 1983). LOS TONOS BLANCOS IDENTIFICAN LINEAMIENTOS. ....	70
FIGURA 31 MAPA DE LINEAMIENTOS NE Y SW. LA IMAGEN CUENTA CON UN FILTRO PRINCIPAL NE, ES EL RESULTADO DEL PROCESAMIENTO UTILIZANDO LA METODOLOGÍA PROPUESTA POR (MOORE & WALTZ, 1983). LOS TONOS BLANCOS PUEDEN INDICAR LINEAMIENTOS. ....	71
FIGURA 32 MAPA DE LINEAMIENTOS N, S, E, W. LA IMAGEN CUENTA CON UN FILTRO PRINCIPAL N, ES EL RESULTADO DEL PROCESAMIENTO UTILIZANDO LA METODOLOGÍA PROPUESTA POR (MOORE & WALTZ, 1983). LOS TONOS BLANCOS PUEDEN INDICAR LINEAMIENTOS. ....	72
FIGURA 33 MAPA DE LOS LINEAMIENTOS OBTENIDOS EN TODAS LAS DIRECCIONES: N, NW, NE, SE, E-W, NNW-SSE. LA IMAGEN BASE ES LA COMPONENTE 1 OBTENIDA DEL ANÁLISIS POR COMPONENTES PRINCIPALES.....	73
FIGURA 34 MAPA INTEGRADO CON LINEAMIENTOS, COMPOSICIÓN RGB VEGETACIÓN, ÓXIDOS E HIDROXILOS, Y PUNTOS DE UBICACIÓN (CIAN) DE LAS ZONAS CON ALTERACIÓN HIDROTHERMAL PREDOMINANTE. ....	75
FIGURA 35 MAPA INTEGRADO CON LINEAMIENTOS, COMPOSICIÓN RGB ÓXIDOS, HIDROXILOS Y ÓXIDOS + HIDROXILOS. ....	76

## Índice de Tablas

TABLA 1 PROPIEDADES MACROSCÓPICAS DE LOS MATERIALES EN TÉRMINOS DE COCIENTES DE ENERGÍA .....	14
TABLA 2 ALGUNAS PLATAFORMAS Y SENSORES (CARACTERÍSTICAS PRINCIPALES) .....	17
TABLA 3 CARACTERÍSTICAS DE LA PLATAFORMA LANDSAT 8 .....	18
TABLA 4 ASOCIACIONES MINERALES PRESENTES EN LAS ZONAS DE ALTERACIÓN HIDROTHERMAL DE LOS PRINCIPALES TIPOS DE ROCA ENCAJONANTE, TOMADO DE (BROWNE, 1984). .....	25
TABLA 5 CARACTERÍSTICAS ESPECTRALES PARA ÓXIDOS, HIDROXILOS Y VEGETACIÓN .....	29
TABLA 6 BANDAS Y REGIONES ESPECTRALES SELECCIONADAS .....	35
TABLA 7 INFORMACIÓN ESTADÍSTICA DE LAS IMÁGENES. SE INCLUYE LA CORRECCIÓN ATMOSFÉRICA DESCRITA POSTERIORMENTE .....	35
TABLA 8 COORDENADAS DE LA ZONA DE ESTUDIO, CORRESPONDEN A LAS ESQUINAS INFERIOR IZQUIERDA Y SUPERIOR DERECHA. ....	36
TABLA 9 BANDAS SELECCIONADAS PARA EL PROCESAMIENTO POR COCIENTES .....	38
TABLA 10 BANDAS SELECCIONADAS PARA EL PROCESAMIENTO POR SUSTRACCIONES .....	39
TABLA 11 MATRIZ DE CORRELACIÓN OBTENIDA PARA EL ANÁLISIS DE COMPONENTES PRINCIPALES PARA 6 BANDAS	51
TABLA 12 MATRIZ DE EIGEN VECTORES, VECTORES CARACTERÍSTICOS .....	52
TABLA 13 MATRIZ DE CARGA PARA COMPONENTES PRINCIPALES, CUADRO ROJO DENOTANDO LOS ÓXIDOS Y CUADRO VERDE DENOTANDO VEGETACIÓN .....	52
TABLA 14 MATRIZ DE EIGEN VECTORES. ....	55
TABLA 15 MATRIZ DE CARGA PARA IDENTIFICACIÓN DE ÓXIDOS Y VEGETACIÓN, LAS CELDAS SOMBREADAS REPRESENTAN AQUELLAS COMPONENTES QUE CUMPLEN LAS CARACTERÍSTICAS NECESARIAS, PARA LA VEGETACIÓN (CUADRO VERDE), PARA LOS ÓXIDOS (CUADRO ROJO). ....	55
TABLA 16 MATRIZ DE EIGEN VECTORES. ....	55
TABLA 17 MATRIZ DE CARGA PARA LA IDENTIFICACIÓN DE HIDROXILOS.....	56
TABLA 18 MATRIZ DE EIGEN VECTORES Y MATRIZ DE CARGA (SE RESALTAN AQUELLAS COMPONENTES CON MAYOR CARGA; ROJO = ÓXIDOS, VERDE = VEGETACIÓN) .....	56
TABLA 19 MATRIZ DE EIGEN VECTORES Y MATRIZ DE CARGA (SE RESALTAN AQUELLAS COMPONENTES CON MAYOR CARGA; VERDE = VEGETACIÓN, AZUL = HIDROXILOS) .....	57
TABLA 20 COMPONENTES ELEGIDAS Y REASIGNADAS A PARTIR DEL PROCESAMIENTO Y ANÁLISIS POR COMPONENTES PRINCIPALES DIRIGIDAS. ....	58

## RESUMEN

El estado de Baja California Sur ha estado sujeto a diversas investigaciones, tanto académicas como gubernamentales y privadas, relacionadas a la búsqueda de indicios de actividad geotérmica para diversos usos como la generación de energía eléctrica, etc. Existe presencia de actividad tectónica y volcánica en varias regiones del estado, en dichas regiones es viable hallar ambientes hidrotermales fósiles y activos. Pese a los muchos estudios ya realizados, aún continúa la falta de información de tipo litológico en diversas zonas del estado, la percepción remota ofrece una alternativa viable para esta problemática debido a su bajo costo y disponibilidad de información, además de facilitar el estudio a zonas de difícil acceso. En la exploración de zonas geotérmicas, las imágenes satelitales ofrecen resultados en la identificación y delimitación de fallas y fracturas, la identificación de rocas alteradas por acción hidrotermal, etc. El propósito de la investigación es identificar mediante imágenes satelitales OLI Landsat 8, alteraciones hidrotermales y lineamientos asociados a actividad hidrotermal en la zona conocida como Sierra la Giganta, Baja California Sur, México. Los municipios de Comondú y Loreto en Baja California Sur, cuentan con diversas zonas de alteración hidrotermal reportadas en investigaciones académicas y gubernamentales lo que sugiere la presencia de sistemas hidrotermales dentro de dichos municipios. Como resultado se identificaron al menos tres zonas que presentan alteraciones hidrotermales que no se habían reportado con anterioridad asociados a sistemas de fallas y fracturas cercanos.

## ABSTRACT

The estate of Baja California Sur has been subject to diverse investigations, as much academic as governmental and private, related to the search of indications of geothermal activity for diverse uses like generation of electrical energy, etc. There is presence of tectonic and volcanic activity in several regions of the state, in these regions it is viable to find fossil and active hydrothermal environments. Despite the many studies already carried out, there is still a lack of lithological information in various areas of the state, remote perception offers a viable alternative to this problem due to its low cost and availability of information, as well as facilitating the study of areas Of difficult access. In the exploration of geothermal zones, the satellite images offer results in the identification and delimitation of faults and fractures, the identification of rocks altered by hydrothermal action, etc. The purpose of the research is to identify OLI Landsat 8 satellite images, hydrothermal alterations and hydrothermal activity in the area known as Sierra la Giganta, Baja California Sur, Mexico. The municipalities of Comondú and Loreto in Baja California Sur have several areas of hydrothermal alteration reported in academic and governmental research suggesting the presence of hydrothermal systems within these municipalities. As a result, at least three zones were identified that presented hydrothermal alterations that had not been previously reported associated to systems of faults and near fractures.

## **1. INTRODUCCIÓN.**

La percepción remota es una herramienta con alto uso en la exploración terrestre que requiere de la adquisición, procesamiento e interpretación de imágenes y datos obtenidos a partir de diversos sensores sin tener contacto físico con el objeto de estudio (fotografías aéreas e imágenes satelitales). La técnica de percepción remota se ha extendido a diversas áreas de investigación, debido a su variabilidad de usos y a su capacidad de analizar datos representativos de la superficie terrestre en diversas épocas. Esta técnica no está supeditada al inconveniente de la accesibilidad y genera información sustancial que puede aplicarse a diversos objetivos, por ejemplo: el mapeo litológico, identificación de lineamientos, identificación de zonas de alteración, etcétera.

En la exploración de zonas geotérmicas, las imágenes satelitales ofrecen resultados en la identificación y delimitación de fallas y fracturas como indicios de la permeabilidad que es un factor esencial en estos sistemas; otro punto de importancia es la identificación de rocas alteradas por acción hidrotermal (Sabins, 1999). La región de Baja California Sur ha estado sujeta a diversas investigaciones, tanto académicas como gubernamentales y privadas, relacionadas a la búsqueda de indicios de actividad hidrotermal para diversos usos como la generación de energía eléctrica, búsqueda de yacimientos minerales de interés económico, entre otros. Sin embargo, muchos trabajos en la actualidad se han concentrado en áreas específicas de este estado, tanto por su interés económico y académico al igual que su accesibilidad para posteriores estudios. Pese a los muchos estudios ya realizados, aún continúa la falta de información de tipo litológico en diversas zonas del estado, lo que dificulta las investigaciones; en este caso la percepción remota ofrece una alternativa viable para esta problemática debido a su bajo costo y disponibilidad de información, además de facilitar el estudio a zonas de difícil acceso.

La opción de realizar una investigación a través de imágenes satelitales ha demostrado su utilidad en la identificación y delimitación de zonas que contengan los grupos mineralógicos relacionados con la alteración hidrotermal como son los óxidos e hidroxilos. Los métodos propuestos para la ubicación de estos grupos minerales son diversas técnicas de realce espectral; cocientes de bandas Bancora y Prol-Ledesma (2008), componentes principales para el mapeo de alteraciones (Loughlin, 1991), componentes principales dirigidas y orientadas (Crosta & Moore, 1989). Cada técnica será evaluada con el fin de resaltar cuál de ellas presenta mayores beneficios en la identificación de alteración hidrotermal.

### **1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.**

Existe presencia de actividad tectónica y volcánica en varias regiones del estado, en dichas regiones es viable hallar ambientes hidrotermales fósiles y activos debido a trabajos realizados por varios investigadores (Prol-Ledesma et al. 2010, Rodríguez-Díaz et al. (2010), Canet et al. (2005)). Los municipios de Comondú y Loreto en Baja California Sur, cuentan con diversas zonas de alteración hidrotermal reportadas en investigaciones académicas y gubernamentales lo que sugiere la presencia de numerosos sistemas hidrotermales dentro de dichos municipios (Instituto Nacional de Estadística, 2015). Ambos municipios tienen área conjunta de 17,425 km<sup>2</sup>, lo cual representa una zona extensa con diversos sitios de interés pero que es poco accesible al estudio en campo en

su totalidad; tomando en cuenta esto, las investigaciones a partir de imágenes satelitales ofrecen una alternativa real para la identificación de zonas de alteraciones hidrotermales.

Una de estas zonas poco analizadas que será incluida en este estudio se conoce cómo “Sierra La Giganta” comprendida entre ambos municipios y que representa un área de interés dada su cercanía a varios sitios de alteración hidrotermal estudiados con anterioridad y con información disponible. Esta zona representa un sitio adecuado para la exploración a través de imágenes satelitales Landsat 8 OLI.

## **1.2. DELIMITACIÓN DEL PROBLEMA.**

La extensión de la zona y la poca accesibilidad presente, requieren el uso de imágenes satelitales para identificar aquellas zonas que presenten alteración de tipo hidrotermal. Aunado a esto, actualmente existe poca información de tipo geológica en la Sierra La Giganta lo que implica que el uso de estas herramientas sea indispensable para obtener información de importancia tanto económica como académica de dicha zona.

El objetivo planteado para este trabajo es la caracterización mineral de las rocas alteradas en dicha zona como guía para futuros estudios de exploración.

## **1.3. JUSTIFICACIÓN.**

Desde los primeros días de la exploración de fuentes hidrotermales en México (1970), Baja California ha sido identificada como una región con gran potencial. Pese a esto existen muchas zonas sin estudiar aún. Sin embargo, la urgente necesidad de identificar las regiones geotermales para desarrollo comercial en el futuro ha generado esfuerzos enfocados a obtener más información. Existe poca información litológica concerniente directamente a esta zona en la Sierra La Giganta. La dificultad de acceder a dicha sierra hace necesario el uso de imágenes satelitales para la identificación de los grupos mineralógicos asociados a la alteración hidrotermal (óxidos e hidroxilos). Dado que diversas investigaciones han tenido éxito en la identificación de estos grupos minerales en zonas con presencia hidrotermal, el procesamiento de imágenes satelitales de tipo Landsat proporciona una alternativa razonable.

El uso de imágenes satelitales para la exploración geotérmica sigue aumentando en importancia, debido al relativo bajo costo de exploración y delimitación en áreas extensas y de difícil acceso, para reducir la incertidumbre en la exploración terrestre a zonas específicas que cumplan con las características geológicas, estructurales y geoquímicas relevantes para descubrir zonas con alteración hidrotermal. Hasta ahora, el sector minero prevalece como la base económica de la entidad, pero los recursos geotérmicos en esta zona ofrecen un nuevo potencial económico aún no explotado en su totalidad.

## **1.4 OBJETIVOS.**

La presente investigación tiene como propósito: Identificar mediante imágenes satelitales OLI de la plataforma Landsat 8, alteraciones hidrotermales y lineamientos asociados a actividad hidrotermal en la zona conocida como Sierra La Giganta, Baja California Sur, México.

- 1) Identificar los grupos mineralógicos (óxidos e hidroxilos)

- 2) Aplicar las diversas técnicas de realce espectral para la identificación de dichas zonas de alteración.
- 3) Clasificación geológica de la zona de estudio.
- 4) Cartografiar lineamientos superficiales.
- 5) Interpretación óptima de los datos recabados.

## 2. PERCEPCIÓN REMOTA

### 2.1. DEFINICIÓN.

La percepción remota parte de un principio fundamental, la medición de ciertas propiedades físicas sin contacto con el objeto de estudio (Khorram & Koch, 2012), la información recabada puede ser de diversos tipos dependiendo del mecanismo de toma de datos. Muchos métodos geofísicos toman mediciones de las características físicas mediante el uso de campos electromagnéticos, radiación electromagnética, sistemas de radar, sismógrafos, etcétera.

En el contexto de nuestro interés la percepción remota se refiere a la tecnología capaz de captar la energía electromagnética emanada o reflejada por la superficie terrestre u objetos en la superficie o atmósfera terrestre, la información obtenida es utilizada para conocer las propiedades de dichos objetivos. Para ello, se analiza la radiación electromagnética recibida y su relación con el objeto que la emitió, reflejó o dispersó.

### 2.2. ENERGÍA ELECTROMAGNÉTICA

La energía electromagnética es esencial en la percepción remota, ya que es a través de esta que caracterizamos la superficie terrestre. La energía electromagnética, se compone de un campo eléctrico y uno magnético perpendiculares entre sí y propagándose en una trayectoria perpendicular a ambos campos. Para poder describir una onda tomamos en cuenta las características que la describen: longitud de onda  $\lambda$  (distancia entre dos puntos en la misma fase de la onda), frecuencia  $\nu$  (número de ondas que pasan por un mismo punto en un periodo de tiempo, y amplitud (nivel de energía, intensidad de cada pico) Figura 1.

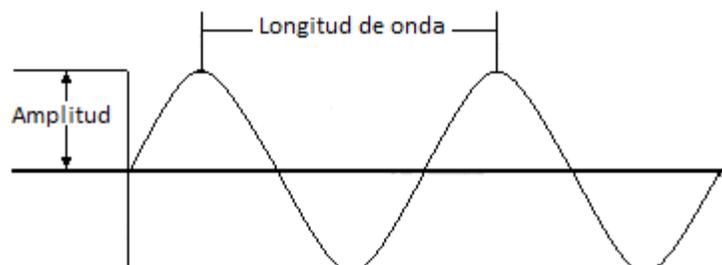


Figura 1 Se muestran las características de longitud de onda y amplitud de las ondas (Campbell et al., 2011).

La velocidad de las ondas electromagnéticas en el vacío es una constante ( $c=299,972$  km/s), ésta es comúnmente mencionada como velocidad de la luz siendo la luz una forma de denominar a la energía electromagnética del espectro visible (Sabins, 1996).

Las características de la propagación de la energía en forma de radiación electromagnética desde la fuente hasta los sensores, la convierte en una fuente valiosa de datos para la interpretación de las propiedades del medio con el cual interactúa. Es necesario entender cómo se genera, se propaga y se modifica en contacto con la materia (Sabins, 1996).

En 1865, James C. Maxwell físico británico desarrollador de la teoría electromagnética clásica, publicó una teoría que unifica los fenómenos eléctrico y magnético. El modelo plantea que la energía electromagnética es producida siempre que existen variaciones en un campo magnético y por lo tanto en el campo eléctrico que genera. El movimiento aparente de la carga es una perturbación caracterizada por la presencia de ondas eléctricas y magnéticas (onda electromagnética) (Sabins, 1996). La teoría cuántica de Max Planck reconfigura el modelo de Maxwell, lo que permite describir cómo la radiación electromagnética interactúa con la materia y explica el efecto fotoeléctrico. Max Planck postuló que la energía electromagnética es absorbida y emitida en unidades discretas llamadas cuantos. El tamaño de cada unidad es directamente proporcional a la frecuencia de la radiación de la energía.

$$E = h\nu \quad \text{Ec. 1}$$

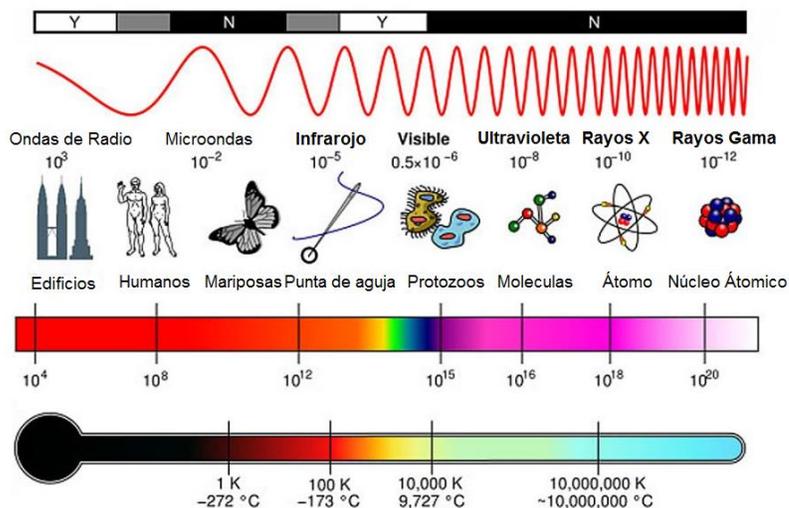
Dónde:

E es la energía del cuanto,  $\nu$  la frecuencia y  $h$  la constante de Planck =  $6.625 \times 10^{-34}$  Js. Ambos modelos explican la naturaleza de la radiación electromagnética completándose mutuamente en la expresión.

$$E = \frac{h}{\lambda} \quad \text{Ec. 2}$$

A partir de la Ec. 2 entendemos que la energía del cuanto es inversamente proporcional a su longitud de onda. Esto indica que, a mayor longitud de onda, menor cantidad de energía.

Para que la energía electromagnética se genere requerimos diversos mecanismos, el decaimiento radioactivo de sustancias, movimiento térmico de los átomos y las moléculas, cambio en los niveles de energía de los electrones, también las reacciones nucleares dentro del sol producen un espectro de radiación. Lo denominado cómo espectro electromagnético es la representación esquemática de las características de las ondas electromagnéticas basándose en la frecuencia, longitud de onda y cantidad de energía. Las divisiones son establecidas de acuerdo a las diferentes disciplinas en función de su enfoque Figura 2 (Campbell, 1987).



**Figura 2 Espectro electromagnético, se compara la longitud de onda con el tamaño de varios objetos, también se asocia con la temperatura a la cual emitiría la materia en cada longitud de onda. (tomada de National Aeronautics and Space Administration, 2017)**

El rango de visión humana constituye una parte muy pequeña del espectro electromagnético, los límites se relacionan a la sensibilidad visual de los humanos. Este rango de radiación visible se divide en segmentos que son denominados en función de los colores primarios aditivos, que se encuentran definidos en los siguientes intervalos de longitud de onda: 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 percibidos por el cerebro humano consisten en una relación establecida por el proceso de visión del cerebro para cada longitud de onda o energía de la radiación electromagnética (Lira, 2003), cuando llega el haz de luz al ojo se presentan dos fenómenos; “El primero es la recepción de la luz por este órgano y el segundo es la formación de la imagen en la retina” (Eliezer, 2002). Estos fenómenos se basan en la refracción que ocurre entre dos medios distintos y que causa un cambio en el ángulo de propagación del rayo. El ojo funciona como una cámara fotográfica, en su interior está cubierto de una capa negra que evita que llegue luz a la retina excepto por la parte frontal, el iris funciona controlando la cantidad de luz que llega a la retina. Al recibir la luz la retina reacciona y envía una señal nerviosa al cerebro a través del nervio óptico (Eliezer, 2002).

*“La transformación de la luz en señales ocurre en las células fotorreceptoras (bastones y conos (Eliezer, 2002)), cada célula absorbe la luz de un punto de la imagen y genera una señal eléctrica hacia el cerebro que lleva la información de cuanta luz ha sido absorbida”.*

Ambos tipos de células (bastones y conos) se encuentran en la retina. Los bastones nos dan la visión en blanco y negro, estas células son sensibles a la luz y se apagan al recibir mucha luz, en cambio los conos solo funcionan con cierto nivel de iluminación. De estas células poseemos más de 100 millones que detectan el número de fotones (cuantos de luz) que llegan a ellas, independientemente de la longitud de onda de la radiación. En cambio, los “conos”, que no llegan a 7 millones, son por su parte células sensoriales mucho más especializadas que sólo aparecen en el ojo del hombre y los primates y que solo detectan ciertos rangos de longitud de onda.

## 2.3. INTERACCIÓN CON LA ATMÓSFERA

La radiación que es detectada por los diferentes sensores deberá atravesar cierto espesor de atmósfera. Los efectos de la atmósfera sobre la radiación captada varían de acuerdo a la composición de la misma, las condiciones atmosféricas (temperatura, presión, humedad, etc.) y las longitudes de onda involucradas. Estos efectos pueden ser dispersión y absorción.

**Dispersión Atmosférica:** La dispersión atmosférica afecta la intensidad de la energía electromagnética que recibe el sensor debido a partículas de la atmósfera (Lillesand & Kiefer, 2000). La magnitud de dispersión en un cuerpo planetario dependerá del tamaño de las partículas, su abundancia, la longitud de onda de la radiación, y del espesor de la atmósfera por la cual atraviesa (Campbell, 1987). Existen tres procesos principales de dispersión en la atmósfera.

**Dispersión de Raleigh:** Ocurre cuando la radiación interactúa con moléculas atmosféricas que son pequeñas en comparación a la longitud de onda de la radiación, tiende a afectar longitudes de onda corta, por ejemplo, se presenta en gran medida en regiones del espectro visible (desde el azul y disminuye hacia el infrarrojo). Se presenta en partículas pequeñas como moléculas de gases tal es el caso de N<sub>2</sub> y O<sub>2</sub>. Este tipo de dispersión representa el proceso dominante en la atmósfera terrestre (Campbell, 1987).

**Dispersión de Mie:** Se presenta cuando el diámetro de las partículas en la atmósfera es similar a la longitud de onda de la radiación. El vapor de agua, partículas de polvo, polen y smog son los principales causantes de esta dispersión, se presenta en longitudes de onda larga.

**Dispersión no selectiva:** Actúa en longitudes de onda que son mucho más grandes, por lo mismo las partículas tienen un tamaño mayor que dichas longitudes de onda. Las gotas de agua causan este tipo de dispersión con diámetros entre 5 y 100  $\mu\text{m}$  (Lillesand & Kiefer, 2000). La denominación de “no selectiva” hace referencia a que no se encuentra limitado a cierta longitud de onda.

**Absorción atmosférica:** La absorción atmosférica conlleva pérdida de energía debido a las partículas de la atmósfera (principalmente vapor de agua, dióxido de carbono y ozono) absorben diversas longitudes de onda. Este proceso provoca que en ciertos rangos no sea posible detectar la radiación electromagnética, por lo que los sensores deben ser diseñados en las regiones del espectro electromagnético donde no se presentan los efectos de absorción. En estos casos la transmisividad de la atmósfera permite que la radiación atraviese la atmósfera, se refleje en la superficie y en su trayectoria de regreso sea detectada por los sensores. A esas regiones donde no se presenta la absorción se les denomina “ventanas atmosféricas”.

## 2.4. INTERACCIÓN CON LA SUPERFICIE.

Una vez que la radiación electromagnética atraviesa la atmósfera e interactúa con la superficie se llevan a cabo diferentes procesos, parte de la radiación es transmitida, absorbida, dispersada o reflejada por los materiales presentes en la superficie. Es así como cada material presenta una respuesta distinta correspondiente a cada uno de los procesos

mencionados. La energía absorbida es aquella porción de la energía que el material integra a su constitución (es disipada generalmente como calor, etcétera), la transmisión ocurre cuando la radiación pasa a través de una sustancia o cuerpo sin tener una atenuación significativa. La reflexión ocurre cuando un haz de luz (radiación) choca con alguna superficie y este haz es reflejado, su trayectoria a partir de su interacción depende del ángulo de incidencia de la radiación.

La energía electromagnética no está exenta del principio de conservación de la energía, para la interacción de la radiación con la materia, la energía incidente ( $E_I$ ) es separada entre la reflexión ( $E_R$ ), absorción ( $E_{Abs}$ ) y la transmisión ( $E_T$ ) como se ve en la Ec. 3

$$E_I = E_R + E_{Abs} + E_T \quad \text{Ec. 3}$$

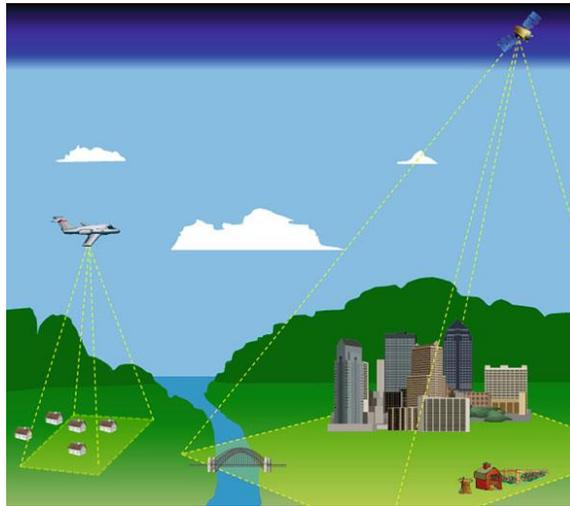
Claramente la proporción de la energía absorbida, transmitida y reflejada será diferente para los distintos materiales presentes en la superficie, además que la porción de la energía que experimentará cada proceso no será la misma para diferentes longitudes de onda (Sabins, 1996).

**Tabla 1 Propiedades macroscópicas de los materiales como resultado de su interacción con la energía electromagnética.**

Denominación	Unidad	Característica
<b>Reflectancia (<math>\rho</math>)</b>	Adimensional	$E_R$ Energía reflejada entre la radiación incidente $E_I$
<b>Transmitancia (<math>\tau</math>)</b>	Adimensional	$E_T$ Energía transmitida entre la radiación incidente $E_I$
<b>Absorbancia (<math>\alpha</math>)</b>	Adimensional	$E_{Abs}$ Energía absorbida entre la radiación incidente $E_I$
<b>Radiancia</b>	Energía por tiempo por unidad de área ( $W/m^2$ )	Suma de toda la radiación proveniente del cuerpo en observación, ya sea reflejada, dispersada o emitida.
<b>Emitancia</b>	Joule por segundo	Depende de la temperatura del cuerpo en observación

## 2.5. SENSORES E IMÁGENES

Los sensores son aquellos instrumentos diseñados para captar la energía electromagnética proveniente de la interacción con la superficie de la Tierra, estos se colocan sobre plataformas que son los vehículos que trasladan y dan soporte al sensor; el tipo de plataforma puede ser un satélite, avión, globo o un dron (Figura 3). Existen dos tipos de sensores: pasivo que utiliza la energía proveniente de una fuente natural (por ejemplo: el Sol), en cambio un sensor activo es aquel que utiliza una fuente de energía electromagnética propia.



**Figura 3.** Se muestran dos tipos de plataformas y sus campos de visión tomado de Khorram y Koch (2012).

La forma en que se realiza la medición parte del principio de interacción de la radiación con el elemento físico: el resultado es radiación electromagnética que muestra los efectos de esta interacción, permitiendo así identificar el tipo de material con el que interaccionó. De acuerdo al diagrama (colector, detector, procesado y producto) una parte de la radiación emitida, reflejada o transmitida por la superficie física es captada sobre cierto ángulo sólido en una dirección predeterminada por el arreglo de sensores, con la función de detectar un conjunto de intervalos de energía ( $\Delta E$ ) o longitudes de onda ( $\Delta \lambda$ ), en algunos casos puede existir más de un detector para el mismo intervalo. Para cada intervalo se detecta la cantidad de radiación por unidad de ángulo sólido y unidad de tiempo, las unidades son  $mW/msterad/s$ . Finalmente la señal de voltaje generada por los detectores se introduce a un convertidor analógico/ digital, que la contabiliza empleando una escala en función de  $2^n$  elementos.

Para cada intervalo  $\Delta E$  y para cada CIV (campo instantáneo de visión), se genera un número que se guarda en algún medio de almacenamiento, con una posición lógica de acuerdo al lugar relativo del CIV en la escena. La escena obtenida se transforma en un pixel que es un elemento lógico de la imagen digital, al cual se le asociarán los valores de energía detectados en cada uno de los intervalos que tiene asignado a un sensor. Al terminar se tiene un conjunto de matrices de números para cada intervalo de energía obtenido para cada pixel. El tamaño de la matriz será de  $M \times N$  (número de píxeles por columna y por renglón) y cada una formará una imagen digital conocida como banda correspondiente a cada uno de los sensores: banda del azul, verde, rojo, infrarrojo cercano, etc.

## **2.6. IMAGEN**

Una imagen es un arreglo matricial que representa la respuesta espectral de una escena en la superficie terrestre o en general para un objeto de estudio.

### **Imagen multiespectral e hiperespectral**

El conjunto de más de una banda para una escena dada, caracteriza la distribución espacial y espectral de la radiación proveniente de dicha escena para diferentes

longitudes de onda. Esta imagen forma un campo vectorial compuesto por píxeles provenientes de las bandas. Las imágenes multiespectrales están formadas por relativamente pocas bandas (normalmente entre 3 y 20). Una imagen hiperespectral es una imagen que tiene numerosas bandas espectrales de información a través de todo el espectro electromagnético, generalmente más de cien. Normalmente están formadas por un mayor número de bandas (pueden ser varias decenas hasta cientos) y éstas siempre son contiguas. Es decir, tenemos el espectro continuo, algunas tienen bandas en rangos de 10 nanómetros que cubren desde el rango visible hasta el infrarrojo lejano (Campbell, 1987).

## **2.7. IMÁGENES SATELITALES**

Las imágenes aéreas predecesoras de las imágenes satelitales fueron usadas desde 1858 patentadas por el francés Gaspar Feliz Tournachon quien utilizó un globo para tomar fotografías aéreas con uso cartográfico (International, 2016). Sin embargo, la dificultad de las condiciones necesarias para la toma de imágenes, provocó el uso de otras plataformas (cometas, palomas, cohetes) mucho antes de su uso militar. Para 1882 se contaba con cámaras más pequeñas y el meteorólogo inglés E. D. Archibald obtuvo fotografías a través del uso de cometas. La necesidad de imágenes durante la primera y segunda guerra mundial impulsó más y más el uso de diferentes plataformas, con la llegada de los aeroplanos la toma de imágenes fue más precisa y continua, y posterior a la guerra su uso se volvió comercial, diseñándose aeronaves y sensores exclusivos para este propósito.

La carrera espacial durante la guerra fría intensificó el uso de sensores remotos en las misiones espaciales, la primera imagen satelital se obtuvo con el satélite Explorer 6 (NASA) en 1959 (Khorram & Koch, 2012). Desde 1972 existe monitoreo a través de sensores remotos (ERTS-A NASA). A partir de 1980 con el éxito de la misión Landsat muchos países se volcaron a diseñar y construir sus propios satélites de monitoreo. Además, el éxito comercial de las imágenes satelitales propició el nacimiento de empresas privadas que diseñan, construyen y lanzan sus propias misiones.

Tabla 2 Algunas Plataformas y Sensores (características principales).

Plataforma	Sensor	Fechas	Resoluciones							
			Temporal	Radiométrico	Espacial	Banda	Esppectral			
Landsat 5	TM	Inicio de operación Marzo 1984 . El sensor TM salió de operación Noviembre 2011	16 días	8 bits	30 metros	1	0.45 – 0.52 $\mu\text{m}$ (azul-verde)			
						2	0.52 – 0.60 $\mu\text{m}$ (verde)			
						3	0.63 – 0.69 $\mu\text{m}$ (rojo)			
						4	0.76 – 0.90 $\mu\text{m}$ (IR cercano)			
						5	1.55 – 1.75 $\mu\text{m}$ (IR medio)			
	MSS	El sensor MSS se volvió a encender y funcionó hasta Enero 2013	16 días	8 bits	30 metros	6	10.4 – 12.5 $\mu\text{m}$ (IR lejano)			
						7	2.08 – 2.35 $\mu\text{m}$ (IR medio)			
						pixel 57 x 79 m	1	0.5 – 0.6 $\mu\text{m}$ (verde)		
						2	0.6 – 0.7 $\mu\text{m}$ (rojo)			
						3	0.7 – 0.8 $\mu\text{m}$ (IR cercano)			
						4	0.8 – 1.1 $\mu\text{m}$ (IR cercano)			
Landsat 7	ETM+	Lanzado en 15 de Abril 1999	16 días		30 metros	1	0.450 – 0.515 $\mu\text{m}$ (azul-verde)			
						2	0.525 – 0.605 $\mu\text{m}$ (verde)			
						3	0.630 – 0.690 $\mu\text{m}$ (rojo)			
						4	0.75 – 0.90 $\mu\text{m}$ (IR cercano)			
		Considerado con un vida útil de 5 años.					5	1.55 – 1.75 $\mu\text{m}$ (IR medio)		
							6	10.4 – 12.5 $\mu\text{m}$ (IR lejano)		
							7	2.09 – 2.35 $\mu\text{m}$ (IR medio)		
							8	0.52 – 0.90 $\mu\text{m}$ pancromático		
						1.58 – 1.75 $\mu\text{m}$ (IR medio)				
Spot 3	HRV	Lanzado 26 de Septiembre 1993	1-3 días	8 bits	10 metros	PN	0.51 – 0.73 $\mu\text{m}$			
	PN									
	XS	En funcionamiento hasta noviembre de 1996	1-3 días	8 bits	20 metros	1	0.50 – 0.59 $\mu\text{m}$ (verde)			
						2	0.61 – 0.68 $\mu\text{m}$ (rojo)			
						3	0.79 – 0.89 $\mu\text{m}$ (IR cercano)			
	Spot 4	HRVIR	Lanzado 24 de Marzo 1998	1-5 días	8 bits	10 metros	1	1.58 – 1.75 $\mu\text{m}$ (IR medio)		
PN		1					0.51 – 0.73 $\mu\text{m}$			
XS						1-5 días	8 bits	20 metros	2	0.50 – 0.59 $\mu\text{m}$ (verde)
									3	0.61 – 0.68 $\mu\text{m}$ (rojo)
									CCD	0.79 – 0.89 $\mu\text{m}$ (IR cercano)
VGT						1-5 días	8 bits	20 metros	1	0.45 – 0.50 $\mu\text{m}$ (azul)
									2	0.61 – 0.68 $\mu\text{m}$ (rojo)
									3	0.79 – 0.89 $\mu\text{m}$ (IR cercano)
									4	1.58 – 1.75 $\mu\text{m}$ (IR medio)
Spot 5		HRVIR				Lanzado 24 de Mayo 2002	1-5 días	8 bits	10 metros	1
	PN	1	0.51 – 0.73 $\mu\text{m}$							
	XS		1-5 días	8 bits	20 metros				2	0.50 – 0.59 $\mu\text{m}$ (verde)
									3	0.61 – 0.68 $\mu\text{m}$ (rojo)
									CCD	0.79 – 0.89 $\mu\text{m}$ (IR cercano)
	VGT		1-5 días	8 bits	20 metros				1	0.45 – 0.50 $\mu\text{m}$ (azul)
									2	0.61 – 0.68 $\mu\text{m}$ (rojo)
									3	0.79 – 0.89 $\mu\text{m}$ (IR cercano)
						4	1.58 – 1.75 $\mu\text{m}$ (IR medio)			
ASTER satellite Terra	Visible	Inicio 18 de Diciembre 1999	4-16 días	8 bits	15 metros	1,2,3	3 bandas en 0.52-0.86 $\mu\text{m}$			
	infrarojo cercano				30 metros	4,5,6,7,8,9	6 bandas en 1.6 -2.43 $\mu\text{m}$			
	infrarojo termico				90 metros	10,11,12,13,14	5 bandas en 8.125 -11.65 $\mu\text{m}$			
MODIS	VIS, NIR, SWIR/MWIR and	inicio 18 de Diciembre 1999	1 0 2 días	12 bits	Área: 500, 250 y 1 Km	36	0.4 -14 $\mu\text{m}$			

Dada la variedad de imágenes satelitales disponibles en función de las plataformas y sensores existentes solo se muestran algunas plataformas y sensores en la Tabla 2.

Existen varios conceptos que deben tomarse en cuenta para la adquisición de imágenes satelitales, así como su aplicación a la diversidad de objetivos posibles. Si bien existe una amplia gama de imágenes, la utilidad de algunas puede ser nula en ciertas investigaciones. Aquí aparece el concepto de resolución, la característica propia del sensor para medir una variable física requiere de la consideración de cuatro tipos de resolución:

**Resolución espacial:** Distancia más pequeña que es posible apreciar con un sensor. Tamaño del pixel en metros equivalentes del terreno.

**Resolución espectral:** Región del espectro electromagnético que puede detectar, así como dimensión y número de intervalos de longitud de onda del espectro que es capaz de medir el sensor.

**Resolución temporal:** Periodicidad entre observaciones, es aquel intervalo de tiempo en que el sensor toma las imágenes de un área en específico.

**Resolución radiométrica:** Detalle en la detección, se refiere a la sensibilidad para diferenciar la intensidad de una señal.

Formatos en que se han presentado las imágenes

- BIP: Formato de banda intercalado por pixel
- BIL: Formato de banda intercalado por línea
- BSQ: Formato de banda secuencial

Actualmente las imágenes en general se obtienen en formato Geotiff por bandas separadas.

### Plataforma Landsat

Se eligió el satélite Landsat 8 y el sensor OLI, debido a la accesibilidad de esta información. Las imágenes utilizadas en este trabajo fueron adquiridas el 15 de febrero del 2016, se descargaron sin costo desde el sitio del U. S. Geological Survey. El satélite fue lanzado el 11 de febrero de 2013 y entró en operaciones a partir del 30 de mayo del mismo año. Cuenta con 11 bandas distribuidas en 2 sensores, las características principales se anexan en la Tabla 3.

**Tabla 3 Características de la plataforma Landsat 8**

Plataforma	Sensor	Fechas	Errores	Resoluciones				
				Temporal	Radiométrico	Espacial	Banda	
Landsat 8	OLI	Puesto en órbita el 11 de febrero de 2013	Inclinado 98,2° (un poco retrógrada)	16 días	12 bits	30 m.	1	Visible (0.43 - 0.45 μm)
							2	Visible (0.450 - 0.51 μm)
							3	Visible (0.53 - 0.59 μm)
							4	rojo (0.64 - 0.67 μm)
							5	IR cercano(0.85 - 0.88 μm)
							6	SWIR 1(1.57 - 1.65 μm)
							7	SWIR 2 (2.11 - 2.29 μm)
	15 m.	8	(PAN) (0.50 - 0.68 μm)					
	30 m.	9	Cirrus (1.36 - 1.38 μm)					
	100 m.	10	(10.6 - 11.19 μm)					
	TIRS	En servicio					11	(11.5 - 12.51 μm)

Como se puede ver, las imágenes adquiridas por la plataforma Landsat 8 ofrecen características mejoradas en cuanto a su resolución radiométrica, espacial y espectral con respecto a sus predecesores, cabe mencionar que el sensor Operational Land Imager (OLI), (generador operacional de imágenes de tierra) ofrece otras bandas añadidas para mejorar la recepción de información en la banda del azul y la del infrarrojo cercano. También se cambiaron los rangos de las bandas para evitar la absorción de la atmósfera y también para obtener señales más limpias de la respuesta espectral de algunos materiales específicos (USGS, 2016).

### 3. AMBIENTE HIDROTHERMAL

#### 3.1. FUNDAMENTOS

La Tierra como planeta es una fuente transmisora y generadora de calor debido a diferentes procesos que ocurren en su interior, las manifestaciones de esta energía han sido observadas y denotadas desde tiempos remotos (volcanes, géiseres, manantiales, etc.). Se sabe con base a experiencias registradas que profundizando en el interior de minas la temperatura aumenta gradualmente, además desde tiempo remotos se han observado y denotado manifestaciones superficiales de calor. El calor emanado por el interior de la tierra tiene su origen en el enfriamiento natural del planeta, el decaimiento radiactivo de algunos elementos presentes, además de la atracción gravitacional del sol y la Luna. Los dos primeros mecanismos aportan el mayor porcentaje de energía calorífica procedente del subsuelo. La hipótesis de la formación del sistema solar pretende explicar él porque en el interior de la tierra existe un manto y núcleo a altas temperaturas, durante el proceso de formación del planeta se llevó a cabo una compactación de fragmentos cósmicos debido a la acción gravitacional del sol. La fricción y choque de estos fragmentos y su posterior unión en un solo objeto generó un aumento en la temperatura desde el comienzo del planeta.

Una vez que el planeta estuvo formado por dicha acumulación, se generó una diferenciación gravitacional, que plantea el movimiento de los elementos más densos hacia el interior del planeta y el ascenso de los elementos ligeros, este proceso originó una enorme cantidad de energía liberada debido al movimiento (fricción, choque, etcétera) de los materiales, y provocando la estratificación del planeta (Prol-Ledesma, 1988). La estructura interna del planeta quedó condicionada durante este proceso Figura 4, la corteza terrestre se fue enfriando hasta solidificarse actuando como aislante para las capas interiores, en términos generales el interior del planeta puede dividirse en 3 capas: corteza, manto y núcleo (Figura 4), existe una subdivisión para el manto: manto superior e inferior y el núcleo: externo e interno.

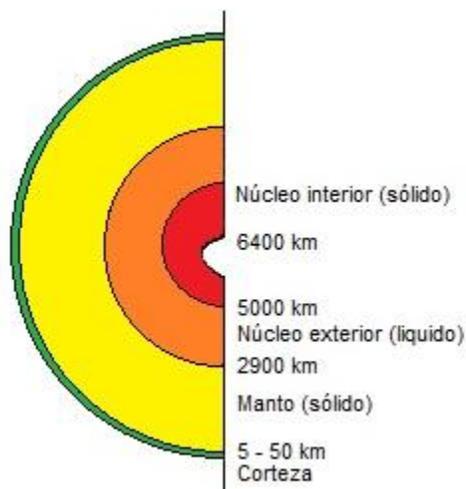


Figura 4 Estructura interior de la Tierra imagen tomada de (Prol-Ledesma, 1988).

La composición mineral de cada una de las capas difiere en relación a su contenido de elementos pesados, las capas externas presentan un alto contenido de rocas y minerales con base en sílice y aluminio “minerales ligeros”, en comparación al contenido de hierro y magnesio que aumenta conforme se profundiza, finalizando con un núcleo que con base a los estudios y teorías tendría un contenido primordialmente de hierro y níquel. Se pueden distinguir diferencias fundamentales entre las capas de la tierra esto también se ve reflejado en el mecanismo que transporta el calor a través de cada una de las capas. Existen dos mecanismos principales de transferencia de calor que actúan en el interior del planeta: conducción y convección (Prol-Ledesma, 1988), cada uno tiene una relevancia particular de acuerdo a la capa de que se trate; la radiación es otra forma de transferencia de calor que es muy importante en la atmósfera.

**Conducción:** Es la capacidad que posee un cuerpo (sólidos) de transmitir calor a través del contacto con este físico y está en función de la conductividad térmica, si la conductividad térmica es alta menor será la diferencia de temperatura a través del objeto. La conducción es el medio de transmisión de calor más importante en la corteza y en la mayor parte del interior del planeta, gran parte del planeta reacciona como sólido y es debido a esta característica que la conducción es el mecanismo primordial.

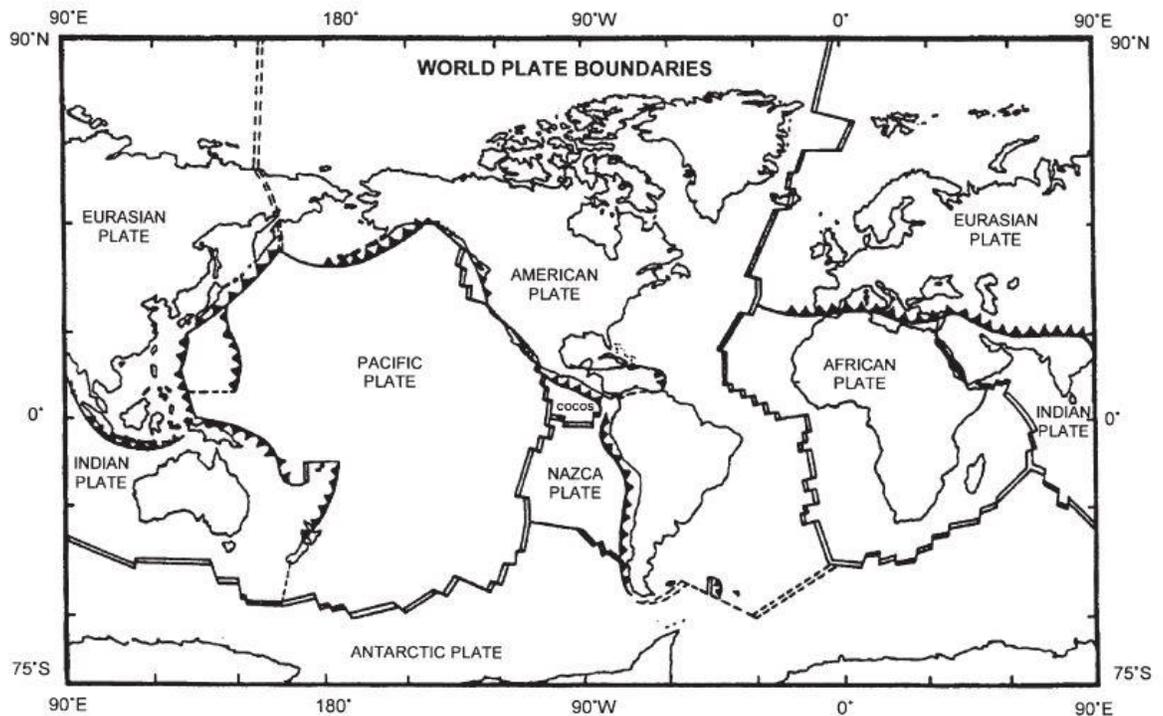
**Convección:** Este mecanismo de transporte de calor se presenta en líquidos y gases, una vez que se aplica calor a un fluido comienza un proceso denominado celda de convección donde el calentamiento y expansión del fluido desencadena un ascenso de parte de este fluido provocado por la reducción en su densidad, consecuentemente otra parte del fluido descenderá hasta aumentar su temperatura y expandirse nuevamente para así ascender en un ciclo continuo. El manto presenta cierto comportamiento como fluido con una alta viscosidad, el transporte de calor más importante es la convección.

**Radiación:** la radiación consiste en la emisión de energía que estará condicionada a la temperatura del material, todos los cuerpos con una temperatura mayor al 0 absoluto emiten cierta radiación (Prol-Ledesma, 1988) lo cual presupone que a mayor temperatura aumentará la radiación emitida y tendrá una longitud de onda menor. Los isotopos de los elementos: uranio ( $^{238}\text{U}$  y  $^{235}\text{U}$ ), torio ( $^{232}\text{Th}$ ) y potasio ( $^{40}\text{K}$ ) son los principales emisores de radiación en la corteza debido a su decaimiento radiactivo.

El comportamiento de la temperatura dentro de la tierra depende de: la distribución original de temperatura poco después de la formación, la distribución e intensidad de las fuentes de calor, ambas dependientes del tiempo y el mecanismo de transferencia de calor interno (conducción, convección o ambos) Gupta & Roy (2007).

La relevancia del transporte de calor por conducción en la corteza no evita que existan zonas donde el principal medio de transmisión de calor sea la convección. Existen zonas de debilidad en la corteza donde se presentan fallas, fracturas, etc., y a través de dichas zonas ascienden fluidos calientes que provienen de diferentes profundidades, *“los fluidos pueden ser rocas fundidas procedentes de la base de la corteza o en otro caso agua originada en la superficie y que ha penetrado hasta profundidades donde se calienta por contacto con material a muy altas temperaturas, dicho calentamiento provoca el ascenso del agua a la superficie”* (Prol-Ledesma, 1988)

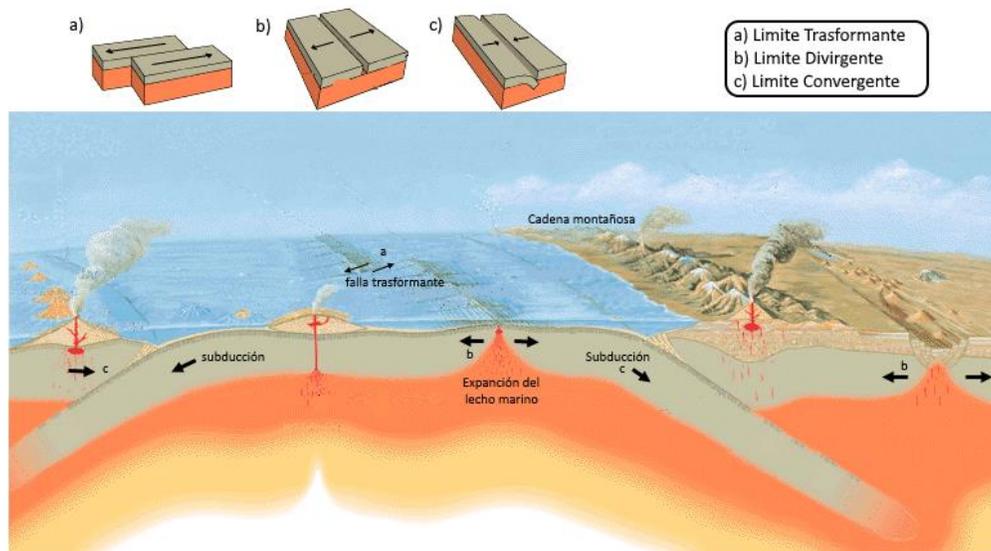
Recordemos que la Tierra no se comporta del todo como un cuerpo rígido, está dividida en capas, y en el caso de la capa más superficial existe una serie de placas que la componen, en los límites de estas placas se presentan grandes cambios y transformaciones, los fenómenos geológicos en la superficie están condicionados al transporte de calor desde el interior del planeta procedente de la convección de material rocoso en el manto. La teoría de tectónica de placas se basa en el comportamiento de la corteza al calor procedente del interior del planeta (Figura 5), La litosfera (corteza y parte del manto superior) se encuentra compuesta por placas que se hallan flotando sobre un sustrato caliente que tiene un comportamiento semejante al de un fluido (manto), debido a la circulación provocada en las celdas de convección, las placas ascienden en algunos lugares y se hunden en otros (Figura 6).



**Figura 5 Distribución geográfica de las placas principales en el mundo, tomado de Gupta & Roy (2007).**

En los márgenes de placas se llevan a cabo diversos procesos Figura 6, las zonas de dispersión son aquellas donde se crea nueva litosfera, el material caliente y parcialmente fundido de la astenosfera (parte del manto) se eleva para rellenar el hueco, dando lugar a la dispersión del fondo marino. En el caso de las zonas de subducción (Figura 6, zonas marcadas con la letra "c") existe una convergencia debido al choque entre placas, lo cual desencadena que una de las placas caiga debajo de la otra, esto se debe a la interacción entre la densidad y espesor de la placa que fuerza a una de ellas a descender hacia la astenosfera, para las zonas donde no se crea ni se destruye litósfera se presenta un deslizamiento entre los límites de placa que ocasiona una falla transformante Figura 6. Otro tipo de zonas son producidas por el adelgazamiento de la corteza con el consecuente ascenso de material fundido procedente del manto (Gupta & Roy, 2007). El movimiento entre placas trae consigo diversos eventos que demuestran el dinamismo del calor en el planeta. A estos márgenes de placa está asociado la mayor parte de la actividad volcánica

(zonas de subducción) en el mundo, además de esto también en dichas zonas se localizan sitios con alta sismicidad. Existen manifestaciones hidrotermales presentes en la cercanía de los sistemas de fallas asociados a los límites de placas. Las manifestaciones termales superficiales son la prueba visual de calor encerrado en la Tierra, se tienen en el caso de manifestaciones hidrotermales: manantiales, geiseres, fumarolas, pozas de lodo, terrazas de sílice, pozas calientes, suelos vaporizantes, etc.



**Figura 6** Procesos de ocurrencia entre los límites de placa. a) Límite transformante, b) Límite divergente es aquel donde se crea nueva corteza, c) Límite convergente se desarrolla cuando una placa se hunde con respecto a otra. Tomado de (U.S. Geological Survey, la institución Smithsonian, y la U.S. Laboratorio de Investigación Naval, 2017)

### 3.2. RECURSO GEOTÉRMICO

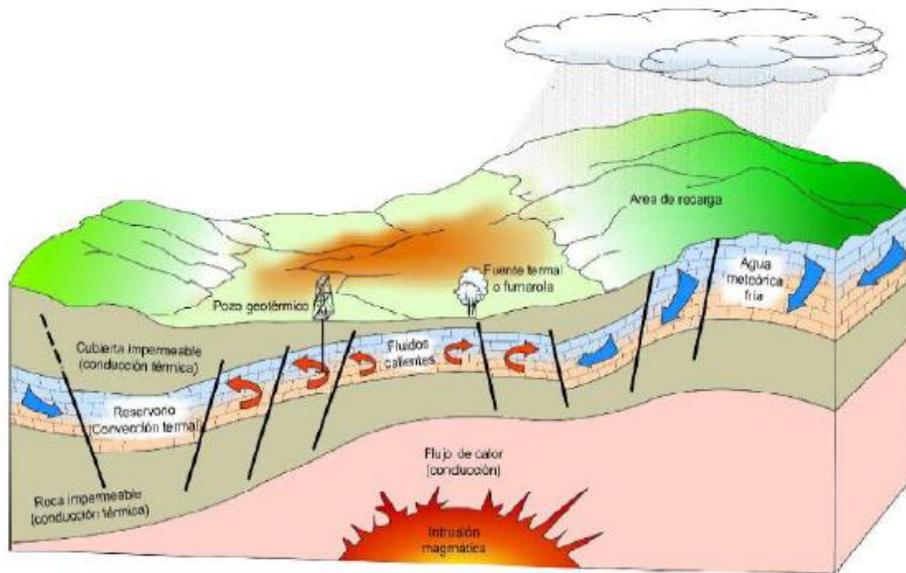
Un recurso geotérmico es la porción de calor aprovechable proveniente del interior de la Tierra que se transmite a la parte externa de la corteza terrestre. El objetivo de la geotermia como técnica es el aprovechamiento de la energía calorífica procedente del interior del planeta. A diferencia de los combustibles fósiles que suelen ser quemados para producir energía, se considera que es un recurso de energía relativamente limpio y renovable.

Los sistemas geotérmicos, se refieren al sistema de transporte de calor desde una fuente a profundidad hasta una zona de descarga que generalmente es la superficie terrestre (Prol-Ledesma, 1988). Los sistemas geotermales se presentan frecuentemente en regiones con vulcanismo activo (límites de placa asociados a zonas de subducción o centros de expansión), sin embargo, no está restringido a zonas con vulcanismo reciente, sino que también es controlado por fallas regionales. Usualmente estos sistemas poseen un gradiente geotérmico alto (variación de la temperatura con la profundidad), para la mayoría de las zonas del planeta se tienen valores del gradiente geotérmico que se agrupan alrededor de un promedio de 25 a 35°C/km (Prol-Ledesma, 1988), pero en zonas de actividad geotermal el gradiente será mucho mayor y con ello el flujo de calor ( $\text{Flujo de calor} = \text{Gradiente geotérmico} \times \text{Conductividad térmica de la roca}$ ). La energía geotermal fue usada por primera vez a escala industrial en Italia en 1912 y fue adoptada en Nueva Zelanda en 1950 (Watson, 2013), su crecimiento se debe a los beneficios que

ostentan con respecto a otras fuentes de energía, enumerando algunos beneficios de la energía geotérmica tenemos: que es una energía renovable (generada constantemente por la tierra), ofrece una producción menor de contaminantes con respecto a otros combustibles, posee una estabilidad energética relativamente constante, etc.

El crecimiento de la población en años recientes ha tenido como efecto el aumento de la demanda de energía a una escala que seguirá creciendo en el futuro, los gobiernos y la iniciativa privada han tenido que lidiar con la búsqueda de nuevas fuentes de energía para mantener los actuales niveles de vida en los países desarrollados, es así como la energía geotérmica se presenta como una alternativa viable al consumo energético actual. Existen varios usos para la energía geotérmica además de la generación eléctrica (balneología, calentamiento de suelos, secado de pescado, secado de madera, calefacción, uso en invernaderos, etcétera). Los sistemas hidrotermales son objeto de exploración para determinar la factibilidad de su explotación para la generación de energía eléctrica o bien para su utilización en aplicaciones directas como ya se lleva a cabo en varios países (ejemplo: Japón, Islandia, México, Nueva Zelanda, Filipinas, Kenia, etcétera). México es un país con gran potencial en el uso de recursos geotérmicos, existen varios lugares que ya generan energía a partir de sistemas hidrotermales, como: Los Azufres y Cerro Prieto. En la península de Baja California se presenta un alto flujo de calor que está relacionado con su contexto tectónico Fletcher et al., (2007). Con la apertura del Golfo, los centros de dispersión dan lugar a cuencas oceánicas en expansión y a fuertes anomalías térmicas que pueden ser explotadas.

Un sistema geotérmico consta de 3 partes básicas; 1) Una fuente de calor, 2) Un reservorio, y 3) Un fluido por medio del cual ocurre la transferencia de calor (Figura 7). La fuente puede estar atribuida a una intrusión magmática, el reservorio será una roca permeable y el fluido que trasfiere el calor puede ser agua caliente (mayormente meteórica excepto en los sistemas marinos y en algunas cuencas sedimentarias), salmuera, vapor o gas. Las características de los sistemas geotermiales están en función de variables específicas de acuerdo a las condiciones naturales donde se presentan: la profundidad de la fuente de calor, el mecanismo predominante para la transferencia de calor, la permeabilidad y distribución de la porosidad dentro de la roca, las propiedades mecánicas de la roca, la química del fluido y roca, además de la fuente de recarga del fluido Avato et al., (2013).



**Figura 7 Modelo de un sistema geotérmico hidrotermal (Dickson & Fanelli, 2004)**

La clasificación de yacimientos geotermales es de vital importancia cuando se pretende explorar este tipo de recursos, esta clasificación puede darse en base al origen de la fuente de calor, se pueden definir 2 categorías y varias subcategorías (Muffler, 1976).

Recursos asociados a **intrusiones ígneas** en la parte superior de la corteza, estas fuentes pueden dividirse en: a) magma, b) roca seca caliente y c) sistema hidrotermal convectivo.

Regímenes geotérmicos **no relacionados a intrusiones ígneas recientes**, pueden clasificarse en: a) recursos asociados con la circulación profunda de agua meteórica, b) recursos de un ambiente de alta porosidad con presión hidrostática, y c) ambientes de alta porosidad a presiones mayores que la hidrostática.

Existe la necesidad de conocer el marco estructural en áreas geotérmicas para entender las relaciones con la roca sello, el depósito y la circulación del fluido (Barbier, 2002); a su vez se toman en cuenta las condiciones hidrológicas y topográficas que condicionan las manifestaciones superficiales, la descarga del fluido, y la permeabilidad. Sobre estas condiciones se dan otras clasificaciones que se basan en:

- La naturaleza del fluido dominante en la parte principal del yacimiento.
- La concentración de determinados componentes químicos en el fluido dominante.
- La descarga superficial de calor.
- La entalpia o contenido energético.

Una vez que una región geotermal es identificada, el siguiente paso es aplicar diferentes técnicas para evaluar y localizar las áreas con potencial de yacimiento geotermal e identificar objetivos de perforación. Este conlleva múltiples disciplinas con el fin de conseguir la mayor información sobre los blancos de exploración. Es necesario

estimar: la temperatura, volumen, permeabilidad, y otras propiedades (Gupta & Roy, 2007). La exploración es una secuencia de investigación, y para obtener dicha información es necesario emplear una serie de técnicas de exploración (técnicas geológicas e hidrológicas, técnicas geoquímicas, técnicas geofísicas, etcétera). La actividad geotermal superficial es particularmente interesante para los geocientíficos, debido a que proporciona ciertas claves para entender la naturaleza del yacimiento, además de las características físicas y los procesos químicos que toman lugar en el yacimiento (Watson, 2013). Las características que podemos apreciar desde la superficie son limitadas, pero en estas se encuentran las claves que serán relacionadas a un determinado tipo de yacimiento. La alteración mineral es un parámetro importante, donde el fluido presente juega un papel vital, el fluido transporta calor y atraviesa una serie de capas rocosas, sirviendo como medio de transporte para una serie de elementos procedentes de las rocas por las cuales atraviesa y altera, para finalmente depositarse en la parte superior de la corteza e interactuar con el terreno circundante, generando una serie de alteraciones minerales que estarán en función de la composición química del yacimiento y de la roca presente en la superficie.

Otro aspecto importante de la alteración es su zonificación. Esta representa la transición química y mineralógica de la roca previa exterior hacia el interior del cuerpo mineralizado por la acción geotérmica. Cada zona presenta sus minerales diagnósticos (Tabla 4) de acuerdo con las condiciones de equilibrio de dichos minerales (Browne, 1984).

**Tabla 4 Asociaciones minerales presentes en las zonas de alteración hidrotermal, Browne (1984).**

<b>Zona</b>	<b>Mineralogía</b>
<b>Propilítica</b>	Sericita, Albita, Feldespato-K, Biotita, Siderita, Pirita, Pirrotita, Hematita, Ankerita, Calcita, Montmorillonita, Zeolita, Epidota, Clorita
<b>Argílica</b>	Caolinita, Montmorillonita, Pirita
<b>Fílica</b>	Sericita, Topacio, Turmalina
<b>Argilización Avanzada</b>	Caolinita, Alunita, Pirofilita, Pirita
<b>Potásica</b>	Sericita, Calcita, Ankerita, Pirita, Biotita, Feldespato-K, Hematita, Siderita, Clorita

### **3.3. IDENTIFICACIÓN DE ZONAS DE ALTERACIÓN HIDROTERMALES UTILIZANDO IMÁGENES SATELITALES**

Las rocas que rodean los yacimientos minerales de origen hidrotermal muestran continuamente los efectos de la actividad de alteración de un fluido caliente en interacción con la roca. La alteración son aquellos cambios que ocurren en la composición mineralógica de la roca (Browne, 1984).

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 con parámetros físico-químicos y geológicos; estos parámetros son: temperatura, presión, el tipo de roca, permeabilidad,

composición del fluido y duración de la actividad (Browne, 1978). Existen dos asociaciones o grupos minerales relacionados a la alteración hidrotermal: los **hidroxilos** (arcillas, micas, sulfatos, carbonatos, fosfatos, etcétera) y **minerales de hierro** (hematita, goethita y jarosita). Algunos de estos minerales solo se forman durante los procesos de alteración hidrotermal y otros pueden ser también producto del interperismo (Browne, 1984).

Dado que conocemos los minerales de alteración (Tabla 4) que usualmente se presentan en la superficie del sistema hidrotermal, la búsqueda de dichos minerales será uno de los objetivos dentro del programa de exploración. Es en este punto donde las nuevas tecnologías aportan métodos de exploración a mayor escala y con otros beneficios importantes. Unas de las técnicas de exploración aplicadas en la actualidad son aquellas que utilizan sensores remotos, estas técnicas han emergido como una útil herramienta de reconocimiento para el mapeo geológico, detección de anomalías de temperatura superficial, identificación de indicadores geotermales incluyendo alteración por minerales hidrotermales, etcétera. En el caso del mapeo mineral, la técnica de espectroscópica de infrarrojo plantea la diferenciación entre las características de absorción de los elementos formadores de rocas como el hierro, las moléculas y aniones tales como el agua, hidroxilos, carbonatos y sulfatos. Los carbonatos y minerales de alteración hidrotermal como arcillas y sulfatos tienen firmas espectrales características en la región del visible e infrarrojo que permiten su identificación a través de imágenes satelitales (Gupta & Roy, 2007).

Cuando se tiene como objetivo de búsqueda los principales grupos mineralógicos de un sistema hidrotermal es necesario analizar las características espectrales de cada uno de los minerales incluidos en estos grupos, con el fin de identificar la aportación de reflectancia propia de cada uno de estos minerales, y así utilizar esta información para asociar una firma espectral característica a cada mineral, con el fin de diferenciarlo y posteriormente identificarlo.

### **Firma espectral**

Un concepto importante para entender qué es una firma espectral característica y cómo es posible diferenciarla de otras es la comprensión del significado de reflectancia, esta es el cociente entre la energía reflejada dividida por la energía incidente (Campbell, 1987).

$$\rho(\lambda) = \left[ \frac{E_R(\lambda)}{E_I(\lambda)} \right] \times 100 \quad \text{Ec. 4}$$

Dónde:

$\rho(\lambda)$  Es la reflectancia 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 tiene diferentes valores en diferentes longitudes de onda para cada material presente en el 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 o reflejan energía en función de sus estructuras atómicas, por lo tanto, cada material tendrá una firma espectral única Figura 8.

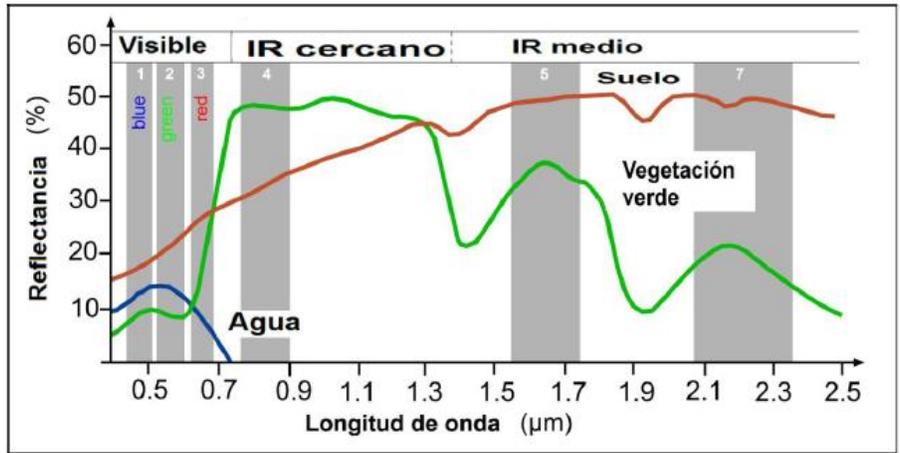


Figura 8 Esquema que muestra la firma espectral de tres materiales: vegetación (verde), agua (azul), suelo (rojo), Los números 1, 2, 3, 4, 5 y 7 corresponden a las bandas del sensor TM de Landsat. (McCloy & Severiens, 2009)

La firma de vegetación Figura 9 muestra características particulares, los bajos de reflectancia en la región del visible (0.40  $\mu\text{m}$  a 0.7  $\mu\text{m}$ ) se deben a la absorción de la clorofila, existe en un pico de reflectancia en la región del verde (0.5-0.578  $\mu\text{m}$ ) lo que nos permite ver la vegetación de color verde como efecto del contenido de clorofila. En las siguientes regiones se presentan diversos picos de reflectancia y otros de absorbancia, para la región del infrarrojo cercano tenemos una zona conocida como meseta del infrarrojo cercano, en el que se tiene el máximo de reflectancia de la clorofila. En la región del infrarrojo medio se presentan los picos de absorción del agua.

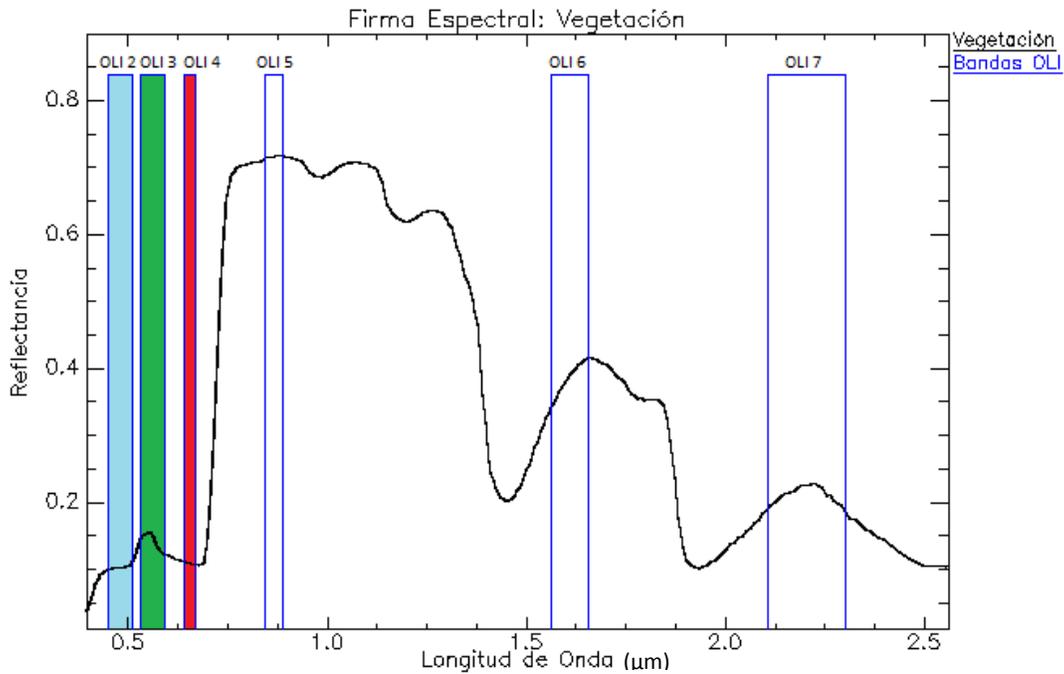
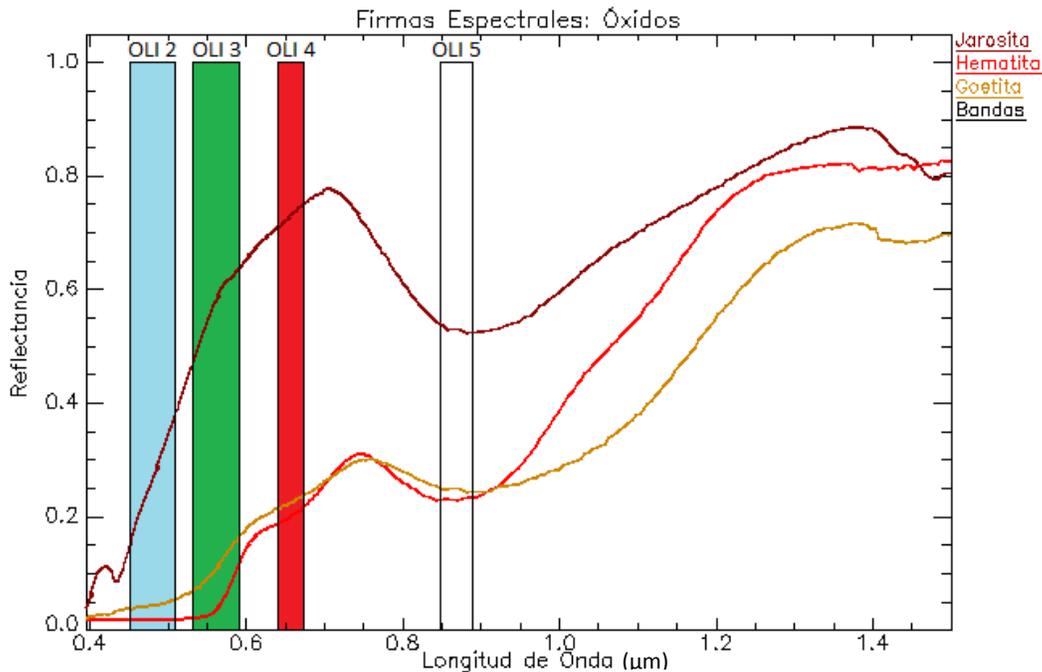


Figura 9 Firma espectral de la vegetación el eje vertical es reflectancia y el eje horizontal longitud de onda, se colocaron las regiones espectrales contenidas en las bandas del sensor OLI. Solo se utilizarán 6 bandas de acuerdo al análisis realizado.

Considerando lo anterior podemos detectar los rasgos de interés en las bandas 5 y 4 del sensor OLI, ya que estas regiones presentan un pico alto en reflectancia (OLI 5) y un intervalo de absorbanza (OLI 4) característicos en forma de la firma espectral de la vegetación (Figura 10).

En el caso de los minerales de hierro se observa (Figura 10) un incremento de la reflectancia desde la banda 3 hasta la 4, en la banda 5 se observa un bajo de absorbanza importante, pero coincidente con el de otros grupos minerales.



**Figura 10** Regiones espectrales del sensor OLI, se grafican las firmas espectrales características de los minerales de oxidación más comunes.

Analizando la firma espectral de los óxidos (Figura 10), Por ejemplo, la jarosita muestra rasgos de absorción bien definidos en 0.43 μm y 0.92 μm, la hematita tiene un rasgo de absorción en 0.85 μm además de otro en la región del azul y la goethita cuenta con su rasgo de absorbanza cerca de 0.94 μm. Para detectar los rasgos más predominantes podemos utilizar la banda 4 y la banda 2 del sensor OLI. Ya que es aquí donde se presentan los picos de reflectancia y absorbanza más sobresaliente en las firmas.

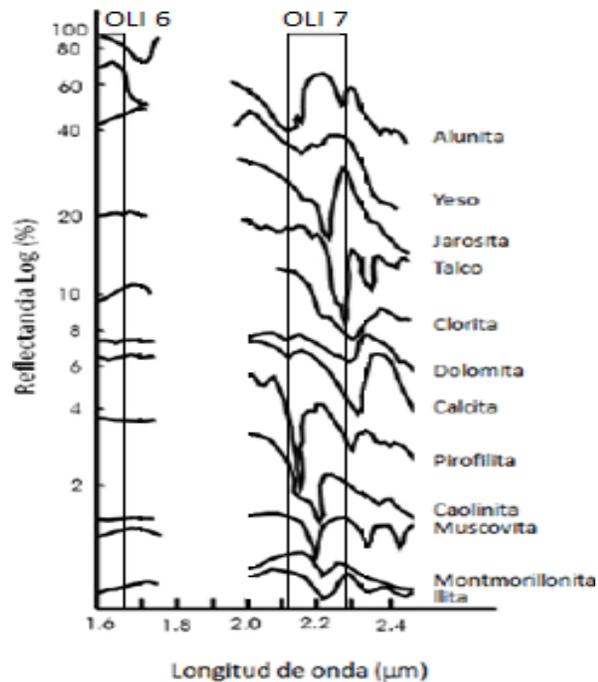


Figura 11 Muestra la firma espectral de algunos minerales arcillosos, filosilicatos, carbonatos y sulfatos Las bandas OLI 6 y OLI 7, pertenecen al sensor OLI de Landsat; en el eje horizontal se encuentra la longitud de onda y el eje vertical el porcentaje de reflectancia en escala logarítmica.

Entre el grupo de 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 OLI de Landsat 8 para esto solo ajustamos las bandas a utilizar, ya que el rango espectral no cambia demasiado, por las características espectrales que presentan: un alto porcentaje de reflectancia en la banda 6 del sensor OLI y una zona con picos de absorbancia en la banda 7 del sensor OLI (Figura 11). Del análisis de las firmas espectrales y su comparación con la resolución espectral del satélite Landsat 8 tenemos que las regiones de interés espectrales son las siguientes Tabla 5. La presencia de vegetación, dificulta la detección de hidroxilos, esto debido a la respuesta espectral similar en ciertas regiones espectrales.

Tabla 5 Características espectrales para óxidos, hidroxilos y vegetación

Materiales	Reflectancia	Absorción
Minerales arcillosos, carbonatos, filosilicatos y sulfatos	OLI 6	OLI 7
Hematita	OLI 4	OLI 2, OLI 3
Goetita	OLI 3, OLI 4	OLI 2
Jarosita	OLI 3, OLI 4	OLI 2
Vegetación	OLI 3, OLI 5	OLI 2, OLI 4, OLI 6 y OLI 7

Esta información es la que definirá la elección de las bandas OLI pertinentes para cada procesamiento realizado.

## 4. GEOLOGÍA.

### 4.1. ZONA DE ESTUDIO

La zona de estudio se ubica entre los municipios de Comondú y Loreto pertenecientes al estado de Baja California Sur. Los municipios de Comondú y Loreto son dos de los cinco municipios de Baja California Sur, ambos se localizan en la parte centro norte del estado. El municipio de Comondú está ubicado geográficamente en la parte central del estado de Baja California Sur, entre los meridianos  $110^{\circ} 52' 07''$  y  $112^{\circ} 47' 11''$  al oeste del meridiano de Greenwich y entre los paralelos  $23^{\circ}35'25''$  y  $26^{\circ} 24' 16''$  de latitud norte. El municipio de Loreto se encuentra localizado geográficamente dentro de los  $26^{\circ}33'11''$  y  $25^{\circ}12'15''$  latitud norte y  $111^{\circ}46'22'$  y  $110^{\circ}55'15'$  longitud oeste, con una extensión de  $4,878 \text{ km}^2$ , incluido el territorio de cinco islas que le pertenecen, su litoral es de  $223 \text{ km}$ . La zona de estudio comprende una porción de estos dos municipios con una extensión de  $1462 \text{ km}^2$  (Figura 12). Dentro del área de investigación encontramos el poblado San José de Comondú. La estructura geológica que resalta en la zona de estudio es gran parte de la Sierra La Giganta.

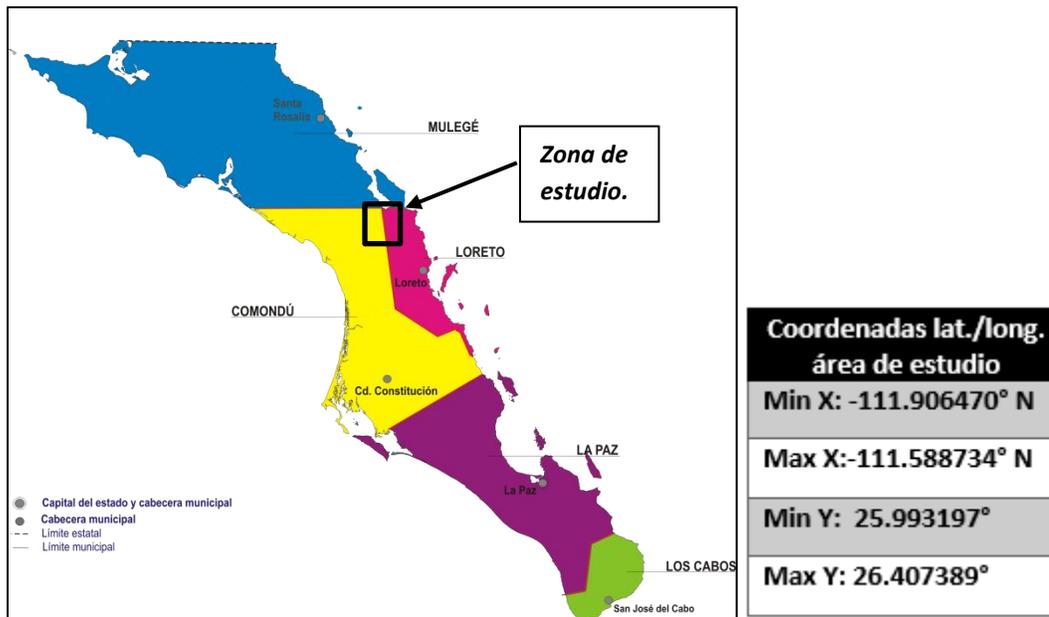


Figura 12 Ubicación de la zona dentro del estado de Baja California Sur y coordenadas del área de estudio, imagen (Instituto Nacional de Estadística, 2015), se muestra el estado dividido por municipios.

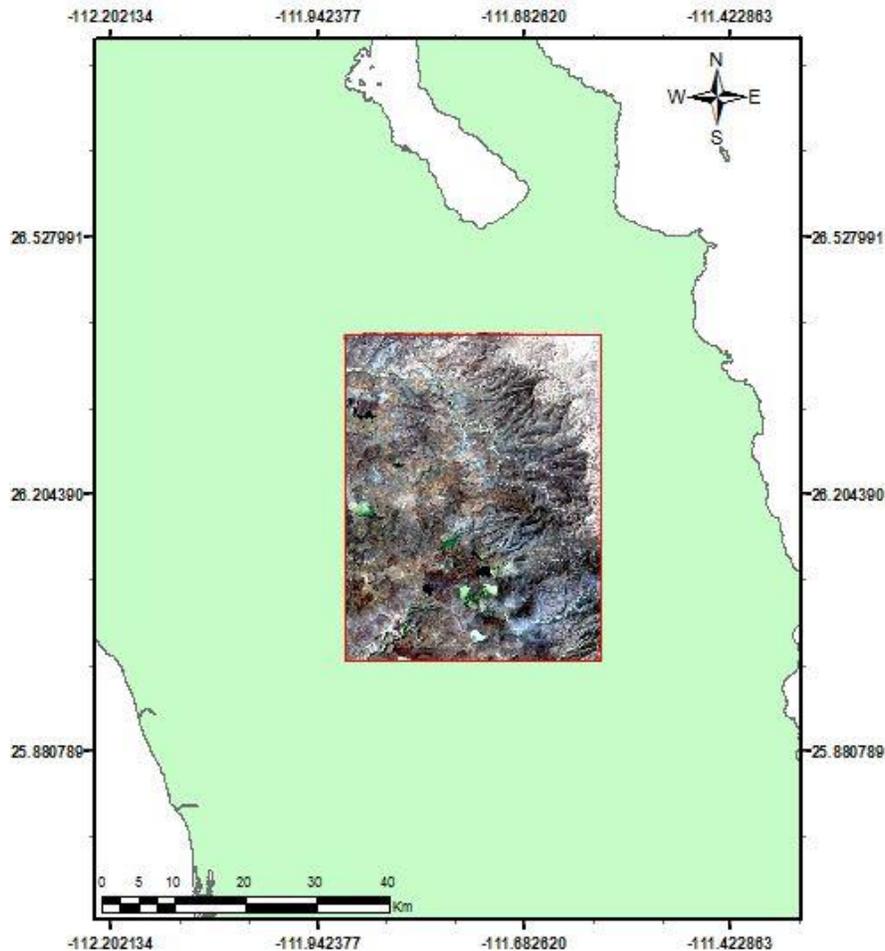


Figura 13 Ubicación de la zona de estudio área delimitada por el cuadro rojo.

#### 4.1.1. Tipo de clima y vegetación.

El clima predominante en un 92% es muy seco, también se encuentra en un 7% el clima seco y semi seco. En cuanto a la vegetación el matorral crasicuale (cardones, nopaleras, biznagas, choyas, palo adán, pithaya, gobernadora y garambullo) representa el tipo de vegetación predominante en la zona de estudio (Instituto Nacional de Estadística, 2015). El 86 % de la superficie la constituyen matorrales, es así como en la sierra predominan bosques de pino y encino, mientras que en la llanura y desiertos el cardón, mezquite, chirinola, lechuguilla y gobernadora.

#### 4.2. MARCO TECTÓNICO

La zona de investigación se encuentra entre los municipios de Comondú y Loreto en Baja California Sur, la geología y tectónica de dichas zonas es muy particular. Baja California Sur se encuentra en un contexto geodinámico relacionado con características geotermales. Hace más de 5.5 Ma las cuencas oceánicas iniciaron su formación, como resultado del cambio geodinámico ocurrió la separación entre la placa americana y Baja California. Parte del basamento oceánico recientemente formado emerge a través de

fallas transformantes a lo largo del golfo. Junto con estas se presentan fallas lítricas NNW-SSE formadas hacia el este de la península (Atwater, 1970).

Los sistemas tectónicos presentes están relacionados a los procesos de apertura del Golfo de California. El modelo que explica la evolución de la tectónica del Golfo de California es el modelo de Fletcher et al. (2007), quien propone un modelo oblicuo al *rift* (Figura 14).

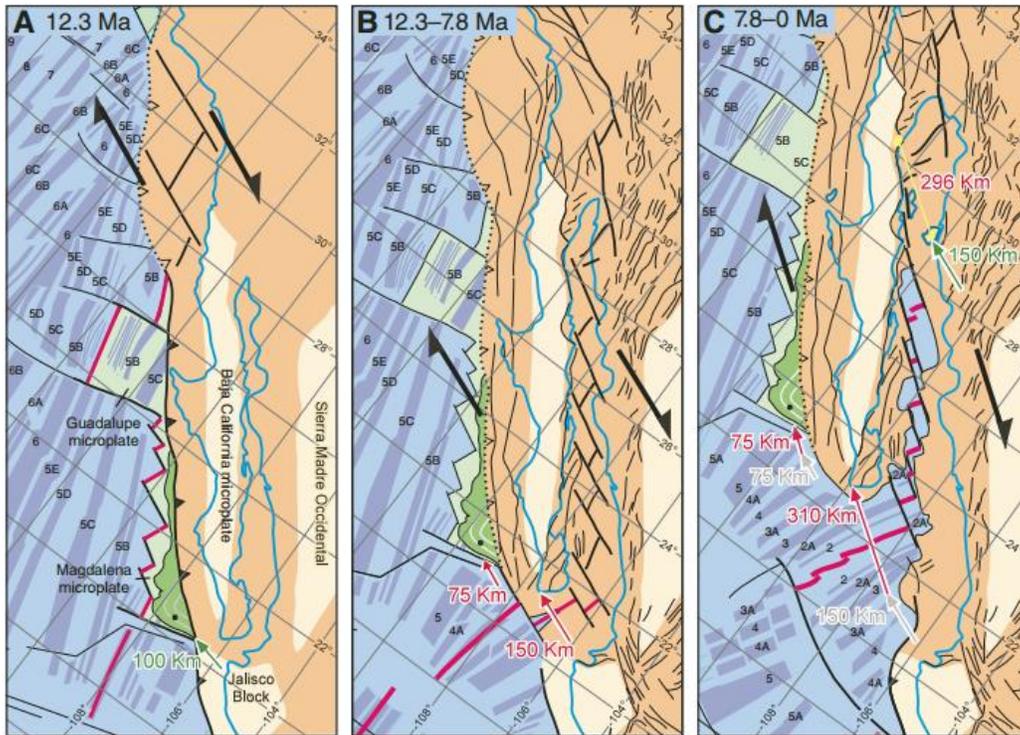


Figura 14 La imagen muestra el modelo a cerca del proceso de apertura del Golfo de California propuesto por Fletcher et al., (2007)

Existen 3 procesos tectónicos principales que actuaron sobre el Golfo de California, que a su vez condicionaron los fenómenos estructurales:

Fallas dirección NE-SW	Fallas y fracturas dirección NW-SE	Estructuras dirección E-W
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Asociado a intrusivos más antiguos</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Ocasionado por la apertura del golfo</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Basaltos y Basaltos andesíticos</li> </ul>



Las rocas sedimentarias se desarrollaron durante el Mioceno tardío hasta el plioceno y pertenecen a la Formación Salada, son intercalación de sedimentos marinos y terrígenos debido a un ambiente de transgresión. Los depósitos más recientes se localizan en lechos de río.

Para la Sierra de La Giganta su constitución es de rocas volcánicas pertenecientes a la Formación Comondú, con un espesor de 3000 m. La parte baja de la Sierra está constituida por: grava, arena y conglomerado.

Zonas con manifestaciones hidrotermales:

- San Siquismunde: Se presenta vulcanismo reciente (periodo Cuaternario) vinculada a una actividad volcánica reciente.
- El Centavito: Diferentes ciclos volcánicos durante el Pliocuaternario
- Santispac
- Bahía Concepción
- Comondú: Punta Púlpito y Mancenares, se presenta vulcanismo reciente y manifestaciones geotermales
- Agua Caliente: Presenta 4 eventos volcánicos con edades desde el Mioceno hasta el Cuaternario, se ubican tres sistemas de fracturamiento con direcciones N-S, NNW-SSE y NE-SW

### **4.3. ESTRATIGRAFÍA**

La Formación Comondú forma la Sierra de La Giganta, con un espesor de 3000 m, es atribuido a un arco volcánico producido por un fenómeno de subducción perteneciente al periodo Paleógeno, Oligoceno tardío, Mioceno medio. En cuanto a su estratigrafía, se encuentra formada por areniscas y conglomerados volcanoclásticos, tobas riolíticas, brechas volcánicas de color rojizo alteradas por oxidación y lahares. Se encuentra sobrepuesta a la Formación “El Salto”. El sistema estructural presente tiene dirección NW-SE (Casarrubias-Unzueta & Romero-Rios, 1997).

La Cuenca De Loreto está constituida por rocas sedimentarias: calcarenitas en su base, areniscas fosilíferas intermedias y terrazas marinas en la cima. Estos sedimentos afloran al noreste y este, con un espesor de 100 m (Casarrubias-Unzueta & Romero-Rios, 1997).

Grupo Salada se encuentra formado por diversas capas; materiales aluviales que presentan buena permeabilidad y porosidad, andesitas fracturadas, posee también materiales semipermeables.

## **5. METODOLOGÍA**

### **5.1 PREPROCESAMIENTO**

La parte del preprocesamiento consiste:

1. Adquisición de las imágenes, selección del tipo de producto, elección de la fecha óptima a descargar.
2. Visualización de las imágenes sin procesar, consiste en detectar errores a simple vista (líneas faltantes, presencia de nubes, etcétera).
3. Recorte de la zona de estudio.
4. Elección de las bandas a utilizar, análisis estadístico de las imágenes seleccionadas.
5. Corrección atmosférica.

### 5.1.1. Adquisición de las imágenes

Las imágenes fueron adquiridas de la plataforma Landsat 8 a través del sensor OLI, para la fecha del 9 de mayo 2015, las coordenadas que se utilizaron para la descarga fueron Path: 35 y Row: 42, de las 12 bandas descargadas se utilizaron solo 6 en el visible e infrarrojo cercano y medio.

**Tabla 6 Bandas y regiones espectrales seleccionadas**

Bandas Seleccionadas	Región espectral $\mu\text{m}$
OLI 2	0.45-0.515
OLI 3	0.53-0.59
OLI 4	0.64-0.67
OLI 5	0.85-0.88
OLI 6	1.57-1.65
OLI7	2.11-2.29

### 5.1.2. Análisis estadístico

Las características estadísticas univariadas de la imagen son presentadas en la Tabla 7 además de la corrección atmosférica. Este análisis muestra que las bandas OLI 2, OLI 3 presentan un rango de valores de brillantes moderadamente distribuidos con base a la media y con un valor mínimo de brillantez alto, recordemos que la dispersión atmosférica afecta en mayor medida a la región del visible (OLI 2-4). Las bandas OLI 5, 6 y 7 muestran una distribución de valores regular, pero no llegan a ocupar la totalidad el rango disponible (0- 65536).

**Tabla 7 Información estadística de las imágenes. Se incluye la corrección atmosférica descrita posteriormente**

Banda	Sin corrección atmosférica		Corrección atmosférica			
	Mínimo	Máximo	Mínimo	Máximo	Promedio	Desviación
Band 2	8641	18456	0	9815	2255.64378	561.44121
Band 3	7212	19776	0	12564	3233.12871	735.814049
Band 4	6418	23388	0	16970	4613.71952	1024.39988
Band 5	5543	29004	0	23461	8533.29902	1449.19118
Band 6	5248	26671	0	21423	10296.5875	1932.84128
Band 7	5220	23530	0	18310	8177.59365	1638.96077

### 5.1.3. Recorte de ventana.

El procesamiento de los datos de percepción remota se limitó a una ventana o área de investigación de 1625041 pixeles, con un área de 1462 km<sup>2</sup> con las siguientes coordenadas.

**Tabla 8** Coordenadas de la zona de estudio, corresponden a las esquinas inferior izquierda y superior derecha.

Coordenadas lat./long. área de estudio
Min X: -111.906470° N
Max X: -111.588734° N
Min Y: 25.993197°
Max Y: 26.407389°

En el procesamiento de las imágenes se utilizó el software de integración geoespacial TerrSet versión 18.21 desarrollado por los laboratorios Clark que incorpora herramientas de IDRISI, y para el despliegue de mapas se utilizó el software especializado ArcMap 10.3 de ArcGIS. Para la elección de las imágenes se consideró la temporada de secas con menor precipitación, esto se asignó debido a que con una menor precipitación la respuesta de la vegetación es menor.

### 5.1.2. Corrección atmosférica

La corrección atmosférica es un proceso necesario, la dispersión atmosférica afecta los valores captados por el sensor. La técnica empleada fue, “sustracción del pixel oscuro” en esta consideramos que al menos un pixel (el que posee el valor mínimo de brillantez) en toda la imagen presenta un valor de 0 radiancia, el cual puede ser atribuido a ciertas coberturas como son los cuerpos de agua (Tabla 7).

## 5.2. PROCESAMIENTO

### 5.2.1. Realce espacial

El realce espacial y el realce espectral, se usan para extraer información de las imágenes multiespectrales que conlleve a la solución de problemas específicos. Hay una relación entre la composición de los materiales en la superficie de la escena y su respuesta espectral característica en cada una de las bandas que componen a la imagen.

Al realizar el realce espacial se evaluaron las direcciones preferentes de fallas y fracturas en la zona de estudio, el análisis de las direcciones preferenciales se observa en la sección 4. GEOLOGÍA. Dentro de la subsección 4.2. MARCO TECTÓNICO. Los filtros propuestos están en función del análisis de direcciones. Se utilizó el software especializado TerrSet 18.2, se aplicó la metodología (Moore & Waltz, 1983). Para la

elaboración y constitución de mapas se utilizó el software especializado ArcMap 10.1 de ArcGIS.

Los filtros propuestos consisten en matrices 3 x 3 Figura 16. Los filtros E-O y NNW-SSE fueron tomados de (Moore & Waltz, 1983).

Este - Oeste	NNW-SSE	Norte
-1 -2 -1	1 1 -2	1 1 1
2 4 2	-2 4 -2	1 -2 1
-1 -2 -1	-2 1 1	-1 -1 -1

NW	NE	SE
1 1 1	1 1 1	-1 -1 1
1 -2 -1	-1 -2 1	-1 -2 1
1 -1 -1	-1 -1 1	1 1 1

Figura 16 Filtros direcciones empleados

#### Procesamiento

1. Se aplicó un filtro “pasa – bajas” con el fin de remover la alta frecuencia espacial en la Comp. 1 obtenida a partir del análisis por componentes principales utilizando las 6 bandas.
2. Los filtros aplicados posteriormente generando 6 nuevas imágenes:
3. Filtros direccionales aplicados: N, NW, NE, SE, E-W, NNW-SSE
4. Una vez obtenidas las imágenes filtradas se les aplicó un nuevo filtro “pasa – bajas” (con el fin de suavizar la información y reducir el ruido).
5. Posteriormente se aplica a cada una de las 6 imágenes un stretch con saturación (1%).
6. Se sumó la imagen resultante a la imagen inicial (Comp. 1). Generando así las 6 imágenes finales
7. Con cada una de las imágenes se identificaron y digitalizaron manualmente los lineamientos presentes en las direcciones identificadas.
8. Como paso final se realizaron mapas para cada uno de los lineamientos procesados, con base en las diferentes direcciones seleccionadas.

#### 5.2.2. Realce espectral

Se realizaron composiciones para poder visualizar ciertas coberturas con el fin de tener una primera aproximación hacia la zona. La composición RGB 543 (Figura 17) se utilizó para resaltar la presencia de los picos de reflectancia y absorbancia característicos de la vegetación. Dentro de esta imagen se obtiene la extensión de la vegetación dentro del área de estudio, se observa además la variabilidad de coberturas en la imagen.

### 5.1.2. Cocientes de bandas

El aplicar cocientes de bandas a las imágenes multiespectrales se tiene como objetivo realzar la respuesta espectral de los materiales de interés. Uno de los primeros pasos, es analizar la firma espectral del material, se deben considerar los picos de reflectancia y absorbancia característicos de dicho material; a partir de esa información, estos picos serán empatados con las regiones espectrales que cubren nuestras bandas.

Al realizar la operación, se coloca la banda de nuestro sensor que contiene una alta reflectancia del material en el numerador, y en el denominador la banda con un patrón de absorbancia. Para este proceso se utilizan las bandas previamente recortadas y corregidas atmosféricamente. En la Tabla 9 se presentan las bandas seleccionadas a partir del análisis hecho con anterioridad (Tabla 5).

**Tabla 9 Bandas seleccionadas para el procesamiento por cocientes**

<b>COCIENTE</b>	<b>COBERTURA A RESALTAR</b>
<b>OLI 5/ OLI 4</b>	VEGETACION
<b>OLI 4/ OLI 2</b>	OXIDOS
<b>OLI 6/ OLI 7</b>	HIDROXILOS

Como se describe en la Tabla 5 la vegetación puede ser identificada debido a su baja reflectancia en la banda OLI 4 y su alta reflectancia en la región del infrarrojo cercano OLI 5. El grupo de los óxidos se caracteriza por una alta reflectancia en la banda del rojo (OLI 4) y alta absorbancia en la banda del azul (OLI 2). Los hidroxilos presentan características espectrales que responden a una alta reflectancia en la banda OLI 6 y alta absorbancia en la banda OLI 7. Para las bandas del denominador (4, 2, 7) se realizó una reclasificación, esto con el fin de evitar indeterminaciones al implementar la operación consecuencia de los valores 0, en estos casos se le dio el valor de 1 a los datos que presentan valores iguales a 0.

### 5.1.3. Sustracción de bandas

Esta técnica busca reducir la información redundante presente en la imagen, una vez aplicada esta técnica aquella información que se presenta de igual medida en dos bandas espectrales será minimizada, de la misma forma los datos que presente cambios entre ambas bandas se resaltarán, de esta forma se incrementa la brillantez de los píxeles con una respuesta espectral semejante al material buscado.

La técnica de sustracción de bandas es una operación lineal, en comparación a la técnica de cocientes que es operación no lineal. La desventaja de los cocientes yace en el realce de contraste, cuando se realizan los cocientes cierta información se pierde en los extremos del histograma debido a que la operación es no lineal, con ello se pierde fragmentos de información sobre los píxeles más oscuros y más brillantes. Las bandas seleccionadas para esta técnica son mostradas en la Tabla 10, con el fin de comparar los resultados la elección de bandas considero la relación existente entre los rangos espectrales tanto para las sustracciones como para los cocientes.

**Tabla 10 Bandas seleccionadas para el procesamiento por sustracciones**

<b>SUSTRACCIÓN</b>	<b>COBERTURA A RESALTAR</b>
<b>OLI 5 - OLI 4</b>	<b>VEGETACIÓN</b>
<b>OLI 4 - OLI 2</b>	<b>ÓXIDOS</b>
<b>OLI 6 - OLI 7</b>	<b>HIDROXILOS</b>

#### **5.2.4. Componentes principales**

La técnica de componentes principales es una metodología del análisis multivariado que realiza una transformación de las imágenes originales (bandas) para producir nuevas imágenes (componentes) que no están correlacionadas unas con otras. Este análisis estadístico multivariado incluye como resultados:

- Matriz de varianza y covarianza
- Matriz de correlación entre bandas
- Imágenes de las componentes principales
- Carga de cada banda en las componentes principales

La información contenida en las bandas espectrales de cualquier sensor posee una correlación innata entre sí, ya que el campo de visión es el mismo entre todas las bandas, por ejemplo, la información topográfica es redundante entre las imágenes captadas, al momento de obtener las componentes la información del terreno se concentra en la primera componente la cual posee la mayor varianza. Con este análisis se permite la estructuración de un conjunto de datos multivariados, obtenidos de una población.

1. Al realizar el análisis de componentes principales se utilizan las bandas OLI 2, 3, 4, 5, 6 y 7 corregidas, obteniendo como resultado seis nuevas componentes, que ya no están correlacionadas
2. Se analiza 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.

La matriz de correlación ofrece información sobre las bandas y la correlación entre ellas, es decir la información que tienen en común, la Tabla 11 muestra esta información. La mayor correlación se observa entre las bandas OLI 2 y 3 (0.9774) lo cual nos indica la poca información contrastante entre ellas. A medida que disminuye la correlación más información diferente se tiene en cada banda.

#### **5.2.4. Componentes principales técnica de Crosta y Moore (1989)**

Empleando la técnica de componentes principales dirigidas, se utiliza la metodología de Crosta & Moore (1989). Esta propone el uso de un menor número de

bandas, basado en la respuesta espectral propia del material buscado. Se describe una metodología llamada FPCS (*Feature Oriented Principal Components*) para decidir en cuál componente principal se concentra la información directamente relacionada con la firma espectral teórica de materiales específicos, y siguiendo el método descrito por Loughlin (1991). Para este proceso se utilizaron 4 bandas específicas.

#### ***Identificación de óxidos y vegetación.***

1. Con las bandas 2, 4, 5 y 6 corregidas, se realiza un análisis de componentes principales. Obteniendo como resultado cuatro nuevas componentes.
2. Se analiza la matriz de carga obtenida del análisis de para determinar cuál componente se utilizará para la identificación de óxidos y vegetación.

Una vez identificada la componente que permita el mayor realce de óxidos y vegetación se realiza un ajuste lineal del histograma para mejorar su visualización, además de una composición a color una vez aplicada la técnica.

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

1. Utilizando las bandas 2, 5, 6 y 7 corregidas, se realiza un análisis de componentes principales. Obteniendo como resultado cuatro nuevas componentes.
2. Se analiza la matriz de carga obtenida del análisis de componentes principales para determinar cuál componente se utiliza para la identificación de hidroxilos y óxidos.
3. Una vez identificada la componente que permita un mejor realce de hidroxilos y óxidos se realiza un ajuste lineal del histograma para mejorar su visualización, además de una composición a color.

### **5.2.4. Componentes principales dirigidas**

La técnica de análisis de componentes principales dirigidas (ACPD) desarrollada por Fraser (1991), usa como bandas de entrada imágenes de cocientes de bandas, en estas imágenes se compensan las variaciones por las condiciones de iluminación de la escena. Cuando aplicamos esta técnica se aíslan las diferencias espectrales de los materiales en la superficie.

#### ***Identificación de óxidos y vegetación.***

1. Utilizando los cocientes  $5/4$ ,  $4/2$ , se realiza un análisis de componentes principales, obteniendo como resultado dos nuevas componentes.
2. Se analiza la matriz de carga obtenida del análisis de componentes principales para determinar cuál componente se utiliza para la identificación de óxidos y vegetación.
3. Una vez identificada la componente que permita un mejor realce de óxidos y vegetación se realiza un ajuste lineal del histograma para mejorar su visualización, además de una composición a color una vez realizado el mismo proceso para identificación de hidroxilos.

#### ***Identificación de hidroxilos y vegetación.***

1. Utilizando los cocientes,  $5/4$  y  $6/7$ , se realiza un análisis de componentes principales, obteniendo como resultado dos componentes.
2. Se analiza la matriz de carga obtenida del análisis de componentes principales para determinar cuál componente se utiliza para la identificación de hidroxilos y vegetación.
3. Una vez identificada la componente que permita un mejor realce de hidroxilos y vegetación se realiza un ajuste lineal del histograma para mejorar su visualización, además de una composición a color.

### 5.2.5 Clasificación no supervisada

Una de las aplicaciones más importantes de las imágenes obtenidas a través de percepción remota es la generación de información acerca de la cantidad y la distribución espacial de los diferentes tipos de uso de suelo y cobertura. En esta línea se han desarrollado procedimientos automatizados y supervisados para la generación de estos mapas.

Una clasificación no supervisada es un proceso automatizado que se aplica tanto como una primera aproximación, como cuando contamos con escasa información *a priori* de la zona de estudio, es decir cuando se carece de información geológica, geográfica, o litología, tipos de vegetación, usos del suelo, etcétera. Debido a esto el usuario no elige las zonas de entrenamiento, en cambio se utiliza un algoritmo de clasificación (isodata, K-medias). También podemos definirlo como el agrupamiento (clustering) por algoritmos usados para seleccionar las clases espectrales inherentes a los datos. La clasificación no supervisada es un proceso más automatizado, el usuario deberá asignar cada grupo espectral a una clase con base en la disponibilidad de información adicional.

#### Ventajas

- El agrupamiento de los píxeles no está afectado geográficamente en alguna porción de la imagen.
- Es altamente exitoso para encontrar grupos espectrales.
- Utiliza criterios similares a un clasificador de mínima distancia a la media.

### 5.3. RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

#### Análisis de resultados de realce espectral

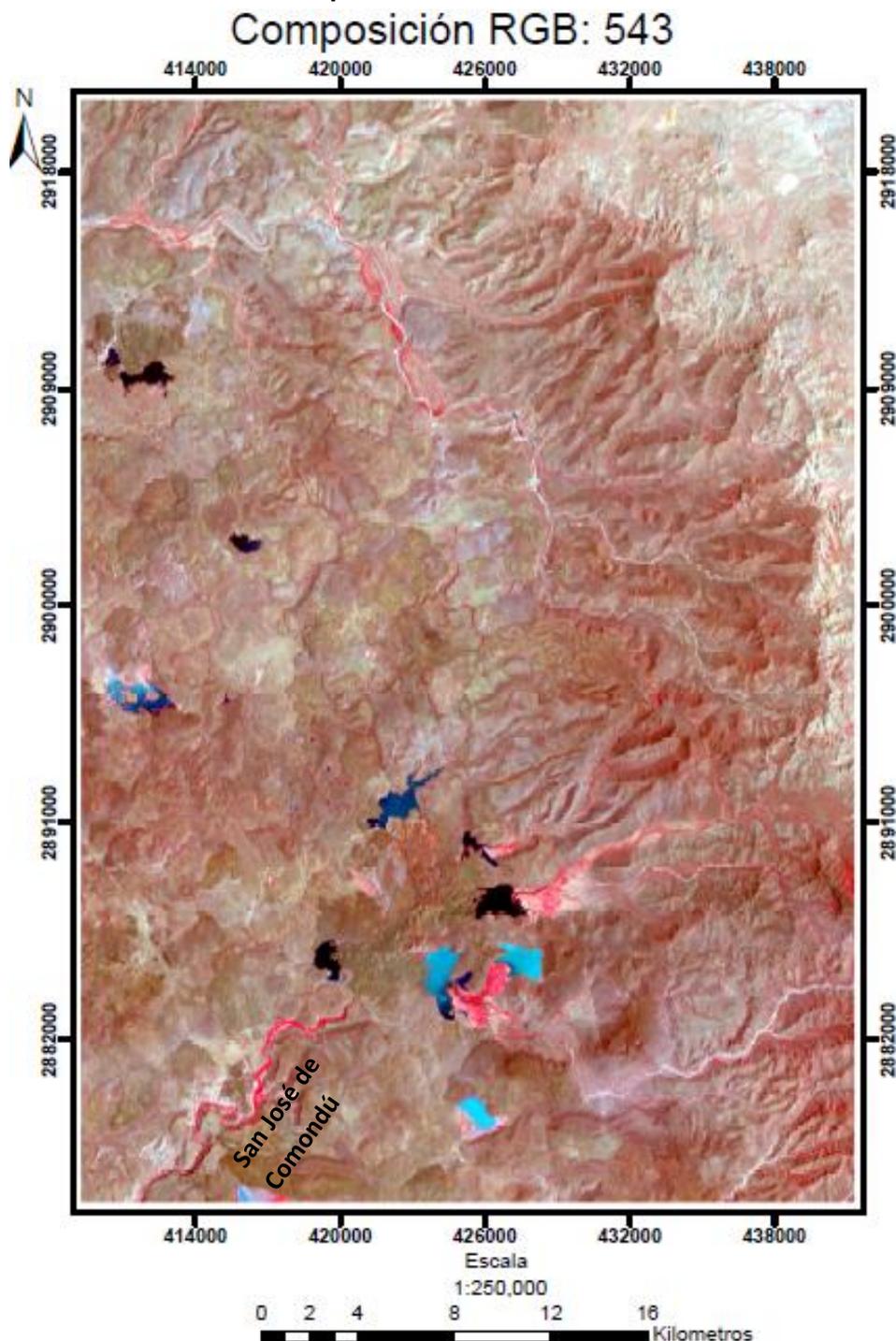


Figura 17 Composición RGB 543, en tonos rojos se resalta la vegetación, los cuerpos de agua se presentan en tonos oscuros si el agua está limpia y tonos de azul claro y rosados si se tiene presencia de sedimentos en suspensión o de vegetación.

En la Figura 17 se visualiza la composición a color RGB 543 para el realce de la vegetación, la presencia de vegetación se denota en tonos rojos, la vegetación a lo largo

de la imagen se hace visible, sin embargo, la intensidad de los tonos rojos es escasa en gran parte de la imagen. Las áreas con presencia importante de vegetación se exhiben en la zona cercana a la población San José de Comondú, en la cercanía de algunos cuerpos de agua de la porción central de la imagen, y existe vegetación ribereña en los drenajes. En la porción noroeste de la imagen existen cuerpos de agua sin gran presencia de vegetación. Es importante señalar que la imagen fue seleccionada tomando en consideración la temporada de secas en la región, pese a esto la vegetación se mantiene en zonas de posible interés, esto podría en ciertos casos afectar la identificación de los hidroxilos ya que la respuesta espectral en la región del infrarrojo de este grupo mineral es similar a la respuesta de la vegetación. Este mapa de composición a color funciona como una primera aproximación hacia las características espectrales de los materiales presentes en la imagen, y observar aquellas regiones con presencia de vegetación brillante.

## Análisis de resultados de cociente de bandas

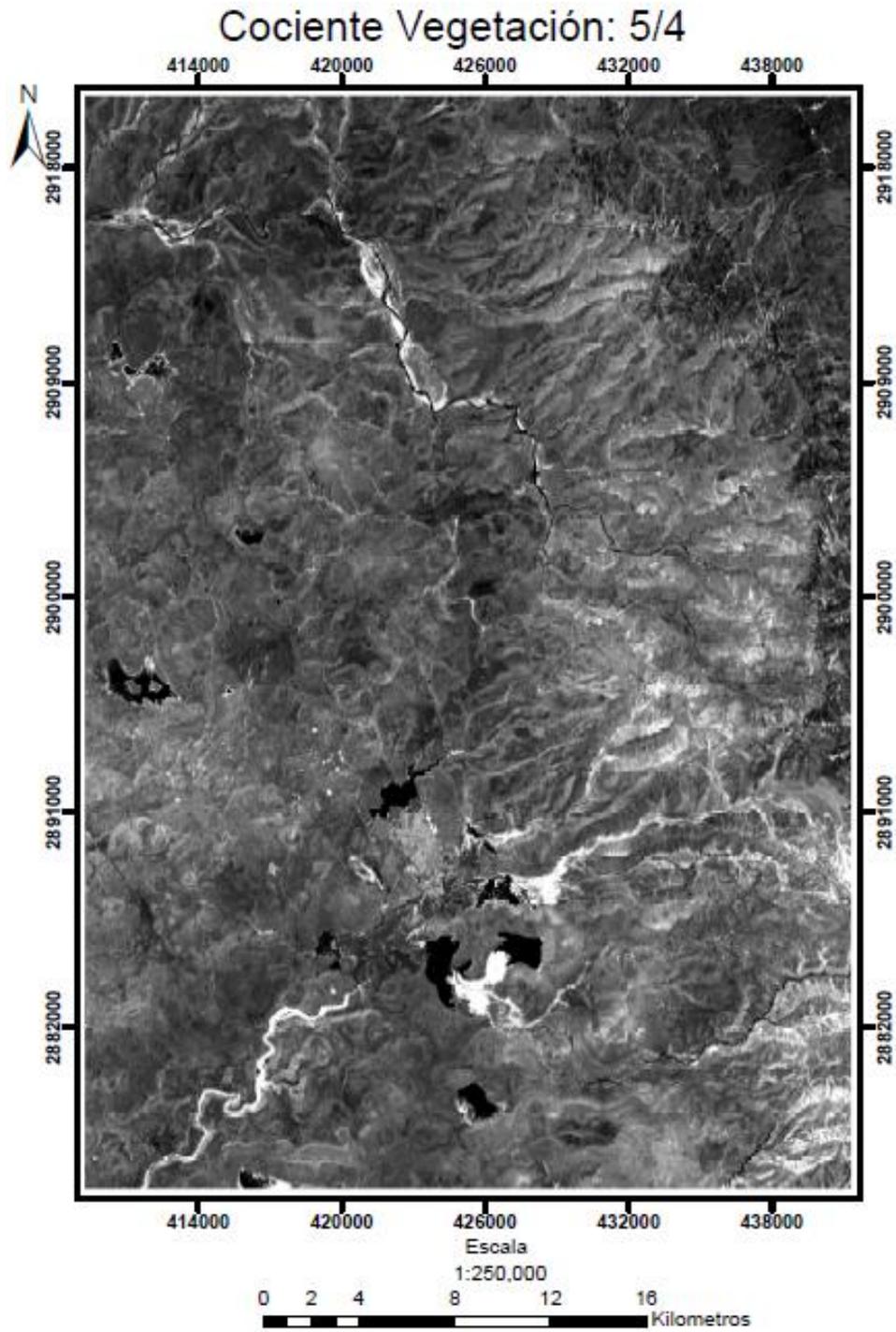


Figura 18 Cociente espectral de vegetación, se utilizaron las bandas 5/4. En tonos de blancos se destaca la presencia de vegetación, los tonos oscuros corresponden a otro material distinto de vegetación.

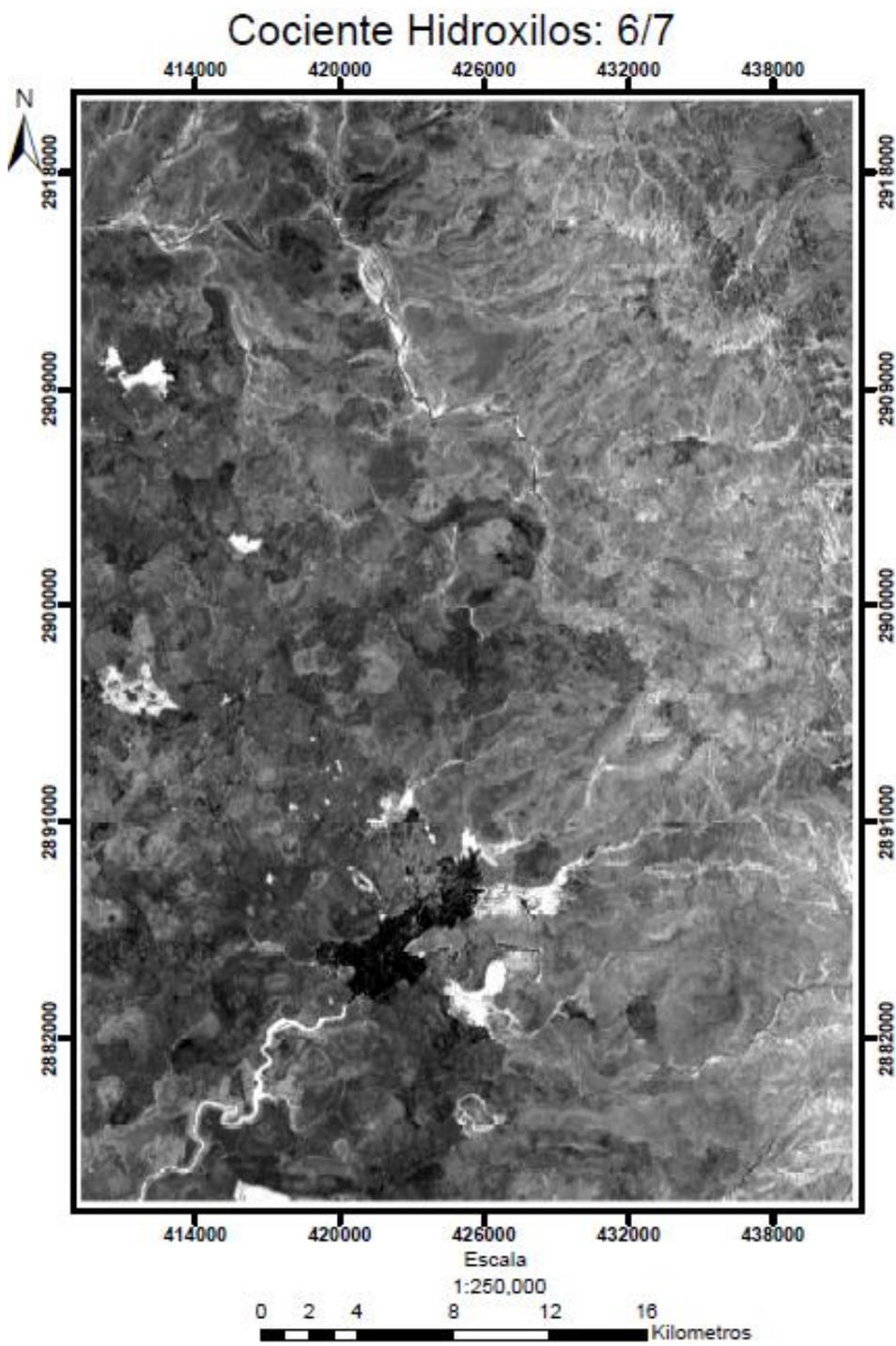
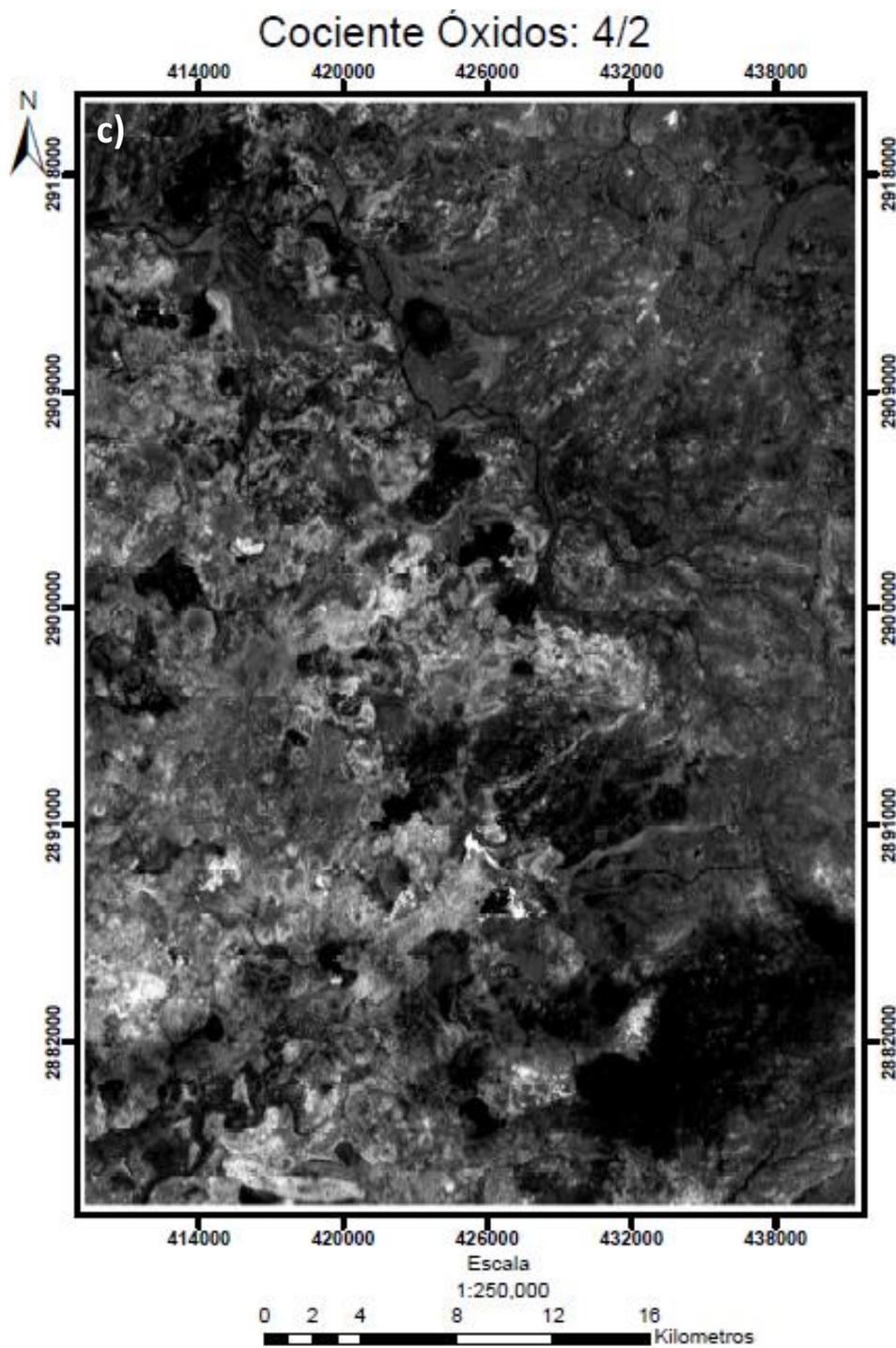


Figura 19 Cociente espectral de hidroxilos, se utilizaron las bandas 6/7. Los tonos blancos indican la presencia de hidroxilos, los tonos oscuros corresponden a otro material distinto de la cobertura de hidroxilos.



**Figura 20 Cociente espectral de óxidos (OLI 4/OLI 2). Los tonos claros indican la presencia de óxidos, los tonos oscuros corresponden a otro material distinto de la cobertura de óxidos.**

En las Figura 18, Figura 19 y Figura 20 es posible observar los cocientes obtenidos tras el procesamiento en la imagen.

### ***Identificación de Vegetación***

La Figura 18 muestra el cociente de vegetación, los tonos claros pertenecen a zonas con presencia de vegetación, esto es concordante con algunas zonas afectadas por afluentes de ríos y pequeños lagos, los valores más altos se ubican cerca del poblado San José de Comodú lo cual indicaría la existencia de un tipo de vegetación inducida y mantenida por la interacción humana. La presencia de vegetación en tonos blancos no demasiado intensos es coincide con decisión de tomar imágenes en temporada de secas, reduciendo al mínimo la presencia de este material.

### ***Identificación de Hidroxilos.***

En la Figura 19 se resalta el grupo de los hidroxilos, los tonos claros se distribuyen por toda la escena y tienen cierta semejanza (excepto en la porción noroeste) con la distribución observada para el cociente de vegetación; esto se debe a que la respuesta espectral de reflectancia y absorbancia de los hidroxilos en las regiones de análisis presenta picos en las mismas regiones que la respuesta espectral de la vegetación, pese a esto existen zonas que destacan la posible existencia de hidroxilos sin coincidir con vegetación: cuerpos de agua en la porción noroeste y oeste de la imagen.

### ***Identificación Óxidos***

Para la Figura 20 correspondiente al cociente de óxidos tenemos varias zonas que poseen tonos en color blanco, principalmente en la parte suroeste detrás de la sierra La Giganta cabe señalar que en estas zonas se encuentran algunos tipos de rocas ígneas debido a cierta actividad volcánica fósil que involucra contenido de ciertos minerales con óxidos.

Análisis de resultados de sustracción de bandas

Sustracción Vegetación: 5-4

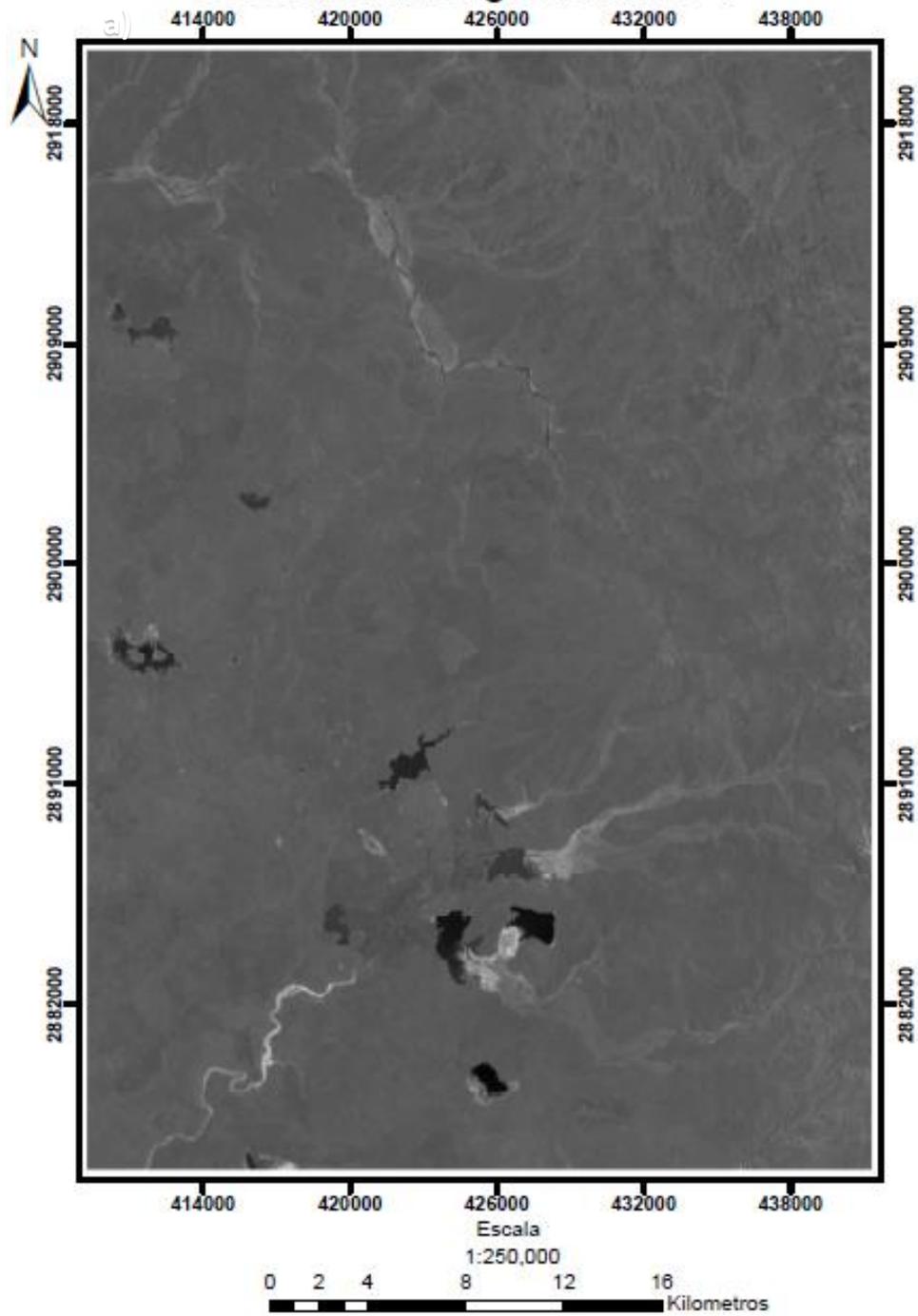


Figura 21 Sustracción de bandas para vegetación, se utilizaron las bandas 5 - 4. En tonos claros se destaca la presencia de vegetación, los tonos oscuros corresponden a otro material distinto de vegetación.

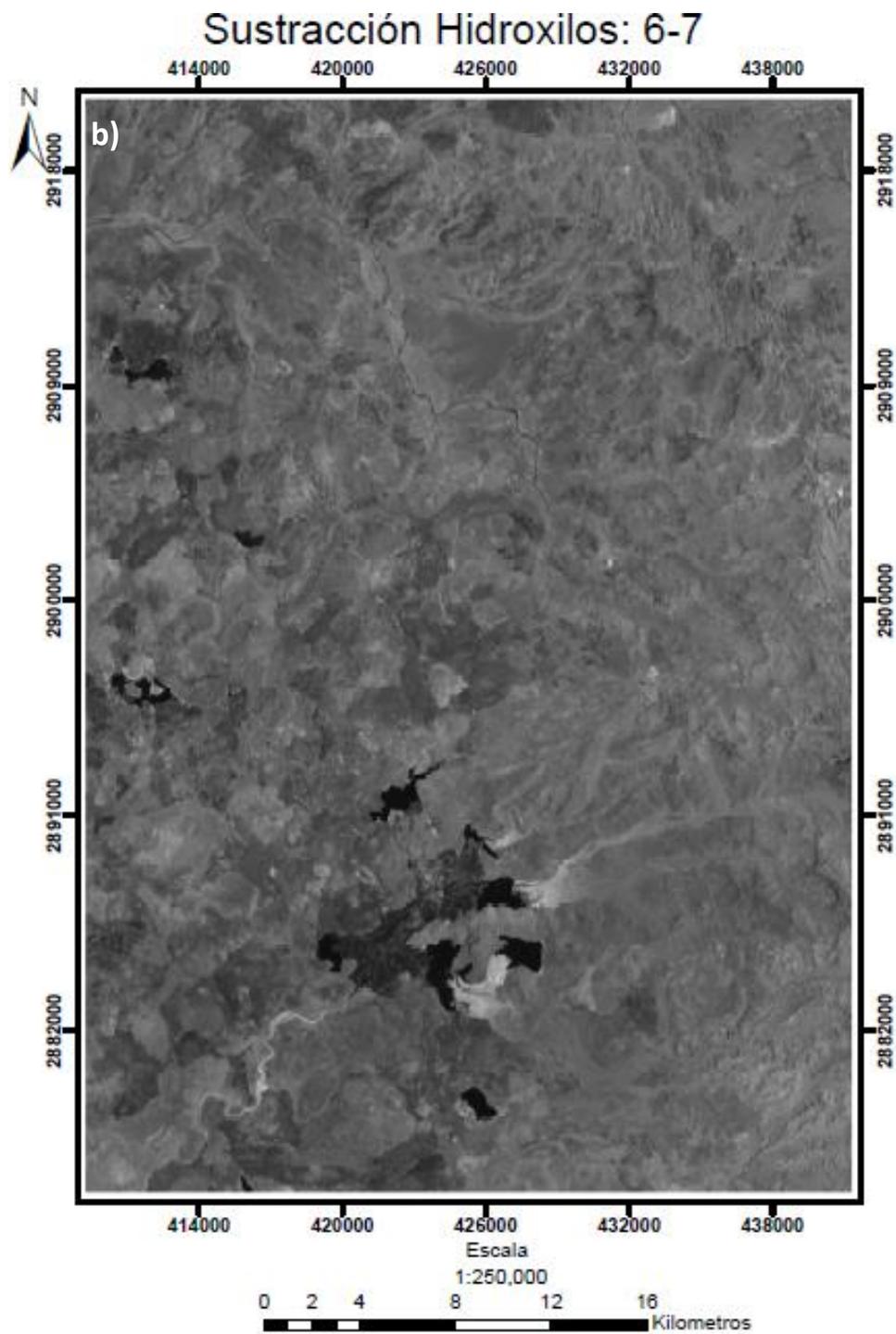
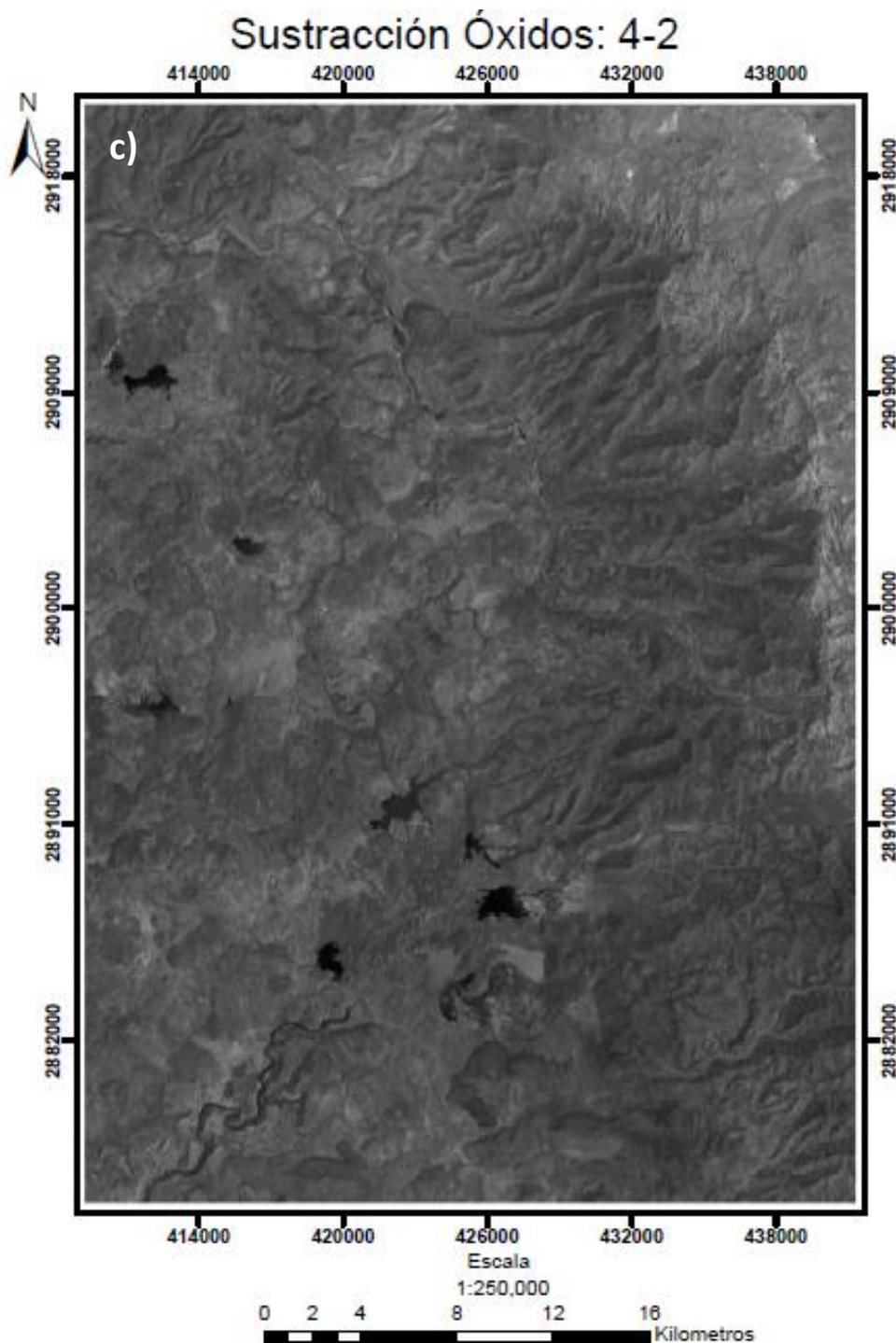


Figura 22 Sustracción de bandas para hidroxilos, se utilizaron las bandas 6 - 7. Los tonos claros indican la presencia de hidroxilos, los tonos oscuros corresponden a otro material distinto de la cobertura de hidroxilos.



**Figura 23** Sustracción de bandas para óxidos OLI 4 - OLI 2. Los tonos claros indican la presencia de óxidos, los tonos oscuros corresponden a otro material distinto de la cobertura de óxidos.

A los resultados del procesamiento se les aplicó un realce de contraste lineal, el cual no distorsiona o pierde información, lo que no ocurre con el realce de contraste para los cocientes. Sin embargo, manteniendo la escala de grises (0 a 256) el contraste en los tonos de gris se ve reducido en forma sustancial. La Figura 21, Figura 22, y Figura 23 muestran los resultados del procesamiento para sustracciones.

### **Identificación de vegetación**

La imagen Figura 21 contiene los resultados para la identificación de vegetación, dado que los valores altos (ND) en la banda OLI 5 corresponden a la reflectancia de la vegetación y los valores bajos de ND en la banda del rojo (OLI 4) corresponden a picos de absorbanza.

Al realizar la sustracción algebraica de bandas se pretende resaltar el contraste de los valores más altos de ND, que indiquen la presencia del material en cuestión, debe existir una gran diferencia entre alta reflectancia y alta absorbanza, de tal forma que la resta arroje un valor alto de ND. Los valores altos en la banda 5 y bajos en la banda 4 prevalecen, mientras que la respuesta de otros materiales se minimizará siempre y cuando su respuesta espectral sea similar en ambas bandas.

Los tonos grises predominan sobre la imagen, pero se presentan ciertas zonas con tonos claros que resaltan visualmente en la región suroeste en las cercanías del poblado “San José de Comondú”, el contraste entre los datos es reducido.

### **Identificación de hidroxilos**

En la imagen Figura 22 se resaltan los hidroxilos, los cuales se limitan a la parte sur de la imagen, además de ciertas zonas aisladas, existe un limitado contraste entre los datos lo cual conlleva una falta de contraste visual entre tonos, esta imagen muestra un parecido en las zonas claras con la sustracción de vegetación.

### **Identificación de óxidos**

La imagen Figura 23 resalta las zonas con presencias de óxidos el contraste es reducido; sin embargo, los valores que presentan ciertos tonos claros se ubican en la parte central y norte de la imagen.

Los resultados a partir de las imágenes por sustracciones muestran una limitada concordancia con los resultados procesados por cociente de bandas, al mismo tiempo se denota bajo contraste en los datos tanto de manera numérica como de manera visual, lo cual dificulta la identificación de cada uno de los objetivos buscados. Pese a lo anterior algunos pixeles son visiblemente resaltados, lo cual se destaca en la identificación de vegetación (Figura 21).

#### **Análisis de resultados de componentes principales**

Una vez aplicada la técnica se generan las siguientes tablas que muestran los resultados del análisis. Los materiales a resaltar son vegetación, óxidos e hidroxilos.

**Tabla 11 Matriz de Correlación obtenida para el análisis de componentes principales para 6 bandas**

<b>Correlación</b>	<b>Band 2</b>	<b>Band 3</b>	<b>Band 4</b>	<b>Band 5</b>	<b>Band 6</b>	<b>Band 7</b>
<b>Band 2</b>	1	0.977409	0.935935	0.680868	0.391181	0.379938
<b>Band 3</b>	0.977409	1	0.960827	0.69497	0.386654	0.379787
<b>Band 4</b>	0.935935	0.960827	1	0.739418	0.485904	0.498777
<b>Band 5</b>	0.680868	0.69497	0.739418	1	0.630608	0.545712
<b>Band 6</b>	0.391181	0.386654	0.485904	0.630608	1	0.975743

<b>Band 7</b>	0.379938	0.379787	0.498777	0.545712	0.975743	1
---------------	----------	----------	----------	----------	----------	---

En la Tabla 11 se resalta la relación entre las bandas incluidas en el procesamiento (2,3,4,5,6 y 7), existe cierta correlación entre las bandas OLI 5 y OLI 4 (.7393) lo cual indica la posibilidad de obtener resultados para resaltar la información del terreno procedente de la vegetación. En el caso de la relación OLI 3 – OLI4 y OLI 6 – OLI7 la correlación es bastante alta Tabla 11, indicando una limitada cantidad de datos diferentes entre estas bandas, dado que la mayor parte de la información presente en las imágenes son geoformas y se trata de la misma área de observación es usual esperar este tipo de datos, entre menor sea la correlación una mayor cantidad de información contrastante se indicará. Cuando se presenta el caso de una correlación entre bandas iguales se observa un valor de 1 ya que la información concuerda y se correlaciona en un 100 %.

**Tabla 12 Matriz de Eigen-vectores, vectores característicos**

<b>Eigenvector</b>	<b>Comp. 1</b>	<b>Comp. 2</b>	<b>Comp. 3</b>	<b>Comp. 4</b>	<b>Comp. 5</b>	<b>Comp. 6</b>
<b>Band 2</b>	-0.11695	-0.154168	-0.248568	-0.400106	-0.662148	-0.549767
<b>Band 3</b>	0.28158	0.380515	0.475041	0.547596	-0.353447	-0.354217
<b>Band 4</b>	-0.274321	-0.360894	-0.478653	0.706166	0.087308	-0.24311
<b>Band 5</b>	0.413739	0.343451	-0.355952	-0.154552	0.52055	-0.537866
<b>Band 6</b>	0.488158	0.222309	-0.563698	0.131752	-0.395839	0.46955
<b>Band 7</b>	0.64985	-0.730627	0.197443	-0.011756	0.036772	-0.058357

La Tabla 12 indica la matriz de vectores característicos, estos datos son las direcciones preferenciales de la información, los datos multivariados ofrecen la posibilidad de ser expresados en combinaciones lineales de las variables originales. El análisis por componentes principales se basa en una transformación lineal de las observaciones originales (vectores característicos), indicando las direcciones preferenciales.

**Tabla 13 Matriz de carga para componentes principales, cuadro rojo denotando los óxidos y cuadro verde denotando vegetación**

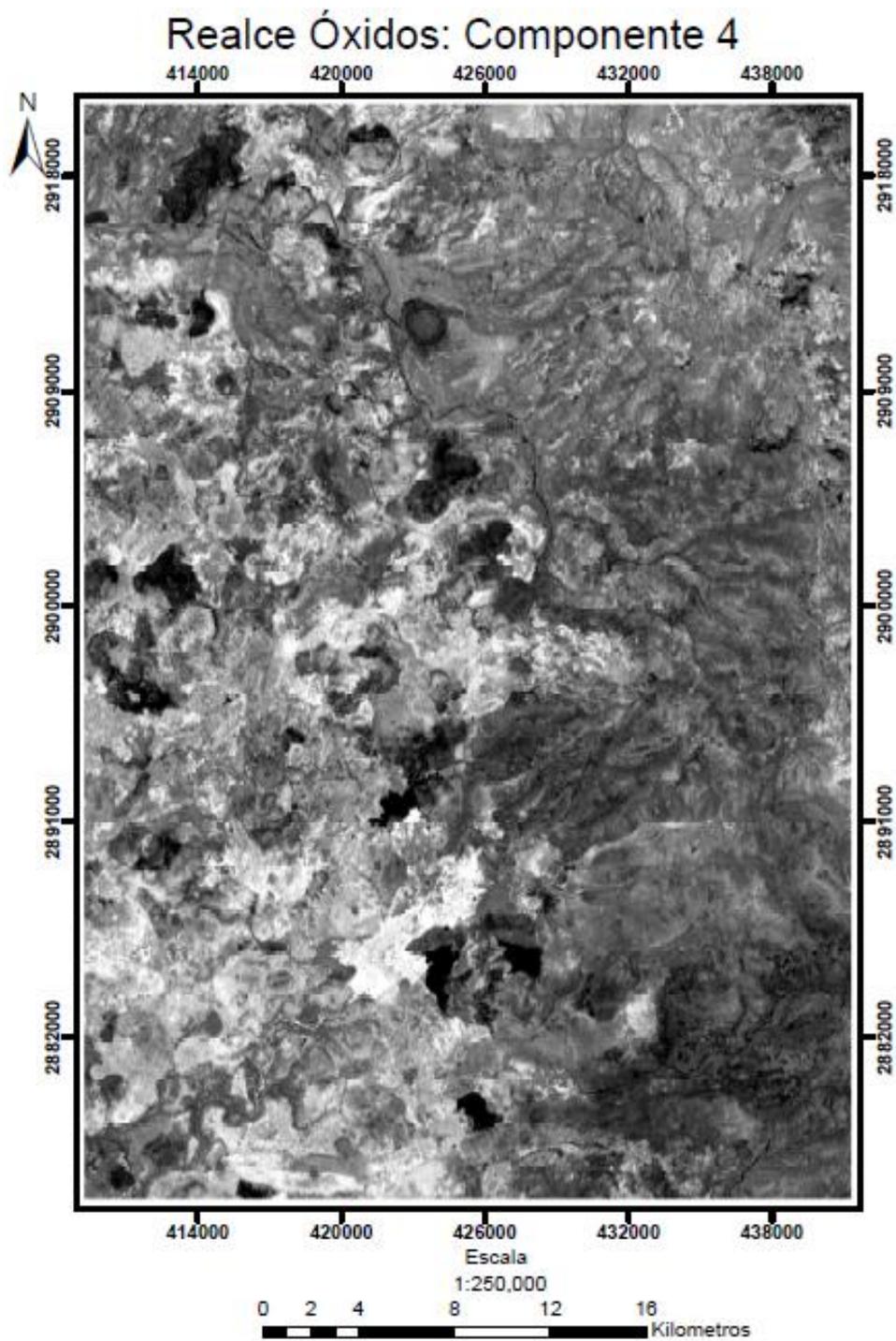
<b>Carga</b>	<b>Comp. 1</b>	<b>Comp. 2</b>	<b>Comp. 3</b>	<b>Comp. 4</b>	<b>Comp. 5</b>	<b>Comp. 6</b>
<b>Band B2</b>	0.586726	-0.686511	0.357161	-0.180425	0.120130	0.099529
<b>Band B3</b>	0.590157	-0.707871	0.358525	-0.114281	0.041743	-0.085383
<b>Band B4</b>	0.683465	-0.634763	0.341554	0.085074	-0.076028	0.016573
<b>Band B5</b>	0.777660	-0.517231	-0.356196	0.026111	0.012561	-0.000698
<b>Band B6</b>	0.964937	0.250310	-0.033019	-0.065939	-0.028296	0.001636
<b>Band B7</b>	0.944824	0.295836	0.108428	0.080349	0.039583	-0.003062

Analizando la matriz de carga (Tabla 13) se indican aquellas componentes que aporten una mayor carga referente a las características de la firma espectral de la vegetación, de los óxidos y de los hidroxilos. Con esto se debe encontrar alguna componente que posea la mayor carga de información para la reflectancia de cada material de interés, esta componente debe poseer cierta carga para la banda de absorbancia, pero de signo opuesto, con el fin de alcanzar nuestro objetivo.

**Óxidos:** Se sabe que el rasgo de reflectancia de los óxidos se encuentra en la banda 4 y su máximo de absorbancia en la banda 2. Con base en la matriz de carga se obtiene como resultado que la componente C4 contiene la mayor carga para la banda 4, además de cumplir con los demás parámetros, lo cual permite identificar el grupo mineralógico óxidos.

**Vegetación:** Buscando los rasgos característicos de la vegetación en la banda 5 y banda 4 se detectó la nueva componente que mostró poseer la mayor carga para denotar este material. Dado el signo negativo de la componente C3 fue necesario realizar una operación de multiplicación por -1, con el fin de obtener valores positivos en los pixeles de interés y así observar la respuesta de reflectancia de la vegetación en tonos claros.

**Hidroxilos:** Para el objetivo de identificar los hidroxilos se verifico las bandas 5 y 6, sin embargo, no se obtuvo una componente apropiada, es decir ninguna componente mostró contener información particular para este material que pudiera ser diferenciable de otros materiales.



**Figura 24** Componente obtenida a partir del análisis PCA. Componente 4 para óxidos, en tonos claros se resalta el grupo de los óxidos

La componente desplegada en la Figura 24 muestra uno de los resultados del análisis por componentes principales, la imagen ha sido mejorada para su visualización, aplicando un realce de contraste. En tonos claros se observan las zonas con presencia de óxidos, la porción izquierda de la imagen aparenta contener una saturación importante y extensa de óxidos, extendiéndose desde la Sierra La Giganta hacia el oeste.

Sin embargo, esta técnica presenta problemas para la obtención de una componente cuya aportación principal sea hidroxilos, debido a que la respuesta espectral de la vegetación es semejante en bandas clave para la visualización de hidroxilos y esto enmascara la información procedente de los hidroxilos.

### **Análisis de resultados de componentes principales técnica de Crosta y Moore (1989).**

Una vez aplicada esta técnica se generan las siguientes tablas que muestran los resultados del análisis. Los materiales a resaltar son vegetación, óxidos e hidroxilos. Las matrices de eigen-vectores (Tabla 14 y Tabla 16) muestran la distribución de la varianza en cada una de las componentes, así como las direcciones preferentes de los vectores característicos. La varianza se concentra en mayor medida en la primera componente con más de 75% y 83% respectivamente, lo que indica que la información presente es en su mayoría redundante dentro de las bandas.

#### **Identificación de óxidos y vegetación.**

Tabla 14 Matriz de Eigen vectores.

COMPONENTE	Comp. 1	Comp. 2	Comp. 3	Comp. 4
% VAR.	75.726317	18.238267	5.635126	0.400288
EIGENVAL.	5452780.958639	1313272.279490	405765.251233	28823.341263
EIGENVEC. 1	0.154495	0.289248	0.362263	0.872486
EIGENVEC. 2	0.319688	0.489654	0.647997	-0.487993
EIGENVEC. 3	0.534343	0.528377	-0.659756	0.004149
EIGENVEC. 4	0.767078	-0.630391	0.116561	0.024762

Tabla 15 Matriz de Carga para identificación de óxidos y vegetación, las celdas sombreadas representan aquellas componentes que cumplen las características necesarias, para la vegetación (cuadro verde), para los óxidos (cuadro rojo).

Carga	Comp. 1	Comp. 2	Comp. 3	Comp. 4
Band B2	0.642567	0.590397	0.411014	0.263831
Band B4	0.728730	0.547769	0.402941	-0.080875
Band B5	0.861001	0.417826	-0.289998	0.000486
Band B6	0.926728	-0.373758	0.038414	0.002175

#### **Identificación de hidroxilos y óxidos.**

Tabla 16 Matriz de Eigen vectores.

COMPONENTE	Comp. 1	Comp. 2	Comp. 3	Comp. 4
% VAR.	83.114674	14.433518	1.908806	0.543004
EIGENVAL.	7345208.597364	1275553.316581	168689.536668	47987.677388
EIGENVEC. 1	0.102410	0.270259	0.914911	-0.281797
EIGENVEC. 2	0.392029	0.867397	-0.242296	0.187690
EIGENVEC. 3	0.703711	-0.237370	-0.205008	-0.637510
EIGENVEC. 4	0.583623	-0.343857	0.249402	0.692058

Tabla 17 Matriz de Carga para la identificación de hidroxilos

Carga	Comp. 1	Comp. 2	Comp. 3	Comp. 4
Band B2	0.494357	0.543657	0.669297	-0.109950
Band B5	0.733153	0.675992	-0.068670	0.028371
Band B6	0.986734	-0.138701	-0.043563	-0.072253
Band B7	0.965087	-0.236951	0.062499	0.092499

Las matrices de las Tablas: Tabla 15 y Tabla 17 describen el resultado del análisis por componentes principales aplicando la técnica (Crosta & Moore, 1989).

**Óxidos y vegetación:** En la Tabla 15 se observa la matriz correspondiente a la identificación de óxidos y vegetación, las componentes escogidas cuyas características numéricas cumplieron con los parámetros de selección fueron la “Comp. 2” (Tabla 15) para vegetación y la “Comp. 4” (Tabla 15) para óxidos, en el caso de la componente 4 se aplicó una operación multiplicativa por un factor de -1 con el fin de obtener la respuesta de reflectancia de forma positiva, y así generar una imagen en tonos claros una vez desplegada.

**Hidroxilos:** La Tabla 17 presenta la matriz de carga correspondiente para la identificación de hidroxilos, sin embargo, no mostró resultados favorables y ninguna componente obtuvo la carga necesaria para que el rasgo de reflectancia de los hidroxilos sobresaliera. Considerando que las bandas de ingreso contienen información de reflectancia y absorbancia referente a este grupo mineralógico, los resultados no fueron los esperados.

#### Análisis de resultados de componentes principales dirigidos

Con la técnica propuesta por (Fraser, 1991) se utilizan cocientes espectrales en lugar de bandas para el análisis por componentes principales, con el fin de concentrar la información en nuevas componentes que ya ha sido enfatizada por los cocientes. Esta técnica ha mostrado buenos resultados en la identificación de óxidos.

#### Identificación de óxidos y vegetación.

Tabla 18 Matriz de Eigen vectores y Matriz de carga (se resaltan aquellas componentes con mayor carga; rojo = óxidos, verde = vegetación)

COMPONENTE	C 1	C 2
%VAR.	60.080914	39.919087
EIGENVAL.	0.167281	0.111145
EIGENVEC 1	0.999334	-0.036487
EIGENVEC 2	0.036487	0.999334

CARGA	C 1	C 2
OLI 4 / OLI 2	0.999557	-0.029748
OLI 5 / OLI 4	0.044748	0.998998

### **Identificación de hidroxilos y vegetación.**

Tabla 19 Matriz de Eigen vectores y Matriz de carga (se resaltan aquellas componentes con mayor carga; verde = vegetación, azul = hidroxilos)

COMPONENTE	C 1	C 2
% VAR.	94.558191	5.441808
EIGENVAL	0.112679	0.006485
EIGENVEC 1	0.993107	-0.117214
EIGENVEC 2	0.117214	0.993107

CARGA	C 1	C 2
OLI 5 / OLI 4	0.999599	-0.028303
OLI 6 / OLI 7	0.441460	0.897281

Una vez analizadas las matrices de carga para la identificación de óxidos, hidroxilos y vegetación se obtuvieron los siguientes resultados.

**Óxidos y vegetación:** En la Tabla 18 nos presenta el resultado del análisis para identificación de óxidos y vegetación con la matriz de valores característicos, y la matriz de carga. La distribución de varianza concentro 60% y 40% de la información en las componentes 1 y 2 respectivamente, indicando una limitada redundancia en los datos ingresados. Las componentes que indican cada uno de los rasgos fueron claramente diferenciables a través de la matriz de carga, la componente C1 presentó la mayor carga para óxidos y la componente C2 obtuvo la mayor carga para la vegetación.

**Hidroxilos y vegetación:** La Tabla 19 corresponde a las matrices de eigen-vectores y de carga para la identificación de hidroxilos y vegetación. El porcentaje de varianza en este caso contó con un sesgo hacia la componente C1 con 94.5%, mientras que la componente C2 presento un 5.5% de la varianza. Pese a este punto, la distribución de carga permitió la identificación de las componentes propias de hidroxilos y vegetación, la componente C2 presento la carga suficiente para resaltar hidroxilos y la componente C1 pese a poseer la mayoría de la información obtuvo la carga necesaria para resaltar vegetación.

Teniendo en cuenta la fuerte coincidencia de rasgos de reflectancia y absorbancia para los materiales de vegetación e hidroxilos fue necesario aplicar este tipo de procesamiento con el objetivo de separar ambas respuestas espectrales y asignarlas a diferentes componentes.

Una vez analizados los resultados generados se procedió a la selección de aquellas componentes que indicaran la presencia de vegetación, óxidos o hidroxilos (Tabla 20), fueron reorganizadas para su utilización posterior dentro de una composición. Las imágenes resultantes se presentan en Figura 25, Figura 26, Figura 27 en escala de grises, los tonos claros representan los pixeles que poseen la presencia del material buscado sea óxidos, hidroxilos o vegetación.

Tabla 20 Componentes elegidas y reasignadas a partir del procesamiento y análisis por componentes principales dirigidas.

<b>Nuevas componentes</b>	<b>Material a resaltar</b>	<b>Nombre original</b>	<b>Análisis de procedencia</b>
<b>Componente 1</b>	Óxidos	C 1	Identificación de óxidos y vegetación
<b>Componente 2</b>	Vegetación	C 2	Identificación de óxidos y vegetación
<b>Componente 3</b>	Hidroxilos	C 2	Identificación de hidroxilos y vegetación

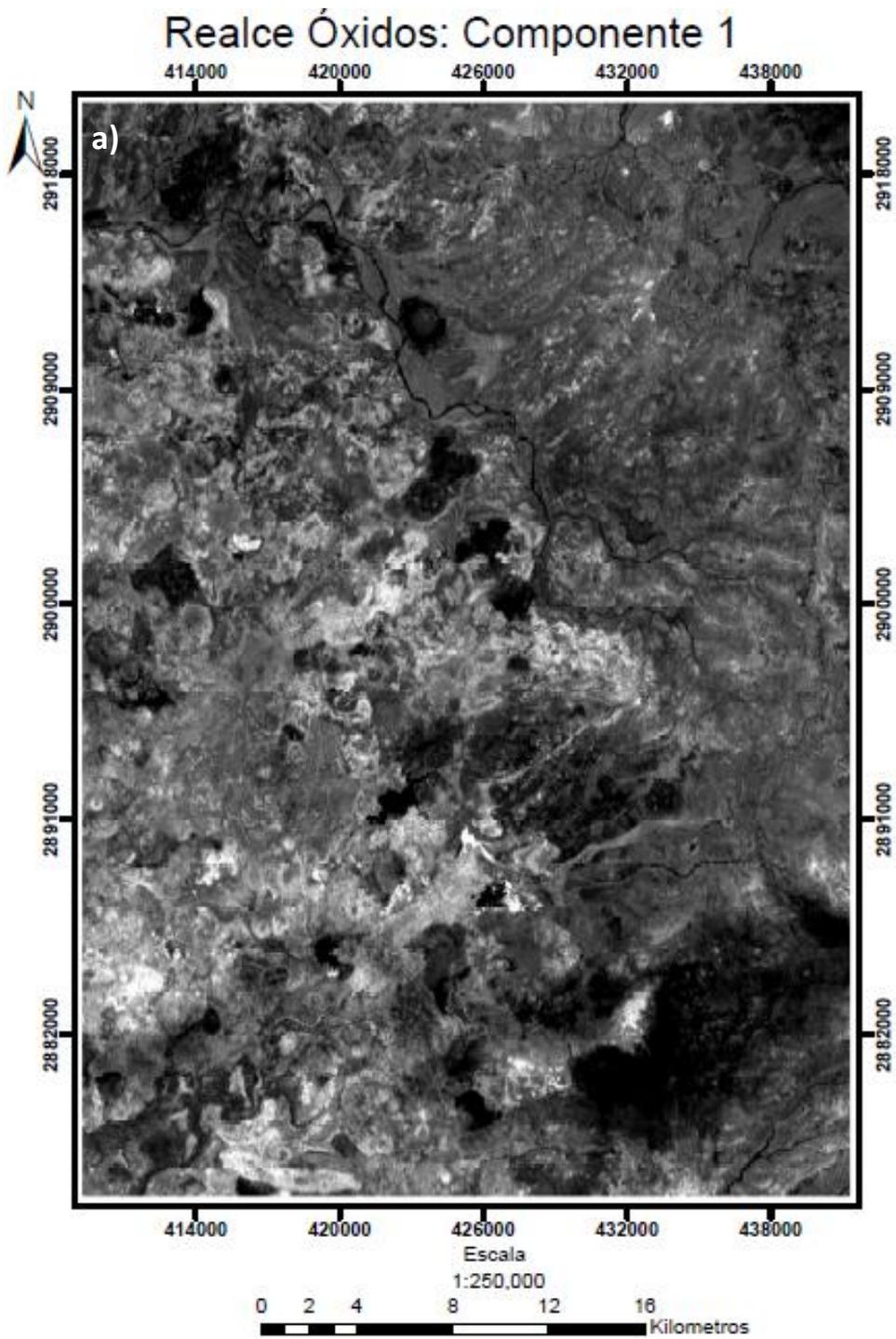


Figura 25 Componente principal dirigida para el realce de Óxidos (Componente 1)

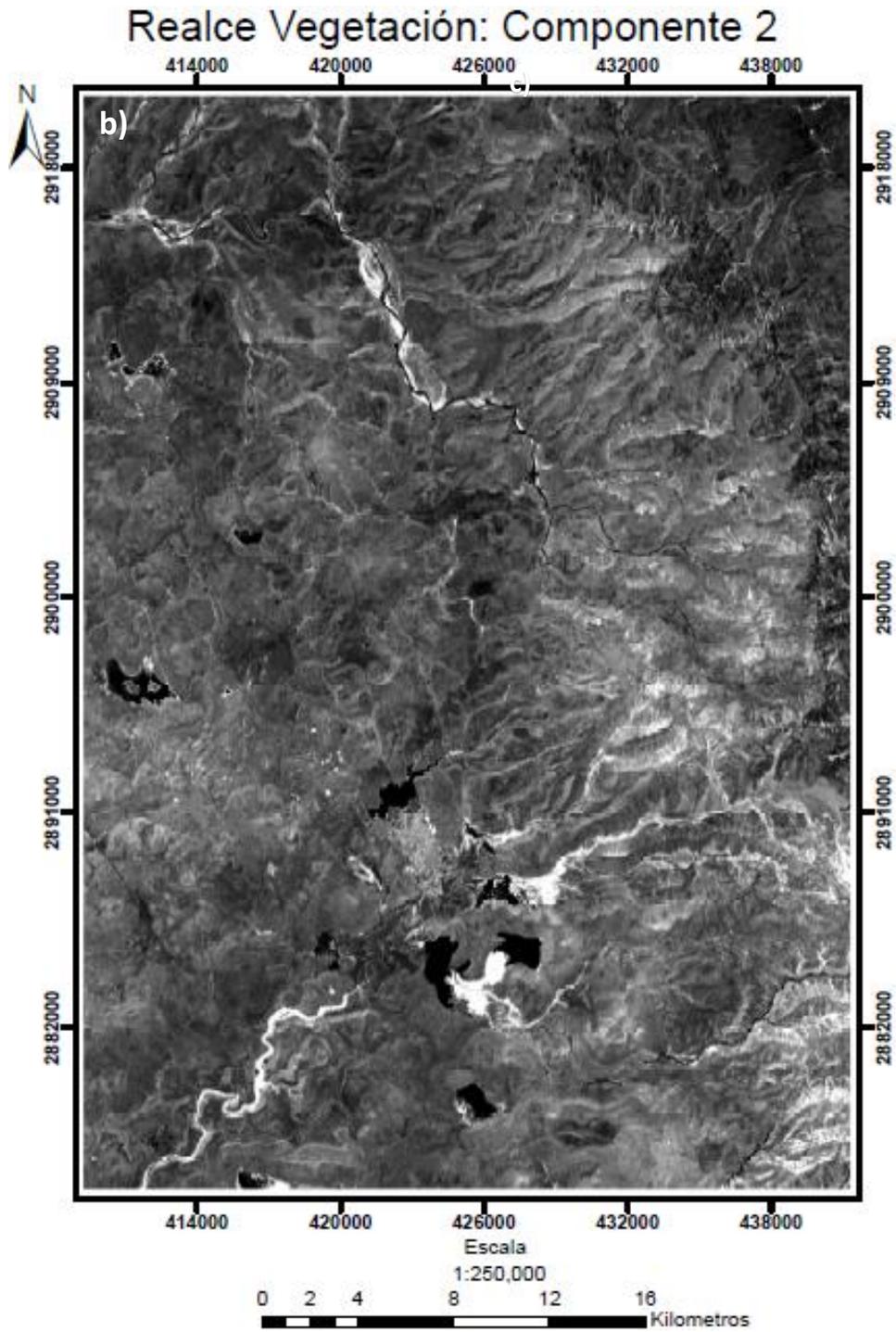


Figura 26 Componente principal dirigida para el realce de Vegetación (Componente 2)

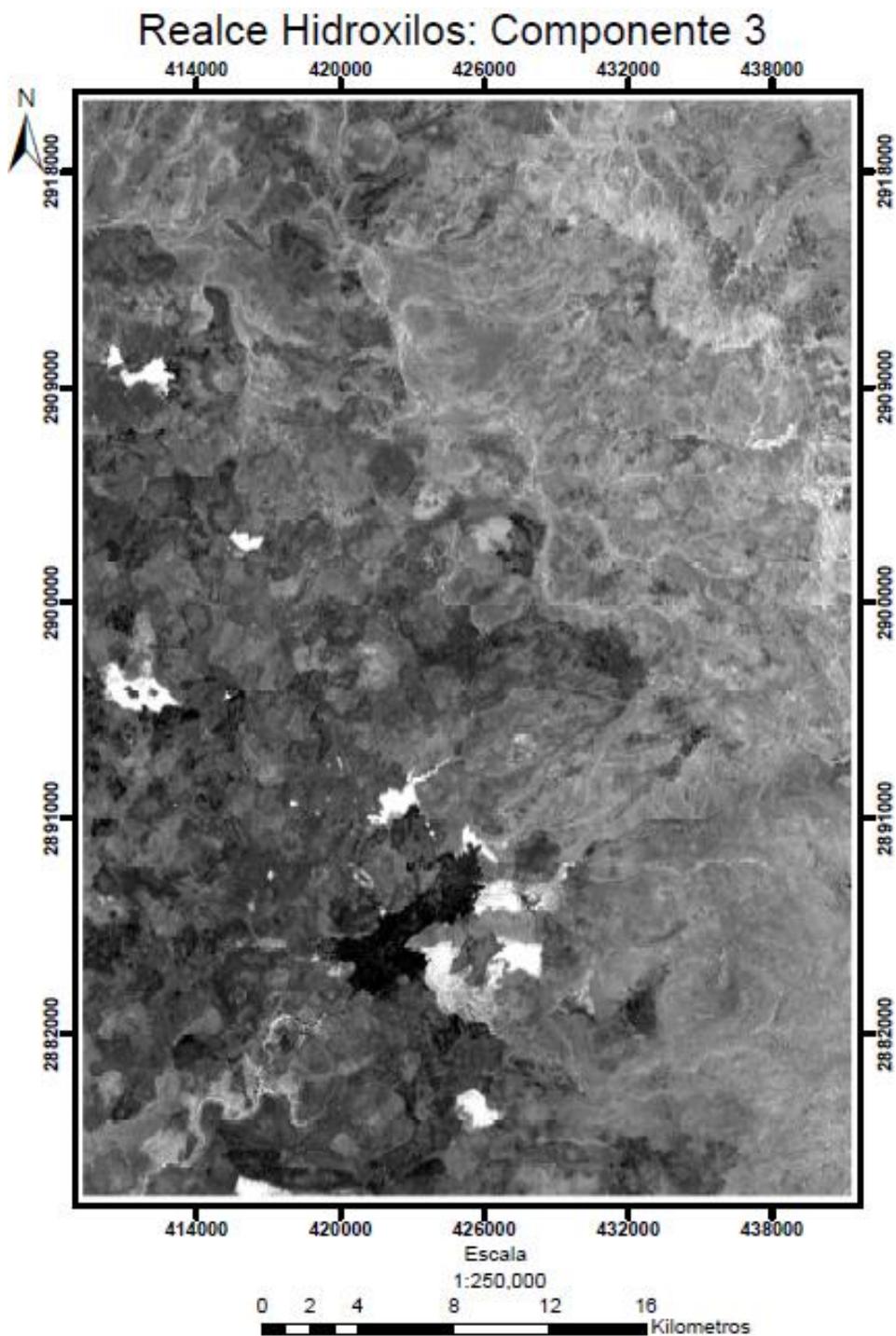


Figura 27 Componente principal dirigida para el realce de Hidroxilos (Componente 3)

### 5.3.2. Composiciones RGB

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

Los resultados individuales del procesamiento para la sustracción algebraica de bandas presentaron bajo contraste entre los datos, dificultando la identificación de

materiales en cada una de las imágenes resultantes. La Figura 28 representa la composición a color RGB como resultado del realce de sustracción de bandas. En tonos rojos se visualiza la vegetación, que en este caso es casi inexistente en tonos rojos intensos, en tonos verdes se observan los óxidos distribuidos ampliamente, y en tonos azules los hidroxilos poco visibles en esta composición. Como se destaca en los resultados previos, la imagen (Figura 28) presenta un reducido contraste entre los tres colores primarios. Los tonos magenta indican la presencia de vegetación e hidroxilos con la mayor abundancia dentro de la imagen, indicando una mezcla entre estos dos materiales. En el caso de los tonos verdes atribuidos a óxidos se aprecia una combinación de píxeles en tonos: verdes, rojos y azules que no permite ser atribuido a un material en particular. Los tonos cian indican la ocurrencia de los dos grupos mineralógicos de interés (óxidos e hidroxilos), estas escasas zonas cian son resaltadas para su observación Figura 28 (cuadros rojos), las zonas con dicha información son mínimas y poco distinguibles, sin embargo, un punto a resaltar es el hecho de que las imágenes utilizadas son el resultado de un realce lineal, este tipo de realce no presenta pérdida de información, en comparación con otros tipos de realces no lineales. En general los resultados fueron insatisfactorios.

La composición RGB (Figura 29) muestra el resultado del procesamiento por cocientes espectrales. En tonos rojos se presenta la vegetación, en tonos verdes los óxidos y en tonos azules los hidroxilos. Existe un aceptable contraste en la imagen, lo cual permite la identificación de una manera más clara los diferentes materiales en la imagen. Los tonos cian indican la presencia de óxidos e hidroxilos Figura 29 (cuadros rojos), es claro que no existe una gran coincidencia entre los resultados de la Figura 28 y Figura 29, lo cual pone en duda los resultados obtenidos por la técnica de sustracción de bandas, indicando un bajo nivel de resultados visuales y numéricos. Los tonos azules atribuibles a los hidroxilos se distribuyen en la zona de la sierra La Giganta área noreste, en dichas zonas se aprecia cierta presencia de cuerpos de agua actuales, y cuerpos de agua en proceso de desecación con presencia de depósitos aluviales indicando concentración mineral denotado en la información geológica. Los cuadros rojos indican zonas en tonos cian que claramente muestran las características espectrales necesarias para poder ser atribuidos a una alteración hidrotermal, sin embargo, el potencial de separación de la información dentro de estas imágenes puede aún ser mejorado.

En la imagen (Figura 29) la distribución de materiales se ve sesgada a dos coberturas principales óxidos en tonos verdes, y vegetación + hidroxilos en tonos magenta que constituyen alrededor del 80% de los píxeles dentro de la imagen.

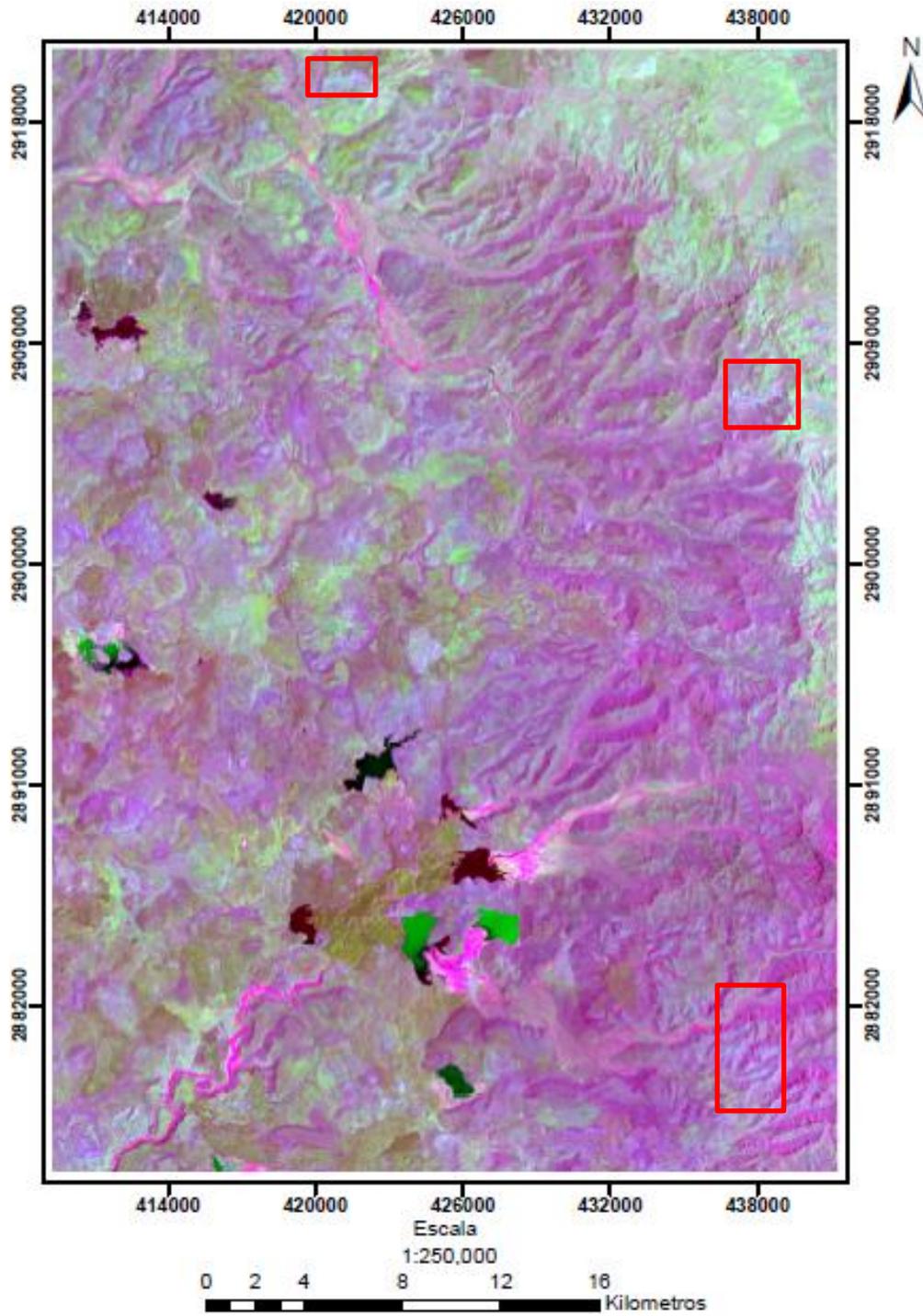


Figura 28 Composición a color RGB utilizando las sustracciones como bandas. Vegetación: 5-4 (rojo), Óxidos: 4-2 (verde) y Hidroxilos: 6-7 (azul).

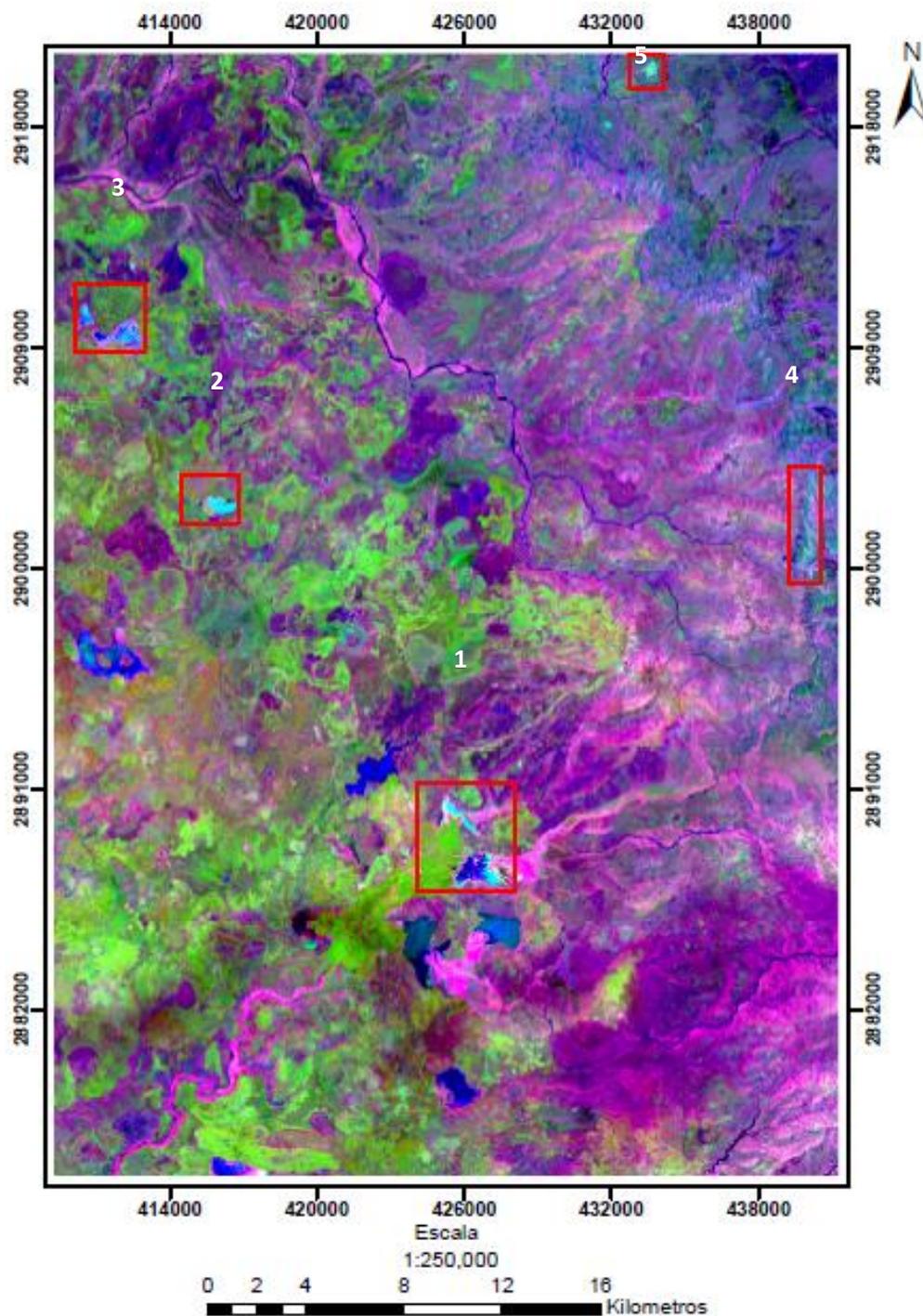


Figura 29 Composición a color RGB utilizando cocientes como bandas. Vegetación: 5/4 (rojo), Óxidos: 4/2 (verde) e Hidroxilos: 6/7 (azul).

El análisis por componentes principales dirigidas utilizando como bandas de entrada cocientes, muestra resultados satisfactorios (Figura 30), concordantes el análisis previo de cocientes espectrales. El beneficio de aplicar la técnica de componentes principales radica en el hecho de concentrar la información redundante en las primeras

componentes, y a su vez separar la información con menor ocurrencia, permitiendo así identificar la componente que presente una mayor aportación de vegetación, óxidos e hidroxilos. La técnica utiliza los cocientes porque en estos la información de reflectancia de un material específico ya fue enfatizada.

En la imagen (Figura 30) podemos apreciar en una combinación de tonos rojos la vegetación que se concentra en gran parte de la imagen, particularmente en la porción sur y este, sobre la sierra La Giganta, los tonos se encuentran entremezclados con tonos magenta que reflejan la aportación de pixeles en color azul propio de los hidroxilos, recordando que la respuesta espectral de la vegetación es similar en ciertas zonas a la respuesta del grupo de los hidroxilos. Los tonos de color verde corresponden al grupo de óxidos distribuidos mayormente en la porción SW y NW de la imagen, mediante el contraste en la imagen es posible diferenciar eficientemente estos materiales y apreciar su cercanía a las faldas de la sierra. Los tonos cian resaltados en cuadros rojos representan las zonas con aportación de óxidos e hidroxilos, propios de la alteración hidrotermal, que es coincidente a los resultados obtenidos en la Figura 29. Sin embargo, la Figura 30 muestra un mejor desempeño en la diferenciación y contraste entre los pixeles, mostrando las mismas zonas y agregando otras que cumplen con dicha característica en la identificación de alteración hidrotermal.

En la Figura 31 se muestra el mapa de la composición RGB en falso color en la cual se busca reducir al mínimo la aportación de vegetación, las bandas de entrada empleadas fueron las componentes obtenidas en el realce de componentes principales dirigidas (Tabla 20). En la banda de color rojo están los óxidos, en la verde los hidroxilos y en la azul la suma de óxidos e hidroxilos. Utilizando cada banda de entrada en la composición para desplegar óxidos e hidroxilos se llevó a cabo una concentración de información, con lo cual se entiende que aquellos tonos blancos que corresponden a zonas con presencia de pixeles que tienen aportación de todas las bandas (alteración hidrotermal). Los tonos magenta asociados a los óxidos son la mezcla de pixeles rojos y pixeles azules que también contiene óxidos. Los tonos verdes son la combinación de pixeles verdes y pixeles azules, lo cual indica una aportación primordial de hidroxilos y la suma de óxidos más hidroxilos. Con esto se observa que las zonas detectadas (cuadros rojos) en la imagen de la Figura 30 tienen una correspondencia con los materiales buscados e identificados con el realce presente en la Figura 31.

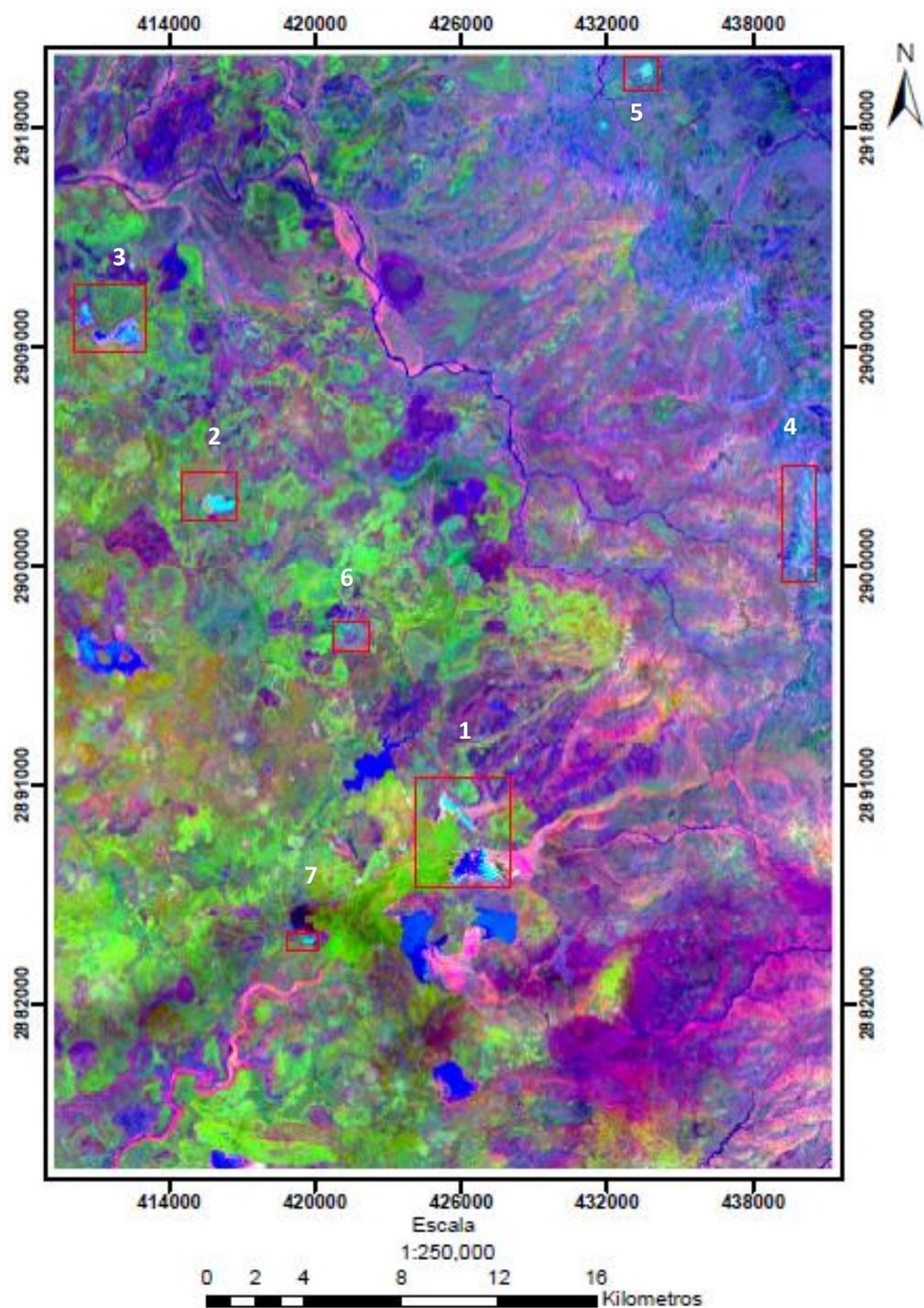


Figura 30 Composición a color utilizando componentes principales dirigidas como bandas de entrada Tabla 20. Componente 2: Vegetación (rojo), Componente 1: Óxidos (verde) y Componente 3: hidroxilos (azul).

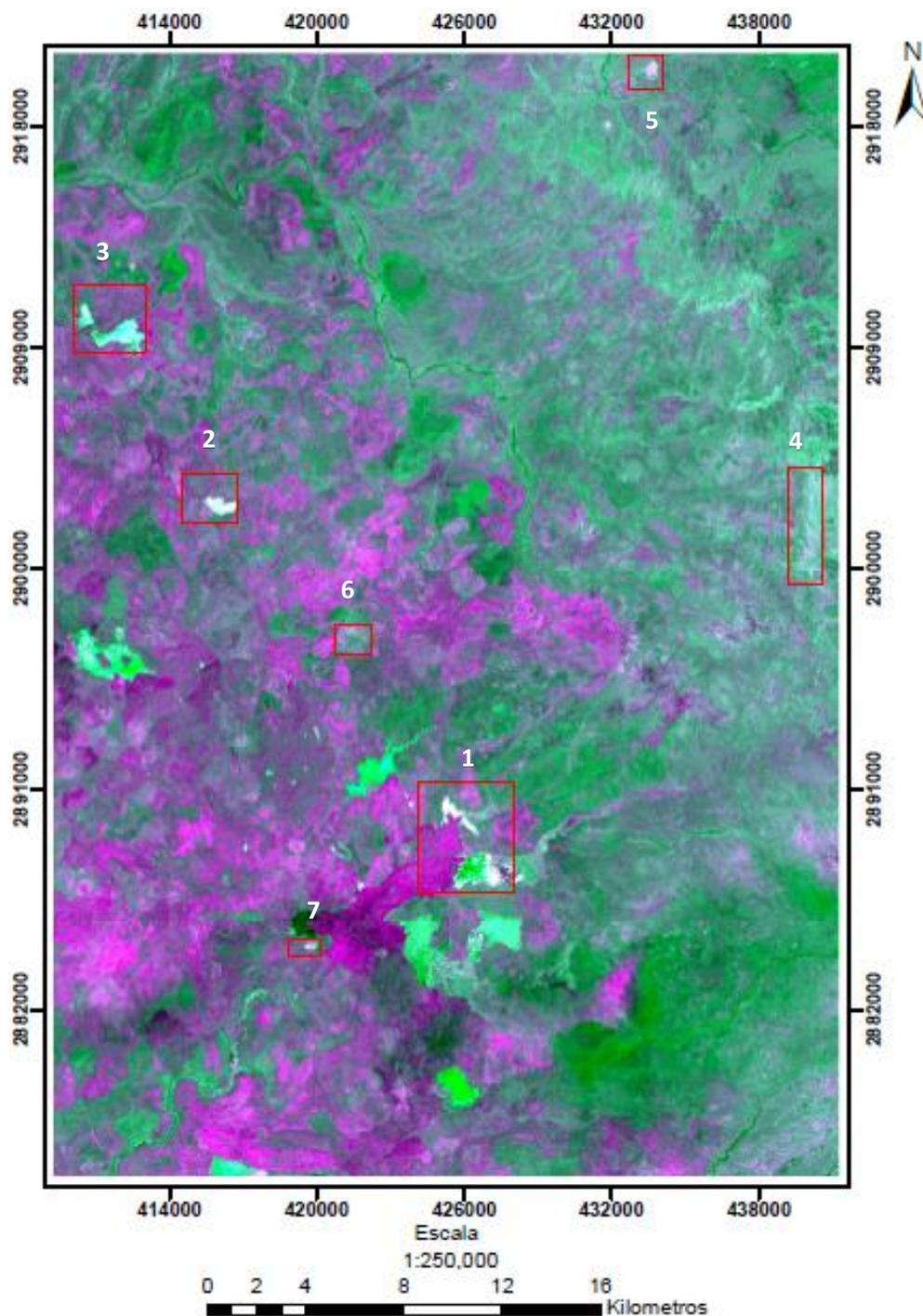


Figura 31 Mapa de la composición RGB O/H/O+H en falso color para en análisis de componentes principales.

### 5.3.3. Clasificación no supervisada

A continuación, se presentan los resultados de la clasificación. Se llevó a cabo una clasificación no supervisada como primera aproximación Figura 32, se utilizaron como bandas de entrada las componentes principales dirigidas Tabla 20.

### **Mapa de clasificación no supervisada utilizando 3 bandas**

En la Figura 32 tenemos el resultado de la clasificación que utiliza como imágenes de entrada las componentes principales dirigidas obtenidas en procesos anteriores. Con el uso de componentes que concentran la información de un material, se obtienen mejores resultados en la separación de clases a la hora de clasificar una imagen.

Analizando los resultados de la Figura 32, se separa la clase específica que corresponde a los óxidos e hidroxilos (clase - morada). En la figura se denota que las clases más grandes corresponden a las designadas como vegetación y óxidos ocupando entre ambas 90% de la imagen. Los cuerpos de agua se presentan como una tercera categoría en cuanto a proporción, ubicándose en los sitios donde realmente existen estos cuerpos de agua. El tipo de cobertura de hidroxilos muestra una distribución mínima acorde a lo observado con la información procesada. La categoría más pequeña fue la referente a las zonas de alteración (óxidos e hidroxilos), su distribución se ve limitada a zonas alejadas, sin embargo, es fácilmente diferenciable del resto de coberturas.

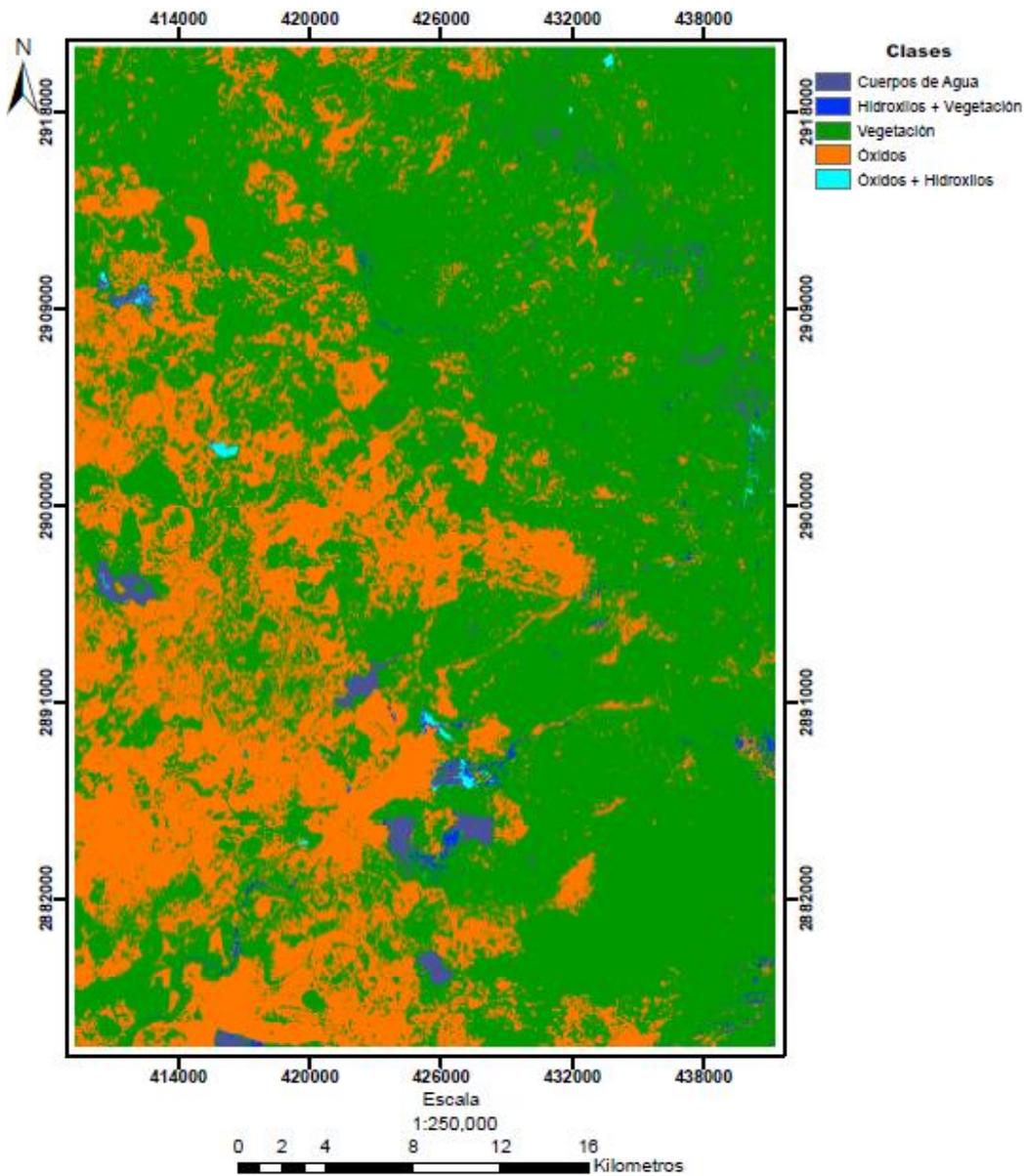
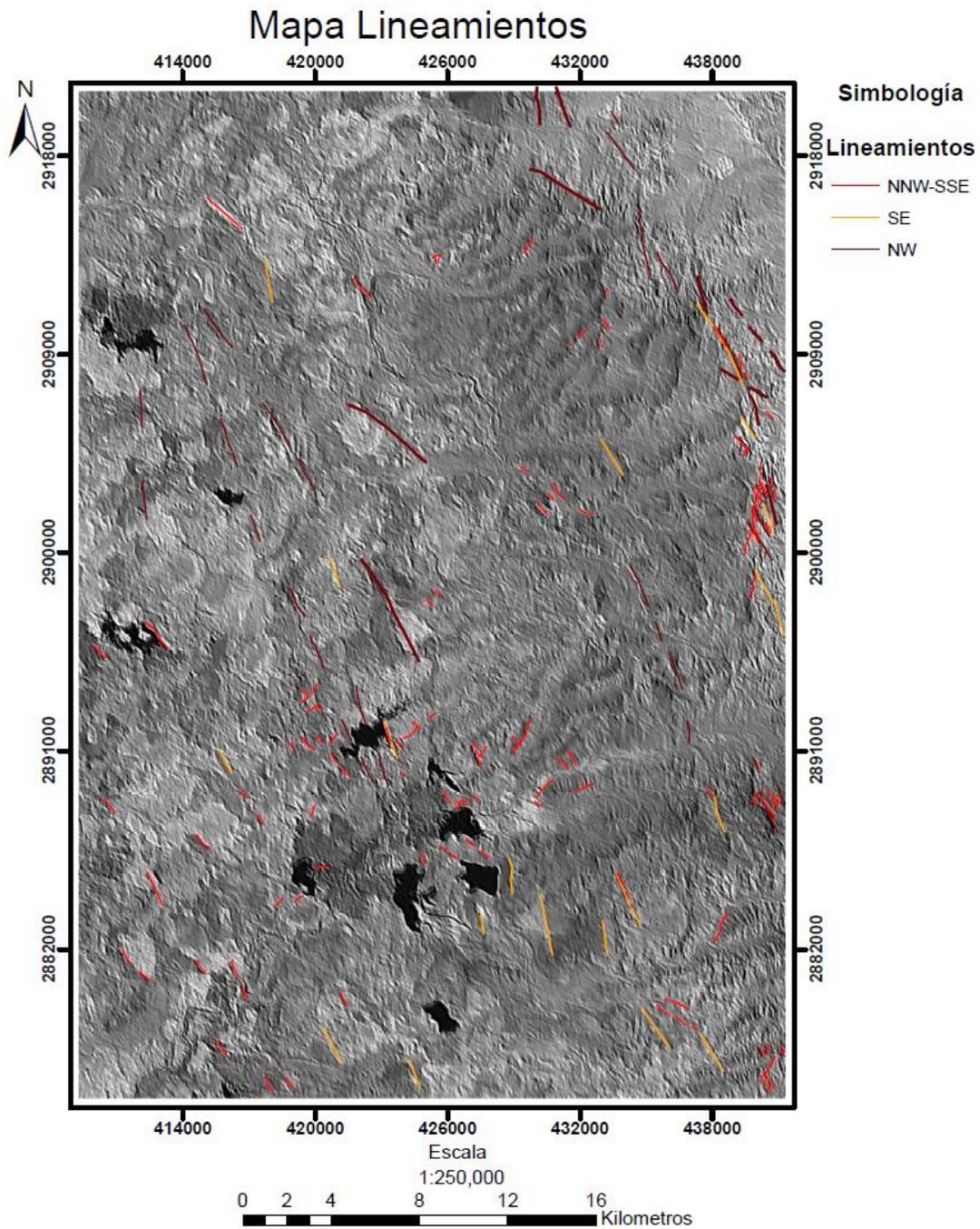


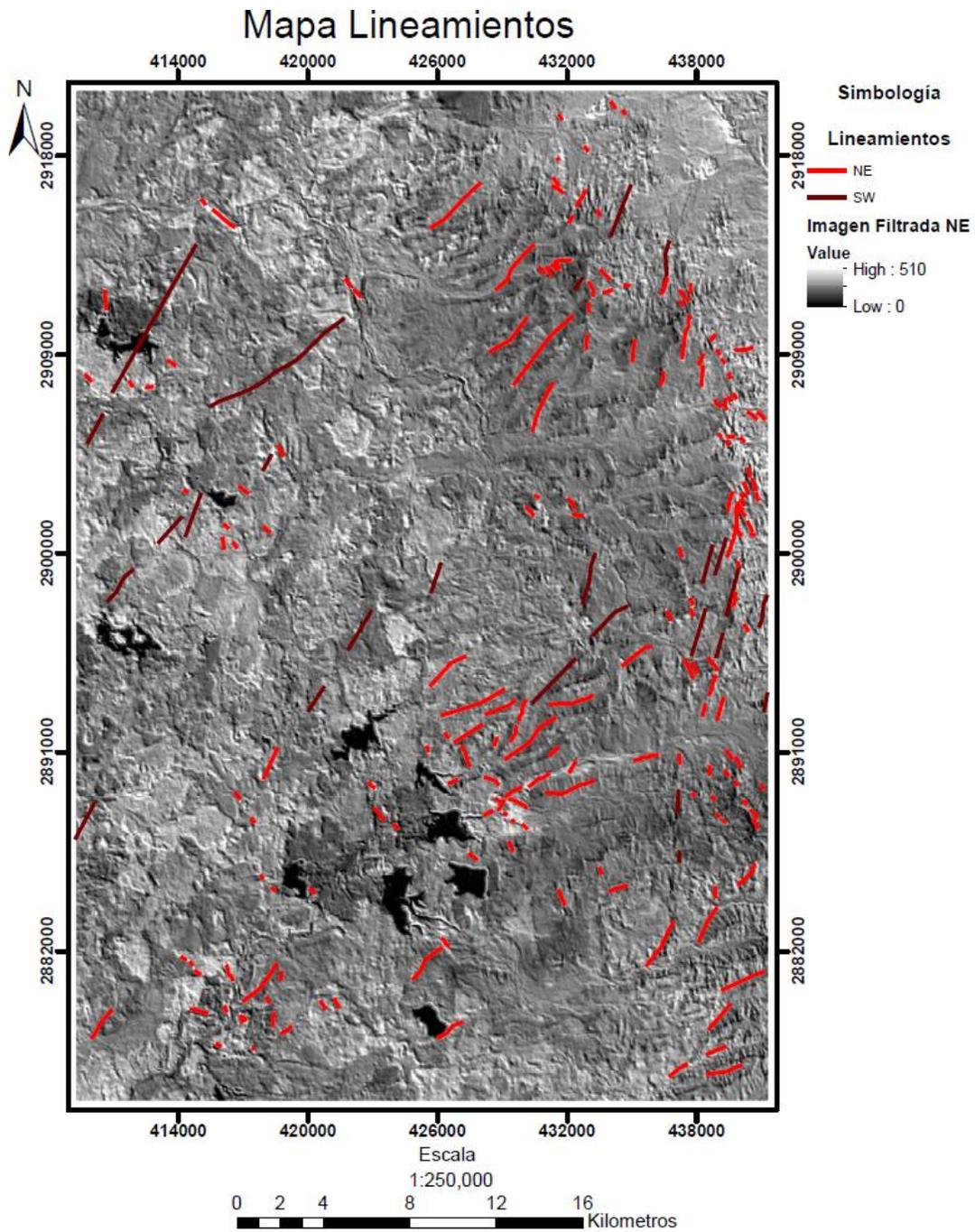
Figura 32 Clasificación no supervisada, se utilizaron las componentes como bandas.

#### 5.4. Mapas de lineamientos.

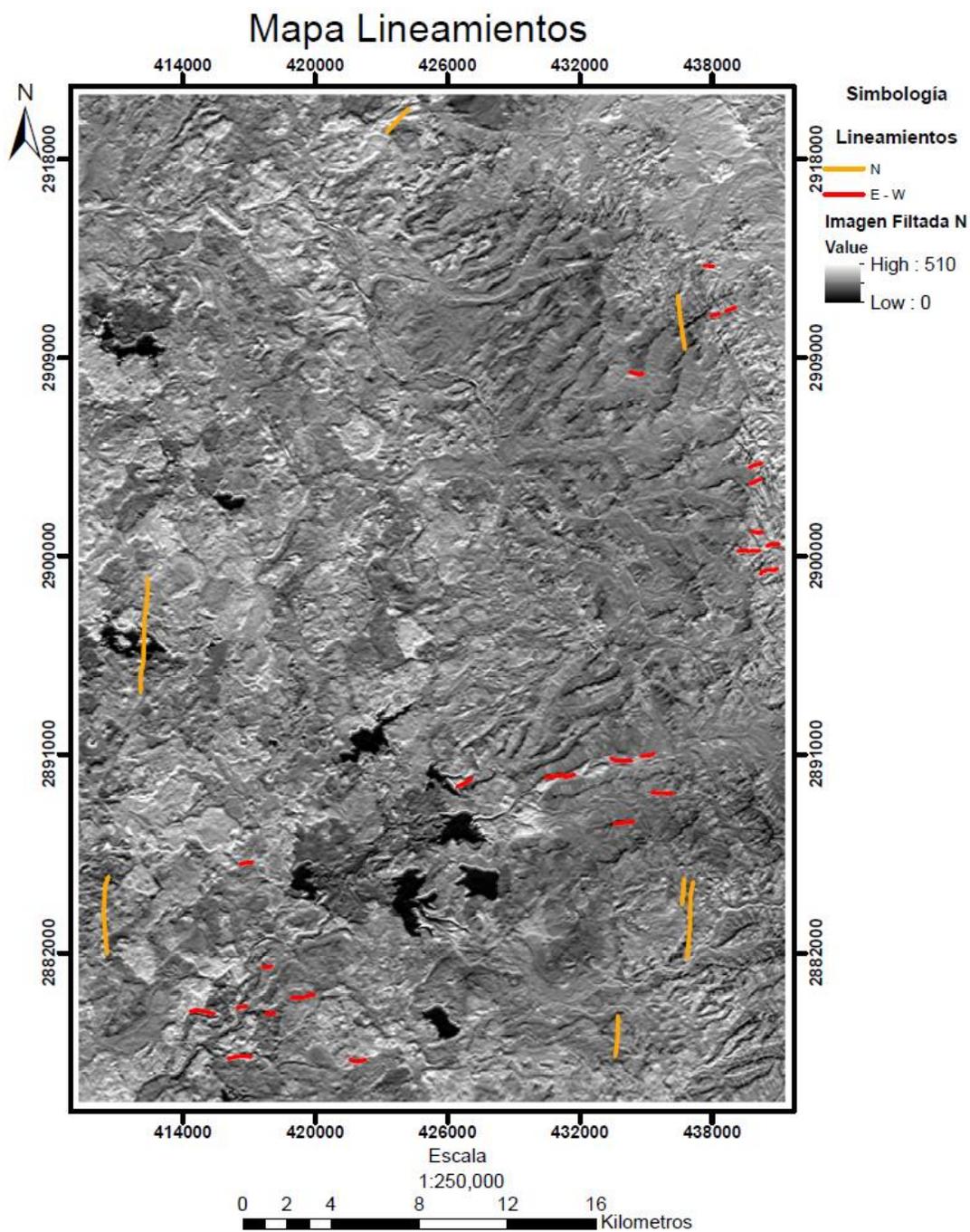
Este apartado presenta los resultados del realce espacial para identificación de lineamientos sobre las imágenes OLI Landsat 8. En los siguientes mapas de lineamientos se muestran, todos los lineamientos identificados en las direcciones N, NW, NE, SE, E-W, NNW-SSE, la imagen base es el resultado final del procesamiento.



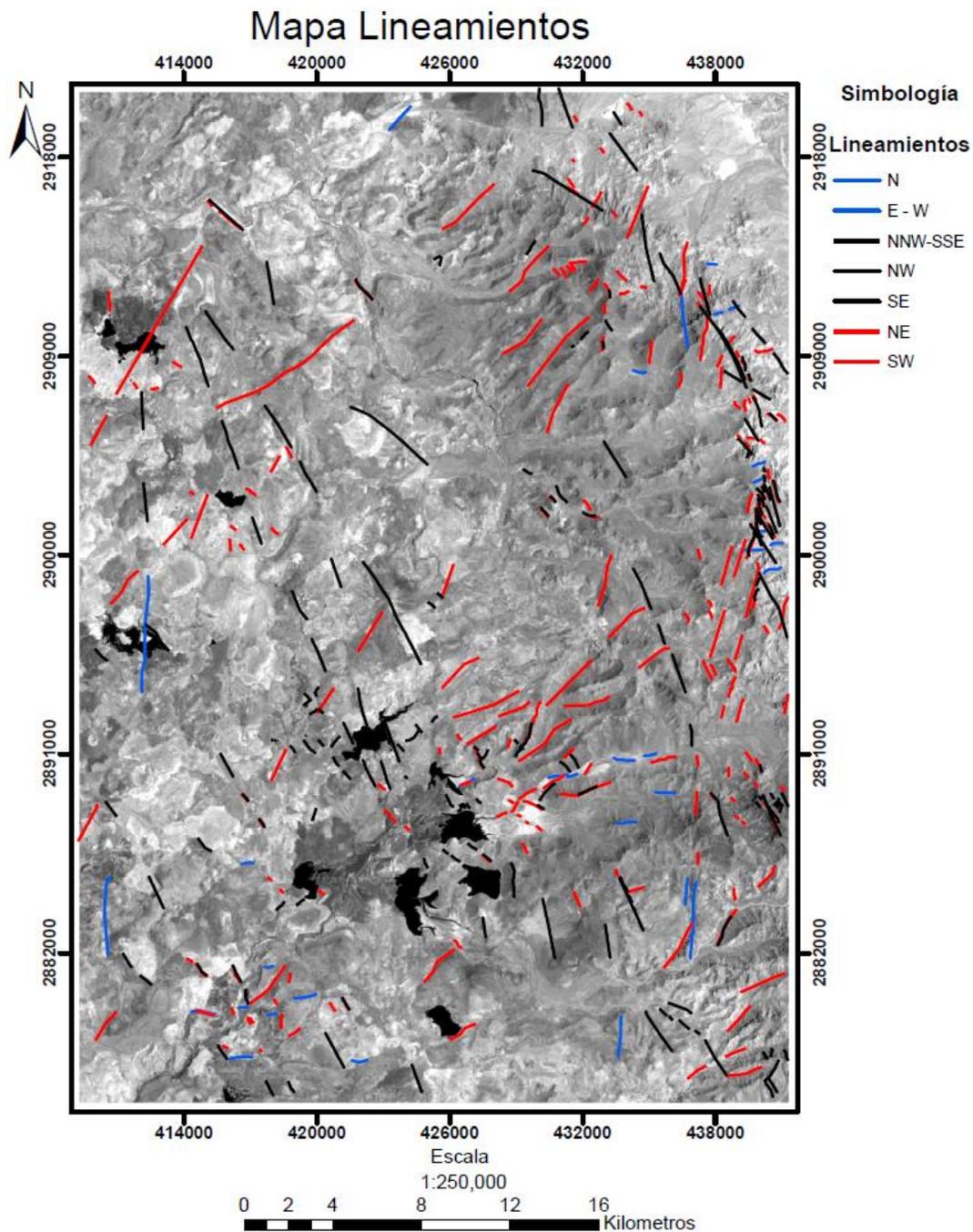
**Figura 33** Mapa de lineamientos: NNW-SSE, SE, NW. La imagen cuenta con un filtro principal NNW-SSE, es el resultado del procesamiento utilizando la metodología propuesta por (Moore & Waltz, 1983). Los tonos blancos identifican lineamientos.



**Figura 34** Mapa de lineamientos NE y SW. La imagen cuenta con un filtro principal NE, es el resultado del procesamiento utilizando la metodología propuesta por (Moore & Waltz, 1983). Los tonos blancos pueden indicar lineamientos.



**Figura 35** Mapa de lineamientos N, S, E, W. La imagen cuenta con un filtro principal N, es el resultado del procesamiento utilizando la metodología propuesta por (Moore & Waltz, 1983). Los tonos blancos pueden indicar lineamientos.



**Figura 36** Mapa de los lineamientos obtenidos en todas las direcciones: N, NW, NE, SE, E-W, NNW-SSE. La imagen base es la componente 1 obtenida del análisis por componentes principales.

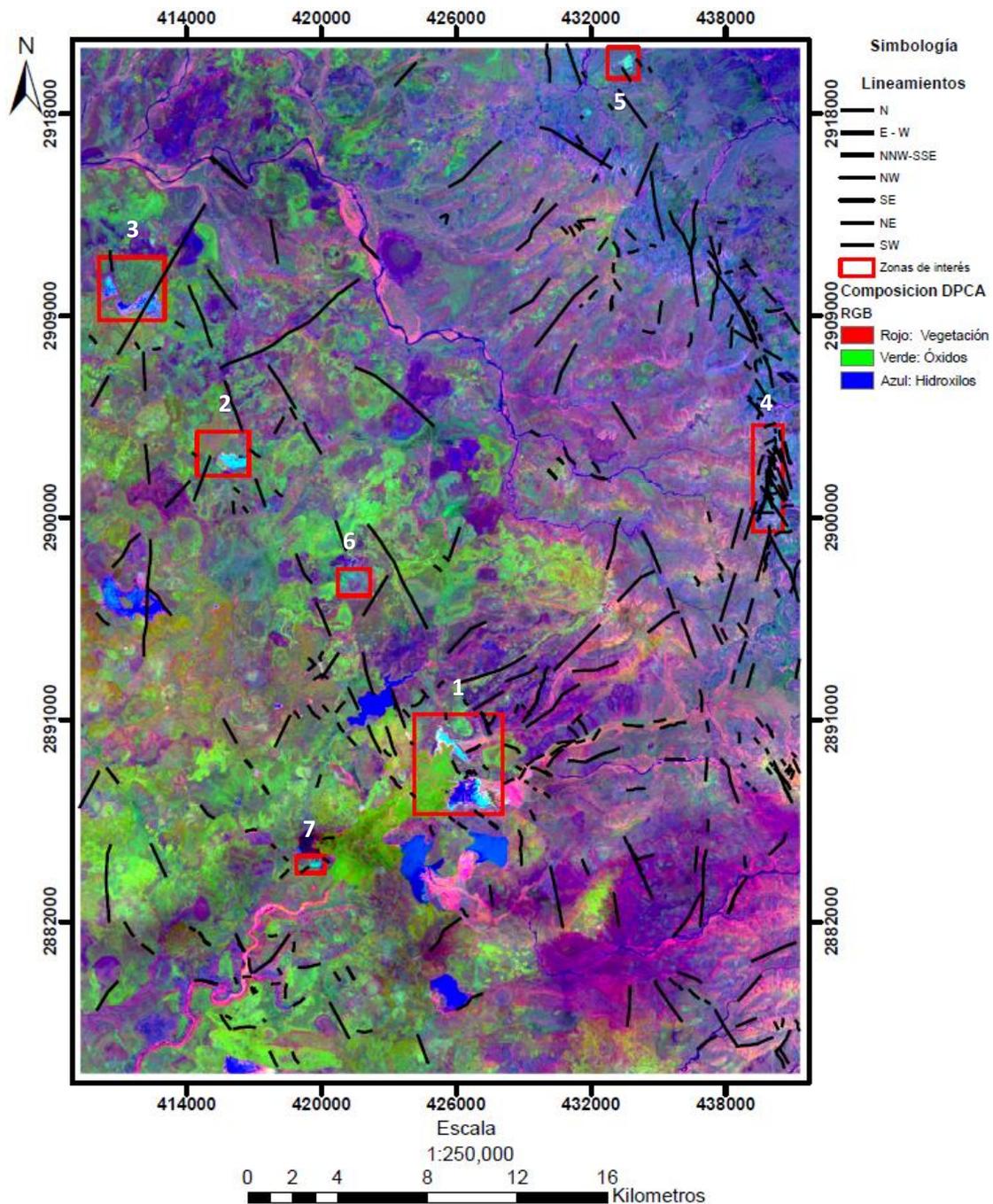
## 6. INTEGRACIÓN DE INFORMACIÓN

### 6.1. MAPAS INTEGRADOS.

A continuación, se presentan los mapas como resultado de integrar la información obtenida del realce espectral y el realce espacial. Para estos mapas se optó por utilizar dos composiciones RGB previamente analizadas a detalle Figura 30 y Figura 31, una vez realizado el análisis de resultados estas imágenes mostraron los mejores resultados en el realce e identificación de alteración hidrotermal presente dentro del área de estudio.

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

La Figura 37 se muestra la composición RGB para vegetación, óxidos e hidroxilos del análisis de componentes principales dirigidos, junto a estos datos se integran los lineamientos denotados por el realce espacial en las direcciones seleccionadas. Los rectángulos rojos resaltan aquellos lineamientos que coinciden o están en cercanía a la presencia de alteración hidrotermal. Se pueden apreciar 7 zonas que contienen alteración y se encuentran en la cercanía de sistemas de fallas o fracturas, estas zonas son enumeradas y acotadas dentro de la imagen.



**Figura 37** Mapa integrado con lineamientos, composición RGB vegetación, óxidos e hidroxilos, y puntos de ubicación (cian) de las zonas con alteración hidrotermal predominante.

En la Figura 38 se muestra un mapa con los lineamientos obtenidos en todas las direcciones generadas durante el realce espacial (líneas en color negro) y la imagen obtenida con la composición en falso color RGB para óxidos, hidroxilos y óxidos más hidroxilos respectivamente. Las áreas de tonos blancos corresponden con presencia importante de óxidos e hidroxilos, al mismo tiempo la presencia de vegetación es reducida al mínimo con el fin de priorizar la alteración.

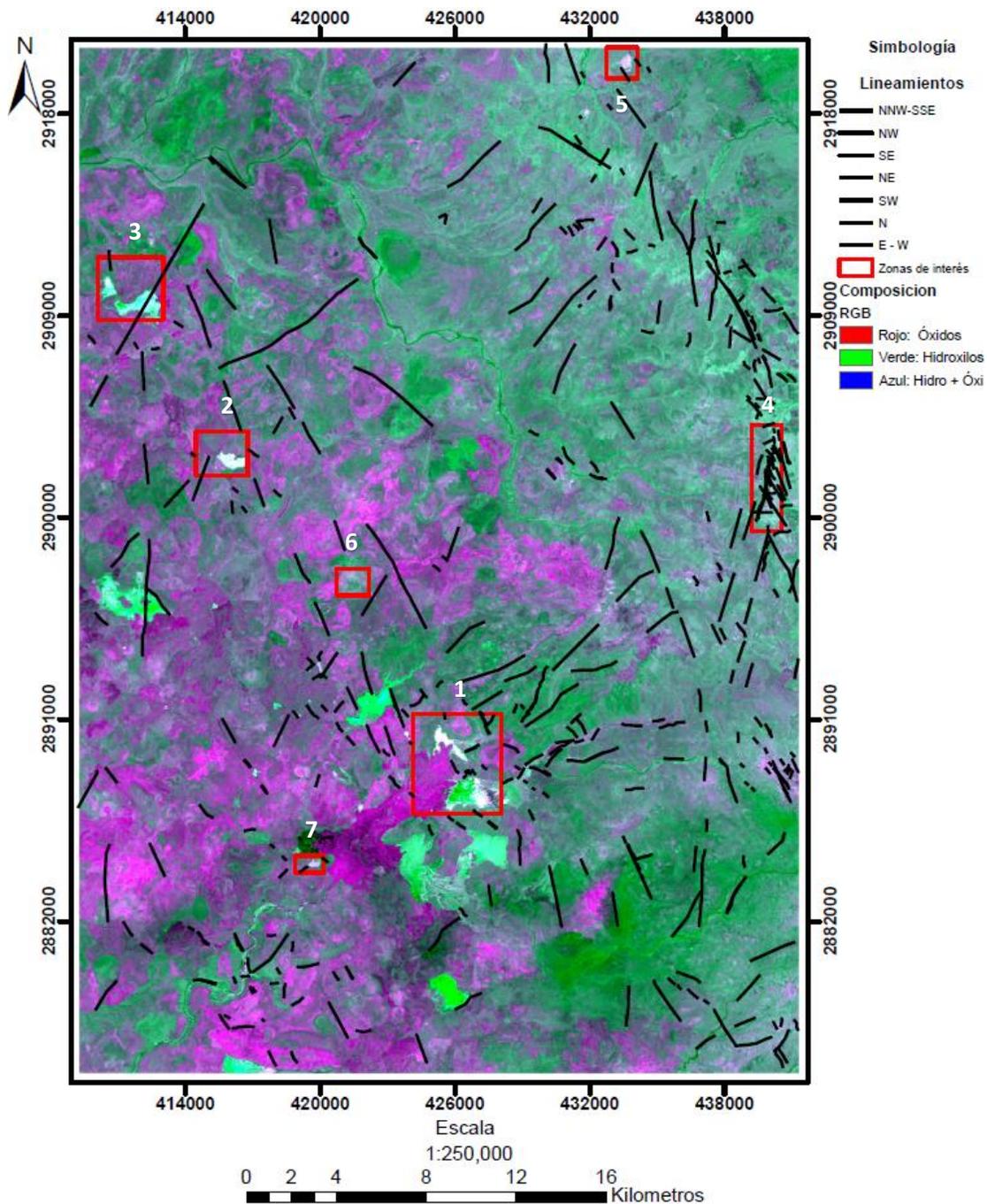


Figura 38 Mapa integrado con lineamientos, composición RGB óxidos, hidroxilos y óxidos + hidroxilos.

## 7. DISCUSIÓN DE RESULTADOS.

Los mapas correspondientes al realce espectral de vegetación, óxidos de hierro e hidroxilos utilizando la técnica de “cocientes de bandas” (Figura 18, Figura 19 y Figura 20), muestran zonas con presencia de pixeles brillantes (tonos blancos) que indican la existencia y extensión del rasgo a resaltar (vegetación, hidroxilos y óxidos) en cada uno de dichos realces. La característica principal de la técnica de cocientes espectrales precisa en

enfatar la respuesta de reflectancia del material objetivo y al mismo tiempo minimizar la respuesta de la reflectancia de otros componentes dentro de la imagen. Dentro de la imagen correspondiente al realce de óxidos Figura 20 se encontraron las zonas con mayor presencia de óxidos ubicadas en la porción central y sur de la imagen, estas coinciden con áreas de poca elevación en la cercanía a fuentes de agua (lagunas y ríos).

Un aspecto importante del análisis de los mapas en las Figura 18 para vegetación y Figura 19 para hidroxilos son las similitudes entre las zonas identificadas positivamente con presencia de vegetación e hidroxilos, las características espectrales semejantes en ambos materiales genera una coincidencia entre los picos de reflectancia dentro de su firma espectral, particularmente en los rangos espectrales del infrarrojo comprendidos en las bandas OLI 4, 5 y 6, es debido a la semejanza entre estos resultados que se procede con la aplicación de diversas técnicas de realce que ofrezcan la posibilidad de discernir entre la vegetación e hidroxilos de un modo más efectivo.

Las imágenes generadas por el realce por sustracción de bandas (Figura 21, Figura 22, y Figura 23), presentan escasos resultados en la identificación del objetivo (vegetación, óxidos e hidroxilos), y se ven limitados nuevamente debido al bajo contraste entre el valor de los pixeles vecinos, esto dificulta la caracterización de cada material. La composición hecha con estas imágenes (Figura 28) presenta resultados positivos en la diferenciación de vegetación (tonos rojos) y óxidos (tonos verdes), pero no logra definir de forma clara el grupo de los hidroxilos (tonos azules). En la identificación conjunta de pixeles que presenten aportación de óxidos e hidroxilos (tonos cian) los resultados fueron escasos y poco claros, dificultando la estimación de zonas de interés.

En la Figura 29 se presenta una composición RGB utilizando los cocientes (vegetación 5/4 tonos rojos, óxidos: 4/2 tonos verdes e Hidroxilos 6/7 tonos azules) obtenidos anteriormente (Figura 18, Figura 19 y Figura 20), la combinación de tonos cian indica la presencia de alteración hidrotermal asociando la existencia de óxidos e hidroxilos en un mismo sitio, con los datos obtenidos es posible indicar 5 zonas principales resaltadas en cuadros rojos, que denotaron presencia de alteración hidrotermal.

El análisis de componentes principales utilizando 6 bandas solo obtuvo resultados para el realce espectral de óxidos Figura 24, las características espectrales de la vegetación enmascararon los resultados, dado lo anterior los resultados no fueron satisfactorios para esta técnica de realce espectral. En este mismo caso se encuentra el análisis por componentes dirigidas usando 4 bandas, una vez retiradas las bandas con poca relación espectral se esperaba obtener una componente que aportara información sobre el grupo de hidroxilos, sin embargo, nuevamente el rasgo de hidroxilos fue enmascarado pese a la disminución de ruido.

El análisis por componentes principales dirigidas utiliza la técnica Fraser (1991), se usaron 2 bandas (cocientes), y los resultados presentaron una gran eficiencia en la identificación de los materiales objetivo: vegetación, óxidos e hidroxilos. Esta técnica ha mostrado resultados en la identificación de óxidos al manejar cocientes en lugar de bandas. Dada las características ya resaltadas espectralmente por los cocientes, al llevar a cabo un análisis de componentes se logra separar la escasa correlación remanente existente entre ambos cocientes, produciendo nuevas componentes totalmente

separadas y atribuidas a un material en particular. Esta técnica tuvo éxito en obtener las nuevas componentes para cada material buscado. La Figura 30 nos presenta la composición RGB utilizando estas nuevas componentes junto con el análisis del significado de los colores obtenidos. En este caso sobresalen 7 zonas con alteración hidrotermal enmarcadas en rojo, la presencia de dichas zonas se concentra en la parte central de la imagen (tonos cian). Los cuadros rojos: 1, 2, 3, 6 y 7 con base en la información geológica (Maraver & Aguilera, 2001) se encuentran sobre roca de origen extrusivo; del cuaternario (brecha basáltica, basalto piroclástico), terciario neógeno (brecha basáltica, basalto). Los cuadros 1 y 6 se ubican entre contactos de roca, a una distancia no mayor de 6 km de sitios con aparatos volcánicos y flujos de lava cartografiados. Las zonas 2 y 3 se localizan a 4 y 5.5 km de aparatos volcánicos, prospectos mineros y flujos volcánicos. Los cuadros 4 y 5 no se encuentran sobre roca ígnea de tipo extrusivo, sin embargo, si a una distancia no mayor a 600 m de este tipo de roca. El resto de la imagen presenta un parecido a la distribución de rocas cartografiadas, los tonos verdes corresponden a óxidos (goethita, hematita y jarosita) presentes en las rocas ígneas extrusivas al este en tonos azules los hidroxilos presentes en rocas de tipo sedimentario y acumulaciones de sedimentos.

En la Figura 31 se observan tres colores principales: 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 más hidroxilos, respectivamente. Los tonos verdes corresponden a los hidroxilos y los tonos rojos a óxidos de hierro. La porción este de la imagen muestra concentraciones considerables de óxidos de hierro, reportadas también en la Figura 29, y la Figura 30, indicando una alta concordancia entre resultados para este material. Los hidroxilos segmentan la imagen y ocupan el lado oeste presentando concentraciones importantes al igual que la Figura 29 y la Figura 30. Las alteraciones hidrotermales dentro de la imagen cuentan con la aportación de todas las bandas, lo que da lugar a píxeles con un color blanco, dichas zonas coinciden con previas imágenes, sin embargo, las zonas 4 y 6 muestran tonos entremezclados con tonos de gris, indicando una menor aportación de alteración, en comparación con las otras áreas.

El mapa de clasificación no supervisada, tiene como fin mostrar de una forma clara la variabilidad de coberturas en el terreno dentro del área de estudio, lo que permite mejorar la interpretación de la información obtenida por los realces espectrales, Figura 32 se realizó esta clasificación utilizando como bandas de entrada las componentes generadas por el análisis de componentes principales dirigidas (Crosta & Moore, 1989). Un beneficio claro es la agrupación de los píxeles con características propias de una alteración hidrotermal, estos fueron separados del resto de píxeles, permitiendo correlacionar esta información con las zonas propuestas, así mismo cada tipo de material buscado fue separado e identificado claramente. Dentro de la imagen las coberturas con mayor proporción fueron: vegetación y óxidos, con una aportación del 90%, las zonas de alteración hidrotermal componen la mínima clase, esta situación era de esperarse dadas las condiciones necesarias para la presencia de alteración. Con el mapa generado se presenta la posibilidad de comparar y evaluar los datos con información geológica, de uso de suelo, etc. Además de esto la integración de información será una parte importante del análisis posterior de los datos recabados.

Los mapas correspondientes al realce espacial Figura 34 y Figura 35 se identificaron los lineamientos en las diferentes direcciones (norte, noroeste, sureste, noroeste, NNW-SSE y este-oeste), ciertos lineamientos obtenidos corresponden cabalmente al sistema de fallas La Giganta (Carta Geológica-Minera de Loreto) con dirección noroeste-sureste. También fue posible identificar otros lineamientos descritos previamente en diversos trabajos, esto da muestra del acierto de la técnica empleada por (Moore & Waltz, 1983).

Se realizaron mapas donde se integró la información de realces espaciales y espectrales (Figura 37 y Figura 38), donde se observa que en la zona suroeste las áreas remarcadas: 1, 2, 3, 6 y 7 poseen lineamientos con dirección NW-SE que son paralelos a la falla La Giganta y en sus alrededores se observan óxidos de hierro e hidroxilos. Cuando se presenta una alteración hidrotermal en muchos de los casos existe un sistema de fallas o fracturamiento involucrado, en la Figura 37 y la Figura 38 se denota la presencia de fracturamiento en las cercanías de aquellos pixeles que contienen indicadores de alteración hidrotermal

Las zonas 2 y 3 no presentan toma de muestras de datos geoquímicos Loreto G12-5 Baja California Sur (Servicio Geológico Mexicano, 1997), sin embargo, se encuentran sobre roca volcánica y en cercanías de fracturas y fallas ya reportadas Maraver Romero et al. (2002), los realces denotaron presencia de alteración hidrotermal. Con la información presente es posible adjudicar a estas zonas blancos potenciales para toma de mediciones geoquímicas, ya que dichas zonas no han sido reportadas anteriormente.

La zona 4 presenta un sistema de fallas y fracturas muy importante en comparación con otras áreas, carece de datos geoquímicos y su alteración hidrotermal obtenida con las técnicas de realce espectral fue baja. La zona 5 se localiza a una distancia menor de 1 Km del sitio donde se tomaron muestras con altas concentraciones de elementos, en dicha zona se encuentran algunas fracturas paralelas a un sistema de falla regional, los datos espectrales arrojaron cierta presencia de alteración hidrotermal, lo cual debería ser verificada en campo. En el caso de la zona 6 existe una alteración hidrotermal mínima, localizada sobre roca de origen volcánico, carece de información estructural y datos geoquímicos que lo conviertan en un blanco primordial.

## **8. CONCLUSIONES.**

Cada uno de los realces espectrales aplicados en este trabajo fue evaluado tomando en consideración sus ventajas y limitaciones, fue así como los resultados individuales colaboraron en la resolución de los objetivos marcados. Aquellos análisis que presentaron limitaciones contribuyeron en el proceso aportando información, y marcando el camino para los procesamientos subsecuentes, generando hipótesis y explicaciones a los datos obtenidos. Las imágenes generadas por el análisis de componentes principales dirigidas Figura 30 y Figura 31 constituyen la culminación de los realces espectrales, indicando aquellas zonas con la mayor aportación de información espectral referente a zonas con alteración hidrotermal. Con estos datos fue posible generar un mapa de clasificación no supervisada que permite definir de una manera más clara cada uno de los materiales identificados en los realces espectrales. El realce espacial aportó información vital sobre los lineamientos presentes en la imagen, se analizaron las direcciones

preferentes en la zona de estudio. Una vez interpretada toda esta información, la integración se dio de manera natural, aportando áreas específicas que indican sistemas de fallas asociados a la posible presencia de alteración hidrotermal, dicha correlación aumenta la certeza de los análisis aplicados. La información disponible hallada en artículos, cartas geológicas, cartas geoquímicas, etc. aportó información fundamental que indica la viabilidad de los datos obtenidos. Ciertas mediciones geoquímicas verifican la presencia de materiales generadores de alteración en la cercanía de las áreas seleccionadas.

En el presente trabajo se identificaron al menos tres zonas (2, 3, y 5) en la Figura 38 que presentan alteraciones hidrotermales que no se habían reportado en trabajos previos, y lineamientos que tampoco se observan en las cartas geológicas utilizadas para éste estudio. Dichas zonas proporcionan blancos de un posible estudio posterior con el fin de identificar y evaluar las zonas alteradas reportadas en el presente trabajo. Como objetivos secundarios se tiene que las zonas (4 y 6) presentan información importante, pero que necesita ser verificada en campo. La zona 1 presenta información (información espectral, datos geológicos, y geoquímicos), que permite definirla como el sitio de mayor interés reportado en el presente trabajo. Existen varios estudios que pueden utilizar la información generada por este trabajo e incorporarla a su información previa a la exploración de estas zonas y consecuentes análisis posteriores. 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.

## 9. BIBLIOGRAFÍA

- Atwater, T. (1970). Implications of plate tectonics for the Cenozoic tectonic evolution of western North America. *Geological Society of America, Bulletin* 81, 3513-3536.
- Avato, P. A., Basarir, N., Beardsmore, G., Gehringer, M., GeothermEx, Harding-Newman, T., . . . Tönnis, M. (2013). *Geothermal exploration best practices : guide to resource data collection, analysis, and presentation for geothermal projects*. World: IFC E&S. Washington D.C. Retrieved from [https://www.geothermal-energy.org/fileadmin/user\\_upload/documents/best\\_practice\\_guide/IFC-IGA\\_Geothermal\\_Exploration\\_Best\\_Practices-March2013.pdf](https://www.geothermal-energy.org/fileadmin/user_upload/documents/best_practice_guide/IFC-IGA_Geothermal_Exploration_Best_Practices-March2013.pdf)
- Bancora, C., & Prol-Ledesma, R. M. (2008). Geothermal Explotation Using Remote Sensing in South of Baja California Sur, México. *GIS in Geology and Earth Sciences*, 180-188.
- Barbier, E. (2002). Geothermal energy technology and current status: an overview *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 6, 3-65.

- Browne, P. (1978). Hydrothermal alteration in active geothermal fields. *Annual Reviews Earth Planet*, 229-260.
- Browne, P. (1984). Lectures on Geothermal Geology and Petrology. *UNU Geothermal Training Programme*.
- Campbell, J. B. (1987). *Introduction to Remote Sensing*. Ney York: The Guilford Press.
- Canet, C., Prol-Ledesma, R., Torres-Alvarado, I. G., Villanueva, R., & Lozano-Santa Cruz, R. (2005). Silica-carbonates stromatolites related to coastal hydrothermal venting in Bahía Concepción, Baja California Sur, México:. *Sedimentary Geology*, 174, 97-113.
- Casarrubias-Unzueta, Z., & Romero-Rios, F. (1997). *Propuesta para la localización de pozos de gradiente en El Centavito, Agua Caliente y Santispac, B.C.S.* Comisión Federal de Electricidad. Gerencia de Proyectos Geotermoeléctricos., Departamento de Exploración, Reporte GG-CBI-019-96., Morelia, Mich., México.
- Congalton, R. G. (1991). A Review of Assessing the Accuracy of Remotely Sensed Data. *REMOTE SENS. ENVIRON*, 37(91), 35-46.
- Crosta, A. P., & Moore, J. M. (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. (pp. 1173-1187.). Calgary, Alberta, Canada, Oct. 2-6: Proceedings of the Seventh Thematic Conference on Remote Sensing for Exploration Geology.
- Dickson, M., & Fanelli, M. (2004). *What is Geothermal energy?*. Pisa, Italia: Istituto di Geoscienze e Georisorse, CNR,.
- Eliezer, B. (2002). *El saber de los sentidos* (Tercera ed.). México: Fondo de Cultura Económica.
- 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. *Geological Survey of America Bulletin*, Vol. 119, 1313-1336.
- Fraser, S. J. (1991). Discrimination and Identification of Ferric Oxides Using Satellite THematic Mapper Data: A Newman Case Stufy. *Remote Sensing*, 12(3), 635-641.
- Gupta, H. K., & Roy, S. (2007). *Geothermal energy : an alternative resource for the 21st century*. Amsterdam: Elsevier.
- Instituto Nacional de Estadística, G. (2015). Cuaderno Estadístico Municipal. La Paz, Baja California Sur. INEGI.
- International, P. (2016, Abril 19). *Professional Aerial Photographers Association (PAPA) International*. Retrieved from History of aerial photography.: [http://professionalaerialphotographers.com/content.aspx?page\\_id=22&club\\_id=808138&module\\_id=158950](http://professionalaerialphotographers.com/content.aspx?page_id=22&club_id=808138&module_id=158950)

- Khorram, S., & Koch, F. (2012). *Remote Sensing*. Ney York, USA: Springer.
- Lillesand, T. M., & Kiefer, R. W. (2000). *Remote Sensing and Image Interpretation*. New Yoork: Wile.
- Lira, J. (2003). *La percepción remota: Nuestros ojos desde el espacio* (Tercera ed.). México: FCE, SEP.
- Loughlin, W. P. (1991). Principal Component Analysis for Alteration Mapping. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, Vol. 57(No. 9), 1163-1169.
- Maraver Romero, D., Aguilera Hale, J., Sevilla, V., & Meléndez, A. (2002). *Carta Geológico-Minera Loreto, Baja California Sur. G12-5*. Servicio Geologico Mexicano.
- Maraver, R. D., & Aguilera, H. J. (2001). *Informe de la carta geológico-minera Loreto G12-5, Escala 1:250000 Estado de Baja California Sur*. Consejo de Recursos Minerales.
- McCloy, K., & Severiens, T. (2009). *Classification algorithms and methods*. Recuperado de <http://www.seos-project.eu/modules/classification/classification-c00-p00.html>.
- Moore, & Waltz. (1983). Objective Procedures for Lineament Enhancement and Extraction. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, Vol. 49(No. 5), 641-647.
- Muffler, L. J. (1976). *Tectonic and hydrologic control of the nature and distribution of geothermal resources. Proceedings of Second U.N. Symposium on the Development and Use of Geothermal Resources* (Vol. 1). Washington, DC: US. Government Printing Office.
- Prol-Ledesma, R. (1988). *El calor de la Tierra*. México: FCE, SEP.
- Rodriguez-Diaz, A. A. (2010). Metallogeny of the Santa Rosa manganese deposit, Baja California Sur, Mexico. *Bol. Soc. Geol. Mex [online]*, Vol. 62, pp. 141-159. Retrieved 05 28, 2017
- Ruiz Armenta, J. R. (1994). *Detección de alteración hidrotermal y realce estructural usando imagenes landsat thematic mapper. Su aplicación en la exploración minera*. UNAM, Facultad de Ingenieria. México: UNAM.
- Ruiz-Armenta, J., & Prol-Ledesma, R. (1995). Tecnicas de procesamiento de imágenes en la exploración de yacimientos minerales de origen hidrotermal. *Fisica de la Tierra*(7), 105-137.
- Sabins. (1996). *Remote Sensing. Principes and Interpretation*. Illinois: Waveland Press.
- Sabins. (1999). Remote sensing for mineral exploration. *Ore Geology Reviews*, 157-183. Retrieved Abril 3, 2016
- Schowengerdt, R. A. (1997). *Remote Sensing: Models and Methods for Image Processing* (Second ed.). Tucson, Arizona, USA: Academic Press.

*Servicio Geológico Mexicano. GeolInfoMex, El Banco de Datos del SGM. (2016, Junio 1). Retrieved from <http://mapasims.sgm.gob.mx/GeolInfoMexDB/>*

Stober, I., & Bucher, K. (2013). *Geothermal energy : from theoretical models to exploration and development*. Berlín: Springer.

Watson, A. (2013). *Geothermal engineering : fundamentals and applications*. New York, NY: Springer.

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