



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

---

---

ESCUELA NACIONAL DE ESTUDIOS SUPERIORES UNIDAD  
MORELIA

IDENTIFICACIÓN DE ZONAS CON ALTERACIÓN  
HIDROTERMAL EN LA ZONA LOS NEGRITOS-IXTLÁN  
DE LOS HERVORES, MICHOACÁN, MÉXICO

T E S I S

PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

LICENCIADA EN GEOCIENCIAS

P R E S E N T A:

VANIA AMARO REDONDA

DIRECTORA DE TESIS:

DRA. ROSA MARÍA PROL LEDESMA

ESCUELA  
NACIONAL  
DE ESTUDIOS  
SUPERIORES  
  
UNIDAD MORELIA

MORELIA, MICHOACÁN  
NOVIEMBRE, 2023



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



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

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

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

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



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

---

---

ESCUELA NACIONAL DE ESTUDIOS SUPERIORES UNIDAD  
MORELIA

IDENTIFICACIÓN DE ZONAS CON ALTERACIÓN  
HIDROTERMAL EN LA ZONA LOS NEGRITOS-IXTLÁN  
DE LOS HERVORES, MICHOACÁN, MÉXICO

T E S I S

PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

LICENCIADA EN GEOCIENCIAS

P R E S E N T A:

VANIA AMARO REDONDA

DIRECTORA DE TESIS:

DRA. ROSA MARÍA PROL LEDESMA

MORELIA, MICHOACÁN  
NOVIEMBRE, 2023

ESCUELA  
NACIONAL  
DE ESTUDIOS  
SUPERIORES  
  
UNIDAD MORELIA



ESCUELA  
NACIONAL  
DE ESTUDIOS  
SUPERIORES  
UNIDAD MORELIA

10  
años  
(2011-2021)

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO  
ESCUELA NACIONAL DE ESTUDIOS SUPERIORES UNIDAD MORELIA  
SECRETARÍA GENERAL  
SERVICIOS ESCOLARES

**MTRA. IVONNE RAMÍREZ WENCE**

DIRECTORA

DIRECCIÓN GENERAL DE ADMINISTRACIÓN ESCOLAR

**PRESENTE**

Por medio de la presente me permito informar a usted que en la **sesión ordinaria 07** del **Comité Académico de la Licenciatura en Geociencias** de la Escuela Nacional de Estudios Superiores (ENES), Unidad Morelia, celebrada el día **24 de agosto de 2023**, se acordó poner a su consideración el siguiente jurado para la presentación del Trabajo Profesional de la alumna **Vania Amaro Redonda** de la Licenciatura en **Geociencias**, con número de cuenta **418129078**, con el trabajo titulado: **"Identificación de zonas con alteración hidrotermal en la zona Los Negritos-Ixtlán de los Hervores, Michoacán, México"**, bajo la dirección como tutora de la **Dra. Rosa María Prol Ledesma**.

El jurado queda integrado de la siguiente manera:

<b>Presidente:</b>	Mtro. José Antonio Navarrete Pacheco
<b>Vocal:</b>	Dr. Antonio Pola Villaseñor
<b>Secretario:</b>	Dra. Rosa María Prol Ledesma
<b>Suplente:</b>	Mtro. Guillermo Cisneros Máximo
<b>Suplente:</b>	Mtro. Rodolfo Ruiz López

Sin otro particular, quedo de usted.

Atentamente  
"POR MI RAZA HABLARÁ EL ESPÍRITU"  
Morelia, Michoacán a 30 de octubre de 2023.

**DRA. YUNUEN TAPIA TORRES**  
**SECRETARIA GENERAL**

---

**CAMPUS MORELIA**

Antigua Carretera a Pátzcuaro N° 8701, Col. Ex Hacienda de San José de la Huerta  
58190, Morelia, Michoacán, México. Tel: (443)689.3500 y (55)5623.7300, Extensión Red UNAM: 80614  
[www.enesmorelia.unam.mx](http://www.enesmorelia.unam.mx)

## Agradecimientos

Expreso mi profundo agradecimiento a aquellos que han sido pilares en mi desarrollo académico y personal, y que han desempeñado un papel vital en la creación de esta tesis:

A la **Dra. Rosa María Prol Ledesma** por el inmenso honor que significó para mí que aceptara ser mi tutora de tesis, es una científica a la que admiro profundamente. Su generosidad al compartir su tiempo, su disposición constante, su apoyo y su empatía durante todo este proceso han sido invaluableles.

A mis **sinodales** por su colaboración en la mejora de mi tesis. El tiempo que se tomaron para todas las aportaciones y su revisión detallada fueron parte esencial en este proceso. Estoy muy agradecida porque hayan sido parte de este importante logro académico.

Al **Mtro. José Antonio Navarrete Pacheco** por sus consejos, amabilidad y su disposición para responder mis preguntas, escucharme y brindarme orientación.

Al **Dr. Antonio Pola Villaseñor**, por su sinceridad y disposición para brindarme su ayuda. Sus valiosas sugerencias me permitieron abordar los desafíos de mi investigación de manera más efectiva.

Al **Mtro. Guillermo Cisneros Máximo**, por su amabilidad y empatía, así como por compartir sus conocimientos conmigo. Su habilidad para conectar con mis ideas y su disposición para escuchar mis inquietudes me inspiraron a profundizar en mi trabajo y explorar nuevas perspectivas.

Al **Mtro. Rodolfo Ruiz López**, agradezco su dedicación y pasión en la enseñanza, lo cual hizo que desarrollara un gran interés por la percepción remota. Me siento muy afortunada de haber tenido la oportunidad de ser su estudiante. Gracias por inspirarme, orientarme y creer en mí.

A la **ENES Morelia**, mi querida casa de estudios, le agradezco con profundo cariño su papel fundamental en mi desarrollo académico y personal. En el corazón de sus aulas, entre sus profesores y las inolvidables prácticas de campo, encontré no solo conocimiento, sino también experiencias que transformaron mi vida de una manera que nunca podré olvidar.

A **Geolatinas**, porque se convirtió en mi red de apoyo durante la pandemia. En un momento de incertidumbre, encontré en esta comunidad un lugar donde pude crecer y desarrollarme. El apoyo, la solidaridad y la oportunidad de colaborar con personas increíbles ha sido importante para mí.

## Dedicatorias

Esta tesis se la dedico a:

**Mi mamá**, por estar siempre a mi lado en cada etapa de mi vida brindándome amor. Eres mi inspiración como mujer, madre y amiga; eres una persona excepcional. Te amo y siempre llevaré conmigo la huella imborrable de tu influencia y amor en mi vida. Siempre estaré agradecida. Este logro es tuyo.

A mi querida **hermana**, mi compañera de vida, por tu apoyo incondicional. Gracias a ti, encuentro la fuerza necesaria para enfrentar cualquier obstáculo. Tenerte a mi lado desde el primer instante que compartimos este mundo ha sido el regalo más hermoso de mi vida; no puedo imaginar mi existencia sin ti, me considero afortunada. Te amo.

A mi perrita **Misty Day**, por transformar por completo mi vida. Me llenas de alegría, cada día que compartimos es una nueva aventura. Gracias por llegar cuando más te necesitaba.

A toda mi **familia**, por su constante apoyo y sabios consejos.

A mis **amigos**, a pesar de la distancia, ustedes ocupan un lugar importante en mi vida. Han llenado mi corazón de amor. Les agradezco por incluirme en sus vidas y en sus familias. Estoy emocionado por lo que el futuro nos depara, y con ansias de que sigamos descubriendo el mundo juntos.

Esta tesis está dedicada a todos ustedes; son mi fuente de motivación y lo más valioso que poseo. Gracias por estar siempre a mi lado y por hacer que cada día de mi vida sea especial.

**"Just be a rock"**

(Everything Everywhere All At Once, 2022)

## Resumen

Los Negritos e Ixtlán de los Hervores son dos prospectos geotérmicos ubicados al noroeste del estado de Michoacán, estos prospectos actualmente cuentan con poca información científica generada a través de técnicas de percepción remota. En el presente trabajo se utilizó percepción remota para generar nueva información sobre alteraciones hidrotermales e identificar grupos de minerales (óxidos e hidroxilos) asociados a estas, además de identificar lineamientos estructurales, y relacionarlos con el yacimiento geotérmico. También se estimó la temperatura superficial del suelo en ambas zonas, proporcionando datos valiosos para la caracterización y evaluación de su potencial geotérmico.

Los estudios se realizaron mediante una imagen satelital del sensor ASTER a la cual, se le aplicó un preprocesamiento y procesamiento. El preprocesamiento consistió en recortar la zona de estudio, realizar un análisis estadístico, una corrección radiométrica, un apilamiento de las capas, cambiar el formato de la escena de BSQ a BIL y una corrección atmosférica. El procesamiento consistió en aplicar la técnica de cociente de bandas, análisis de componentes principales, mapeo de ángulo espectral, un realce espacial y un realce de contraste. Además, se llevó a cabo la estimación de la temperatura superficial del suelo.

Los resultados de estos procesos se representaron en mapas detallados que muestran la ubicación de las alteraciones hidrotermales y la temperatura superficial del suelo en la zona de Los Negritos e Ixtlán de los Hervores. También se identificaron lineamientos estructurales y se estableció su relación con el yacimiento geotérmico.

***PALABRAS CLAVE:*** alteraciones hidrotermales, percepción remota, ASTER, prospectos geotérmicos, Los Negritos, Ixtlán de los Hervores, Michoacán

## Abstract

Los Negritos and Ixtlán de los Hervores are two geothermal prospects located in the northwest of the state of Michoacán, México. Which currently have limited geoscientific information available generated through remote sensing. This study utilized remote sensing data to generate new information on the location of hydrothermal alterations, identify mineral groups (oxides and hydroxyls), and characterize the geothermal reservoir. Additionally, surface soil temperature was estimated in both areas, providing valuable data for the characterization and evaluation of their geothermal potential.

This was accomplished using a satellite image from the ASTER sensor, which underwent pre-processing and processing. The pre-processing involved cropping the study area, performing statistical analysis, radiometric correction, layer stacking, converting the scene format from BSQ to Bill, and atmospheric correction. The processing stage involved applying the band ratio technique, principal component analysis, spectral angle mapping, spatial enhancement and contrast enhancement.

The results were depicted on maps detailing the location of hydrothermal alterations and surface soil temperature in the Los Negritos and Ixtlán de los Hervores area. Additionally, structural lineaments were identified and their connection with the geothermal reservoir was established. Furthermore, to ascertain the reliability of the outcomes, comparisons were conducted with previous studies in detecting hydrothermal alterations.

**KEY WORDS:** hydrothermal alterations, remote sensing, ASTER, geothermal prospects, Los Negritos, Ixtlán de los Hervores, Michoacán

## ÍNDICE

<b>MARCO INICIAL</b> .....	<b>11</b>
INTRODUCCIÓN .....	11
JUSTIFICACIÓN .....	11
OBJETIVOS .....	12
<b>MARCO TEÓRICO</b> .....	<b>13</b>
PERCEPCIÓN REMOTA .....	13
GEOTERMIA .....	32
<b>ESTADO DEL ARTE</b> .....	<b>46</b>
ZONA DE ESTUDIO .....	46
Localización .....	46
Marco Tectónico y Geológico .....	48
Manifestaciones Superficiales y Depósitos Relacionados .....	52
Geoquímica .....	53
Temperaturas .....	53
Hidrología .....	55
Geofísica .....	57
Tipo De Suelo y Vegetación .....	58
Usos de la Geotermia en la Zona de Estudio .....	61
Potenciales Preliminares .....	61
<b>METODOLOGÍA</b> .....	<b>61</b>
<b>MATERIALES</b> .....	<b>61</b>
<b>PREPROCESAMIENTO</b> .....	<b>63</b>
Recopilación de Información Bibliográfica .....	64
Adquisición y características de la Imagen .....	64
Análisis Estadístico Inicial .....	66
Delimitación y Recorte de la Zona de Estudio .....	66
Corrección Radiométrica .....	66
Apilamiento de Capas .....	66
Cambio de Formato de la Información de BSQ a BILL .....	66
Corrección Atmosférica FLAASH .....	67
Reescalamiento .....	67
<b>PROCESAMIENTO</b> .....	<b>68</b>
<b>REALCE ESPECTRAL</b> .....	<b>68</b>
Cocientes de Bandas .....	68
Análisis de Componentes Principales .....	69
Mapeo de Ángulo Espectral / Spectral Angle Mapper (SAM) .....	70
<b>REALCE ESPACIAL</b> .....	<b>71</b>

Digitalización de Lineamientos .....	73
<b>REALCE DE CONTRASTE.....</b>	<b>73</b>
<b>TEMPERATURA SUPERFICIAL DEL SUELO.....</b>	<b>73</b>
Temperatura de Brillo .....	73
NDVI .....	75
Proporción de la Vegetación (Pv).....	75
Emisividad de la superficie terrestre .....	76
Temperatura Superficial del Suelo .....	76
<b>RESULTADOS.....</b>	<b>76</b>
<b>PREPROCESAMIENTO.....</b>	<b>76</b>
<b>PROCESAMIENTO .....</b>	<b>80</b>
<b>REALCE ESPECTRAL.....</b>	<b>81</b>
<b>REALCE ESPACIAL .....</b>	<b>98</b>
<b>TEMPERATURA SUPERFICIAL DEL SUELO.....</b>	<b>101</b>
<b>CORRELACIÓN DE LA INFORMACIÓN (REALCE ESPECTRAL, ESPACIAL , DE CONTRASTE Y LST).....</b>	<b>101</b>
<b>DIFUSIÓN .....</b>	<b>105</b>
GEOLATINAS .....	105
PROTECCIÓN CIVIL .....	105
<b>DISCUSIONES.....</b>	<b>110</b>
<b>CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....</b>	<b>112</b>
<b>REFERENCIAS.....</b>	<b>115</b>

## **Marco inicial**

### **Introducción**

La energía geotérmica se presenta como una de las fuentes de energía renovable más prometedoras en México, debido a la abundancia de recursos geotérmicos en el país. Sin embargo, para aprovechar este potencial, es necesario contar con información detallada sobre las características de los yacimientos geotérmicos. En este contexto, la percepción remota se ha convertido en una herramienta clave para la exploración y caracterización de estos yacimientos, permitiendo la identificación de alteraciones hidrotermales y lineamientos estructurales, que son indicadores importantes para la ubicación de zonas de alta permeabilidad y temperatura.

Existen muchos trabajos publicados respecto al realce espectral de patrones de alteración hidrotermal, entre los que destacan por su importancia: el trabajo de Crosta y colaboradores (2003) en el que mediante el análisis de componentes principales de una imagen ASTER, se pudieron localizar alteraciones hidrotermales asociadas a depósitos epitermales en la Patagonia; y el estudio realizado por Fernández de la Vega y Prol-Ledesma (2001) en el que se aplicaron cocientes de bandas, composiciones a color, composiciones a color de cocientes de bandas, análisis estadístico multivariado y aplicación de filtros direccionales con la finalidad de localizar rocas alteradas por la circulación de fluidos hidrotermales en el Campo Geotérmico La Primavera, Jalisco. Además de estos, sobresale el método propuesto por Fraser (1990) para diferenciar la respuesta espectral de los óxidos y los hidroxilos mediante la aplicación selectiva del análisis de componentes principales, llamado componentes principales dirigidas (PCA). Además de estos métodos de realce espectral de patrones de alteración hidrotermal es importante destacar la importancia de la estimación de la temperatura superficial del suelo. Esto se ha demostrado en investigaciones previas, como la realizada por Jiménez Muñoz y Sobrino (2010), donde se recuperó la temperatura superficial del suelo a partir de datos ASTER.

En cuanto al realce espacial de lineamientos, se ha utilizado una técnica ampliamente reconocida en cartografía y visualización de datos geoespaciales para representar sombreados en un modelo digital de elevación (MDE) con el fin de simular la iluminación de un paisaje tridimensional. Esta técnica, es útil para resaltar y extraer los lineamientos de la superficie terrestre. Facilitando resaltar los lineamientos estructurales por las que se puede dar el ascenso de fluidos hidrotermales.

### **Justificación**

Debido a las circunstancias ocasionadas por la pandemia del COVID-19, se enfrentaron desafíos que requirieron una adaptación ágil. En este contexto, se decidió aprovechar la oportunidad para trabajar con las mejores herramientas, técnicas e información disponibles en el ámbito de la

percepción remota para la exploración geotérmica. Esta adaptación permitió seguir generando ciencia de manera remota, a pesar de las restricciones impuestas por la pandemia.

El uso de percepción remota permite trabajar a distancia, sin estar en contacto físico con la zona de estudio; esto posibilita reducir costos, tiempo y materiales, haciendo factible llevar a cabo esta investigación.

Esta investigación es necesaria porque la zona de estudio es de interés geotérmico, se ha reportado la presencia de manifestaciones superficiales y se sitúa en un terreno tectono-volcánico activo, sin embargo, no se dispone de suficiente información generada a través de técnicas de percepción remota sobre esta área.

Esta tesis generará información con percepción remota sobre la localización y tipo de alteraciones hidrotermales, también ayudará a caracterizar las zonas de descarga del yacimiento geotérmico y servirá como base para la construcción del modelo conceptual del sistema geotérmico. Además, a partir de esta investigación se podrá ampliar la información para continuar hacia la etapa avanzada de exploración, lo que traerá beneficios a futuro para la comunidad de esa zona. Al disponer de más información, estas áreas podrán convertirse en zonas geotérmicas económicamente rentables, lo que, a su vez, impulsaría el desarrollo económico de la región y contribuiría a mejorar la calidad de vida a través de la creación de oportunidades de empleo. La información generada estará disponible al público, con el objetivo de informar a diferentes sectores de la población.

## **Objetivos**

### **Objetivo Principal**

Identificar mediante una imagen ASTER zonas con alteración hidrotermal y lineamientos estructurales que estén asociados a actividad hidrotermal en la zona "Los Negritos-Ixtlán de los Hervores" Michoacán, México.

### **Objetivos Específicos**

- Identificar grupos de minerales (óxidos e hidroxilos) asociados a alteraciones hidrotermales mediante realce espectral.
- Identificar lineamientos estructurales mediante realce espacial.
- Estimar la temperatura superficial terrestre del suelo.
- Generar información mediante percepción remota y demostrar que es una disciplina que puede proveer de información a distancia, reduciendo costos y tiempo.
- Analizar y correlacionar la información generada y la bibliográfica, para proponer áreas favorables para contener un alto potencial geotérmico.

- Proporcionar la información a la comunidad científica para que se utilizada con fines de investigación.
- Proporcionar la información geotérmica a Protección Civil con el fin de prevenir desastres geotérmicos.
- Difundir los resultados a través de un GeoSeminario en línea de acceso público, en colaboración con la Asociación GeoLatinas, para informar y asegurar que la información llegue a una amplia audiencia, con un enfoque particular en los residentes de las localidades de la zona de estudio.

## **Marco Teórico**

### **Percepción remota**

#### **Definición**

La percepción remota es la ciencia que recopila información a distancia mediante sensores capaces de captar energía electromagnética emitida por el Sol que es reflejada por la superficie terrestre. Esta radiación es almacenada por los sensores y transmitida a una estación terrestre receptora, donde un usuario se encarga de analizarla, interpretarla y procesarla para obtener productos de información. La diferencia en el uso de los términos "teledetección" y "percepción remota" puede variar según la región, como menciona SELPER (2013) el término "percepción remota" es más utilizado en Latinoamérica, en Iberoamérica se emplea con mayor frecuencia el término "teledetección". En este trabajo, se ha optado por utilizar el término "percepción remota". Para obtener una comprensión clara del concepto, a continuación, se presentan algunas definiciones proporcionadas por diversos autores e instituciones a lo largo de la historia:

- Lira, J. (1987): "remote sensing" se definió como la ciencia de obtener información acerca de un objeto, utilizando luz visible o invisible, por medio del análisis automatizado de datos obtenidos a distancia por un sensor remoto.
- Lintz y Simonett (1976): definieron "remote sensing" como la adquisición de datos físicos de un objeto sin tocarlo ni entrar en contacto con él.
- Campbell y Wynne (2011): afirmaron que "remote sensing" es la práctica de obtener información sobre las superficie terrestres y acuáticas utilizando imágenes adquiridas desde una perspectiva aérea, utilizando radiación electromagnética en una o más regiones del espectro electromagnético, reflejada o emitida desde la superficie de la Tierra.
- Lillesand et al. (2015): definieron "remote sensing" como la ciencia y el arte de obtener información sobre un objeto, área o fenómeno a través del análisis de datos adquiridos por un dispositivo que no está en contacto con el objeto, área o fenómeno bajo investigación.

- Chuvieco (2016): describió "remote sensing" como la adquisición de información sobre el estado y la condición de un objeto a través de sensores que no lo tocan.
- USGS (United States Geological Survey) (s.f): definió la percepción remota como el proceso de detectar y monitorear las características físicas de un área midiendo su radiación reflejada y emitida a distancia (generalmente desde satélites o aeronaves).
- ESA (European Space Agency) (s.f): definió "teledetección" como un modo de obtener información acerca de objetos tomando y analizando datos sin que los instrumentos empleados para adquirir los datos estén en contacto directo con el objeto.

### Procesos y Elementos de la Percepción remota

La percepción remota requiere de tres elementos esenciales: en primer lugar, una plataforma que actúe como medio de transporte para el sensor y lo mantenga a cierta distancia de la superficie terrestre, como un dron, avión, satélite, entre otros (Figura 1); en segundo lugar, el sensor, que es el instrumento encargado de recopilar la información, como una cámara, videocámara o sensor satelital, y, en tercer lugar, el objeto u objetivo que se desea observar. Esto puede incluir una amplia gama de características y fenómenos, como recursos naturales, medio ambiente, geología, clima, cartografía, gestión de desastres, planificación urbana y seguridad. La elección del objeto de estudio es fundamental para determinar cómo se llevará a cabo el proceso de percepción remota y qué tipo de datos se recopilarán.

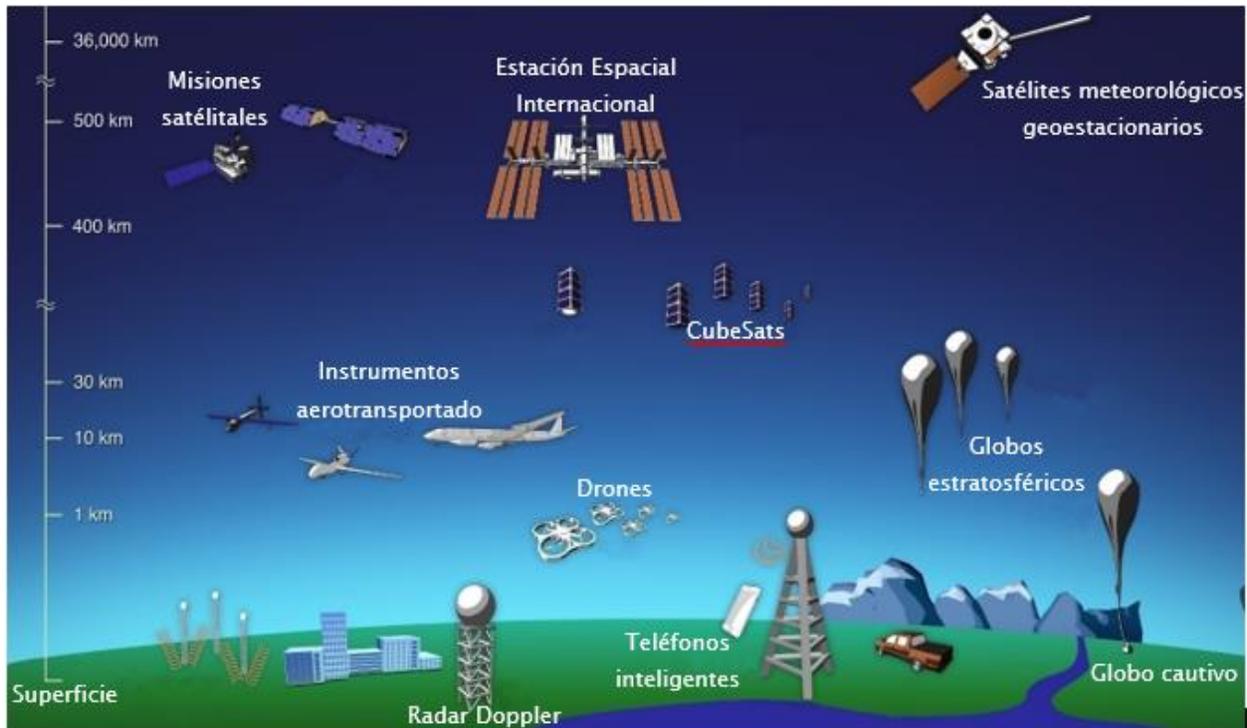


Figura 1. Principales medios de transporte de percepción remota y sus alturas (NASA SVS, 2017).

De acuerdo con Lillesand et al.,(2015), los procesos básicos de la percepción remota se dividen en dos etapas: 1) adquisición de datos y 2) análisis de datos; a continuación, se describen cada uno de ellos y sus elementos, los cuales se pueden observar en la Figura 2.

### *1. Adquisición De Datos*

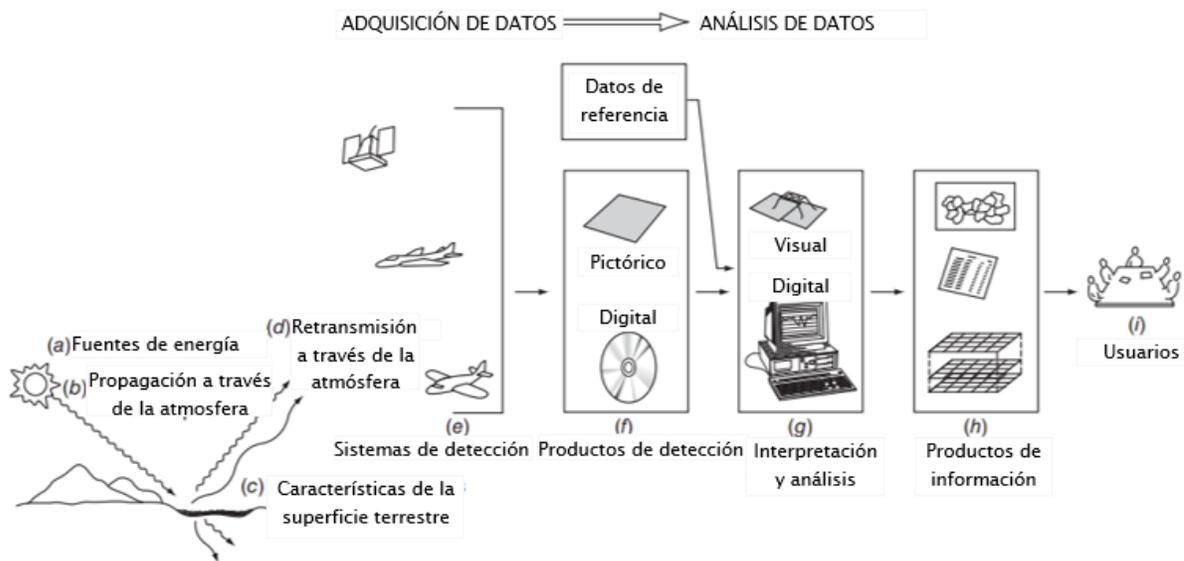
- a) Fuentes de energía: la energía puede provenir de fuentes externas naturales, como el Sol, que emite radiación electromagnética, este tipo de energía es utilizada por los sensores denominados pasivos, ya que no la emiten. Por otro lado, la segunda fuente de energía es interna y es emitida por el propio sensor. Esta puede ser controlada y es utilizada por sensores llamados activos.
- b) La propagación de energía a través de la atmósfera: se producen varios fenómenos físicos cuando un haz de luz incidente atraviesa la atmósfera. La energía electromagnética incidente puede ser absorbida, transmitida y dispersada.
- c) Las interacciones de la energía con las características de la superficie terrestre: Chuvieco (2016) expresa que la cubierta terrestre está compuesta por vegetación, suelos, agua, rocas, nieve, hielo y estructuras humanas. Estas superficies reciben la energía incidente de la fuente de energía y, como resultado de la interacción física y química con la energía entrante, reflejan y emiten una parte de esa energía hacia el sensor del satélite.
- d) Retransmisión de energía a través de la atmósfera: la energía que es emitida hacia el sensor satelital a través de la atmósfera, por lo que el haz de luz vuelve a pasar por fenómenos físicos que cambian su comportamiento.
- e) Sistemas de detección: son los instrumentos que se encargan de capturar la información a distancia, pueden ser sensores fotográficos, aerotransportados, satelitales, etc.
- f) Productos de detección: el sensor receptor terrestre se encarga de recopilar y procesar la información emitida por los sistemas de detección, para entregarla en forma digital y en algunos casos con formato de imágenes.

### *2. Análisis de datos*

- g) Interpretación y análisis: de acuerdo con Serra et al. (2002) interpretar una fotografía es examinar las imágenes fotográficas de los objetos con el propósito de identificar esos objetos, definir su categoría, su naturaleza, sus límites y sus relaciones con el medio, lo cual se ha denominado fotointerpretación. Lillesand et al. (2015) explican que el proceso de análisis de datos implica examinar los datos usando varios dispositivos de visualización e interpretación para analizar datos pictóricos y/o una computadora para analizar datos de sensores digitales. Se utilizan datos de referencia sobre los recursos que se están estudiando (como mapas de suelos, estadísticas de cultivos o datos de

verificación de campo) para ayudar en el análisis de datos. Con la ayuda de los datos de referencia, el analista extrae información sobre el tipo, la extensión, la ubicación y el estado de los diversos recursos sobre los que se recopilaron los datos del sensor.

- h)* Productos de información: la información se compila, generalmente en forma de mapas, tablas o datos espaciales digitales que se pueden fusionar con otras capas de información en un sistema de información geográfica (SIG) (Lillesand, 2015).
- i)* Usuarios: la información se presenta a los usuarios, quienes la aplican a su proceso de toma de decisiones (Lillesand, *op. cit.*).



**Figura 2.** Esquema del proceso y elementos involucrados en la percepción remota, imagen modificada de Lillesand et al. (2015).

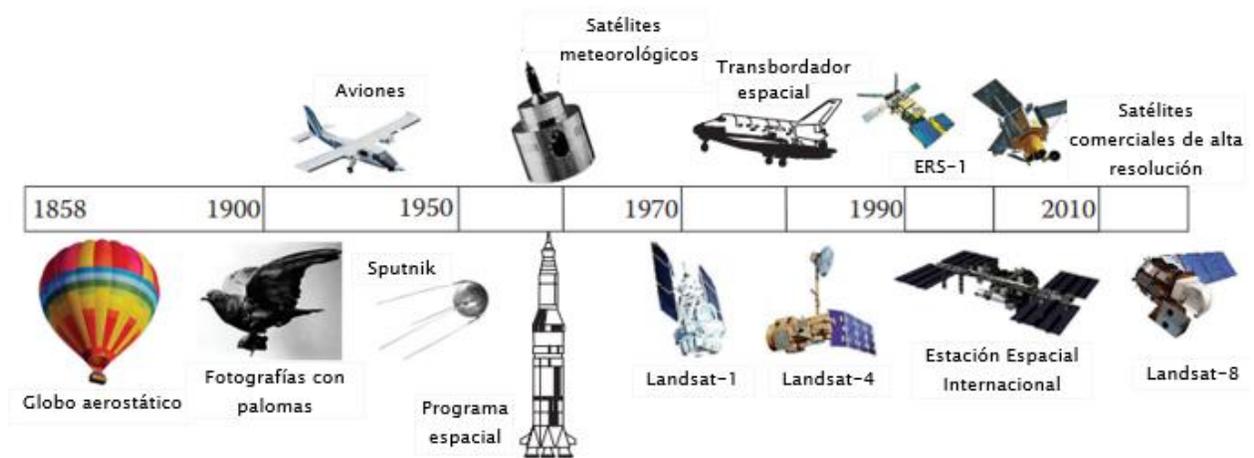
### Historia y Evolución de la Percepción remota

La percepción remota surgió desde tiempos remotos debido a la necesidad de obtener información más allá de lo que el ser humano es capaz de captar. Dado que la limitada estatura y visión ocular del ser humano no le permitían obtener un panorama amplio de lo que ocurría en la superficie terrestre, se comenzó a desarrollar instrumentación capaz de visualizar la Tierra desde alturas mayores de manera eficaz y rápida. Como primera instancia se desarrolló la fotografía. En 1858 se tomó la primera fotografía a la superficie terrestre desde un globo aerostático, posteriormente en 1900 continuó desarrollándose mediante la utilización de palomas como medio para la toma de fotografías, las cuales fueron reemplazadas por aviones nueve años después. (Campbell y Wynne, 2011; Chuvieco, 2016).

La percepción remota cobró un papel muy importante en diferentes eventos históricos. Entre el comienzo de la primera guerra mundial (1914) y hasta la Guerra Fría (1947), la fotografía

aérea y fotogrametría comenzó a desarrollarse como parte de la investigación militar. Durante la Primera Guerra Mundial, se buscó mejorar los instrumentos para la obtención de información con fines militares, como el reconocimiento y vigilancia militar. Dos años después, se comenzaron a utilizar otras aplicaciones como mapeo topográfico, cartográfico, levantamientos de suelos, geología, entre otros. Otro evento histórico donde la percepción remota tuvo un papel importante, especialmente para el gobierno, fue la depresión económica donde se comenzó a monitorear el desarrollo económico rural. Enseguida surgió la segunda guerra mundial, se realizaron aplicaciones más allá del espectro visible; y diez años después comenzó la carrera espacial entre Estados Unidos y la Unión soviética en la que desarrollaron satélites y plataformas para obtener información del espacio exterior. La carrera espacial trajo como consecuencia el desarrollo de imágenes en formato digital y software para análisis digital. (Campbell y Wynne, *op.cit.*; Chuvieco, *op.cit.*).

Durante el año 2000 se interrelacionó la percepción remota, con los SIG, y los Sistemas de navegación satelital o Global Navigation Satellite System (GNSS). Actualmente se han creado y mejorado más plataformas, sensores, y sistemas de información. Se conocen mejor las bases físicas, las metodologías y los procesamientos son más precisos. Además, la mayoría de la información se puede conseguir de manera digital, lo que permite que sea más accesible y rápida de obtener. Para el año 2005 se lanzó Google Earth siendo este un avance que tiene un alcance social amplio. La Figura 3 resume algunos de los eventos históricos que han contribuido al desarrollo de la percepción remota.



**Figura 3.** Desarrollo histórico de los sistemas de percepción remota, imagen modificada de Chuvieco (2016).

## Usos y Aplicaciones de la Percepción remota

A pesar de que la percepción remota surgió y se utilizó inicialmente para fines militares, pasó poco tiempo para que se comenzara a utilizar para aplicaciones civiles, trayendo consigo múltiples beneficios. La percepción remota es una valiosa herramienta para diversas disciplinas, ya que ha ayudado a describir, monitorear, y mapear recursos y zonas de la superficie terrestre; como huracanes, tsunamis, inundaciones, lineamientos estructurales, alteraciones hidrotermales, coladas de lava, incendios forestales, derrames de petróleo, entre otros. Asimismo, es una herramienta ideal para recabar información en áreas de difícil acceso, como regiones polares, montañosas, desérticas, y forestales. La percepción remota ha sido de gran importancia, ya que ha tenido un impacto significativo en el mundo, y ha ampliado el conocimiento sobre la Tierra.

Para el caso de México, las aplicaciones de la percepción remota son en el estudio y observación de la Tierra, esto a través del Instituto Nacional de Estadística, y Geografía (INEGI), la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO), Comisión Nacional Forestal (CONAFOR), Secretaría de Medio Ambiente Recursos Naturales (SEMARNAT) o desde los satélites vinculados a la National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA), etc. Igualmente, las instituciones universitarias y centros de investigación son quienes con mayor frecuencia realizan estudios de percepción remota (Collado et al, 2015).

El uso de la percepción remota en la geotermia ha traído múltiples beneficios, especialmente en la etapa de exploración. Ha ayudado a identificar y caracterizar sistemas geotérmicos de manera precisa y remota, sin necesidad de desplazarse a la zona de estudio, esto ha permitido reducir los costos de inversión en la exploración.

Existen diversas aplicaciones de percepción remota en la geotermia. Estas pueden llevarse a cabo a través de diferentes plataformas, como satélites, aviones y drones, utilizando sensores que capturan información en varias longitudes de onda del espectro electromagnético, como visible, infrarrojo cercano, infrarrojo térmico, entre otros. Además, se utilizan diversas técnicas de preprocesamiento y procesamiento de la información, dependiendo del tipo de información geotérmica que se desea obtener. A continuación, se enumeran algunas de las aplicaciones de la percepción remota en la geotermia, junto con el rango espectral en el que es posible visualizarlas de manera general, ya que cada zona de estudio puede requerir un rango espectral y sensor específico, así como procesamientos definidos:

1. Localización de manifestaciones geotérmicas superficiales: se puede utilizar el infrarrojo térmico para la detección de anomalías de temperatura indicativas de manifestaciones geotérmicas superficiales.

2. Determinación de la alineación de las manifestaciones superficiales: una vez localizadas las manifestaciones superficiales se puede determinar la dirección o alineación de las manifestaciones geotérmicas.

3. Identificación de alteraciones geotérmicas superficiales: se puede utilizar la información de firmas espectrales en el rango visible e infrarrojo cercano.

4. Identificación de lineamientos estructurales: como fallas y fracturas que suelen estar correlacionados con la actividad geotérmica y la circulación de fluidos en el subsuelo, ya que las estructuras son importantes para el transporte de fluidos.

5. Identificación de cambios en la vegetación: se puede utilizar el visible e infrarrojo cercano, para identificar la salud de la vegetación.

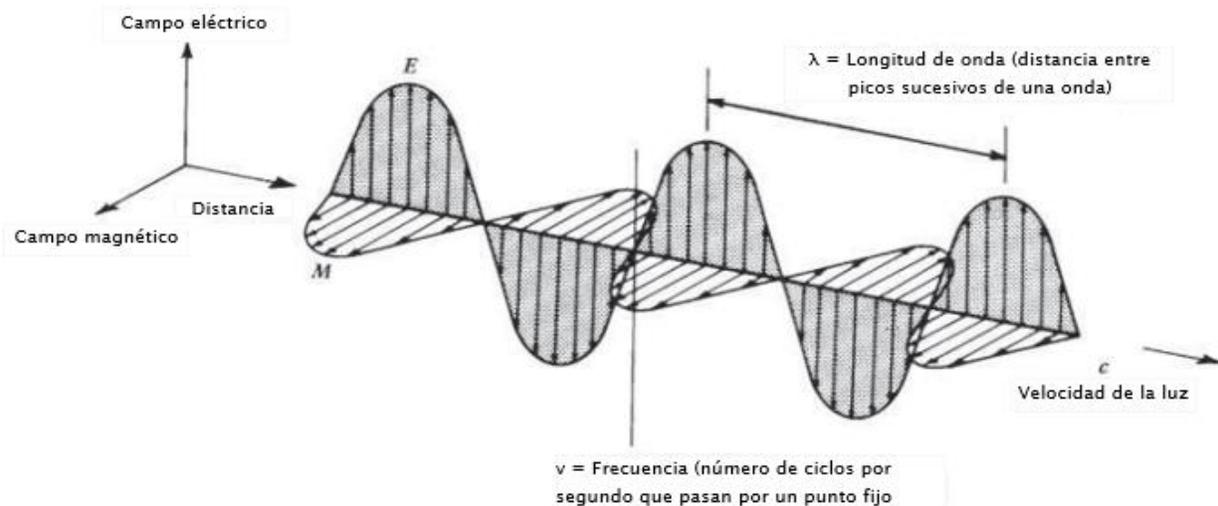
6. Estimación de la temperatura superficial: el infrarrojo térmico es capaz de detectar anomalías de temperatura en la superficie terrestre.

### Energía Electromagnética

La energía electromagnética está compuesta por variaciones ondulatorias en un campo eléctrico y uno magnético acoplados, que viajan perpendicular entre sí, a la velocidad de la luz (Figura 4), esa energía se genera por cambios en los niveles de energía de los electrones, la aceleración de las cargas eléctricas, el decaimiento de las sustancias radiactivas y el movimiento térmico de los átomos y las moléculas (Campbell y Wynne, 2011).

Las propiedades de las ondas electromagnéticas son:

- Longitud de onda: es la distancia de una cresta a otra cresta de onda.
- Frecuencia: es la longitud de tiempo en una unidad de tiempo
- Amplitud: es su altura a partir del eje.



**Figura 4.** Representación de una onda electromagnética y sus propiedades. Imagen modificada de Lillesand et al. (2015).

## Espectro Electromagnético

El espectro electromagnético es la manera de organización de las ondas electromagnéticas de acuerdo a su longitud de onda, se dividen en varias regiones que van desde los rayos Gamma que son longitudes de onda corta hasta longitudes de onda larga como las telecomunicaciones (Figura 5), las unidades en las que se expresan son variables, desde gigahertz hasta kilómetros (Tabla 1), sin embargo la unidad más común y utilizada en percepción remota es el micrómetro  $\mu\text{m}$ , un micrómetro equivale a  $1 \times 10^{-6}$  m.

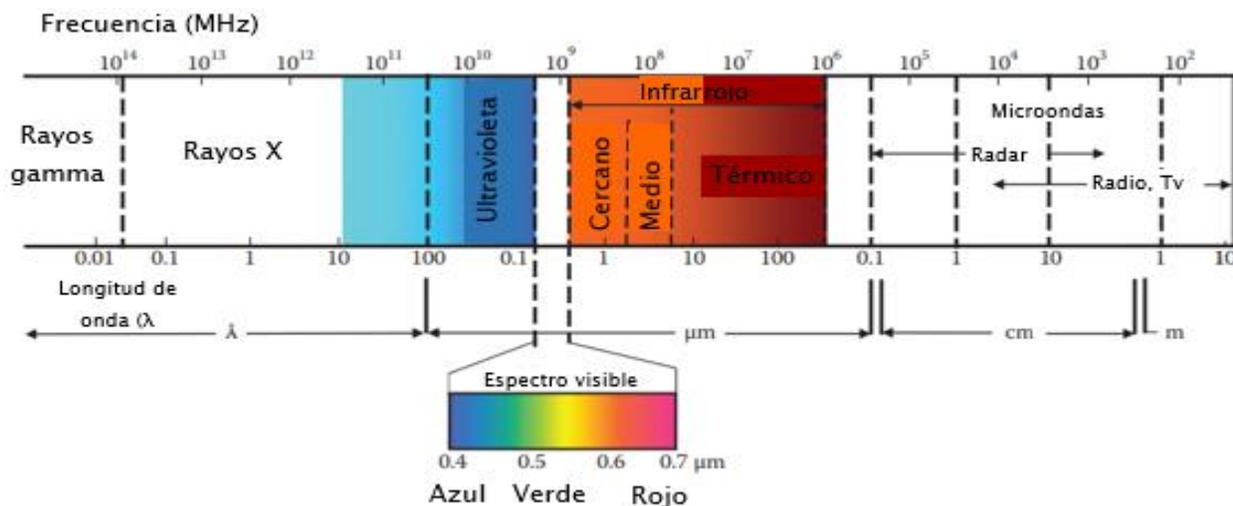


Figura 5. Principales regiones del espectro electromagnético. Imagen modificada de Chuvieco (2016).

Tabla 1. Unidades de longitud de las ondas electromagnéticas utilizadas en la percepción remota (Campbell y Wynne, 2011).

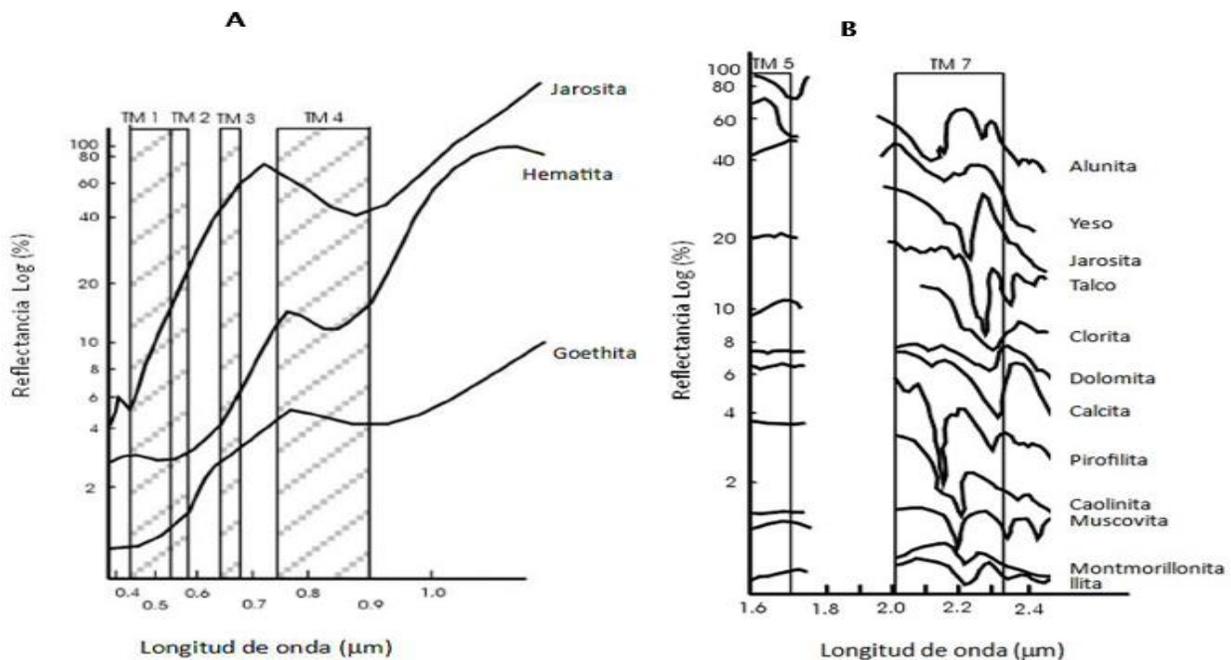
Unidad	Distancia	
Kilometro (km)	1,000 m	
Metro (m)	1.0 m	
Centímetro (cm)	0.01 m	= $10^{-2}$ m
Milímetro (mm)	0.001 m	= $10^{-3}$ m
Micrómetro ( $\mu\text{m}$ )	0.000001 m	= $10^{-6}$ m
Nanómetro (nm)		= $10^{-9}$ m
Ångstrom (Å)		= $10^{-10}$ m
Hertz (Hz)	1	
Kilohertz (kHz)	$10^3$	1, 000
Megahertz (MHz)	$10^6$	1,000,000
Gigahertz (GHz)	$10^9$	1,000,000,000

## Firmas Espectrales

Una firma o signature espectral muestra la radiación electromagnética reflejada o emitida por un material específico. Esta radiación es característica, ya que cada material tiene un

comportamiento y reflectancia singular, lo que hace que todas las firmas espectrales sean distintas. De acuerdo con la investigación de Hunt y Ashley (1979), se pueden identificar tres grupos principales de minerales que son característicos de la alteración hidrotermal: los hidroxilos (arcillas y micas), minerales de hierro (hematita, goethita y jarosita) y los sulfatos hidratados (yeso y alunita). Además, Hunt y Ashley señalaron que los minerales de hierro presentan espectros en las longitudes de onda de 0,43, 0,65, 0,85 y 0,93  $\mu\text{m}$  (Figura 6). Además, las longitudes de onda menores a 1.2  $\mu\text{m}$  se deben a varias transiciones electrónicas que involucran al hierro; mientras que los hidroxilos muestran espectros en 1,4, 1,75, 1,9, 2,2 y 2,35  $\mu\text{m}$ .

La espectroscopia infrarroja es la técnica que se utiliza para estudiar las vibraciones moleculares de los materiales. Se basa en la detección y medición de la absorción de radiación electromagnética en la región del infrarrojo. En el caso de los grupos mineralógicos, como los óxidos e hidroxilos, es posible realizar espectroscopia infrarroja debido a la estructura de los minerales y a los modos de vibración que presentan. Cuando se expone un mineral a un haz de luz infrarroja, las moléculas del mineral comienzan a vibrar, y cada tipo de vibración produce un espectro característico en respuesta. Las características espectrales que ocurren en las rocas alteradas se derivan de procesos tanto electrónicos como vibracionales, principalmente relacionados con el hierro o el grupo hidroxilo (Hunt y Ashley, 1979).



**Figura 6.** Firmas espectrales de óxidos (A) y (B); firmas espectrales de algunos minerales arcillosos, filosilicatos, carbonatos, sulfatos, las bandas TM5 y TM7 corresponden al sensor TM de Landsat. En el eje horizontal se representa la longitud de onda, y en el eje vertical se muestra el porcentaje de reflectancia en una escala logarítmica. Modificado de Hunt y Ashley, (1979).

## Teorías para Explicar la Naturaleza de la Luz

- **Isaac Newton** (1643–1727) Teoría corpuscular.

Postuló que la luz era un flujo de partículas minúsculas sin masa a las que denominaba corpúsculos, que viajan en línea recta a gran velocidad, y se podían desplazar a través de cuerpos transparentes, pero no en cuerpos oscuros.

- **Christiaan Huygens** (1629–1695) Teoría ondulatoria.

Postuló que la luz se podía explicar cómo onda, y se propagaba a través de un material llamado éter. Notó que la velocidad de un haz de luz disminuía al penetrar agua, por lo que describió la refracción.

- **James Maxwell** (1831–1879) Modelo ondulatorio de radiación electromagnética.

Descubrió que la energía electromagnética tenía un campo magnético y uno eléctrico que se propagan perpendicularmente entre sí, a la velocidad de la luz, sin necesidad de éter.

## Leyes de la Radiación

- **Max Karl Ernst Ludwig Planck** (1858–1947) Teoría de las partículas.

Postuló que la energía electromagnética puede ser absorbida y emitida en unidades discretas llamadas fotones o cuantos. Definió una constante ( $h$ ) para relacionar la frecuencia ( $\nu$ ) con la energía radiante ( $Q$ ). La energía es inversamente proporcional a la longitud de onda ( $\lambda$ ), mayor longitud de onda menor energía, menor longitud de onda mayor energía.

$$\text{Formula: } Q = h\nu \quad Q = hc/\lambda$$

### Donde:

$Q$  = energía de un cuanto, en Joules (J)

$h$  = constante de Planck, es  $6.626 \times 10^{-34}$  Jseg

$\nu$  = frecuencia (1/seg)

$\lambda$  = longitud de onda (nm)

- **Ley de Stefan Boltzmann**

La ley describe que la radiación total emitida por un cuerpo es proporcional a la cuarta potencia de su temperatura.

$$\text{Formula: } W = \sigma T^4$$

Donde:

W= radiación total emitida

s=5.6697\*10<sup>-8</sup>

T: temperatura

- Ley de desplazamiento de Wien (1893)

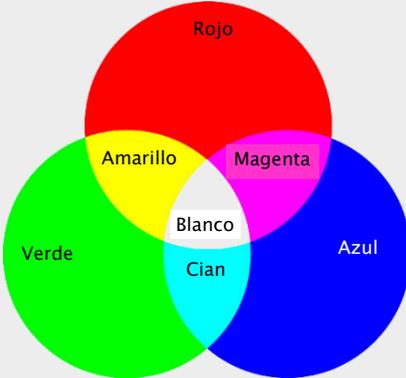
Wilhelm Wien (1864–1928) propuso que existía una relación entre la longitud de onda y la temperatura de un cuerpo.

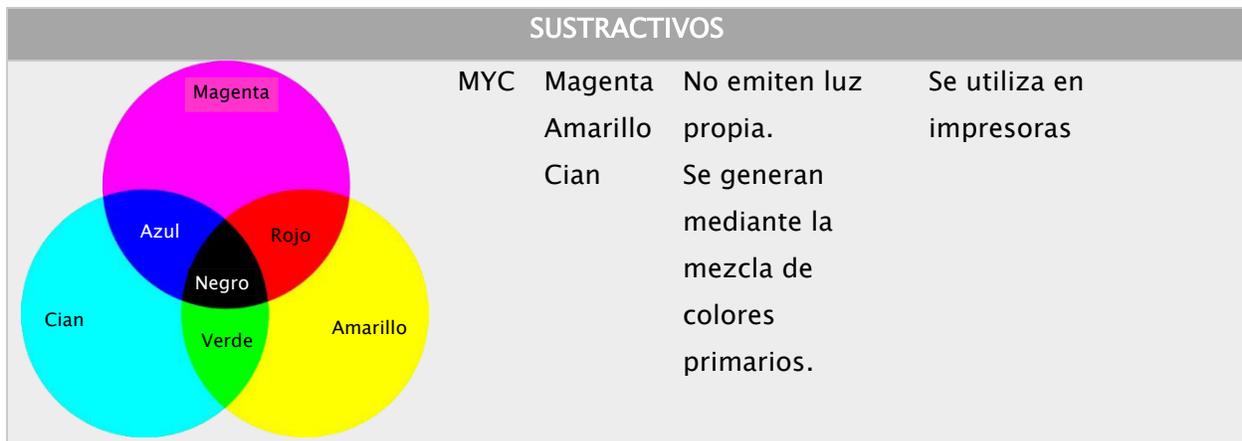
$$\text{Formula: } \lambda = 2.8978 * 10^{-3} / T$$

### Colores

El ojo humano percibe ondas electromagnéticas en el rango de 0.4 a 0.7 μm que corresponde a la región del espectro visible. Estas longitudes de onda son las responsables de lo que los seres humanos perciben como colores. Los colores primarios aditivos, son rojo, verde y azul o RGB (Red, Green, Blue) por sus siglas en inglés, y la combinación de estos colores aditivos dan como resultado a los colores sustractivos que son magenta, amarillo y cian o MYC (Magenta, Yellow, Cyan). En la Tabla 2 se muestran algunas de las características de los colores aditivos y sustractivos.

Tabla 2. Características de los colores aditivos y sustractivos

ADITIVOS				
	RGB	Rojo Verde Azul	Reflejan luz. No pueden generarse.  Al ser combinados pueden generarse la gama de colores existentes.	Se utilizan en dispositivos electrónicos como: monitores de computadora, pantallas de dispositivos móviles, etc.



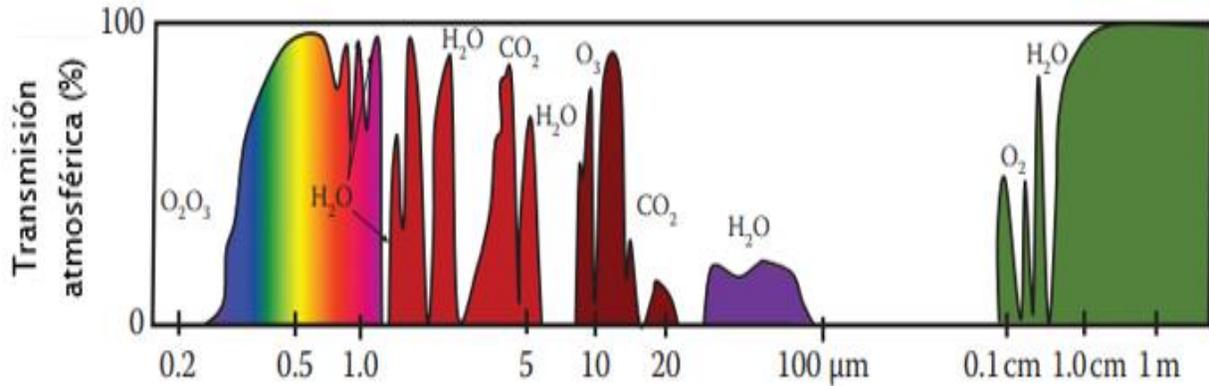
### Interacción de la Energía Electromagnética con la Atmósfera

La atmósfera desempeña un papel crucial en la interacción con la energía electromagnética al absorber, transmitir y dispersar dicha energía. Dado que la energía incidente atraviesa la atmósfera terrestre, resulta de suma importancia comprender en detalle el comportamiento de la atmósfera y los diversos fenómenos y procesos físicos que ocurren en ella en relación con el haz incidente.

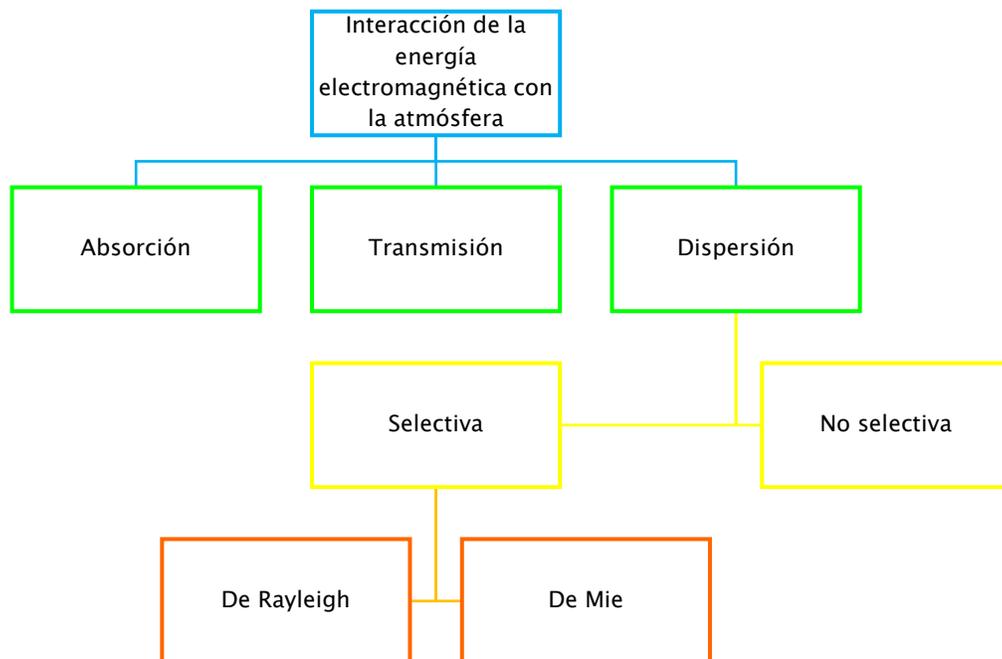
La atmósfera terrestre, como lo expresa el Servicio Meteorológico Nacional (2019), es la envoltura gaseosa que rodea tanto a la parte sólida como la líquida de la Tierra, forma una parte integral del planeta ya que de ella depende la vida y se extiende a una altura de varios cientos de kilómetros; su espesor es muy pequeño comparado con el tamaño del planeta, está formada por una mezcla de gases cuya composición varía con la altitud: gases permanentes, como el nitrógeno (78%) y el oxígeno (21%), así como, gases nobles y dióxido de carbono (1%). El aire también contiene en distinto porcentaje vapor de agua y polvo atmosférico (humo, arenas finas, polen, esporas, microorganismos, etc.) llamados componentes variables. La atmósfera se puede dividir de forma diferente en diversas capas según se consideren sus propiedades físicas o químicas. De acuerdo con sus propiedades químicas se divide en homosfera y heterosfera dependiendo de la composición de gases. Mientras que una clasificación en función de la distribución de temperatura está dividida en troposfera, estratosfera, mesosfera y termosfera.

Los fenómenos físicos provocados por la interacción de la energía electromagnética con la atmósfera son la absorción, transmisión y dispersión. En la absorción, los gases de la atmósfera se encargan de absorber las longitudes de onda; en las zonas donde no hay una cantidad considerable de absorción y hay transmitancia se denominan ventanas atmosféricas (Figura 7). En la transmisión la radiación electromagnética es redirigida. Y la dispersión es la redirección de la energía electromagnética por partículas suspendidas en la atmósfera o por grandes moléculas de gases atmosféricos (Campbell y Wynne, 2011). La dispersión depende del tamaño y abundancia de las partículas, longitud de onda de la radiación, y profundidad de la atmósfera a

través de la cual viaja el haz de luz. Existen dos tipos de dispersión: la selectiva y la no selectiva, la dispersión selectiva se denomina así por que no dispersa todas las longitudes de onda, en la dispersión de Rayleigh ocurre cuando la  $\lambda$  (longitud de onda) es menor que la de los objetos dispersores, cuanto más corta sea la  $\lambda$  existe mayor dispersión y la de Mie ocurre cuando la  $\lambda$  es igual o similar a las partículas en la atmósfera. Por otro lado a esta dispersión no selectiva se le denomina así por que dispersa todas las  $\lambda$ . En la Figura 8 se muestra de manera concreta esta interacción de la energía electromagnética con la atmósfera.



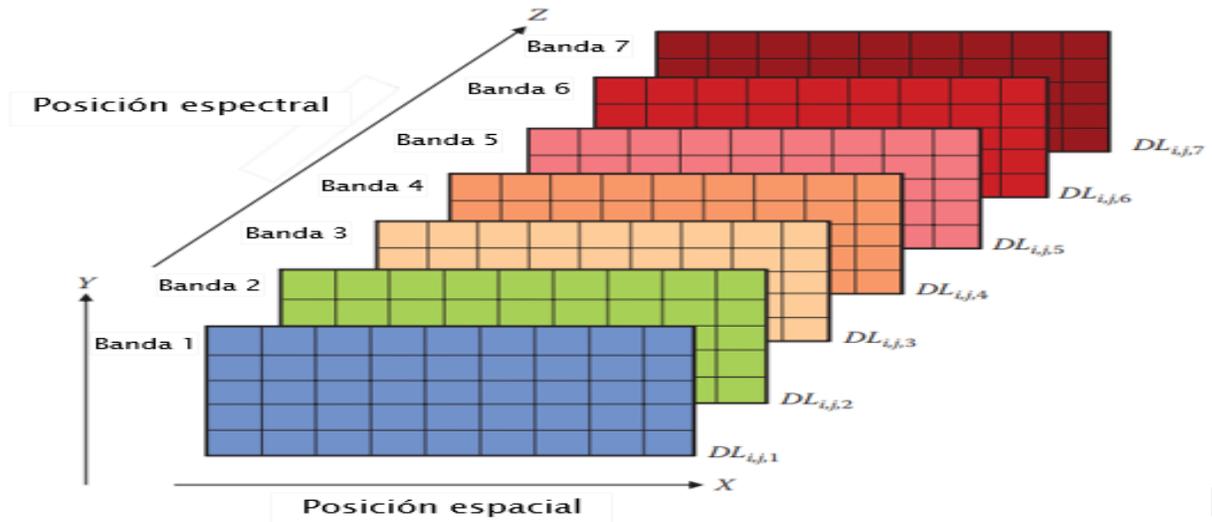
**Figura 7.** Ventanas atmosféricas y los principales gases responsables de la absorción. Imagen modificada de Chuvieco (2016).



**Figura 8.** Diagrama de las principales interacciones que se llevan a cabo entre la energía electromagnética y la atmósfera.

## Imágenes Digitales

La imagen digital (Figura 9) es una traducción numérica de las radiaciones originales recibidas por el sensor, formando una matriz de números en 2D. La radiación recibida en el sensor se convierte en un valor numérico discreto para cada una de las bandas espectrales a las que es sensible el sensor. El área observada instantáneamente se denomina píxel, una contracción de la denominación elemento de imagen en inglés (picture element), que es la unidad mínima de información en una imagen digital (Chuvienco, 2016).



**Figura 9.** Estructura y organización de los datos numéricos dentro de una imagen digital (Chuvienco, 2016).

Los datos que se registran en un sensor y se envían a plataformas en Tierra, pasan por un procesamiento para entregar la información al analista en cierto formato, generalmente es entregada en DN (Digital Number) (Lillesand y Kiefer, 2000) , o valores de píxel (Hord,1986; Mather,1998), valores de brillo (Jensen, 1996), niveles de gris (Schowengerdt, 2007) o conteos digitales (Richards, 1993); son valores binarios en una escala de grises expresada por un número, ese número depende de la resolución radiométrica del sensor.

Los valores de brillo se pueden transformar a radiancia (calibración radiométrica). La radiancia es la energía que proviene de un área en una dirección determinada delimitada por el ángulo sólido, este ángulo sólido se define como la relación entre el área en la superficie de una esfera y el cuadrado de su radio (Chapman y Gasparovic, 2022). También es posible transformar los valores de brillo a reflectancia que indica la cantidad de energía que es reflejada respecto a la energía incidente. Las conversiones para realizar estas transformaciones se detallan en la Tabla 3 y dependen del producto de información que se desee obtener.

**Tabla 3. Tipos de información digital y conversiones asociadas: números digitales, radiancia y reflectancia.**

Tipo	Definición	Unidades	Conversión
<b>Números digitales</b>	Escala de grises expresada por un número.	Bits	ND a radiancia $L = \left[ \left( \frac{L_{máx} - L_{min}}{255} \right) \right] * DN + L_{min}$ L= radiancia L <sub>máx</sub> = radiancia de saturación de la banda L <sub>min</sub> = radiancia mínima detectable de la banda.
<b>Radiancia</b>	Energía que sale en un área y dirección determinada delimitada por el ángulo sólido.	Wm <sup>-2</sup> Sr <sup>-1</sup>	Radiancia a ND $DN = G \times L + B$ G= ganancia de la banda L= radiancia B= ordenada al origen de la función.
<b>Reflectancia</b>	Cantidad de energía que es reflejada respecto a la energía incidente.	Adimensional	-

### Estructuras de la Información: BIL, BIP y BSQ

Existen diferentes estructuras de organización de la información digital (Tabla 4), que se entregan a los analistas; sin embargo, estas estructuras pueden ser modificadas mediante diferentes programas según el objetivo. La primera estructura a describir es BIL (*Band Interleaved by Line*) que significa banda intercalada por línea, donde una línea es una unidad, y, cada línea se presenta en cada banda; el segundo formato es BIP (*Band Interleaved by Pixel*) que significa banda intercalada por pixel, en la que el primer pixel pertenece a la primer banda, el segundo pixel pertenecerá a la segunda banda, y así sucesivamente, hasta completar una línea y las necesarias para completar la escena, de acuerdo con Campbell y Wynne (2011), esta disposición es ventajosa para muchos análisis en los que el vector de valor de brillo (o número digital) se consulta o se usa para calcular otra cantidad. Sin embargo, es un formato difícil de manejar para la visualización de imágenes; por último, BSQ (*Band Sequential*) que significa banda secuencial en la que los datos se estructuran de manera secuencial, siendo el primer dato correspondiente a la primera banda, el segundo a la segunda banda y así sucesivamente, Campbell y Wynne (*op. cit.*), detalla que este

formato es el más práctico, ya que presenta los datos en el formato que más se parece a la estructura de datos utilizada para la visualización y el análisis.

**Tabla 4.** Características de las estructuras de organización de la información: BIL, BIP y BSQ.  
Figuras tomadas de Campbell y Wynne (2011).

FORMATOS	DEFINICIÓN	EJEMPLO		
<b>BIL</b>	Banda intercalada por línea			
<b>BIP</b>	Banda intercalada por píxel			
<b>BSQ</b>	Banda secuencial			

### Resoluciones (Espacial, Espectral, Radiométrica, Temporal)

De acuerdo con Jensen (2005) una resolución es la característica de medición de la superficie de la tierra en cuatro dimensiones: espacio, tiempo, longitud de onda y radiancia; sus variaciones pueden ser: espaciales, espectrales, radiométricas y temporales; todas generadas de acuerdo con las capacidades del satélite.

Existen diversos sensores que proporcionan información con características específicas, ya que cada sensor tiene una resolución espectral, espacial, temporal y radiométrica, las cuales es importante conocer para poder determinar que instrumento de detección remota se desea utilizar según el objetivo de investigación. A continuación, se describen las cuatro resoluciones:

1. Resolución Espectral: se refiere al número y ancho de bandas espectrales registradas por un sensor.

2. Resolución Espacial: se refiere a la finura de detalles visibles en una imagen, depende del tamaño del píxel puede estar en mm, cm, m, o km.

3. Resolución Temporal: es una medida de la frecuencia con la que un satélite es capaz de obtener imágenes de una determinada área. La resolución temporal alta es menor a las 24 horas hasta tres días, la resolución media va de los cuatro a los 16 días y la resolución baja es a partir de los 16 días.

4. Resolución Radiométrica: determina el número de niveles digitales utilizados para expresar los datos recogidos, niveles de brillantez o escala de grises que el sistema de detectores puede medir.

### Satélites y Sensores

Un satélite o plataforma es un instrumento que proporciona los principales servicios para el funcionamiento de los sensores, como el control de altitud y órbita, el suministro de energía y las comunicaciones con el sistema de recepción terrestre. Por otro lado, un sensor se encarga de registrar y medir la información electromagnética proveniente de la superficie terrestre (Chuvienco, 2016). Para poder recopilar datos mediante percepción remota se requiere una fuente de energía que interactúe con la superficie terrestre y que retransmita esa energía a un sensor, los sensores se pueden dividir en dos tipos según la fuente de energía (Tabla 5) los primeros son los sensores pasivos los cuales obtienen energía por fuentes externas y los segundos son los sensores activos que emiten su propia energía.

**Tabla 5.** Características de los tipos de sensores de acuerdo con la fuente de energía (pasivos y activos).

Tipo de sensor	Características	Ventajas	Desventajas	Ejemplos
<b>Sensores pasivos</b>	La fuente de energía proviene de fuentes externas naturales como el Sol.	Tienen una fuente natural, no se necesita inducir. Disponibilidad de mayor cantidad de datos históricos.	La fuente de energía no puede ser controlada. Dependen de las condiciones climáticas. No pueden penetrar nubes.	Radiómetro de barrido Espectro radiómetro Cámara fotográfica Radiómetro de microondas pasivo
<b>Sensores activos</b>	La fuente de energía emitida por el propio sensor.	La fuente de energía puede ser controlada. No dependen de las condiciones climáticas.	Complejidad en el procesamiento de datos. Mayor consumo de energía.	RADAR (Radio Detection and Ranging) LIDAR (Light Detection and Ranging)

Tienen diversidad de fuentes de energía. Pueden penetrar nubes. Adquieren imágenes de día y de noche.	SONAR (Sound Navigation and Ranging) Magnetómetro
---	--

### Sensor ASTER

Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER) es un sensor a bordo de la plataforma Terra (Figura 10), un satélite que fue lanzado el 18 de diciembre de 1999 y es propiedad del Earth Observing System (EOS) de la NASA (National Aeronautics and Space Administration) y del Ministry of Economy Trade and Industry (METI) de Japón. Terra es un satélite sincrónico con el Sol que se encuentra a 705 km de altitud, y tiene un ancho de barrido de 60 km. ASTER contiene tres subsistemas el primero es Visible and Near Infrared (VNIR) que tiene resolución espacial de 15 m, resolución espectral de 0.52 a 0.86  $\mu\text{m}$  distribuidos en tres bandas, el segundo subsistema es Short Wave Infrared (SWIR) cuenta con una resolución espacial de 30 m, una resolución espectral de 1.60 a 2.43  $\mu\text{m}$  distribuidos en seis bandas, y el tercero y último subsistema es Thermal Infrared (TIR) tiene una resolución espacial de 90 m y una resolución espectral de 8.12 a 11.65  $\mu\text{m}$  distribuidos en cinco bandas (Tabla 6).

Desde el año 2000 se han utilizado datos del sensor ASTER para identificación mineralógica y litológica (Ninomiya, 2002). Este sensor proporciona valiosa información utilizada en diversas investigaciones científicas, de acuerdo con el portal de la NASA, los datos de ASTER se utilizan para crear mapas detallados de temperatura, reflectancia y elevación de la superficie terrestre; otras aplicaciones en la ciencia son: climatología de la superficie terrestre, dinámica de la vegetación y ecosistemas, monitoreo de volcanes, monitoreo de peligros, hidrología, geología y suelos, cambios en la superficie, cobertura terrestre, entre otros.

El producto ASTERL1T, conocido como Registered Radiance at the Sensor - Precision Terrain Corrected, es un producto de datos satelitales que ha sido corregido tanto en su geometría como en su radiometría. Esto significa que las imágenes ASTER han pasado por un proceso que corrige las distorsiones geométricas y ajusta las radiaciones medidas en el sensor, lo que garantiza una mayor precisión en la localización y los valores de los datos obtenidos.

El 12 de enero de 2009 ASTER emitió un aviso en el que informó que los detectores ASTER SWIR ya no funcionaban debido a temperaturas anormalmente altas del detector SWIR. Los datos ASTER SWIR adquiridos desde abril de 2008 no son utilizables y muestran saturación de valores y rayas severas. Todos los intentos de revivir las bandas SWIR han fracasado y no se prevén más acciones. Los datos VNIR y TIR continúan mostrando una excelente calidad, cumpliendo con todos los requisitos y especificaciones de la misión.

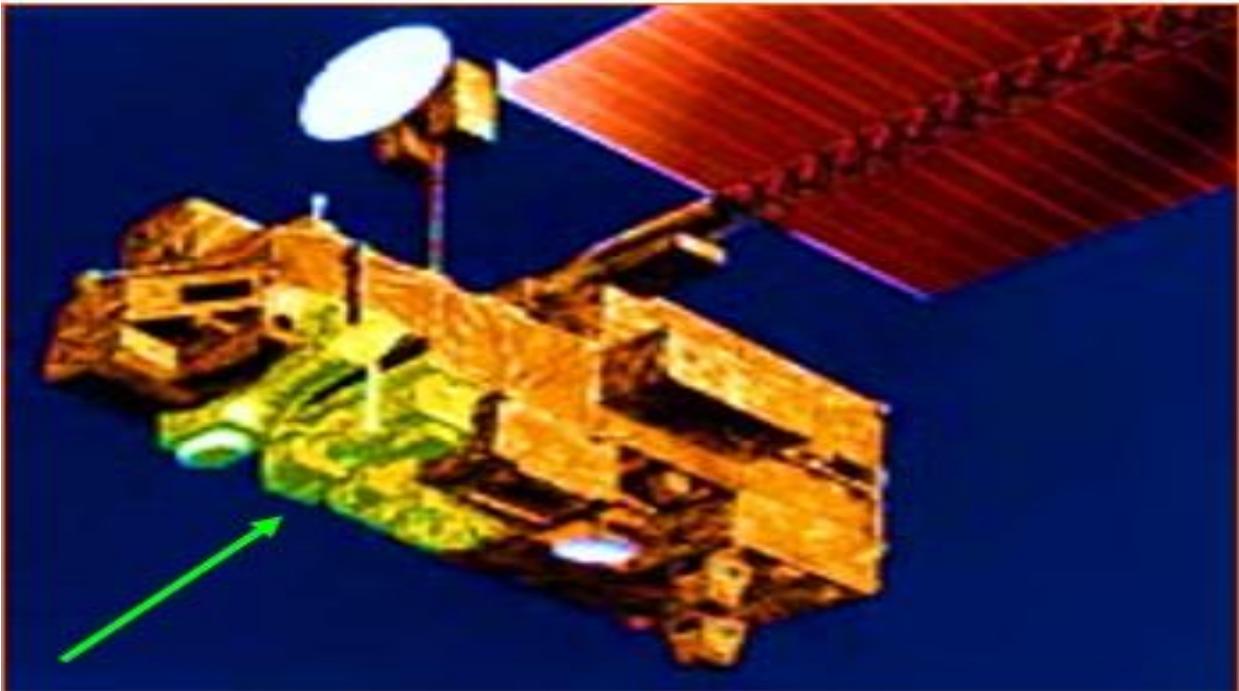
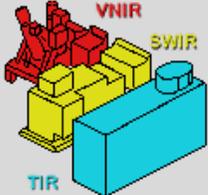
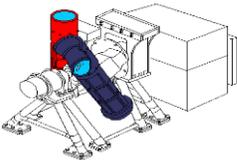
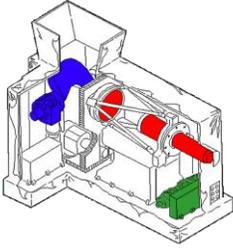
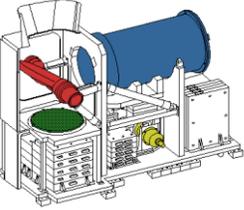


Figura 10. Satélite Terra con el sensor ASTER señalado por una flecha verde.

Tabla 6. Características de sensor ASTER, información e imágenes tomadas de: <https://ASTERweb.jpl.nasa.gov/>

<b>SUBSISTEMAS</b> 	RESOLUCIÓN ESPECTRAL	RESOLUCIÓN ESPACIAL	RESOLUCIÓN RADIOMÉTRICA	RESOLUCIÓN TEMPORAL
	Banda 1 (0.52–0.60 $\mu\text{m}$ ) Banda 2 (0.63–0.69 $\mu\text{m}$ ) Banda 3N (0.78–0.86 $\mu\text{m}$ ) Banda 3B (0.78–0.86 $\mu\text{m}$ )	15 m		16 días

SWIR		30 m	8 bits
	Banda 4 (1.60–1.70 $\mu\text{m}$ )		
	Banda 5 (2.14–2.18 $\mu\text{m}$ )		
	Banda 6 (2.18–2.22 $\mu\text{m}$ )		
	Banda 7 (2.23–2.28 $\mu\text{m}$ )		
	Banda 8 (2.29–2.36 $\mu\text{m}$ )		
	Banda 9 (2.36–2.43 $\mu\text{m}$ )		
TIR		90 m	12 bits
	Banda 10 (8.12–8.47 $\mu\text{m}$ )		
	Banda 11 (8.47–8.82 $\mu\text{m}$ )		
	Banda 12 (8.92–9.27 $\mu\text{m}$ )		
	Banda 13 (10.25–10.95 $\mu\text{m}$ )		
	Banda 14 (10.95–11.65 $\mu\text{m}$ )		

## Geotermia

### Definición y Origen del Calor Interno de la Tierra

La etimología de la palabra “geotermia” deriva del griego “geos” que quiere decir “tierra” y de “thermos” que significa calor: “calor de la tierra”. La geotermia es una rama de la geofísica que estudia los fenómenos térmicos del interior del planeta y/o a los procesos requeridos para la explotación industrial de ese calor para producir energía eléctrica y otros usos (Peláez, 2017). El calor interno de la Tierra es producto de diversos eventos y procesos físicos y químicos. Colisiones repetidas provocaron la unión de la materia que rotaba alrededor del sol en cuerpos más grandes, del tamaño de un asteroide, denominadas protoplanetas, que en unas pocas decenas de millones de años crecieron hasta convertirse en planetas, incluyendo la Tierra (Tarbuck, 2005).

La estructura interna de la Tierra quedó constituida por capas concéntricas resultado de una diferenciación química y gravitacional, los elementos más pesados como el Fe, Ni descendieron formando el centro de la Tierra, el núcleo, y los elementos más ligeros como el Si y Al ascendieron formando la capa más externa de la Tierra, la corteza. Este proceso generó una gran cantidad de calor que provocó la fusión de todo el planeta y que aún se mantiene en gran parte encerrado en su interior, a pesar de la gran cantidad de calor que está emitiendo hacia el espacio que se ha calculado que es más de 47 TW (Davies y Davies, 2010). Otro proceso que genera calor al interior de la Tierra, especialmente en la corteza continental y manto superior, es el decaimiento radiactivo de elementos inestables, como el Uranio (U238, U235), Torio (Th232) y

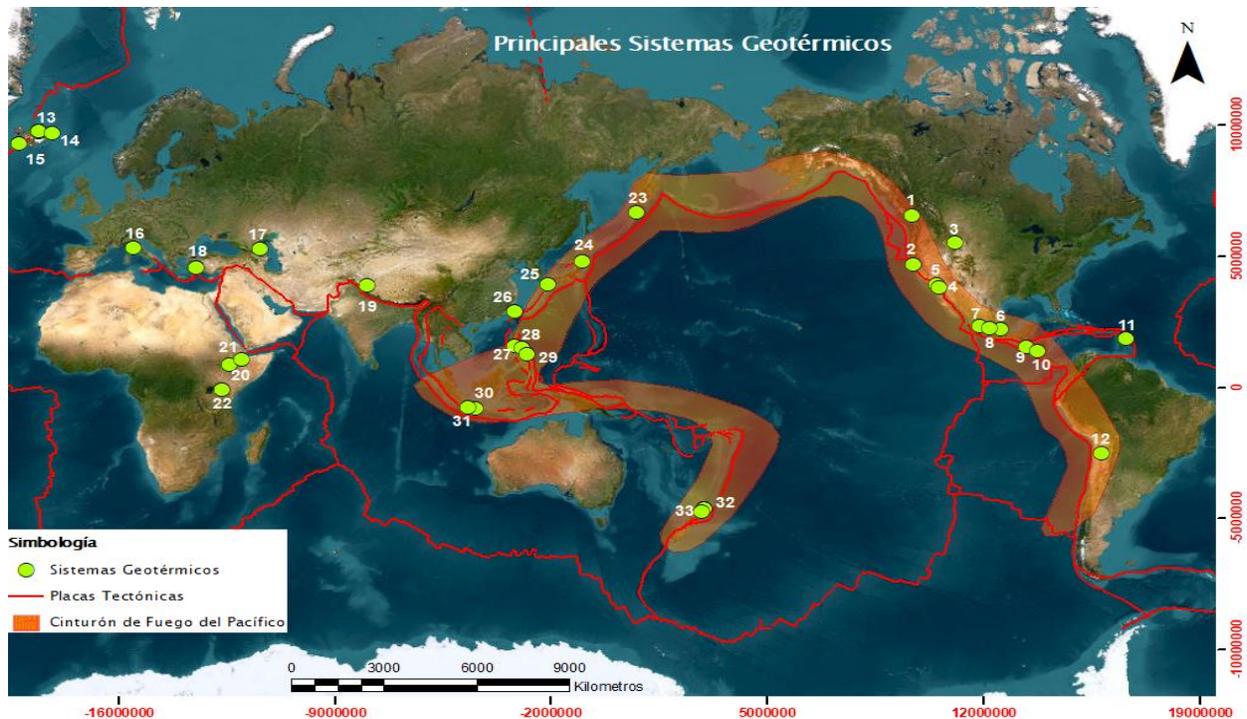
Potasio (K40), debido a la desintegración del núcleo del átomo. El siguiente proceso que ha contribuido al calor interno de la Tierra es el cambio de fase de ciertos materiales del manto, que ocurre debido a las elevadas presiones y temperaturas, lo que provoca que los minerales sean inestables y se produzcan cambios de fases continuos, generando energía en forma de calor, por ejemplo, durante el proceso de subducción, en el cual la placa subducente se hunde en el manto con el consiguiente aumento en la presión y temperatura. Además, el rozamiento o calor cinético es otro proceso que contribuye al calor interno de la Tierra, ocurre como consecuencia del rozamiento producido por la distinta respuesta del núcleo externo y el manto ante los campos de fuerza de la Luna y el Sol (fuerzas de marea) (ICGC, 2011).

### **Mecanismos de Transferencia de Calor**

Los mecanismos de transporte de calor en la Tierra son tres, la primera es la conducción, que es la transferencia de calor en sólidos por actividad molecular (Tarbuck, 2005), este proceso ocurre principalmente en la corteza terrestre, donde el material que forma la corteza es sólido y sólo localmente se presenta el movimiento de fluidos, las rocas son malas conductoras de calor, por lo que este proceso puede durar miles de años. El segundo mecanismo de transporte de calor es la convección, es la transferencia de calor mediante el movimiento o la circulación de un fluido (líquido o gas), este proceso ocurre principalmente en el manto en escalas de tiempo de millones de años debido a la alta viscosidad del material que forma el manto; también ocurre convección en la corteza en forma local, cuando se presentan canales, como fallas, o zonas de alta permeabilidad que permitan el movimiento de magma o de agua y gases. Por último, la radiación es otra forma de transporte de calor, es a través de ondas electromagnéticas y ocurre principalmente en la atmósfera, no se necesita contacto entre los materiales para que ocurra la transferencia de calor, gracias a estos procesos fisicoquímicos la energía del sol llega a la superficie terrestre, contribuyendo al calentamiento del planeta.

### **Sistemas Geotérmicos**

El término describe un sistema de elevado transporte de calor desde una fuente a profundidad hasta una zona de descarga que generalmente es la superficie de la Tierra y que genera altas temperaturas a profundidades someras. Este transporte de calor usualmente se efectúa a través de un fluido que puede ser magma, en el caso de sistemas volcánicos, o bien agua caliente o salmuera (agua con alta concentración de sales), vapor y gases en un sistema geotérmico en el sentido estricto del término. En su camino desde la fuente hacia la superficie, el fluido geotérmico puede ser almacenado temporalmente en un yacimiento, que en el caso de un sistema volcánico forma la cámara magmática. En la Figura 11 se ilustran los principales sistemas geotérmicos a nivel mundial.



**Figura 11.** Localización de los principales sistemas geotérmicos: 1.Meager Mt.; 2.Los Geiseres; 3.Yellowstone; 4.Salton Sea; 5.Cerro Prieto; 6.Los Humeros; 7.La Primavera; 8.Los Azufres; 9.Ahuachapan; 10.Momotombo; 11.Bouillante; 12.El Tatío; 13.Krafla; 14.Namafjal; 15.Svartsengi; 16.Larderello; 17.Makhashcala; 18.Kizildere; 19.Puga; 20.Aluto; 21.Langano; 22.Olkaria; 23.Pauzhetskiy; 24.Matzukawa; 25.Otake; 26.Tatun; 27.Makban; 28.Tiwi/Bacman; 29.Tongonan/Palipinon; 30.Dieng; 31.Kawah Kamodjang; 32.Broadlands; 33.Wairakei. Información tomada de Prol (1988).

### Clasificación de los Sistemas Geotérmicos Hidrotermales

Los sistemas geotérmicos hidrotermales se clasifican principalmente en cuatro categorías distintas. La primera categoría se basa en la entalpía, la segunda son los sistemas hidrotermales, la tercera son los sistemas geotérmicos conductivos, y la cuarta son los sistemas acuíferos profundos. A continuación, se proporciona una descripción detallada de cada uno de estos tipos:

#### 1. Con base en la entalpía:

La entalpía denota la cantidad de energía térmica que un fluido o un objeto puede intercambiar con su entorno, se expresa en kJ/kg o en kcal/kg (Trillo y Angulo, 2008), Este concepto es esencial para la clasificación de los sistemas geotérmicos hidrotermales. Dicha clasificación se fundamenta en la temperatura de los fluidos geotermiales y se divide en tres categorías principales:

##### 1.1. Alta entalpía: fluido > a 150 °C

- 1.2. Mediana entalpia: fluido entre 90° y 150°C
- 1.3. Baja entalpía: fluido < a 90°C

## **2. Sistemas hidrotermales:**

Están constituidos por una fuente de calor y por fluidos (agua y gases) que constituyen el medio de transporte del calor por convección, roca permeable donde se almacenan los fluidos y una capa de "roca sello". Los fluidos se infiltran en la corteza terrestre a través de poros y fracturas hasta alcanzar un yacimiento, donde se almacenan. La existencia de estos yacimientos se manifiesta en la superficie por la presencia de manantiales calientes, fumarolas, géiseres, pozas de lodo y suelos calientes. Estos yacimientos pueden ser de vapor o líquido dominante de alta temperatura, o de líquido de mediana o baja temperatura. (Santoyo y Barragán, 2010).

Los elementos de un sistema geotérmico son tres, el primero es la fuente de calor puede ser tanto una intrusión magmática a muy alta temperatura (> 600°C), emplazada a profundidades relativamente someras (5–10 km) o bien, como en sistemas de baja temperatura donde el gradiente geotérmico normal genera el calor para tener temperaturas anómalas (Dickson y Fanelli, 2004) el segundo elemento es el reservorio formado por rocas permeables, y el tercero el fluido que puede incluir aguas meteóricas, agua magmática, agua connata o agua marina, es el que se encarga de transferir el calor (Figura 12).

Tipos de sistemas hidrotermales:

- 2.2. Continental: Se localiza en los continentes y pueden tener manifestaciones superficiales en forma de fumarolas, solfataras geiseres, etc.
- 2.3. Submarino: Se localizan en el fondo del mar, y se manifiestan como descargas de agua caliente, descargas de gases y/o formación de chimeneas hidrotermales (Santoyo y Barragán, 2010).

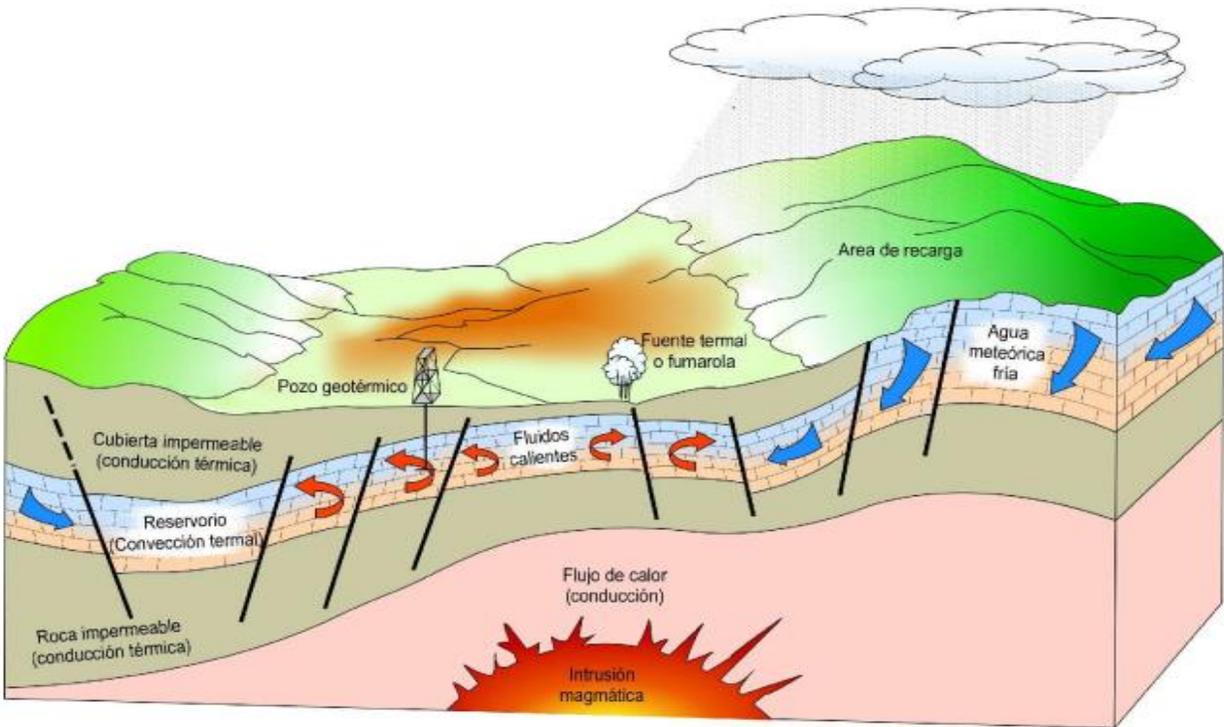
## **3. Sistemas geotérmicos conductivos:**

Roca seca caliente o mejorados/ Enhanced or Engineered Geothermal Systems (EGS): Consisten en roca impermeable a altas temperaturas y con la característica particular de no contar con permeabilidad para permitir el transporte convectivo de calor hacia la superficie. Su explotación requiere de la creación de una red de fracturas en la roca y la inyección de fluidos para su aprovechamiento (Santoyo y Barragán, *op. cit.*).

## **4. Sistemas acuíferos profundos:**

- 4.1. Acuíferos hidrostáticos: contienen agua bajo presión debido al peso del agua circundante.

- 4.2. Geopresurizados: Contienen agua y metano disuelto a alta presión (unos 700 bar, unidad de presión) y mediana temperatura (entre 90 y 200 grados centígrados) (Santoyo y Barragán, 2010).
- 4.3. Sistemas supercríticos: se caracterizan por temperaturas muy altas y un reservorio natural que contiene fluido en estado supercrítico. Para agua pura, esto significa una temperatura de al menos 374°C y una presión de al menos 221 bar (Reinsch et al., 2017).



**Figura 12.** Representación esquemática de un sistema geotérmico ideal. (Dickson y Fanelli, 2004).

### Manifestaciones Geotérmicas Superficiales

Algunas evidencias del calor interno de la Tierra que se pueden observar en la corteza son las manifestaciones geotérmicas superficiales, a continuación, se mencionan algunas :

**Fumarolas:** Nombre genérico dado a la emisión de gases y vapores de agua a temperaturas muy elevadas, en ocasiones pueden alcanzar 500 °C. Se las denomina, en función de su composición química, carbónicas, sulfurosas, clorhídricas, etc. (Trillo y Angulo, 2008).

- Suelos vaporizantes: Los suelos vaporizantes se forman por la acción del vapor que se desprende de un yacimiento en el que los fluidos alcanzan el punto de ebullición a profundidad. (Prol, 1988)
- Pozas de agua caliente: Las pozas calientes se forman por la acumulación del agua que arrojan uno o varios manantiales termales y se necesita que las condiciones topográficas

del terreno sean favorables, esto es, que exista una depresión en el lugar de los manantiales donde el agua de éstos sea contenida como en una alberca. (Prol, *op. cit.*)

- Pozas de lodo: Erupciones de gases y barro que aparecen donde no hay suficiente agua para sostener un géiser o una fuente termal. El vapor y los gases burbujan a través del barro formado por la interacción de los gases con rocas sedimentarias.

Geiseres: Surtidores intermitentes de agua líquida mezclada con vapor de agua, a una temperatura entre 70 y 100 °C, con gran cantidad de sales disueltas y en suspensión. Los minerales disueltos en el agua quedan depositados alrededor del géiser a modo de escoria o de sílice amorfa (geiserita). (Trillo y Angulo, 2008)

### **Alteraciones Hidrotermales**

La alteración hidrotermal es un proceso complejo que involucra cambios mineralógicos, químicos y texturales, resultantes de la interacción de fluidos acuosos calientes con las rocas a través de las cuales circulan, bajo condiciones fisicoquímicas cambiantes. Los fluidos hidrotermales interactúan químicamente con los constituyentes minerales de las rocas circundantes, que tienden a reequilibrarse formando nuevos conjuntos minerales que están en equilibrio con las nuevas condiciones de presión y temperatura. Según Pirajno (2008) los principales factores que controlan los procesos de alteración son:

1. La naturaleza de las rocas de la pared
2. Composición de los fluidos
3. Concentración, actividad y potencial químico de los componentes del fluido, como H<sup>+</sup>, CO<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>, K<sup>+</sup>, H<sub>2</sub>S y SO<sub>2</sub>.

A continuación, se describen algunas tipologías producto de alteración hidrotermal (Pirajno, *op.cit.*) y (Lagat, 2009):

- Sódico-Cálcica: este tipo de alteración es común en ambientes geotérmicos donde hay una alta concentración de sodio y calcio en los fluidos hidrotermales. Los minerales característicos de esta alteración son la albita y la calcita.
- Potásica: común en sistemas de mineralización epitermal y de pórfidos, ocurre en las zonas centrales de alta temperatura (450–600 °C) en las que se presenta un enriquecimiento de potasio. Los minerales característicos son feldespato potásico, biotita en pórfidos, y adularia en sistemas epitermales. Suele ir acompañada de sulfuros (calcopirita, pirita, molibdenita). Este estilo de alteración puede formarse antes de la cristalización completa del magma. La alteración potásica puede ocurrir en ambientes plutónicos más profundos, donde se formará ortoclasa, o en ambientes volcánicos poco profundos donde se formará adularia.

- Propilítica: se caracteriza por la adición de H<sub>2</sub>O y CO<sub>2</sub>, y localmente S, sin metasomatismo H<sup>+</sup> apreciable. Suelen formarse a partir de la descomposición de minerales que contienen Fe–Mg, como la biotita, el anfíbol o el piroxeno, aunque también pueden sustituir al feldespato. Ocurre a altas temperaturas de 200 a 350 °C. Los minerales característicos son epidota, clorita, actinolita carbonatos, albita, feldespato K y pirita. En lugares también pueden ser comunes la sericita, los óxidos de Fe, la montmorillonita y la zeolita. La presencia de clorita y epidota indican temperaturas de 220–340°C y la aparición de actinolita–tremolita se produce a 280–350°C. La alteración propilítica generalmente se formará en un entorno distal en relación con otros tipos de alteración.
- Clorita–Sericita los minerales originales son remplazados por los minerales clorita y sericita. Ocurre en un rango de temperatura de aproximadamente 150–300°C.
- Sericítica (Fílica): ocurre por la formación de sericita (mica blanca de grano muy fino) se forma por la descomposición de los feldespatos, por lo que reemplaza al feldespato está tipificada por el conjunto cuarzo–sericita–pirita (QSP). Las fases minerales generalmente asociadas con la alteración de QSP son K–feldespato, caolinita, calcita, biotita, rutilo, anhidrita y apatita. La alteración que consiste en sericita + cuarzo se denomina alteración “fílica”.
- Argílica: intenso metasomatismo de H<sup>+</sup> y lixiviación ácida, a temperaturas entre 100 y 300°C.
- Argílica avanzada (baja temperatura 180 °C): la alteración arcillosa intermedia se define por la presencia de montmorillonita, illita, clorita, arcillas del grupo caolín (caolinita, dickita, haloisita, halofana) y sericita, mientras que el feldespato K puede permanecer inalterado y el K, Ca, Mg, Na no completamente lixiviado. La caolinita puede estar presente más cerca de la zona fílica, mientras que las arcillas de montmorillonita en las zonas exteriores.
- Argílica avanzada (alta temperatura): se caracteriza por un ataque ácido intenso y una lixiviación más o menos completa de los cationes alcalinos con destrucción completa de los feldespatos y las fases de silicatos máficos. Las fases minerales típicas son dickita, caolinita, pirofilita, barita, alunita y diáspora. Además, pueden estar presentes sulfuros (covellita, digenita y enargita), topacio, turmalina y una variedad de arcillas amorfas. La lixiviación de base por encima de 300 °C producirá ensamblajes que contienen pirofilita, andalucita, cuarzo, topacio y pirita. Otros minerales asociados pueden incluir cantidades menores de sericita, diáspora, caolinita, rutilo, anhidrita, corindón, zunyita, dumortierita, cloritoide.
- Zona de silificación: La silificación es la adición de sílice secundario (SiO<sub>2</sub>). La silificación es uno de los tipos de alteración más comunes y se presenta en muchos

estilos diferentes. Uno de los estilos más comunes se denomina "inundación de sílice", que resulta del reemplazo de la roca con cuarzo microcristalino (calcedonia). Una mayor porosidad de una roca facilitará este proceso. Otro estilo común de silicificación es la formación de fracturas poco espaciadas en una red, o "stockworks", que se rellenan con cuarzo. La inundación de sílice y/o stockworks a veces están presentes en la pared de roca a lo largo de los márgenes de las vetas de cuarzo. La silicificación puede ocurrir en un amplio rango de temperaturas.

### Beneficios y usos de la Energía Geotérmica

La energía geotérmica tiene muchas aplicaciones en diversos sectores. Es una fuente de energía limpia que emite bajas cantidades de gases de efecto invernadero, lo cual contribuye a reducir las emisiones de CO<sub>2</sub>, y es económicamente viable. Algunos ejemplos de esos usos son: generación de energía, climatización de viviendas, balneología, secado de textiles, refrigeración, elaboración de hielo, secado de cemento, producción de etanol y biocombustible. Además, de las salmueras geotérmicas se pueden extraer litio, sílice, zinc, manganeso, tierras raras, entre otros elementos. A continuación, se muestra una ilustración (Figura 13) que resume algunos usos de la energía geotérmica y la temperatura necesaria para estos.

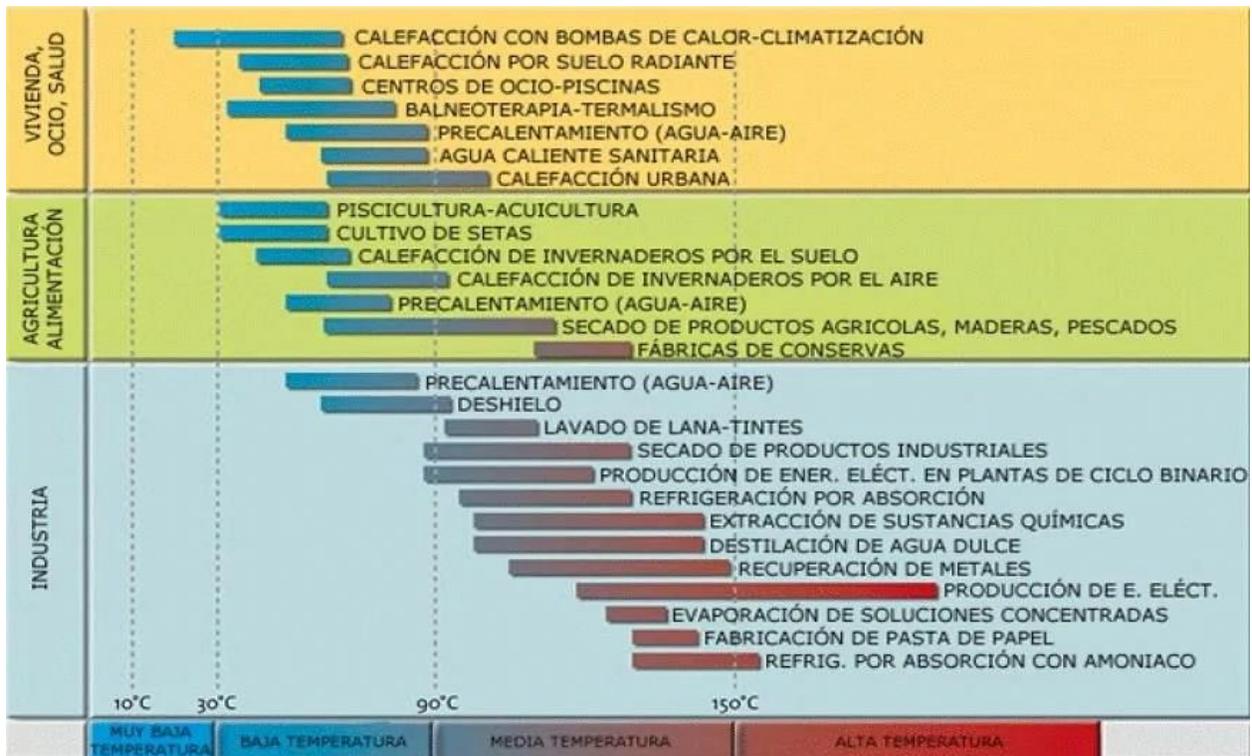


Figura 13. Usos de la energía geotérmica en función de la temperatura. Información tomada de: [www.geothermie-perspectives.fr](http://www.geothermie-perspectives.fr)

## Ejemplo de uso directo de la geotermia

El litio a partir de salmueras geotérmicas podría impulsar la transición energética apoyando la producción de baterías para el almacenamiento de energía y vehículos eléctricos de una manera más sostenible desde el punto de vista medioambiental, como se ha demostrado en Alemania, Nueva Zelanda, Reino Unido, Chile y Estados Unidos. En 2021, en Alemania, un proyecto piloto produjo litio apto para baterías a partir de salmueras geotérmicas, y la producción comercial está prevista para 2024 (Vulcan Energy, 2021).

La geotermia también puede ser una tecnología prometedora para producir hidrógeno verde, y en campos con temperaturas superiores a 200 °C, puede hacerlo a precios competitivos (Yimlaz y Kanoglu, 2017). Esta posibilidad ya se está probando en el proyecto geotérmico de Mokai en Nueva Zelanda y en la central eléctrica de Reykjanes en Islandia (Global Geothermal Alliance, 2019). Por otro lado, en la central geotérmica Domo San Pedro en México, se ha instalado

una fábrica de deshidratación de frutas que puede procesar 3000 kilogramos (kg) de fruta al día, brindando una oportunidad de negocio para las comunidades locales y contribuyendo a la seguridad alimentaria de la zona (Aviña, 2021).

### Tipos de Centrales Geotérmicas

Para la generación de electricidad, se utilizan principalmente dos tecnologías: vapor seco y vapor flash que se describen a continuación.

**Vapor seco:** La tecnología de vapor seco es aplicable cuando el vapor seco se produce directamente desde el depósito geotérmico. Con esta tecnología, se obtiene vapor geotérmico saturado o sobrecalentado a alta presión directamente del pozo geotérmico y se dirige a una turbina de vapor acoplada a un generador para producir electricidad (DiPippo, 2012; Anderson y Rezaie, 2019). El vapor de escape de la turbina se descarga en un condensador a baja presión o vacío parcial para optimizar la eficiencia de la generación de electricidad. En pequeñas unidades modulares, las plantas de contrapresión que descargan el vapor de escape directamente a la atmósfera brindan una solución tecnológicamente más simple y económica para la generación temprana de electricidad en campos en desarrollo (Figura 14).

**Vapor flash:** Esta tecnología utiliza fluidos geotérmicos bifásicos a alta presión y alta temperatura para generar electricidad vaporizando primero el fluido geotérmico bifásico a una presión más

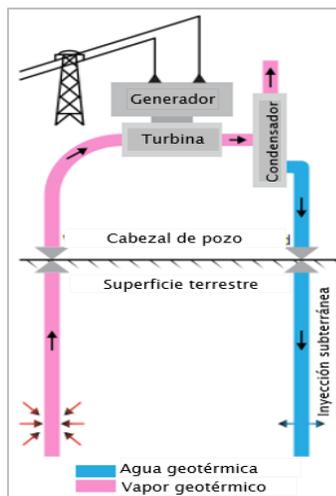


Figura 14. Planta de vapor seco (IRENA e IGA, 2023).

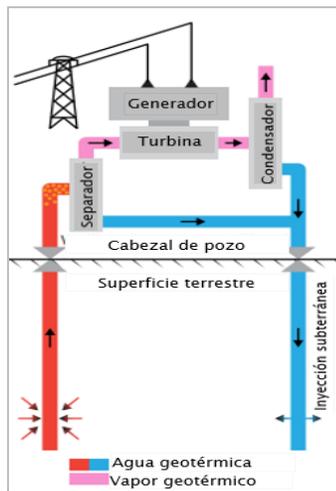
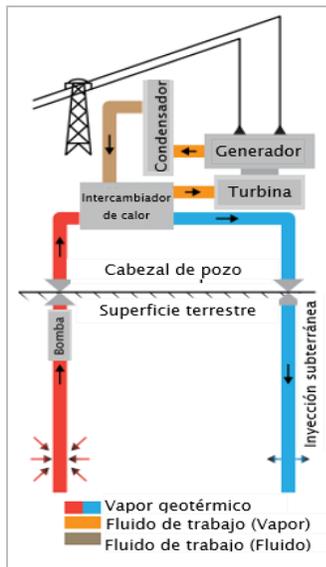


Figura 15. Planta flash (IRENA e IGA, 2023).

baja a través de un proceso conocido como “flasheo”. El componente de vapor del fluido geotérmico generado durante este proceso se separa del componente líquido. Luego, el vapor se expande a través de una turbina que está acoplada a un generador para producir electricidad. Similar al proceso de vapor seco, el escape de vapor de la turbina se descarga a un condensador a baja presión o se libera directamente a la atmósfera en soluciones de plantas de contrapresión. El componente líquido separado del fluido geotérmico puede evaporarse aún más para generar más vapor para la generación de electricidad adicional (doble/triple flash) y eventualmente regresar a la fuente del yacimiento a través de pozos de reinyección. (IRENA e IGA, 2023) (Figura 15).



**Figura 16.** *Planta de ciclo binario (IRENA e IGA 2023).*

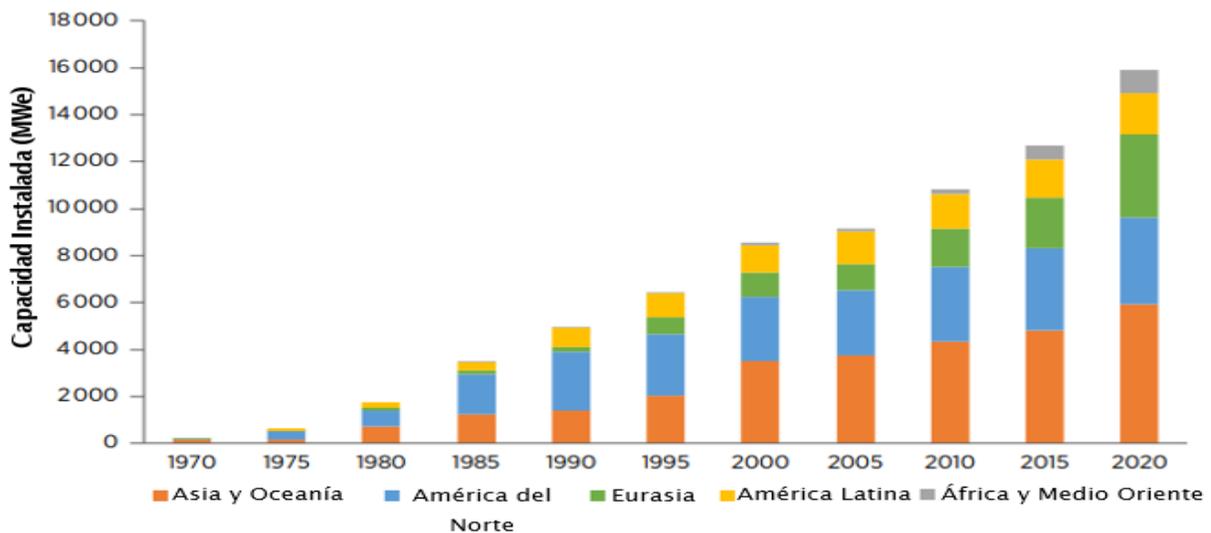
**Ciclo binario:** funcionan transfiriendo calor del fluido geotérmico a un fluido de trabajo secundario con un punto de ebullición más bajo que el agua, contenido en un circuito cerrado. El fluido de trabajo secundario se vaporiza y genera suficiente presión para impulsar una turbina. Las plantas de energía binarias generalmente usan fluidos geotérmicos con temperaturas más bajas que las requeridas para vapor flash y vapor seco. Los avances en la tecnología del ciclo binario han permitido generar electricidad a partir de recursos geotérmicos con temperaturas tan bajas como 70–80°C, aunque a pequeña escala. Las plantas binarias pueden operar en un ciclo Rankine orgánico (ORC) o en un ciclo Kalina, dependiendo del tipo de fluido secundario utilizado (butano o pentano en un ORC y una mezcla de amoníaco y agua en un ciclo Kalina) (DiPippo, 2012; RHC, 2014; Anderson y Rezaie, 2019). Las plantas binarias pueden trabajar en un ciclo completamente cerrado, en el que el 100 % del fluido geotérmico extraído se devuelve a la fuente del yacimiento mediante reinyección, lo que permite una operación libre de emisiones y maximiza la sostenibilidad de la utilización de los recursos (IRENA e IGA, *op.cit.*) (Figura 16).

### Antecedentes Históricos y Panorama Actual de la Geotermia Mundial

Los antecedentes históricos de la geotermia se remontan al siglo XVI, cuando se descubrió que la temperatura aumenta a medida que se profundiza en la tierra debido a la actividad minera. Un importante hito en la historia de la geotermia tuvo lugar en 1827, cuando se inició la explotación industrial utilizando el vapor de un géiser para extraer ácido bórico de un volcán de lodo en Larderello, Italia. Posteriormente, en 1892, se estableció el primer sistema de calefacción geotérmica a nivel distrital en Boise, Idaho, Estados Unidos.

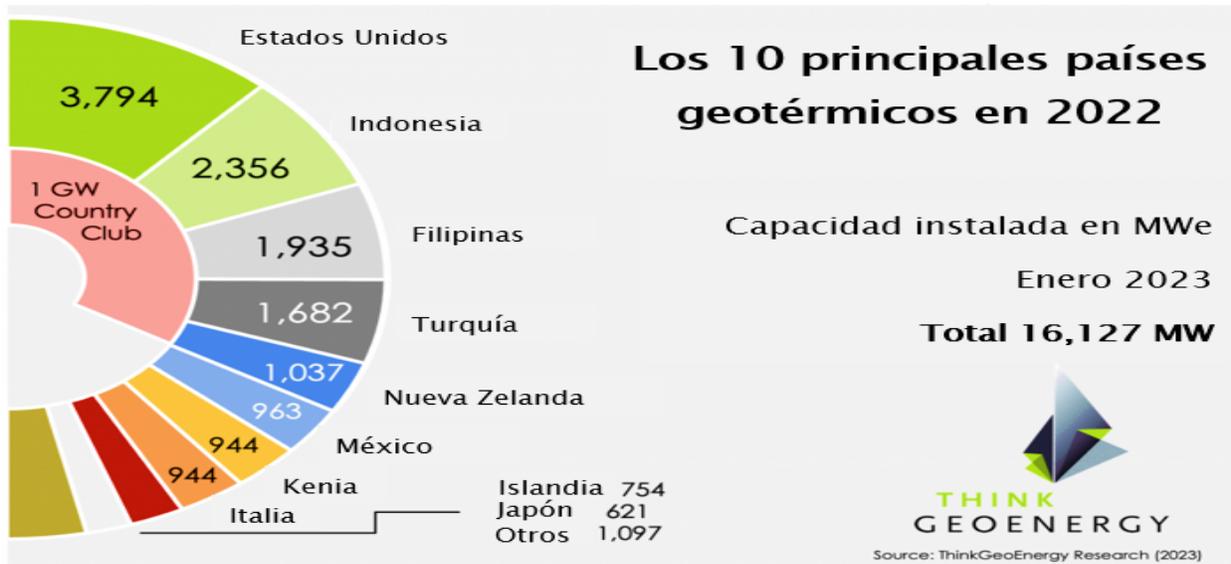
En 1904, se marcó otro hito con el inicio de la generación de energía eléctrica mediante el uso de vapor geotérmico en Larderello. Luego, en 1958, Nueva Zelanda inauguró su primera planta geotérmica, seguida por la planta Pathe en México en 1959. Finalmente, en 1960, se dio inicio a la generación eléctrica con geotermia en los Geysers, Estados Unidos.

Actualmente la geotermia es una fuente de energía que está cobrando importancia debido a su potencial como fuente de energía renovable y sostenible. La capacidad global de generación de electricidad de las plantas geotérmicas creció de 200 MWe a principios de la década de 1950 a aproximadamente 16 GWe en 2020. La capacidad geotérmica aumentó significativamente en las décadas de 1970 y 1980, gracias en parte a las crisis del petróleo de 1973 y 1980/81 (Figura 17). Los fuertes aumentos en los precios del petróleo llevaron a la investigación y desarrollo de fuentes alternativas de electricidad, incluida la geotérmica (IRENA e IGA, 2023).



**Figura 17.** Crecimiento de la capacidad instalada de energía geotérmica por región. Imagen modificada de IRENA e IGA (2023).

De acuerdo con los estudios de ThinkGeoEnergy (2023) a finales del año 2022 la capacidad instalada de generación de energía geotérmica global fue de 16127 MW, hubo un aumento de 286 MW con respecto al 2021, los países que se situaron en los 10 primeros lugares este año fueron Estados Unidos, Indonesia, Filipinas, Turquía, Nueva Zelanda, México, Kenia, Italia, Islandia y Japón (Figura 18).



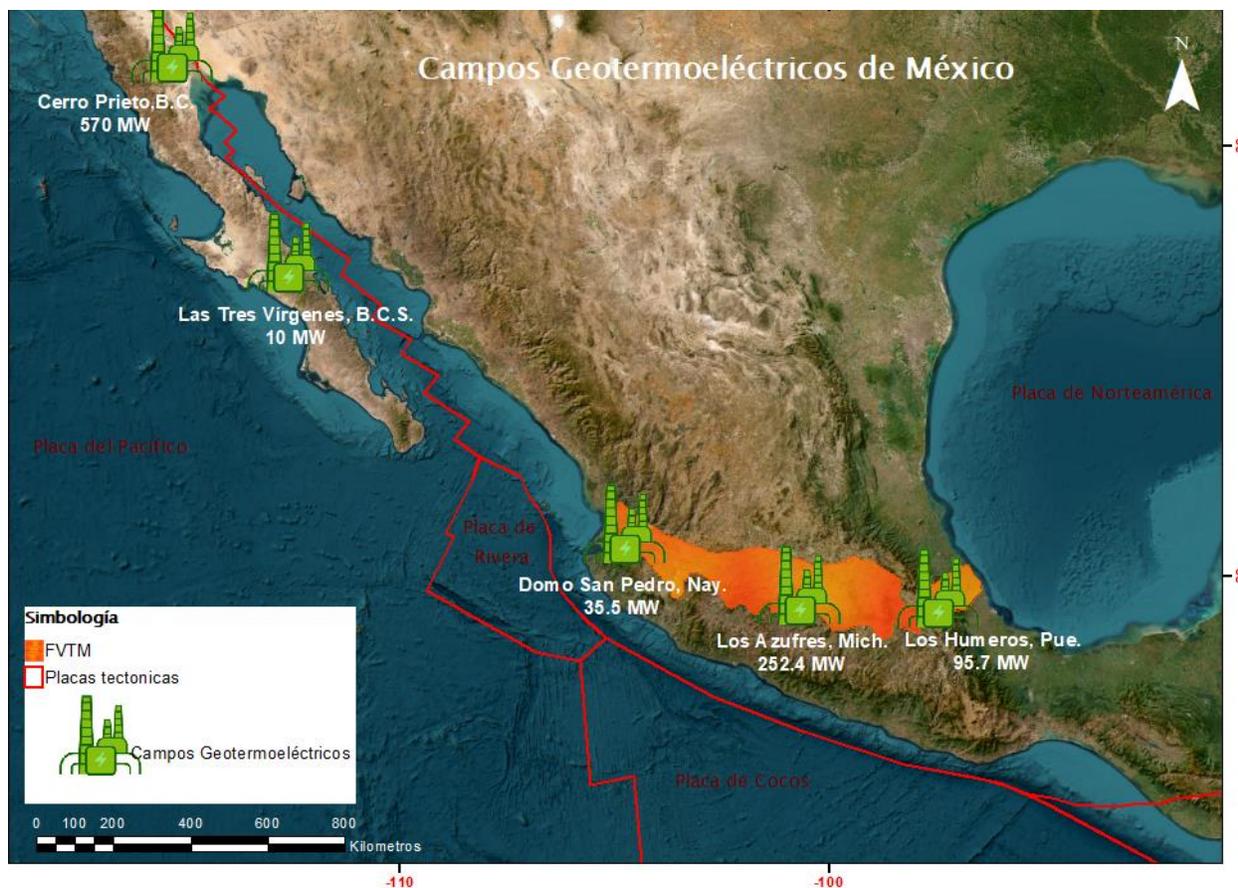
**Figura 18.** Principales países geotérmicos: capacidad instalada de generación de energía geotérmica (ThinkGeoEnergy, 2023).

La geotermia aún representa solo el 0.5% de la capacidad instalada basada en las energías renovables para la generación de electricidad, calefacción y enfriamiento, a nivel mundial (IRENA e IGA, 2023).

El potencial técnico de los recursos geotérmicos hidrotermales se estima en alrededor de 200 GWe y más de 5 000 gigavatios térmicos (GWth). El Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático proyecta que la energía geotérmica puede suministrar alrededor del 18 % de la demanda mundial de electricidad y satisfacer las necesidades de electricidad del 17 % de la población mundial (IRENA e IGA, *op.cit.*).

### Panorama Actual de la Geotermia en México

México es uno de los principales países en generación de energía geotérmica, ocupando el sexto lugar a nivel global con una capacidad instalada de 963 MW. Esto se debe a la presencia de varios campos geotérmicos en explotación en diferentes regiones del país. Algunos de estos campos geotérmicos son: Cerro Prieto (Baja California) con 570 megavatios (MW) de capacidad instalada; Las Tres Vírgenes (Baja California Sur) con 10 MW, Domo de San Pedro (Nayarit) con 35.5 MW, Los Azufres (Michoacán) con 247.8 MW y Los Humeros (Puebla) con 120.4 MW. (Figura 19).



**Figura 19.** Distribución de los campos geotermoeléctricos en México. Se resalta que 3 de los 5 campos se encuentran dentro de la Faja Volcánica Transmexicana (FVTM), destacada en naranja. La FVTM es una región de intensa actividad volcánica que juega un papel crucial en la generación de energía geotérmica en México. Además, esta región se localiza en proximidad a los límites de las placas tectónicas, como la Placa del Pacífico, la Placa de Cocos y la Placa Norteamericana, lo que contribuye a su rica fuente de recursos geotérmicos.

Actualmente la Comisión Federal de Electricidad (CFE) es la empresa pública del gobierno de México que se encarga de proveer la mayor cantidad de energía eléctrica al país, de acuerdo con los resultados financieros de CFE del 3 de noviembre de 2022, esta generó el 74% de la electricidad consumida en México, con cobertura al 99.2% de la población. También reportó una capacidad instalada de 65960 MW de la cual solo 32% pertenece a tecnologías limpias (18.5% hidroeléctrica, 6.1% solar, 3.9% eólica, 2.4% nuclear y 1.3% geotérmica).

Algunas de las estrategias por parte de México para la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero son:

1. **Reducción de emisiones:** en la reciente COP27 (Conferencia de las Partes), la meta de reducción de emisiones de la SEMARNAT se incrementó del 30% al 35% para 2030,

aumentando cinco puntos porcentuales. Se han propuesto 35 medidas, como vehículos cero emisiones, transporte ferroviario, trabajo a distancia, creación de reservas naturales y regulación industrial, entre otras; que permitirán una reducción total anual estimada para 2030 de 88.9 MtCO<sub>2e</sub> (millones de toneladas de bióxido de carbono equivalente), y que dichas acciones se ubican en 3 ejes: soluciones basadas en la naturaleza, transporte bajo en carbono, y regulación y fomento industrial.

2. **Cambio en el sector energético:** el gobierno mexicano también plantea un cambio en el sector energético, comprometiéndose a eliminar la quema de gas en las instalaciones de Pemex y agregar 30 Gigawatts (GW) más de capacidad renovable en los próximos ocho años.
3. **Plan Sonora:** incluye la exploración del litio, producción de semiconductores y la construcción de la mayor planta solar de Latinoamérica (Enlight, 2023).
4. **Programa de financiamiento:** el programa es en colaboración con el Banco Interamericano de Desarrollo (BID) para aumentar la generación de energía a partir de recursos geotérmicos en el país. Este programa, llamado "Programa de Financiamiento y Transformación de Riesgos para la Energía Geotérmica en México" (PFTRG), tiene como objetivo contribuir a la diversificación de la matriz energética de México y reducir la dependencia de combustibles fósiles, lo que a su vez ayudará a reducir las emisiones de gases de efecto invernadero (ThinkGeoEnergy, 2023).

La Secretaría de Energía (SENER) de México anunció que otorgó a CFE 22 permisos de exploración geotérmica (para realizar estudios geológicos, geofísicos y geoquímicos más detallados de las áreas geotérmicas), 6 en Baja California, 4 en Jalisco, 4 en Michoacán, 3 en Nayarit, 2 en Guanajuato, 1 en Baja California Sur, 1 en Chiapas, y 1 en Puebla. A pesar de estos avances, se advierte que alcanzar los 30 GW de capacidad renovable en ocho años implica construir 30 plantas de 1 GW y que el ritmo de expansión de la capacidad renovable en los próximos cuatro años debe aumentar en un 60% para estar en línea con el Escenario Net Zero para 2050 de la AIE (Agencia Internacional de Energía). Además, la falta de certeza política a largo plazo sigue siendo un desafío clave que obstaculiza el crecimiento de las energías renovables en México (Enlight, 2023).

## **Estado del arte**

### **Zona de estudio**

#### **Localización**

La zona "Los Negritos-Ixtlán de los Hervores" se ubica en el centro-oeste de la Faja Volcánica Transmexicana, al noroeste del estado de Michoacán, México, abarcando los municipios Villamar e Ixtlán; geográficamente Villamar se encuentra en las coordenadas UTM X:765289 y 740463; UTM Y: 2198720 y 2226052; cuenta con un área de 347.67 km<sup>2</sup> y una elevación media de 1540 m.s.n.m.; por su parte el municipio de Ixtlán se encuentra en las coordenadas UTM X:777163 y 762931; UTM Y: 2221059 y 2239300, tiene un área de 122.98 km<sup>2</sup> y una elevación media de 1579 m.s.n.m., la zona de estudio que comprende parte de los dos municipios se sitúa entre las coordenadas UTM X: 778966 y 747279, UTM Y: 2217395 y 2237223, abarca un área de 625.33 km<sup>2</sup> y está situada a una elevación media de 1582 m.s.n.m. (Figura 20).

# Zona de Estudio: "Los Negritos-Ixtlán de los Hervores"



Figura 20. Ubicación de la zona de estudio. Los dos triángulos negros representan las áreas de mayor relevancia para esta tesis: Los Negritos e Ixtlán de los Hervores; ubicados dentro del municipio de Ixtlán de los Hervores (delimitado por la línea color azul) y la zona sur del municipio de Villamar (delimitado por la línea color verde). En la imagen A, se muestra la posición de la Faja Volcánica Transmexicana (destacada en color naranja) y la posición del estado de Michoacán (en color amarillo). En la figura B, se detalla la ubicación de la zona de estudio en el noroeste del estado de Michoacán, México.

## Marco Tectónico y Geológico

La zona de los Negritos e Ixtlán de los Hervores se ubica en el centro-oeste del Cinturón Volcánico Transmexicano, también conocida como Faja Volcánica Transmexicana (FVTM) o Eje Neovolcánico de México (Figura 21), este es un arco volcánico continental calcialcalino resultante de la convergencia de las placas de Cocos y Rivera debajo de la placa de Norteamericana (Pasquaré et al., 1991; Ferrari et al., 2012). Está constituido por cerca de 8 000 estructuras volcánicas y algunos cuerpos intrusivos, que se extiende desde el volcán Pleistocénico San Juan en el estado de Nayarit, hasta el volcán Pico de Orizaba en el estado de Veracruz. Tiene aproximadamente 1000 km de longitud y una amplitud irregular entre los 80 y 230 km, y se distribuye con una dirección preferencial E-W en su parte central y oriental, WNW-ESE en su parte occidental, formando un ángulo cercano a los 16° con respecto a la Trinchera Mesoamericana. Esta característica ha dado lugar a que la provincia reciba el nombre de Faja Volcánica Transmexicana, pues muestra una distribución transversal con respecto a las grandes provincias geológicas mexicanas que corren con una orientación preferencial NNW-SSE (Ortega Gutiérrez et al., 1992).

La zona de estudio se ubica al extremo Este de la fosa tectónica de Chapala o Ciénega de Chapala que se sitúa al Este del rift de Citala (que da origen al graben y al lago de Chapala), es una depresión de aproximadamente 20 km de ancho y 110 km. de longitud (Rosas, 1981; Allan, 1986) y ocupa un área de más de 4252 km<sup>2</sup>. El graben se originó entre la época del Mioceno y Plioceno, se caracteriza por fallas normales en dirección noroeste-sureste a este-oeste. (Valle et al., 1970)

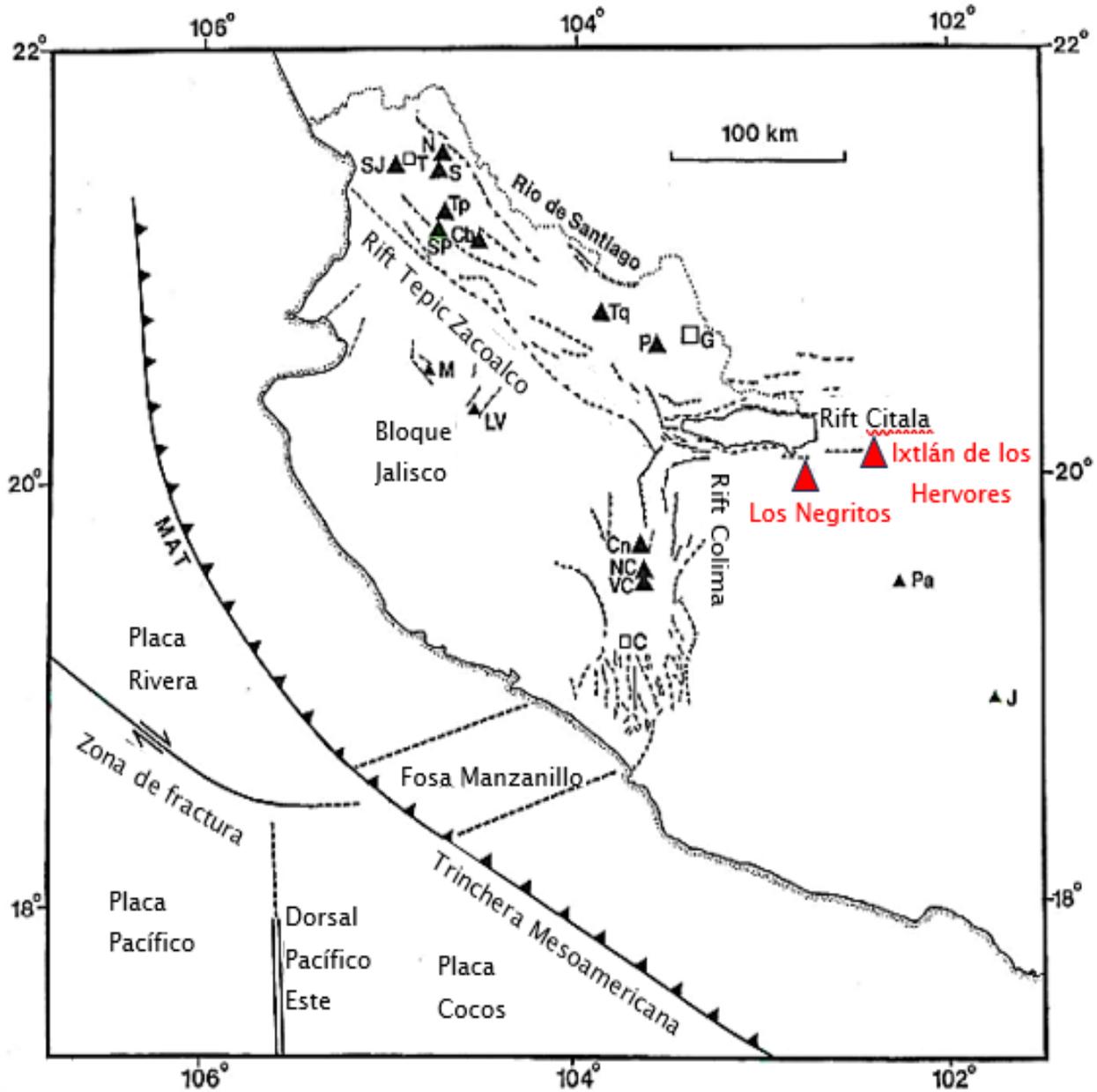


Figura 21. Marco geodinámico del occidente de México (imagen modificada de Allan et al., 1991). Los cuadros sin rellenar se refieren a ciudades; los triángulos negros se refieren a las siguientes estructuras volcánicas: Cb: Ceboruco; Cn: Cántaro; CSV: Cerro San Vicente; J: Jorullo; LV: Campo volcánico Los Volcanes; M: Campo volcánico Mascota; N: Navajas; NC: Nevado de Colima; P: Caldera La Primavera; Pa: Parícutín; S: Sanganguey; SJ: San Juan; SP: San Pedro; TP: Tepetitlic; Tq: Tequila; VC: Volcán Colima. PSR: Presa Santa Rosa. PTJ: Unión Continental Triple de Jalisco señalada por un círculo negro. Los triángulos rojos se refieren a los sitios geotérmicos estudiados en este trabajo.

La geología de la zona de estudio, presentada en la Figura 22, se caracteriza por la presencia de sedimentos lacustres que afloran en gran porción de la zona de estudio, con una edad correspondiente al Plioceno; estos sedimentos exhiben estratos de color blanco a crema y contienen partículas de tamaño limo a arena media, se han identificado macrofósiles de bivalvos, gasterópodos y evidencia de bioturbación, lo que sugiere un ambiente de deposición lacustre. Estos sedimentos representan una secuencia que involucra la caída de ceniza en agua y su posterior deposición lacustre. Además, se han observado otros depósitos lacustres contemporáneos, como areniscas y lodolitas diatomáceas, que se intercalan con lavas de composición andesítico-basáltica en la misma área (Gaspar Patarroyo, 2017). Las lavas andesíticas basálticas del Plioceno medio a superior se encuentran en la parte sur de la zona de estudio, de acuerdo con Gaspar Patarroyo (2017), son producto de un vulcanismo efusivo andesítico basáltico a andesítico, caracterizado generar morfologías de semi-escudos y derrames de lava. En la parte Este de la zona de estudio se encuentran las lavas del Pleistoceno inferior andesíticas y conos de escoria, mientras que hacia noroeste y sur se encuentran las lavas del Pleistoceno superior; las unidades antes mencionadas están cubiertas por depósitos lacustres (limolitas calcáreas) /aluviales del Holoceno (Olvera et al., 2020), que rellenan el valle, sobre el que afloran las manifestaciones termales.

Se identifican dos estructuras regionales principales: las fallas de Pajacuarán e Ixtlán, La falla de Pajacuarán, de orientación este-oeste, se inclina  $70^\circ$  hacia el norte, tiene una longitud de 18 km, atraviesa volcanes del Plioceno y forma el flanco sur del graben de Chapala (Rosas Elguera et al., 1989; Garduño Monroy et al., 1993). La falla Ixtlán, de orientación noroeste, se inclina hacia el suroeste, tiene una longitud de aproximadamente 35 km, atraviesa lavas del Pleistoceno temprano y forma el flanco norte del graben de Chapala (Viggiano Guerra y Gutiérrez Negrín, 2006, 2007). demás, la Falla de El Platanal, con orientación este-oeste, y la Falla de los Negritos, con orientación noreste-suroeste, fueron identificadas mediante estudios de magnetometría realizados por Díaz (1969).

# Mapa Geológico de la Zona de Estudio "Los Negritos-Ixtlán de los Hervores"

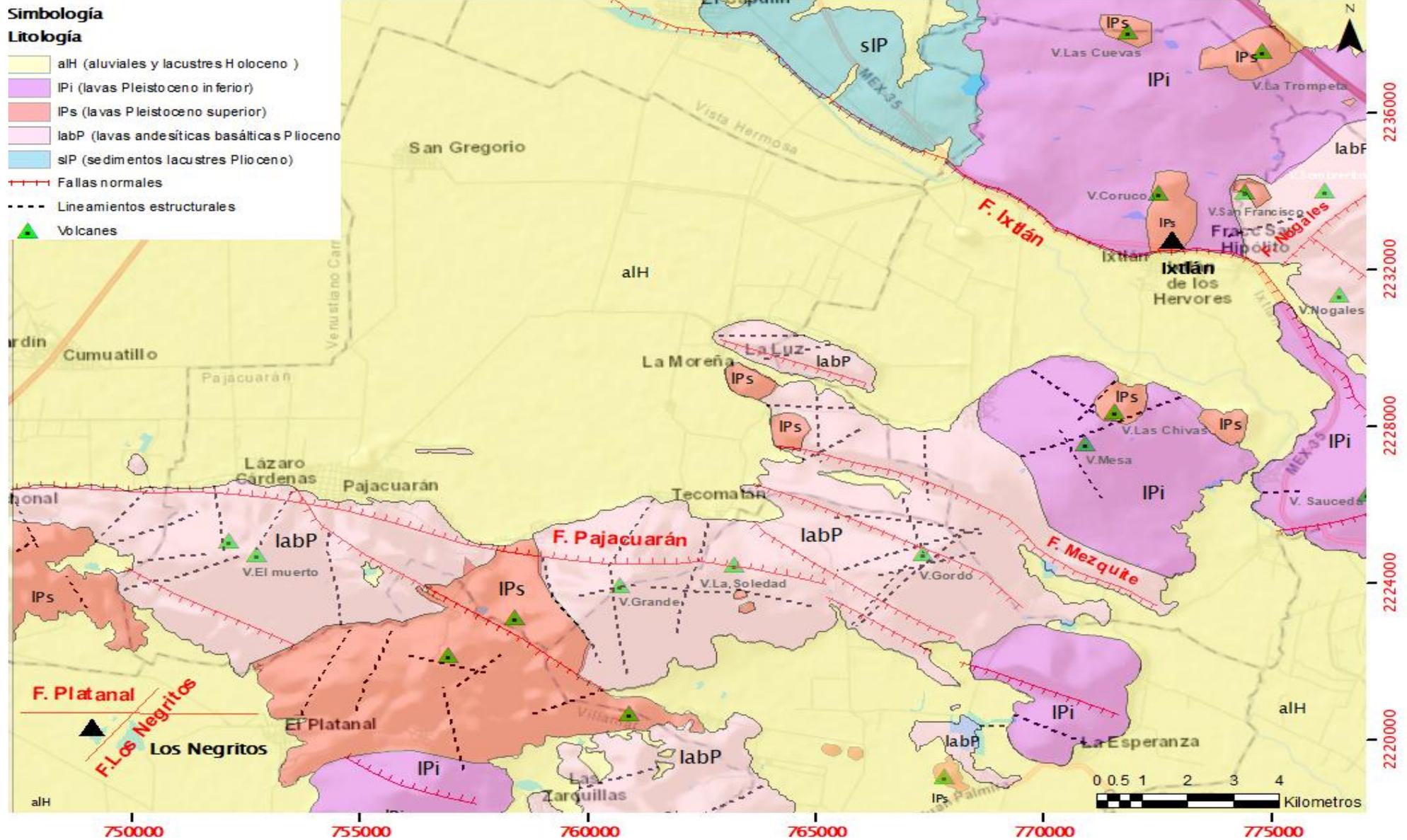


Figura 22. Contexto geológico de la zona de estudio "Los Negritos-Ixtlán de los Hervores". La figura muestra la litología en la región. Las fallas están marcadas con líneas rojas y etiquetadas con "F." Los lineamientos estructurales se representan con líneas discontinuas negras. Los volcanes se indican con triángulos verdes y se abrevian con "V.".

## Manifestaciones Superficiales y Depósitos Relacionados

Las manifestaciones hidrotermales superficiales en la zona de Los Negritos reportados por Banwell y Gómez (1970) son los siguientes:

- Volcanes de lodo (con diámetro de hasta 3 m)
- Pozas burbujeantes
- Fumarolas de vapor seco

Los depósitos asociados a manifestaciones geotérmicas reportadas por Valle et al. (1970) son los siguientes:

- Minerales: Vermiculita, Perlita, Clorita, Montmorillonita, Micas zonificadas, Feldespatos, Cristobalita y Cuarzo.

Las manifestaciones hidrotermales superficiales en la zona de Ixtlán de los Hervores descritos por Banwell y Gómez (1970) y Olvera et al. (2020) son los siguientes:

- Manantiales termales
- Emisiones de gases
- Volcanes de lodo
- Géiseres
- 16 cráteres de erupciones hidrotermales (Alineación NO-SE, con diámetro de 1,5 a 7 m, profundidad de hasta 3 m y comúnmente se llenan con agua termal)

Los depósitos de aguas termales en la zona de Ixtlán de los Hervores reportados por Olvera (2020) son los siguientes:

- Terrazas (la mayor de las terrazas tiene una superficie de 600 m<sup>2</sup>. los espesores variaron entre unos pocos cm hasta 40 cm).
- Facie vítrea (consolidados, aspecto vitreo, alta densidad, comportamiento frágil, con presencia de cerámica prehispánica).
- Facie arenosa cementada (débilmente consolidados, ricos en sedimentos líticos, fácilmente disgregables, presencia de cerámica prehispánica).
- Facie porosa
- Montículos (los diámetros de los montículos oscilan entre 40 cm y 1,5 m con espesores de entre 10 y 40 cm.)
- Brechas hidrotermales cementadas (asociadas a erupciones hidrotermales, cementadas por minerales hidrotermales, formadas por clastos que van de mm hasta 20 cm, dominadas por fragmentos líticos andesíticos y basálticos, con presencia de restos óseos de animales, fragmentos de obsidiana y cerámica prehispánica; los espesores van de 20

cm y están expuestas discontinuamente en manchas que alcanzan hasta 30 m de diámetro).

- Minerales
- Facies semivítreas: Ópalo, Cristobalita, Tridimita, Cuarzo, Estilbita, Albita y Clinoptilolita.
- Ópalo, Cuarzo, Haloisita, Albita, Heulandita, Andesina, Magnetita, Halita y Sanidino.

## **Geoquímica**

### **Geoquímica de aguas**

De acuerdo con Gutiérrez Negrín et.al., (1989) en la zona de Los Negritos las aguas de las manifestaciones hidrotermales son de tipo clorurado sódico con concentraciones de boro que oscilan entre 14 y 67 ppm, esto es igual en la zona de Ixtlán de los Hervores con la diferencia de que allí las concentraciones de boro varían entre 5 y 44 ppm.

### **Geoquímica de gases**

En los Negritos los volcanes de lodo descargan gases constituidos principalmente por CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>S y una pequeña proporción de CH<sub>4</sub>. Las características químicas de las descargas superficiales calientes en Los Negritos son consistentes con la presencia de un sistema superior de agua caliente (espesor de unos 750 m) con un depósito de vapor subyacente que suministra el calor y algunos de los componentes químicos. El sistema hidrotermal parece autosellarse mediante la deposición de sílice y otros minerales en los sedimentos lacustres superficiales o en los basaltos inmediatamente inferiores. Las características de autosellado, combinadas con el calor procedente de un depósito de vapor profundo, explicarían satisfactoriamente tanto la producción relativamente pequeña de calor de Los Negritos e Ixtlán de los Hervores como las violentas erupciones freáticas que se producen de vez en cuando (Banwell y Gómez, 1970).

En la zona de Ixtlán de los Hervores el análisis químico del gas recolectado en las fuentes termales encontró altas concentraciones de CO<sub>2</sub>, N<sub>2</sub> y gases inertes y bajas concentraciones de H<sub>2</sub>S, CH<sub>4</sub>, CO y H<sub>2</sub>. Las aguas termales en la zona de Ixtlán de los Hervores tienen una distribución química uniforme, mientras que en El Salitre hay una mayor variabilidad. (Banwell y Gómez *op. cit*).

## **Temperaturas**

### **Temperaturas superficiales**

En la zona de Los Negritos de acuerdo con Gutiérrez Negrín et al. (1989) las temperaturas superficiales varían entre 30 y 82°C mientras que Banwell y Gómez (1970) reportan temperaturas

superficiales de 36–90 °C. Por otro lado, en la zona de Ixtlán de los Hervores las temperaturas superficiales están entre 45–100 °C. (Banwell y Gómez, *op. cit.*)

### Temperaturas de manifestaciones hidrotermales

En la zona de Los Negritos, las fumarolas de vapor seco tienen temperaturas que oscilan entre los 75 y los 95°C, y la temperatura de las pozas burbujeantes oscila entre 30 y 60°C. En la zona de Ixtlán de los Hervores los manantiales termales tienen temperaturas entre 60 y 95°C, la temperatura de los volcanes de lodo oscila entre 80 a 92°C y las emisiones de vapor y gas formando piscinas burbujeantes calientes entre 80 a 95°C. (Banwell y Gómez, 1970).

### Temperaturas de pozos exploratorios

En la zona de los Negritos se perforaron tres pozos de exploración hasta una profundidad máxima de 577 m, donde se midió una temperatura máxima de 140 °C. Mientras que, en la zona de Ixtlán de los Hervores a la profundidad de 577 m, se midió una temperatura máxima de 140 °C (Banwell y Gómez, 1970; Viggiano Guerra y Gutiérrez Negrín, 2006). Gutiérrez Negrín et al. (1989) reportan que CFE perforo nueve barrenos exploratorios en 1969 a profundidades entre 120 y 630 m, en el más caliente de los cuales se midieron 164°C a 360 m de profundidad, aunque otro de ellos registró 120°C a sólo 110 m de profundidad.

### Temperaturas de equilibrio

**Tabla 7.** *Temperaturas de equilibrio en la zona de Ixtlán de los Hervores calculadas con geotermómetro de K-Na, Na-K-Na y geotermómetro de gases de D'Amore-Panichi registradas por Tello (1986) y Gutiérrez Negrín et al. (1989) y Gutiérrez Negrín (2007).*

Geotermómetro	Temperaturas de fondo °C	Reportadas por
K-Na	169–220	(Tello,1986)
Na-K-Ca	153–198	(Tello,1986)
gases de D'Amore-Panichi	218°	(Gutiérrez Negrín et al,1989 y Gutiérrez Negrín, 2007).

**Tabla 8.** *Temperaturas de equilibrio en la zona de Los Negritos calculadas con geotermómetro de K-Ca y geotermómetro de gases de D'Amore-Panichi registradas por Tello (1986) y Gutiérrez Negrín et.al. (1989).*

Geotermómetro	Temperaturas de fondo °C	Reportadas por
K-Ca	entre 156 y 243°	(Tello,1986)
gases de D'Amore-Panichi	219	(Gutiérrez Negrín et al,1989)

## Hidrología

La cuenca de Chapala ocupa un área de más de 4252 km<sup>2</sup> y contiene varios ríos (Figura 23) como el Lerma y el Duero. Debido a que la cuenca es cerrada, el lago de Chapala tiene una influencia importante en las zonas geotérmicas y en la posición del nivel freático. Los registros meteorológicos indican una precipitación anual que varía de 581.2 a 1038.1 mm, y temperaturas máximas y mínimas de 35°C y 9.5°C respectivamente, con una media de 27°C. En esta zona no existe drenaje libre ni externo, lo que resulta en frecuentes ascensos del nivel freático y la formación de numerosas zonas pantanosas (Valle et al., 1970).

En el Valle de Ixtlán la presencia de antiguo material volcánico crea las condiciones geohidrológicas óptimas para mantener dos niveles freáticos separados que consisten en la recarga de esta zona. El nivel freático más superficial se encuentra a una profundidad de 1,2 m, con una recarga complementada con escorrentía, que tiene una tasa de infiltración de alrededor del 90%, fluyendo hacia el lago de Chapala. Mientras el nivel freático más profundo, corresponde a un acuífero resultante de la configuración estructural tipo graben que permite una recarga en dirección NO-SE que tiene un contacto directo con una posible fuente de calor a profundidad. (Banwell y Gómez, 1970). La diferencia de niveles hidrostáticos es sugerida dada la formación de geiseros y manantiales termales con periodos de quietud y actividad con una duración periódica pero variable con las estaciones del año (Banwell, *op. cit.*).

En la zona de Los Negritos, la actividad postvolcánica más reciente ocurrió en 1902, tras una serie de terremotos que desencadenaron una violenta explosión. Una nube de vapor y rocas trituradas se elevó desde el centro del valle, creando una enorme cavidad en forma de embudo invertido. En los alrededores, se encontraron depósitos de minerales como calcita, anhidrita, travertino, calcedonia, cuarzo, basalto vesicular, obsidiana y riolita. Con el tiempo, el cráter se llenó de agua meteórica, dando lugar al lago de La Alberca, que se mantiene lleno durante todo el año (Banwell, *op. cit.*).

En la Figura 23, se observa que el río Duero, un río perenne, sigue el curso de la falla Ixtlán. El río Duero es un cauce de agua que mantiene un flujo continuo a lo largo de todas las estaciones del año, lo que lo distingue de otros ríos en el entorno. La zona topográfica circundante exhibe numerosos ríos intermitente, experimentan variaciones significativas en su caudal a lo largo del año y están influenciados por factores climáticos y estacionales, lo que les confiere un carácter menos constante en términos de flujo de agua.

## Mapa Hidrológico de la Zona de Estudio - Los Negritos-Ixtlán de los Hervores

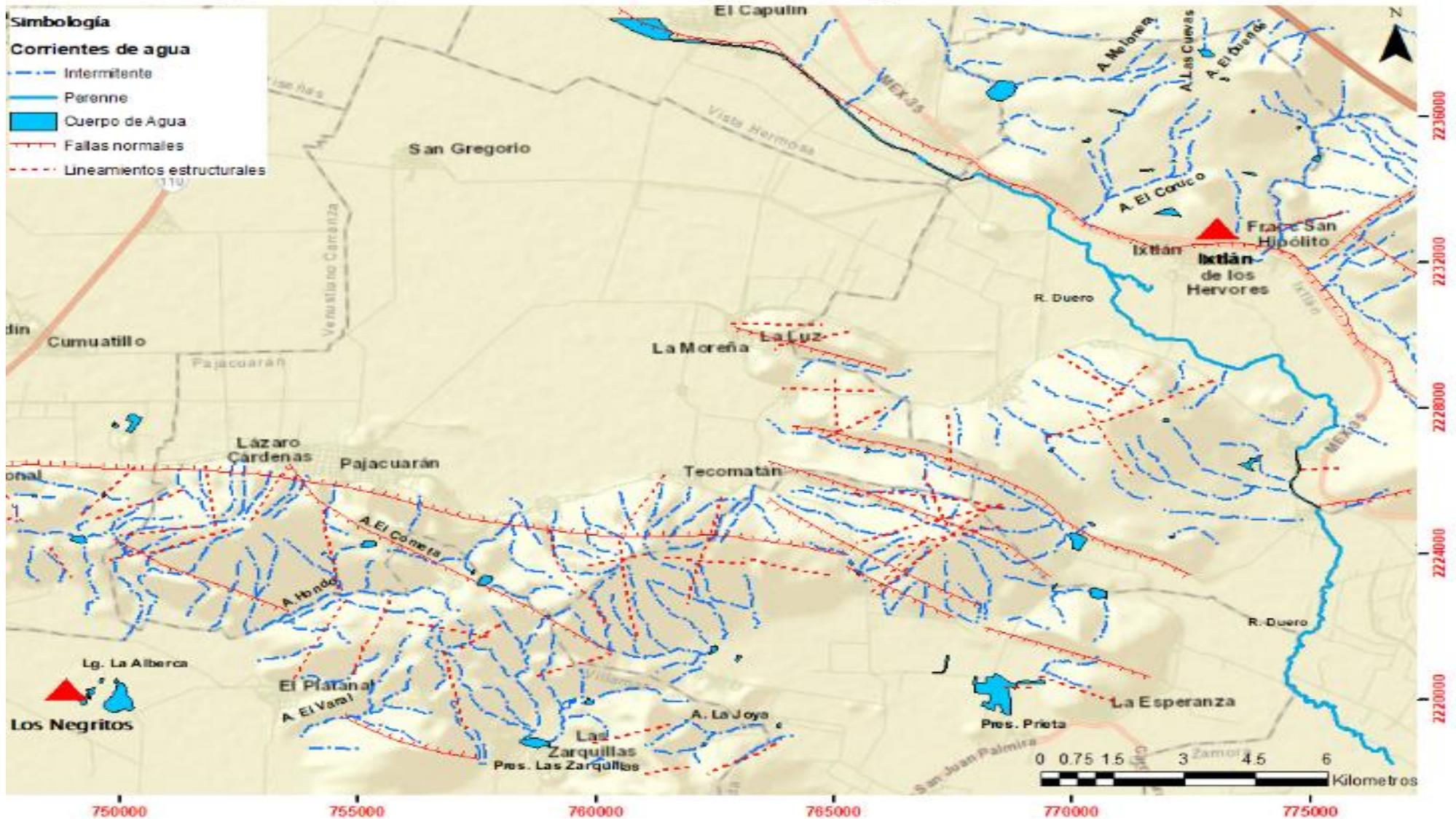
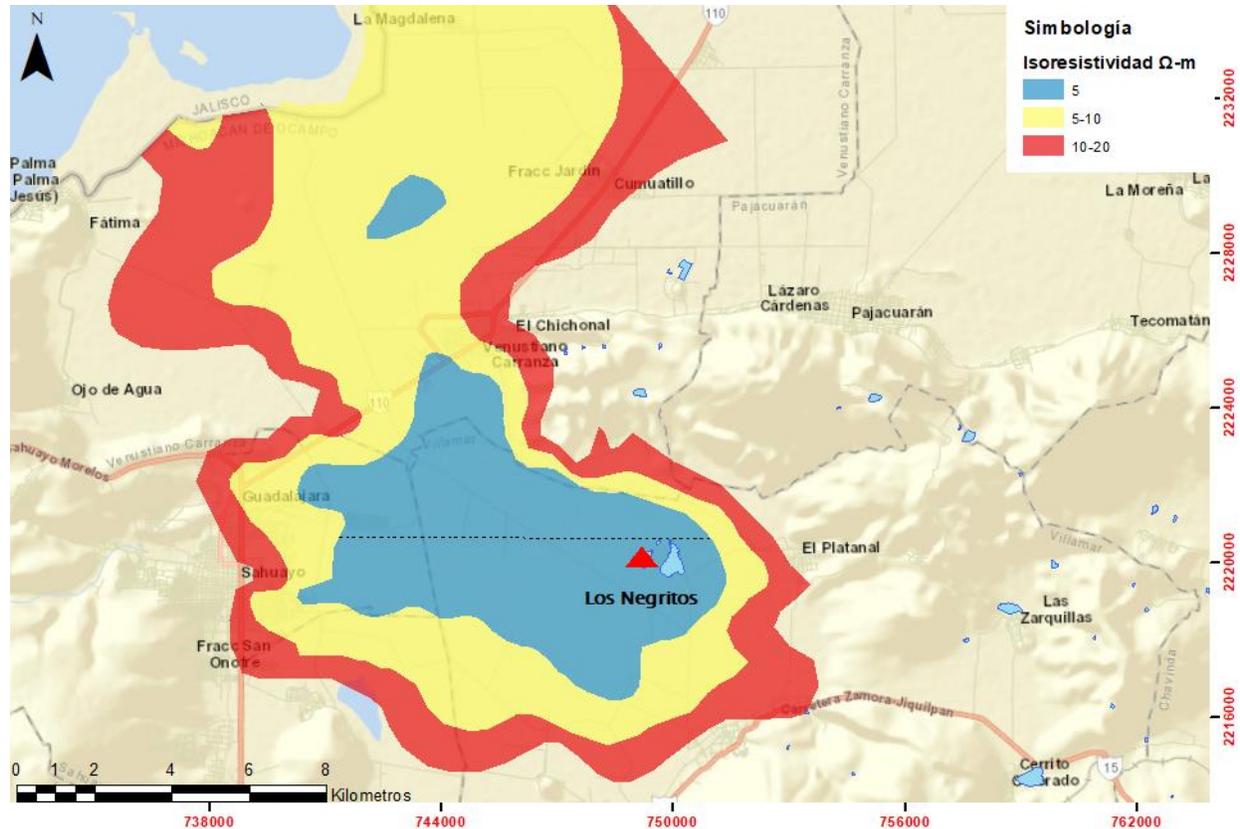


Figura 23. Mapa hidrológico de la zona de Los Negritos-Ixtlán de los Hervores, las corrientes de agua perenne se representan mediante líneas continuas azules, las corrientes intermitentes con líneas discontinuas del mismo color. Las características geográficas como arroyos (A.), lagunas (Lg) y presas (Pres) se identifican mediante polígonos también de color azul. Adicionalmente, en el mapa se resaltan las fallas normales mediante líneas de color rojo, y los lineamientos estructurales se marcan con líneas discontinuas del mismo tono.

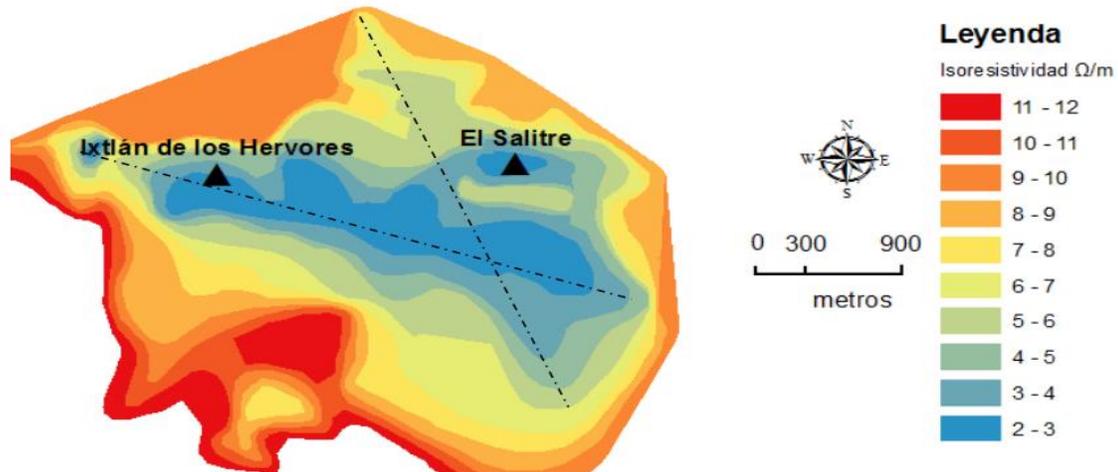
## Geofísica

Banwell y Gómez, (1970) mencionan de acuerdo con el mapa de isoresistividad de la zona de Los Negritos que a continuación se muestra (Figura 24) el área de baja resistividad ( $<5 \Omega \cdot m$ ) cubre  $40,7 \text{ km}^2$ . Está ubicada sobre sedimentos lacustres de 400 a 500 m de espesor y está orientada de E-O, paralela al principal sistema de fallas de la región. Esta baja resistividad está asociada a la presencia de minerales con alta conductividad (arcillas).



**Figura 24.** Mapa de isoresistividad de la zona Los Negritos, la línea punteada muestran las tendencias E-O de la anomalía de baja resistividad. Información obtenida de Banwell y Gómez, (1970).

En cuanto a la zona de Ixtlán de los Hervores, Banwell y Gómez, (1970) mencionan, de acuerdo con el mapa de isoresistividad que se muestra en la Figura 25, existe una zona de baja resistividad ( $<5 \Omega \cdot m$ ) que abarca  $3,5 \text{ km}^2$  y se extiende sobre los sedimentos del lago en dirección NO-SE.



**Figura 25.** Estudios de resistividad realizados por CFE en Banwell y Gómez (1970), re-interpolados cada  $1\Omega/m$ . Las líneas punteadas muestran las tendencias NO-SE y NON-SES de la anomalía de baja resistividad que presenta concordancia con la Falla Ixtlán y la distribución de manifestaciones termales superficiales (Gaspar Patarroyo, 2017).

### Tipo De Suelo y Vegetación

Como se observa en la Figura 26 el suelo predominante en la mayor parte de la zona de estudio es el vertisol pélico, conocido por su alto contenido de arcilla, además, se observa la presencia de litosoles en las áreas con topografía volcánica, que son suelos poco desarrollados que suelen tener una capa superficial de roca o material volcánico. Los vertisoles crómicos están presentes cerca de la localidad de Pajacuarán, los feozem haplicos en la zona de Ixtlán de los Hervores son suelos fértiles y adecuados para la agricultura debido a su contenido de materia orgánica y nutrientes. Estas características del suelo pueden tener un impacto significativo en las prácticas agrícolas y la gestión de tierras en la zona de estudio. Los suelos son profundos, pero se ven afectados por la capa freática, dando lugar a suelos con diferentes grados de alteración por hidratación o deposición de sales (Valle, 1970). El pH del suelo oscila entre 4.25 y 8.5. Las densidades aparentes de la mayoría de los suelos oscilan entre 0,42 y 1,30; las densidades reales (secas) del suelo, entre 1,37 y 2,24. Las texturas varían de arcilla arenosa granular a arcillosa.

Los porcentajes de materia orgánica varían del 0,51 al 11,21% (Valle, 1970). En cuanto al uso y tipo de suelo (ver Figura 27), en la topografía plana predomina la agricultura anual y semipermanente. En contraste, en la topografía volcánica se observa una vegetación secundaria arbustiva de selva baja caducifolia, selva baja caducifolia, agricultura de temporal y pastizal inducido. Los asentamientos humanos presentes en esta área incluyen San Gregorio, Cuamatillo, Pajacuarán, El Platanal, Las Zarquillas, Tecomán, La Luz e Ixtlán de los Hervores. Las localidades más relevantes para esta tesis debido a su proximidad a las alteraciones hidrotermales son El Platanal, Lázaro Cárdenas, Pajacuarán e Ixtlán de los Hervores.

# Mapa Edafológico de la Zona de Estudio "Los Negritos-Ixtlán de los Hervores"

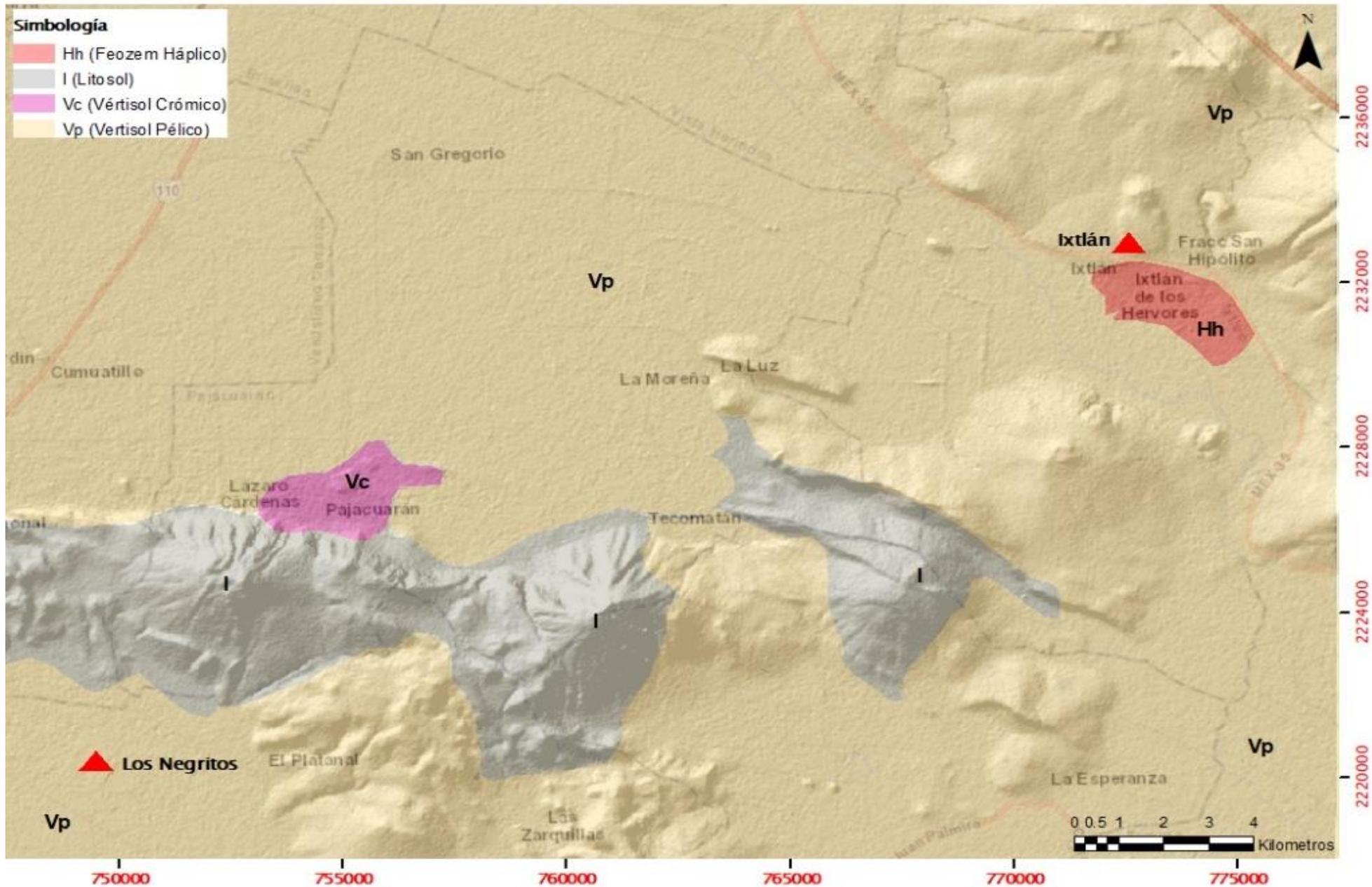


Figura 26. Mapa Edafológico de la Zona de Estudio "Los Negritos-Ixtlán de los Hervores".

# Mapa de Uso de Suelo y Vegetación de la Zona de Estudio “Los Negritos–Ixtlán de los Hervores”

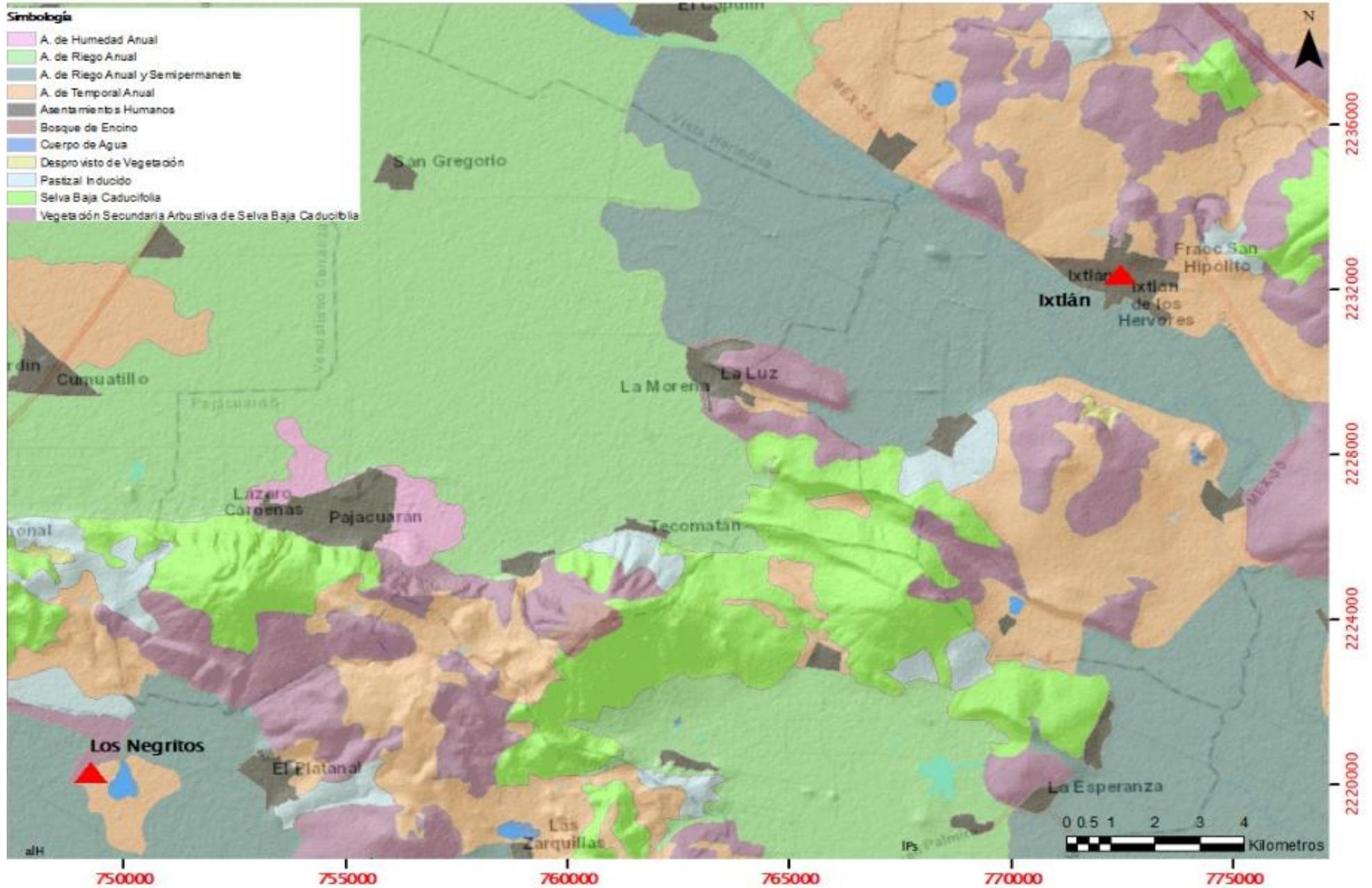


Figura 27. Mapa de Uso de suelo y vegetación de la Zona de Estudio “Los Negritos–Ixtlán de los Hervores”.

## Usos de la Geotermia en la Zona de Estudio

En la zona de Ixtlán de los Hervores, se ha utilizado la energía geotérmica con fines recreativos y balneológicos, principalmente a través del Géiser de Ixtlán. Un pozo exploratorio perforado en 1957 a una profundidad de 50 m fluyó de manera intermitente durante más de 45 años, siendo conocido como el Géiser de Ixtlán. En el año 2005, este pozo fue reemplazado por otro perforado por la comunidad a una profundidad de 149 m, según lo reportado por (Gutiérrez Negrín et al., 1989 y Gutiérrez Negrín, 2007).

En cuanto a la zona de Los Negritos, hasta el momento no se ha reportado ningún uso de la energía geotérmica. Sin embargo, a pesar de la falta de proyectos geotérmicos en la zona, existe una aceptación pública y la idea de aprovechar la zona de Los Negritos es muy atractiva para la población local. Esto se debe a que la comunidad espera que haya un mayor desarrollo económico en esta región, lo que podría mejorar la calidad de vida y las oportunidades de empleo (González y Olguín, 2016).

## Potenciales Preliminares

Banwell y Gómez (1970) argumentan que el potencial geotérmico en la zona de Ixtlán de los Hervores es limitado en un área de  $5 \Omega \cdot m$  ( $2.3 \text{ km}^2$ ), con un potencial de 150 megavatios por año. Al expandir el área a  $10 \Omega \cdot m$ , el potencial aumentaría a 420 megavatios por año; indican que el recurso podría ser más adecuado para aplicaciones industriales en lugar de la generación de energía eléctrica.

Explican que en la zona de los Negritos el potencial energético de un sistema de agua caliente que cubra una superficie igual a la de la anomalía de resistividad de  $5 \Omega \cdot m$  ( $40.7 \text{ km}^2$ ) y se extienda hasta una profundidad de 750 m es de aproximadamente 30,000 MW-año, suponiendo una eficacia de extracción del 25% del rendimiento teórico de la energía mecánica. Esto mantendría una planta generadora de 600 MW durante un periodo de 50 años.

## Metodología

### Materiales

Hardware y software: se utilizó un equipo de cómputo Dell Inc Inspiron 3421, con 12 GB de memoria RAM instalada; para el procesamiento y visualización de la información se utilizaron tres programas: ENVI 5.3, TerrSet2020 y ArcGIS 10.5. Los datos e información espacial descargada se presentan en la siguiente tabla:

**Tabla 9. Datos e información espacial descargada.**

Título del mapa generado	Nombre de la capa generada	Datos e Información espacial descargados	Fuente de Descarga	Formato de Descarga	Autor de la Información espacial
<b>Zona de Estudio: "Los Negritos-Ixtlán de los Hervores"</b>	Estado de Michoacán	División política estatal de México 1:250000. Versión 2	CONABIO	SHAPEFILE	CONABIO 2018
	Municipio de Villamar Municipio de Ixtlán	División Política Municipal, 1250000.2018	CONABIO	SHAPEFILE	INEGI, (01/06/2018)
<b>Mapa Geológico de la Zona de Estudio "Los Negritos-Ixtlán de los Hervores"</b>	Volcanes Fallas Normales	Carta Geológica Villa Chavinda F-13-D-88 Escala 1:50 000.1973 México	INEGI	PDF	CETENAL (Comisión de Estudios del Territorio Nacional)
	Litología	Artículo: Structural control on hydrothermal upwelling in the Ixtlán de los Hervores geothermal area, Mexico	Journal of Volcanology and Geothermal Research	PDF	Olvera et. al., 2020
<b>Mapa Hidrológico de la Zona de Estudio "Los Negritos-Ixtlán de los Hervores"</b>	Corrientes de agua Cuerpo de agua	Conjunto de datos vectoriales de información topográfica F13D88 (Villa Chavinda) escala 1:50 000 serie III. Mich.	GOB.MX	SHAPEFILE	INEGI

<b>Mapa edafológico</b> <b>Zona de Estudio "Los Negritos- Ixtlán de los Hervores"</b>	Edafología	Conjunto de datos vectoriales de información topográfica F13D88 (Villa Chavinda) escala 1:50 000 serie III. Mich.	GOB.MX	SHAPEFILE	INEGI
<b>Mapa de uso de suelo y vegetación</b> <b>Zona de Estudio "Los Negritos- Ixtlán de los Hervores"</b>	Uso de suelo y vegetación	Conjunto de datos vectoriales de información topográfica F13D88 (Villa Chavinda) escala 1:50 000 serie III. Mich.	GOB.MX	SHAPEFILE	INEGI

### **Preprocesamiento**

El preprocesamiento de la imagen fue llevado a cabo con el objetivo de restaurar la información de la escena, ya que los valores verdaderos de la superficie terrestre estaban afectados por los fenómenos y procesos físicos que ocurren en la atmósfera y superficie al incidir y reflejar la energía electromagnética. Las etapas del preprocesamiento realizado incluyeron:

1. Recopilación de información bibliográfica
2. Adquisición de la imagen
3. Análisis estadístico inicial
4. Delimitación y recorte de la zona de estudio
5. Corrección radiométrica
6. Apilamiento de capas
7. Cambio de formato de la información BSQ a Bill
8. Corrección atmosférica
9. Reescalamiento

### **Recopilación de Información Bibliográfica**

Se llevó a cabo la recopilación de información bibliográfica, la cual abarcó diferentes aspectos. En el aspecto teórico se recopilaron conceptos fundamentales, principios físicos, así como las metodologías y técnicas utilizadas en el preprocesamiento y procesamiento de imágenes remotas con el objetivo de tener una comprensión sólida de los fundamentos teóricos de la percepción remota; también se recopiló información de aspectos técnicos, se investigaron los distintos softwares utilizados en el procesamiento de imágenes remotas y por último se revisaron metodologías y enfoques analíticos aplicables para el estudio de la imagen con el objetivo de obtener información relevante y precisa en el análisis.

### **Adquisición y características de la Imagen**

Se adquirió una imagen satelital del portal de datos Earth Explorer, perteneciente a USGS, la escena proviene del sensor ASTER con nivel de procesamiento L1T, su Id es: AST\_L1T\_00305012007173539\_20150519083522\_103067 y path/row: 28/46.

Se trata de una imagen multiespectral con las siguientes características: dimensiones de 60 km x 60 km, una estructura de información en formato BSQ, con 5533 columnas y 4879 filas. La fecha de adquisición fue el 2007/05/01 debido a que los datos ASTER SWIR adquiridos desde abril de 2008 no son utilizables y muestran saturación de valores y rayas severas, y el tiempo de adquisición fue a las 17:35:39.375 horas, los datos se recopilaron durante el día, y la cobertura de nubosidad de la escena es del 1%. La imagen cuenta con 14 bandas (3 bandas visibles e infrarrojas cercanas, 6 bandas infrarrojas de onda corta y 5 bandas infrarrojas térmicas). La información está en números digitales y están proyectados en el sistema de coordenadas Transversa de Mercator, WGS 1984 UTM Zona 13N. El formato de descarga de la imagen fue HDF.

Para examinar la información adquirida, se verificó la información de la escena, como la cantidad de bandas, la estructura de la información, el día y hora de adquisición, las coordenadas, la información espectral, entre otros detalles. El objetivo de esta verificación fue asegurarse de que los datos fueran coherentes con lo esperado del sensor, lo que permitió trabajar con datos confiables y funcionales. La Figura 28 muestra la imagen obtenida, permitiendo una visualización de los datos capturados en esta escena satelital. Esta imagen validada y coherente con lo esperado del sensor servirá como base fundamental para el análisis y estudio posteriores en este proyecto.

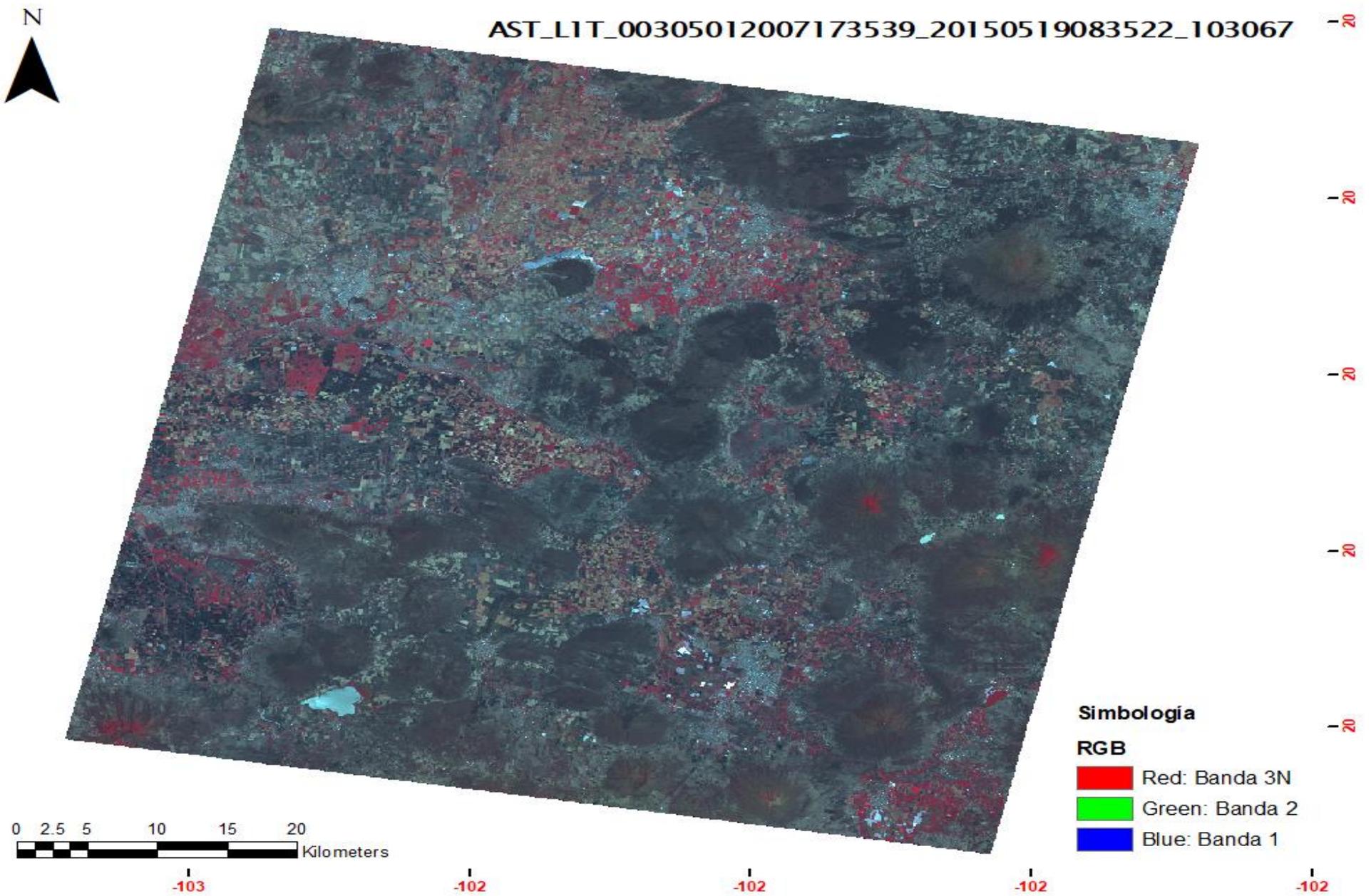


Figura 28. Imagen ASTER con Id: AST\_LIT\_00305012007173539\_20150519083522\_103067, sin ningún procesamiento con la composición en falso color RGB: 321.

### **Análisis Estadístico Inicial**

Se realizó un análisis estadístico básico inicial que incluyó el cálculo del valor mínimo y máximo, así como la media como medida de tendencia central y la desviación estándar como medida de dispersión, con el fin de conocer la distribución de la información, esta comprensión resulta esencial para identificar patrones, tendencias y anomalías en la información.

### **Delimitación y Recorte de la Zona de Estudio**

La delimitación de la zona de estudio se realizó con base en la información bibliográfica previamente recolectada que incluye datos sobre manifestaciones geotérmicas superficiales reportadas, características tectónicas, geológicas, geoquímicas, etc. Se delimitó la zona de estudio con polígono rectangular que se generó con el programa ENVI 5.3 en el cual engloba las zonas de interés, que se utilizó como base para recortar la imagen multiespectral, se recortaron las bandas de interés para esta tesis, las bandas del VNIR (bandas 1,2,3N) y SWIR (bandas 4,5,6,7,8,9). La zona de estudio se sitúa entre los paralelos 20°02' y 20°13' de latitud norte; los meridianos 102°20' y 102°38' de longitud oeste abarca un área de 625.33 km<sup>2</sup> y está situada a una elevación media de 1582 m.s.n.m.

### **Corrección Radiométrica**

Se realizó una corrección radiométrica para ajustar los valores de los píxeles a una escala absoluta de radiancia. Este proceso se llevó a cabo utilizando el programa ENVI 5.3. Primero se corrigieron las bandas del VNIR y posteriormente las del SWIR utilizando un factor de escala de 0.10. Como resultado, la información final de las bandas se obtuvo en unidades de radiancia (W/m<sup>2</sup>/μm/sr) y se guardó en formato BIL.

### **Apilamiento de Capas**

Las bandas VNIR tienen una resolución espacial de 15 m, mientras que las bandas SWIR poseen una resolución espacial de 30 m. Por lo tanto, se llevó a cabo un remuestreo con el objetivo de igualar la resolución espacial de todas las bandas espectrales a 15 m. Esto se hizo para asegurar que los datos sean interpretados y analizados de manera uniforme, y para permitir una comparación adecuada de los valores espectrales entre las diferentes bandas.

### **Cambio de Formato de la Información de BSQ a BIL**

Al apilar las capas, la estructura de la información pasa de BIL a BSQ. Sin embargo, para realizar la corrección atmosférica, es necesario utilizar la información en formato BIL. Por lo tanto,

se llevó a cabo la transformación de bandas secuenciales a bandas intercaladas por línea para asegurar la correcta aplicación de la corrección atmosférica en el procesamiento de los datos.

### **Corrección Atmosférica FLAASH**

Se realizó una corrección atmosférica absoluta con el objetivo de reducir los efectos de la atmósfera y obtener datos precisos de la superficie terrestre en la escena. Se realizó la corrección FLAASH (Fast Line-of-sight Atmospheric Analysis of Spectral Hypercubes) disponible en ENVI 5.3, FLAASH se basa en MODTRAN4 (MODerate resolution atmospheric TRANsmission), el cual busca eliminar los efectos de la absorción y dispersión, causados por las moléculas y partículas atmosféricas en suspensión, de la radiancia recibida por el sensor y convertir esa radiancia a valores de reflectividad de superficie. (Berk, et al., 2000).

Para realizar el procesamiento, se ingresaron los parámetros necesarios para la corrección atmosférica, algunos de los cuales fueron obtenidos del metadata, como el tipo de sensor (ASTER) altitud del sensor (705 km), las coordenadas del centro de la escena (20° 8' 8.01" y -102° 29' 28.14"), así como la fecha y hora en que se recopiló la escena (1 de mayo de 2007 a las 17 horas 35 minutos y 39 segundos). La estimación de la elevación media de la escena (1582 m.s.n.m.) se llevó a cabo utilizando el modelo digital de elevación adquirido del satélite ALOS (Advanced Land Observing Satellite) PALSAR (The Phased Array type L-band Synthetic Aperture Radar). Se seleccionó el modelo atmosférico tropical de acuerdo con un modelo de temperatura superficial de latitud estacional y se optó por el modelo de aerosol rural. Es importante resaltar que no se hizo uso del método de recuperación de la cantidad de aerosoles proporcionado por FLAASH, ya que no es apropiado aplicarlo a datos de ASTER, aunque las bandas de ASTER cubren la región requerida para el método de recuperación de píxeles oscuros en tierra, el ancho de banda de la Banda 2 es bastante amplio (660 nm) y probablemente incluirá el borde rojo de la vegetación, lo que podría sesgar significativamente la estimación de la visibilidad (Exelis Visual Information Solutions, Inc., 2015). Finalmente se asignó una visualización inicial de 40 km, y se utilizó un factor de escala para todas las bandas, establecido en 1, para no calcular factores de escala diferentes para cada banda y hacer más fáciles las comparaciones espectrales en el futuro.

### **Reescalamiento**

Después de realizar la corrección atmosférica, fue necesario reescalar los valores de la información en un rango de 0 a 1, con el fin de facilitar la comparación con información espectral de bibliotecas. La fórmula utilizada fue la siguiente:

$$\rho = (b1 \leq 0) * 0 + (b1 \geq 10000) * 1 + (b1 > 0 \text{ and } b1 < 10000) * \text{float}(b1) / 10000$$

**Donde:**

$\rho$  = reflectancia de la imagen

**b1** = representa el valor original de la banda que se está corrigiendo

## Procesamiento

El procesamiento consistió en aplicar tres tipos de realce a la imagen preprocesada: un realce espectral, uno de contraste y uno espacial. El realce espectral se realizó mediante las técnicas cociente de bandas, análisis de componentes principales y el mapeo de ángulo espectral. El realce espacial se llevó a cabo mediante la generación de un mapa de sombras, y finalmente, el realce de contraste se logró mediante el ajuste del histograma.

### 10. Realce espectral

- Cociente de bandas
- Análisis de componentes principales
- Mapeo de ángulo espectral

### 11. Realce espacial

### 12. Realce de contraste

## Realce Espectral

### Cocientes de Bandas

Los cocientes de banda, también conocidos como bandas ratio, son un método de realce espectral que consiste en una operación aritmética entre el numerador, que es el valor de alta reflectancia del material, y el denominador, que es el valor de alta absorbancia. Esto permite dividir los valores de reflectancia entre los de absorbancia, lo que aumenta los valores de brillantez mientras que atenúa los valores de absorbancia. Una ventaja de utilizar la razón de bandas es que elimina los efectos de algunos errores radiométricos del sensor y los cambios aleatorios en la irradiancia de la escena causados por diferencias atmosféricas y topográficas a lo largo de una escena de datos (Slater, 1980).

Para la identificación de zonas con alteraciones hidrotermales, se decidió calcular los cocientes de banda para los óxidos, hidroxilos y vegetación. Se seleccionaron las bandas en las que cada material mostrara alta reflectancia y alta absorbancia, a partir de estas bandas, se realizaron las operaciones aritméticas correspondientes para resaltar las características espectrales de los diferentes materiales presentes en la escena, con el objetivo de detectar posibles alteraciones hidrotermales. A continuación, se presentan las fórmulas, las bandas utilizadas y la parte del espectro electromagnético a la que pertenecen

$$\text{Cociente de realce de óxidos} = \frac{\text{Banda 2 (Visible)}}{\text{Banda 1 (Visible)}}$$

$$\text{Cociente de realce de hidroxilos} = \frac{\text{Banda 4 (Infrarrojo medio)}}{\text{Banda 9 (Infrarrojo medio)}}$$

$$\text{Cociente de realce de vegetación} = \frac{\text{Banda 3N (Infrarrojo cercano)}}{\text{Banda 2 (Visible)}}$$

### Análisis de Componentes Principales

El análisis de componentes principales o PCA (Principal Component Analysis) por sus siglas en inglés, es una técnica matemática en la que el objetivo principal es caracterizar un gran grupo de variables en un nuevo conjunto más pequeño, sin perder una cantidad significativa de información original (Figura 29). Implica el análisis de estructuras de datos multiespectrales para descubrir interrelaciones complejas entre características espectrales, discernir fuentes independientes de variabilidad y descartar información redundante presente en las imágenes multibanda (reducción de dimensionalidad).

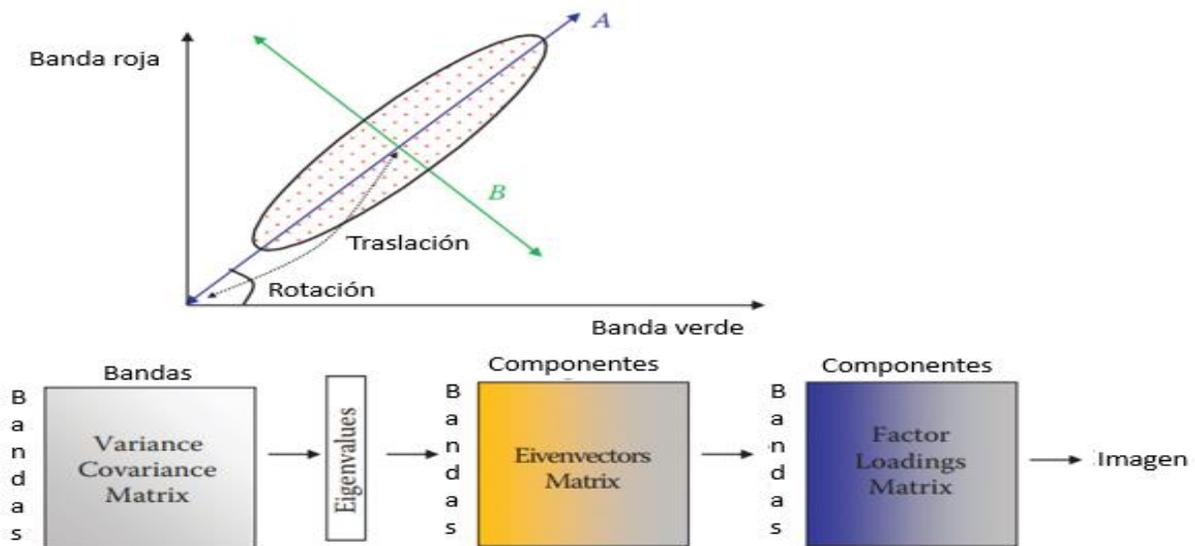


Figura 29. Proceso de obtención de componentes principales (Chuvioco, 2016).

Crosta y McM. Moore (1989) describen una metodología llamada FPCS (Feature Oriented Principal Components Selection), esta se basa en el examen de las cargas de eigenvectores de PCA para decidir qué componentes principales concentrarán información directamente relacionada con las firmas espectrales teóricas de objetivos específicos (Loughlin, 1991).

Se utilizó la técnica de Crosta y McM. Moore para determinar las bandas de entrada según las respuestas espectrales de cada material, se ingresaron 4 bandas de entrada y se obtuvieron 4 componentes de salida independientes. Se analizó la matriz de carga para seleccionar la componente que aporte la mayor información del material buscado. Teniendo en cuenta la alta reflectancia y absorbancia de los materiales de interés se eligieron las bandas de entrada para el procesamiento, a continuación, se muestran las bandas seleccionadas (Tabla 10).

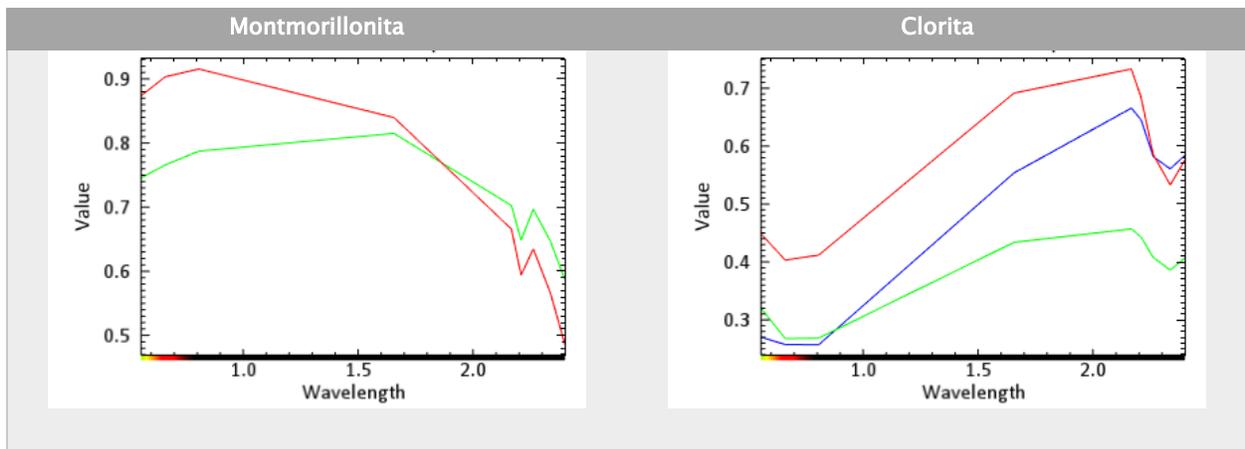
**Tabla 10.** *Bandas de entrada para óxidos, hidroxilos y vegetación para realizar el análisis de componentes principales*

Bandas de entrada para el PCA de óxidos	
Banda en la que presenta alta reflectancia	Banda en la que presenta alta absorbancia
2 (Visible)	1 (Visible)
Bandas de entrada para el PCA de vegetación	
Banda en la que presenta alta reflectancia	Banda en la que presenta alta absorbancia
3N (Infrarrojo cercano)	2 (Visible)
Bandas de entrada para el PCA de hidroxilos	
Banda en la que presenta alta reflectancia	Banda en la que presenta alta absorbancia
4 (Infrarrojo medio)	6 (Infrarrojo medio)
3N (Infrarrojo cercano)	9 (Infrarrojo medio)

### **Mapeo de Ángulo Espectral / Spectral Angle Mapper (SAM)**

SAM mide la similitud de un espectro objetivo con un espectro de referencia mediante un ángulo espectral (Kruse et al., 1993). Esta técnica se basa en la idea de que un espectro de reflectancia observado se puede considerar como un vector en un espacio multidimensional, donde el número de dimensiones equivale al número de bandas espectrales. Si la iluminación general aumenta o disminuye (quizás debido a la presencia de una mezcla de luz solar y sombras), la longitud de este vector aumentará o disminuirá, pero su orientación angular permanecerá constante. Para comparar dos espectros, como el espectro de un píxel de una imagen y un espectro de referencia de una biblioteca, se definen vectores multidimensionales para cada espectro y se calcula el ángulo entre los dos vectores. Si este ángulo es menor que un nivel de tolerancia dado, los espectros se consideran coincidentes (Lillesand et al., 2015).

Se decidió realizar un mapeo espectral de los minerales descritos en la bibliografía de Valle et al., (1970) que fueron Clorita y Montmorillonita. Se utilizó la imagen reescalada para trabajar con los valores de reflectancia y poder compararlos con las firmas espectrales. Se importaron las librerías espectrales disponibles en el programa ENVI 5.3, incluyendo la librería espectral de minerales de ASTER "Beckman 826" y la librería de la USGS "Beckman 430". Para obtener mayor precisión en la identificación del material buscado, se decidió utilizar un ángulo espectral de 0.1 entre el objetivo y el píxel. A continuación (Figura 30), se presentan los perfiles espectrales utilizados de la librería espectral ASTER Beckman 826.



**Figura 30.** *Perfiles espectrales utilizados de la librería espectral ASTER Beckman 826 para la técnica SAM. En el eje X se muestra la longitud de onda, mientras que en el eje Y se muestra la reflectancia en un rango de 0 a 1.*

### Realce Espacial

Se obtuvo un modelo digital de elevación del satélite ALOS PALSAR a través del portal ASF–Earthdata–NASA con el ID "ALPSRP251940390" en formato TIFF (Figura 31). El modelo tiene una resolución espacial de 12.5 m y una resolución radiométrica de 16 bits. Se recortó el modelo de elevación para que coincidiera con la zona de estudio y se le aplicó iluminación artificial para generar un modelo de sombras que hiciera más evidente los rasgos topográficos. El modelo de sombras se empleó para analizar e interpretar la escena en función de la escala de grises, y asistir en la identificación de las características morfológicas, por ejemplo, la presencia de lineamientos que pueden estar relacionados con estructuras geológicas como fallas.

# MDE de la Zona de Estudio "Los Negritos-Ixtlán de los Hervores"



Figura 31. MDE del satélite ALOS PALSAR descargado y recortado de acuerdo con la zona de estudio.

### **Digitalización de Lineamientos**

Con el realce espacial se pudieron identificar lineamientos, ya que se aumentaron y disminuyeron contrastes, dando variaciones de brillantez. Los lineamientos se digitalizaron en el software ArcMap 10.5.

La información generada de los lineamientos estructurales se correlacionó con los datos proporcionados por GeoInfoMex, que reporta la existencia de 5 fallas normales en la zona de estudio.

### **Realce de Contraste**

El realce de contraste, también conocido como ajuste del histograma (stretching), es un método que se utiliza para la visualización de información, consiste en distribuir la información en una escala de 0 a 255 para mejorar la apreciación de los detalles. Este método se aplicó en varios procesos de análisis de imágenes, incluyendo los cocientes de bandas, el análisis de componentes principales, el mapeo de ángulo espectral y el realce espacial. Para los cocientes de banda, se utilizó un stretch lineal con una saturación del 1.5%. En el análisis de componentes principales, se aplicó un stretch lineal con una saturación del 2%, mientras que en el realce espacial se utilizó un stretch de 1.5%.

### **Temperatura Superficial del Suelo**

La temperatura superficial del suelo o LST (Land Surface Temperature), es una medida que refleja la temperatura promedio de la superficie terrestre en un lugar y momento específicos, resultante de la absorción de la radiación solar por la superficie terrestre y su posterior re-emisión de calor. La estimación de la temperatura superficial terrestre en este estudio se basó en el método de los umbrales del NDVI (Índice de Vegetación Normalizado) que se fundamenta en la introducción de parámetros efectivos considerando una superficie dada como constituida por una mezcla de suelo desnudo y vegetación (Sobrino, 2001). Previo a aplicar la metodología mencionada se realizó una corrección radiométrica a las bandas TIR para convertir los números digitales a radiancia.

### **Temperatura de Brillo**

Se procedió a convertir la información de radiancia en temperatura de brillo. La temperatura de brillo es una medida que describe la cantidad de radiación en términos de la temperatura de un cuerpo negro hipotético que emite la misma cantidad de radiación en la misma longitud de onda. La temperatura de brillo puede depender en gran medida de la longitud de onda de la radiación o ser independiente de esta, según las propiedades de la fuente de radiación y cualquier absorción posterior (AMS, 2016).

$$T_b = \frac{K_2}{\ln\left(\frac{K_1}{L_\lambda}\right) + 1}$$

**Donde:**

$T_b$ : Temperatura de brillo en grados Kelvin

$L_\lambda$ : Radiancia espectral en el sensor (Radiancia en el satélite), unidad de medida (vatios / (metro cuadrado \* ster \*  $\mu m$ ))

$K_1$ : Es la constante de conversión térmica específica para cada banda termal (en vatios / metro cuadrado \* ster \*  $\mu m$ )

$K_2$ : Es la constante de conversión térmica específica para cada banda termal (en vatios / metro cuadrado \* ster \*  $\mu m$ )

$K_1$  y  $K_2$  son calculadas como (Jiménez Muñoz y Sobrino, 2010):

$$K_1 = \frac{C_1}{\lambda^5} \quad K_2 = \frac{C_2}{\lambda}$$

**Donde (Mohr et. al., 2015):**

$C_1$ : Primera constante de radiación =  $1.191 * 10^{-16} \text{ Wm}^2\text{sr}^{-1}$

$C_2$ : Segunda constante de radiación =  $1.4388 * 10^{-2} \text{ mK}$

$K_1$  y  $K_2$  se proporcionan en la siguiente tabla:

**Tabla 11.** Constantes  $K_1$  Y  $K_2$  de calibración de las bandas térmicas del satélite ASTER.

Banda	$K_1$ W m <sup>-2</sup> sr <sup>-1</sup> $\mu m^{-1}$	$K_2$ Kelvin
10	3024	1733
11	2460	1663
12	1909	1581
13	890	1357
14	646.4	1273

## NDVI

El Índice de Diferencia de Vegetación Normalizado o NDVI (Normalized difference vegetation index) (Rouse et al., 1974) es un índice usado para medir la diferencia normalizada entre las reflectancias del rojo y del infrarrojo cercano, proporcionando una medida sobre la cantidad, calidad y desarrollo de la cobertura vegetal y vigorosidad en áreas extensas. La temperatura superficial del suelo es sensible a la vegetación y a la humedad del suelo. Por lo tanto, resulta relevante destacar que estudios previos han demostrado la existencia de una relación entre el NDVI y las emisividades de los materiales terrestres (Jiménez et al., 2006).

Se calculó el NDVI para la estimación de la emisividad de la superficie terrestre utilizando las bandas del sensor ASTER. Se emplearon la banda del infrarrojo cercano, que corresponde a la banda 3N, y la banda roja, que corresponde a la banda 2. A continuación, se muestra la fórmula del NDVI:

$$NDVI = \frac{(NIR - (RED))}{(NIR + (RED))}$$

**Donde:**

**NDVI:** Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada

**ρSNIR:** Reflectancia de la banda Infrarrojo cercano (NIR)

**ρSRED:** Reflectancia de la banda roja (RED)

## Proporción de la Vegetación (Pv)

La proporción de vegetación es el porcentaje de la proyección vertical del dosel de la vegetación (incluyendo hojas, tallos y ramas) por unidad de área, se determinó la proporción de vegetación mediante la fórmula propuesta por Carlson y Ripley, (1997). El valor máximo estimado de NDVI para la vegetación más verde fue de 0.63, y el valor mínimo de NDVI presente en el suelo desnudo fue de 0.44.

$$Pv = \sqrt{\frac{NDVI - NDVI_{min}}{NDVI_{máx} - NDVI_{min}}}$$

**Donde:**

**Pv:** Proporción de la vegetación

**NDVI:** Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada

**NDVI<sub>máx</sub>:** Valor de NDVI máximo para la vegetación de mayor verdor

**NDVI<sub>min</sub>:** Valor de NDVI mínimo presente en el suelo desnudo

### Emisividad de la superficie terrestre

La emisividad ( $\epsilon$ ) es la medida de la eficiencia inherente de la superficie para convertir la energía calorífica en energía radiante fuera de la misma. La emisividad depende fundamentalmente de la composición, rugosidad, y el contenido en humedad de la superficie, además, varía con las condiciones de observación; la longitud de onda, la resolución del píxel y el ángulo de observación (Sobrino, 2000).

$$\epsilon = (m * Pv) + n$$

**Donde:**

$\epsilon$  = Emisividad

$Pv$  = Proporción de la vegetación

$m$  = Emisividad de la vegetación (0.0004)

$n$  = Emisividad del suelo (0.986)

### Temperatura Superficial del Suelo

La fórmula utilizada para calcular la temperatura superficial del suelo, según la metodología propuesta por Weng et al. y Schubring en 2004, es la siguiente:

$$T_s = \frac{T_b}{\left[1 + \left(\frac{\lambda * T_b}{c_2}\right) * \ln \epsilon\right]} - 273$$

**Donde:**

$T_s$ : Temperatura superficial del suelo en °C

$T_b$ : Temperatura de brillo

$c_2$ : constante de radiación  $h * \frac{c}{s} = 1.4388 * 10^{-2}$  m K

$h$ : Constante de Planck =  $6.626 * 10^{-34}$  Js

$c$ : Velocidad de la Luz =  $2.998 * 10^8$  m/s

$s$ : Constante de Boltzmann =  $1.38 * 10^{-23}$  J/K

$\epsilon$ : Emisividad de la superficie

$\lambda$ : Longitud de onda

## Resultados

### Preprocesamiento

#### Análisis Estadístico Inicial

Este análisis estadístico inicial muestra los valores mínimos, máximos, medios y desviaciones estándar de cada una de las nueve bandas de una imagen ASTER. Se puede observar en la Tabla 12 que los valores mínimos de todas las bandas son 0, mientras que el valor máximo es de 255,

excepto la banda 9 tiene un valor máximo de 227, lo que sugiere que ya han sido corregidas para los efectos de la atmósfera.

La media y la desviación estándar indican la distribución de los valores de píxeles dentro de cada banda. Se observa que la media varía entre 45.31 (banda 9) y 63.63 (banda 1), lo que sugiere que los valores de los píxeles en las diferentes bandas presentan diferencias en su intensidad. Además, la desviación estándar varía de manera similar a la media en cada banda. La desviación estándar más alta es la de la primera banda, lo que sugiere una mayor variabilidad en los valores de los píxeles en esta banda, mientras que la banda 9 tiene la desviación estándar más baja, lo que indica una menor variabilidad en los valores de los píxeles en esta banda.

**Tabla 12.** *Análisis estadístico inicial de la imagen ASTER.*

Bandas	Mínimo	Máximo	Media	Desviación estándar
Banda 1	0	255	63.63	49.29
Banda 2	0	255	56.62	45.63
Banda 3N	0	255	50.35	40.71
Banda 4	0	255	51.17	38.94
Banda 5	0	234	49.07	37.00
Banda 6	0	236	49.45	37.64
Banda 7	0	245	45.82	34.89
Banda 8	0	247	46.22	35.52
Banda 9	0	227	45.31	34.32

### Corrección Radiométrica

Los resultados estadísticos de la corrección radiométrica muestran los valores mínimos, máximos, medios y desviaciones estándar de cada una de las nueve bandas, la información se observa en valores de radiancia (Tabla 13).

En la Banda 1, los valores mínimos y máximos son 3.52 y 17.17, respectivamente, lo que indica una gran variabilidad en los valores de los píxeles en esta banda. La media es de 6.52, lo que significa que la mayoría de los valores de los píxeles se encuentran cerca de este valor. La desviación estándar es de 1.27, lo que sugiere que la distribución de los valores de los píxeles en esta banda no es bastante dispersa.

En la Banda 2, los valores mínimos y máximos son 2.48 y 17.98, respectivamente, y la media es de 6.00. La desviación estándar es de 1.68, lo que indica una distribución más dispersa que la Banda 1.

En la Banda 3N, los valores mínimos y máximos son 1.98 y 21.89, respectivamente, y la media es de 6.40. La desviación estándar es de 1.96, lo que indica una distribución aún más dispersa que las dos bandas anteriores.

En la Banda 4, los valores mínimos y máximos son 0.17 y 5.52, respectivamente, lo que indica una menor variabilidad en los valores de los píxeles en esta banda. La media es de 1.67 y la desviación estándar es de 0.29, lo que sugiere que los valores de los píxeles en esta banda están muy concentrados en torno a la media.

En las Bandas 5 a 9, los valores mínimos y máximos son bastante bajos, lo que indica que estas bandas contienen información de menor intensidad que las anteriores. Las medias y desviaciones estándar también son bastante bajas en estas bandas, lo que indica que los valores de los píxeles están bastante concentrados en torno a la media y hay poca variabilidad en los datos.

**Tabla 13.** *Resultados estadísticos de la corrección radiométrica de la imagen ASTER.*

Bandas	Mínimo	Máxima	Media	Desviación estándar
Banda 1	3.52	17.17	6.52	1.27
Banda 2	2.48	17.98	6.00	1.68
Banda 3N	1.98	21.89	6.40	1.96
Banda 4	0.17	5.52	1.67	0.29
Banda 5	0.25	1.55	0.52	0.09
Banda 6	0.19	1.43	0.47	0.09
Banda 7	0.19	1.44	0.41	0.08
Banda 8	0.04	1.01	0.29	0.06
Banda 9	0.07	0.69	0.22	0.04

### Corrección Atmosférica FLAASH

Se puede observar en la Tabla 14 que los valores mínimos de las bandas varían entre -4 y 0, lo que indica que algunos de los datos corregidos pueden ser negativos o cero. Los valores máximos varían entre 3330 y 8571, lo que sugiere que las bandas contienen información en diferentes rangos de intensidad.

La media de cada banda indica el valor promedio de los datos corregidos en esa banda. Se puede notar que la media aumenta gradualmente de la Banda 1 a la Banda 9, lo que indica que

la intensidad de la información aumenta a medida que se avanza en las bandas espectrales. Se puede observar que la desviación estándar es más alta en las bandas con valores máximos más altos (Banda 3N y Banda 4). Esto indica que la distribución de los datos en esas bandas es más amplia y que hay una mayor variabilidad en los valores de los píxeles. Por otro lado, las bandas con valores máximos más bajos (Banda 1 y Banda 2) tienen una desviación estándar más baja, lo que indica que los valores de los píxeles están más concentrados en torno a la media.

Con respecto a la corrección atmosférica FLAASH se estimó una cantidad promedio de vapor de agua presente en la escena de 1.8472 cm.

**Tabla 14.** Resultados estadísticos de la corrección atmosférica FLAASH aplicada a la imagen ASTER.

Bandas	Mínima	Máxima	Media	Desviación estándar
Banda 1	0	3330	1020.58	271.86
Banda 2	0	4166	1266.48	404.74
Banda3N	0	7348	2079.91	644.42
Banda 4	-4	8571	2583.27	460.54
Banda 5	-1	6537	2184.18	368.43
Banda 6	-1	6346	2071.12	391.89
Banda 7	-1	7340	2098.83	395.40
Banda 8	-1	6723	1945.30	410.06
Banda 9	-2	7287	2277.45	403.51

### Reescalamiento

El reescalado se realizó con el objetivo de estandarizar los valores de todas las bandas, permitiendo así su comparación con información de bibliotecas espectrales.

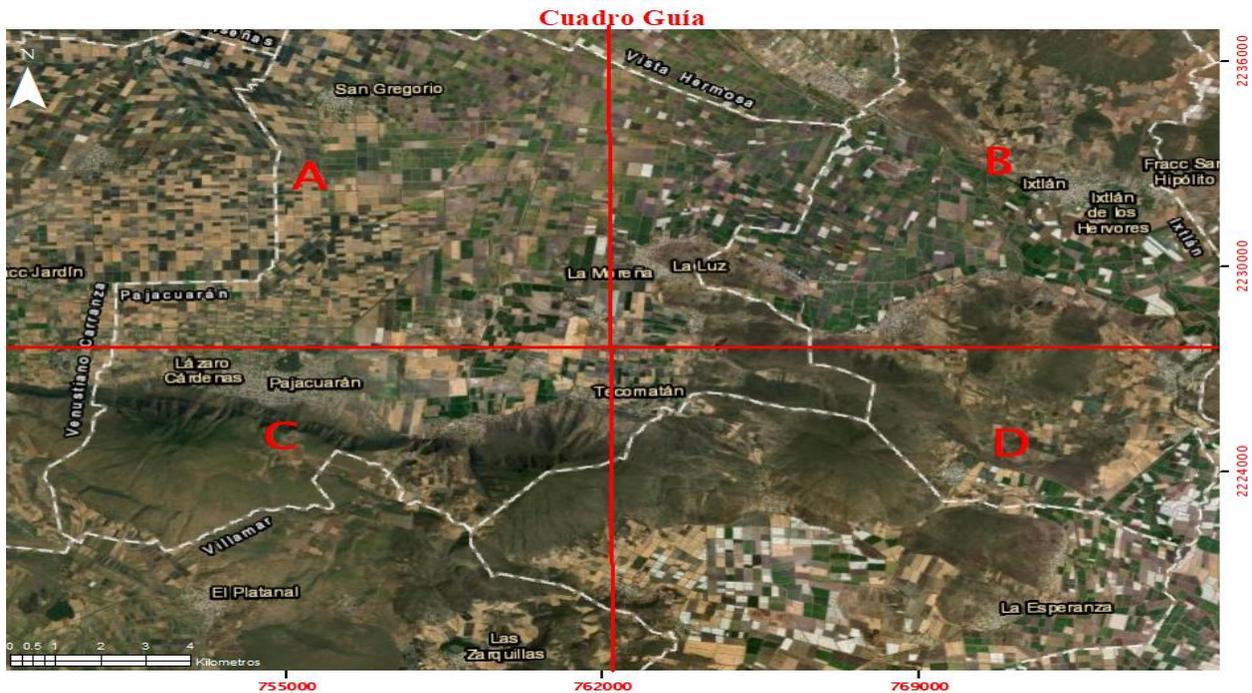
Se puede observar que los valores mínimos son 0 en todas las bandas, lo cual es esperado ya que se ha reescalado la imagen completa para que tenga un valor mínimo de 0. Los valores máximos varían entre 0.33 y 0.86, lo que indica que cada banda tiene un rango de intensidad diferente. La media indica el valor promedio de los datos reescalados en cada banda, y se puede observar que la intensidad de la información aumenta gradualmente de la Banda 1 a la Banda 4, y luego se mantiene relativamente constante en las bandas restantes. La desviación estándar muestra la variabilidad de los valores de los píxeles en cada banda, y se puede observar que la mayor variabilidad se encuentra en la Banda 3N, mientras que las bandas restantes tienen una desviación estándar relativamente baja. En la Tabla 15 se muestran los valores mínimos, máximos, media y desviación estándar de cada banda después de haber sido reescalados en un rango de 0 a 1.

**Tabla 15.** Resultados estadísticos de la corrección atmosférica aplicada a la imagen ASTER.

Bandas	Mínimo	Máximo	Media	Desviación estándar
Banda 1	0	0.33	0.10	0.03
Banda 2	0	0.42	0.13	0.04
Banda 3N	0	0.73	0.21	0.07
Banda 4	0	0.86	0.26	0.05
Banda 5	0	0.65	0.22	0.04
Banda 6	0	0.63	0.21	0.04
Banda 7	0	0.73	0.21	0.04
Banda 8	0	0.67	0.19	0.04
Banda 9	0	0.73	0.23	0.04

### Procesamiento

Los resultados se describen a continuación mediante la utilización de un cuadro guía que incorpora los cuadrantes A, B, C y D. (Figura 32). Las letras de los cuadrantes están referenciadas en los mapas y será emplearán como una estructura organizativa con el propósito de describir y exponer los resultados obtenidos a partir de Cociente de Bandas, Análisis de Componentes Principales, Mapeo de Ángulo Espectral y Cálculo de la Temperatura de la Superficie Terrestre.



**Figura. 32.** Cuadro guía, estructura de cuadrantes para la presentación de resultados

## **Realce Espectral**

### **Cociente de Bandas: Óxidos**

Los resultados de cociente de bandas de óxidos se observan en la Figura 33, los valores de brillo asociados a óxidos se localizan en el cuadrante A, en las proximidades de San Gregorio; en el cuadrante B, cerca de Ixtlán de los Hervores; y en el cuadrante C, en las inmediaciones de la localidad de Pajacuarán. Además, se tienen valores de brillo elevados que no están asociados a óxidos producto de alteraciones hidrotermales, sino que se correlacionan con la agricultura de riego anual y semipermanente en las parcelas de los cuadrantes A, B y D. Estas áreas presentan formas rectangulares bien definidas y texturas finas homogéneas. También se evidenciaron valores de brillo alto en los cuadrantes B, C y D, específicamente en la zona topográfica volcánica. Sin embargo, tras un análisis más detenido, se ha descartado estos valores ya que no están relacionados con alteraciones hidrotermales, en su lugar, se ha establecido una correlación con las lavas andesíticas basálticas del Plioceno en dichas áreas.

Los valores de menor brillantez indican ausencia de óxidos, están distribuidos en todos los cuadrantes, pero en una cantidad muy mínima, sobre las parcelas de agricultura de riego anual y semipermanente y en los cuerpos de agua.

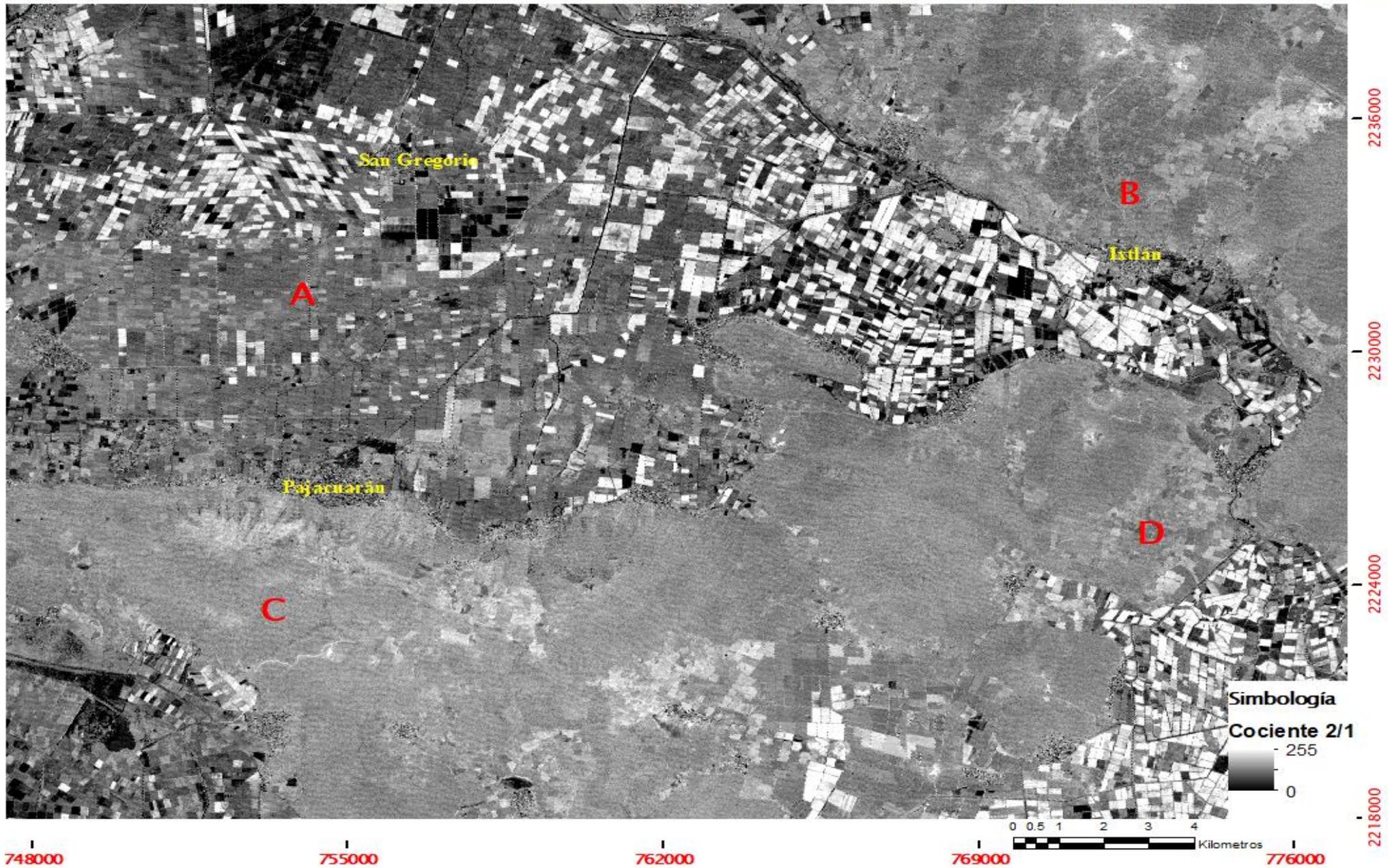


Figura 33. Respuesta espectral de los óxidos utilizando la técnica de cociente de bandas 2/1 con stretch lineal y aplicando una saturación del 1.5%.

### **Cociente de Bandas: Hidroxilos**

Los resultados de cociente de bandas se observan en la Figura 34, los valores de mayor brillo sugieren la presencia de hidroxilos. Estos valores son evidentes en varias áreas: en el cuadrante A, cerca de la localidad de San Gregorio; en el cuadrante B, cerca de Ixtlán de los Hervores; así como en las proximidades de Pajacuarán y en la zona de Los Negritos alrededor de la laguna La Alberca, ubicada en el cuadrante C.

Se han registrado valores de brillo elevados, aunque en menor cantidad, en áreas relacionadas con la agricultura de riego anual y semipermanente. Estos valores son más predominantes en las parcelas del cuadrante B y D. Estas áreas se caracterizan por presentar una textura fina homogénea y formas rectangulares bien definidas. Los valores de menor brillo, que indican la ausencia de hidroxilos, predominan en el cuadrante A y afectan a unas pocas parcelas asociadas a la agricultura de riego anual y semipermanente en esta zona

### **Cocientes de Bandas: Vegetación**

En la Figura 35 se muestran los valores de mayor brillo se encuentran en áreas relacionadas con la agricultura de riego anual y semipermanente y también están presentes en el cuadrante C alrededor de la laguna La Alberca. Por otro lado, los valores de menor brillo se localizan predominantemente en la región de lavas andesíticas del Plioceno debido a la menor densidad de vegetación en esta topografía volcánica.

### **Composición RGB para Cocientes de Bandas de Óxidos, Hidroxilos y Vegetación**

Se llevó a cabo una composición RGB utilizando los cocientes de vegetación, óxidos e hidroxilos (Figura 36). En esta composición, se asignaron colores específicos a cada componente para una mejor visualización de los resultados. La vegetación se representó en el canal rojo, lo que significa que las áreas con tonalidades rojas indican la presencia de vegetación. Los óxidos se asignaron al canal verde, por lo tanto, las zonas con tonos verdes representan la presencia de óxidos. Asimismo, los hidroxilos se asignaron al canal azul, por lo que las áreas con tonalidades azules señalan la presencia de hidroxilos. Las tonalidades cian en la imagen representan la manifestación de la conjugación entre óxidos e hidroxilos, los cuales han sido identificados en distintos cuadrantes de la región de estudio. En el cuadrante A, se observan estas tonalidades cian en las proximidades de San Gregorio; en el cuadrante B, alrededor de la localidad de Ixtlán de los Hervores y en su parte norte; en el cuadrante C, cerca de la localidad de Pajacuarán; y finalmente, en el cuadrante D. Por otra parte, se han identificado áreas en la imagen donde las tonalidades cian y verdes son notablemente evidentes. Cabe destacar que estas áreas no están relacionadas con alteraciones hidrotermales, sino que están asociadas a regiones destinadas a la agricultura de riego anual y semipermanente. Además, se han observado zonas con tonalidades cian que corresponden a áreas de topografía (cuadrante B,C,D) donde prácticamente no hay vegetación. Estas zonas se asocian con suelos de tipo vertisol pélico y litosol.

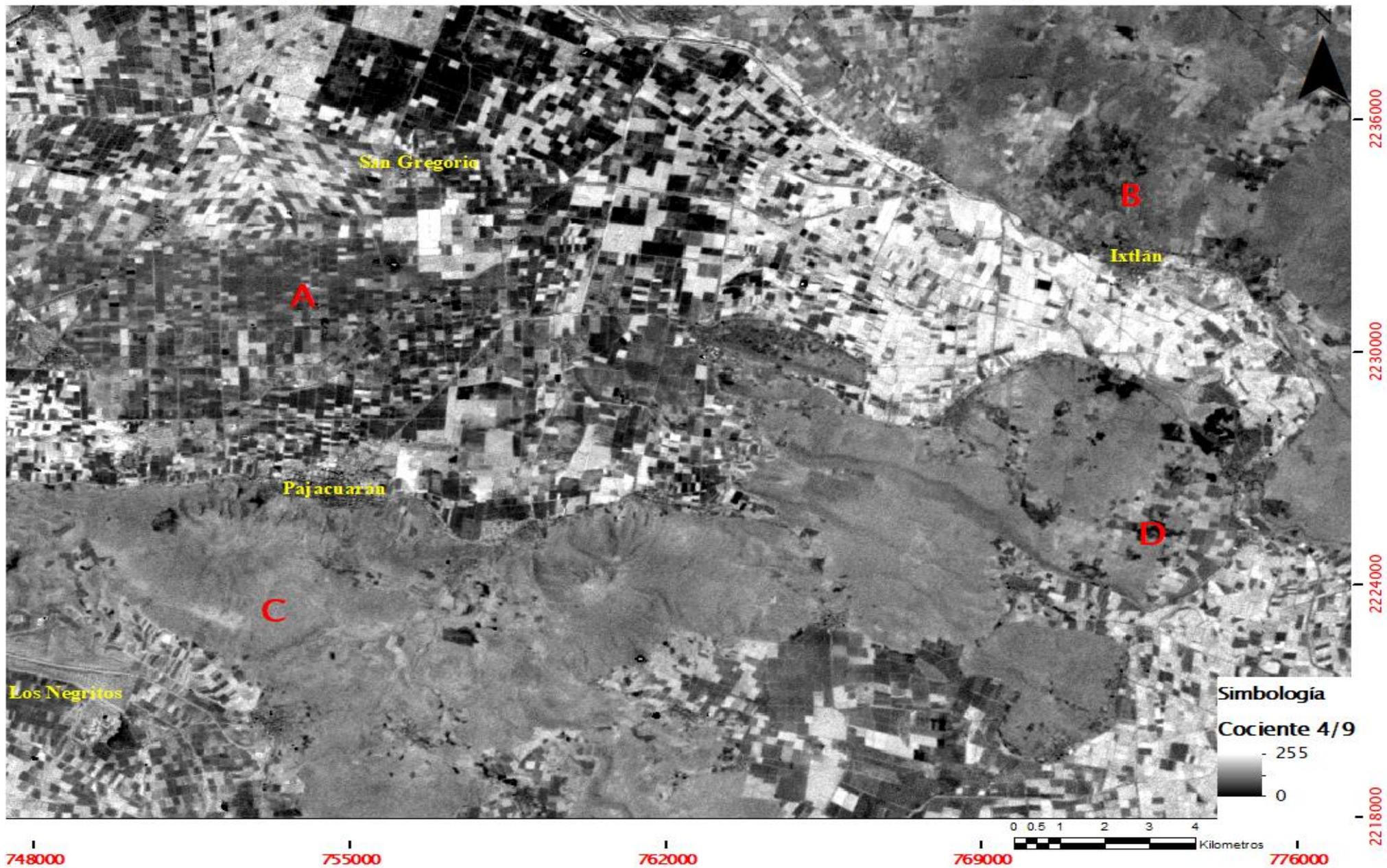


Figura 34. Respuesta espectral de los hidroxilos utilizando la técnica de cociente de bandas 4/9, con stretch lineal y aplicando una saturación del 1.5%.

Cociente de Bandas: 3/2 para Realce de Vegetación en la Zona de Estudio "Los Negritos-Ixtlán de los Hervores"

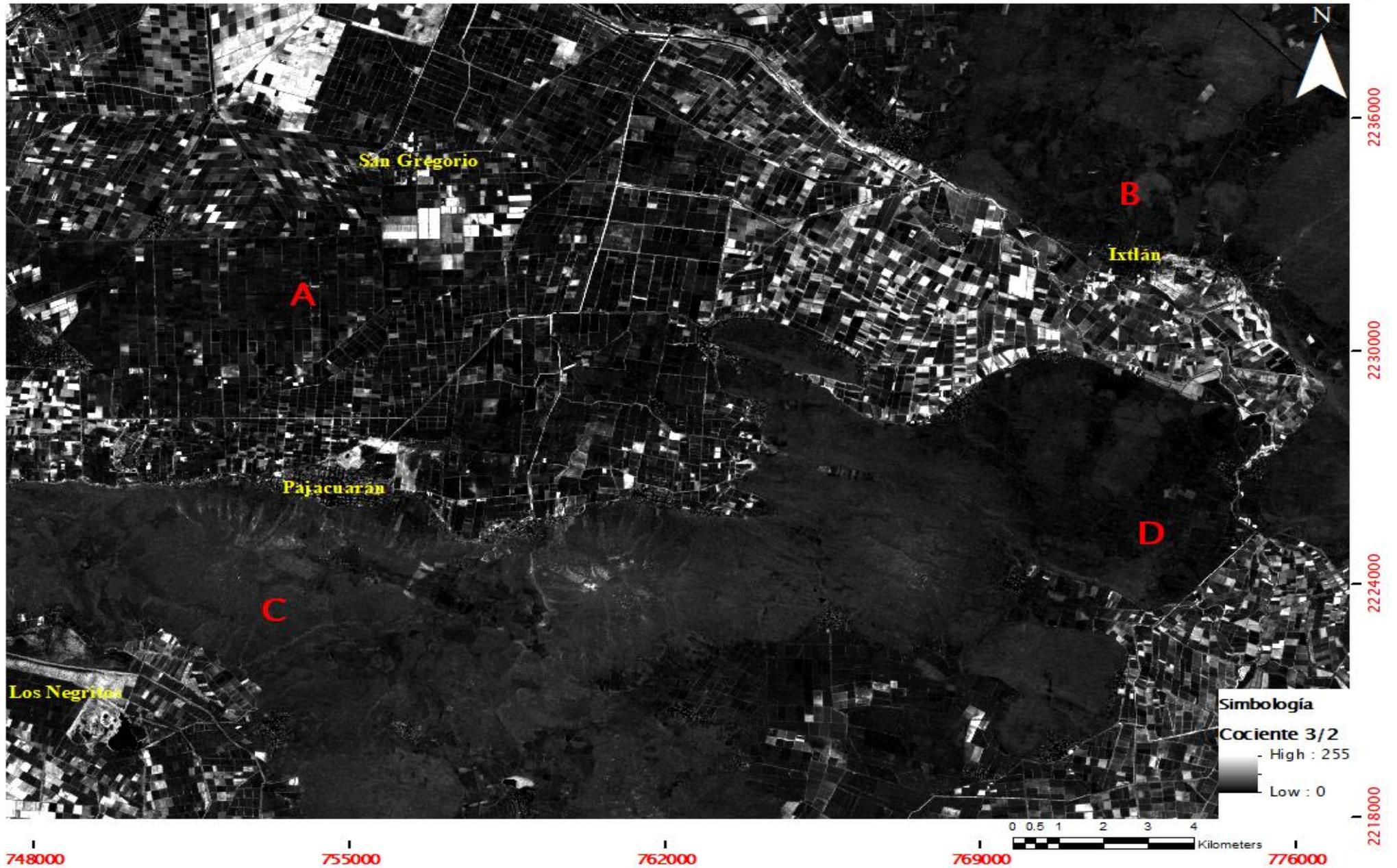


Figura 35. Respuesta espectral de la vegetación utilizando la técnica de cociente de bandas 3N/2 con stretch lineal y aplicando una saturación del 1.5%.,

Composición RGB para cocientes de bandas (3/2, 2/1, 4/9) en la Zona de Estudio "Los Negritos-Ixtlán de los Hervores"

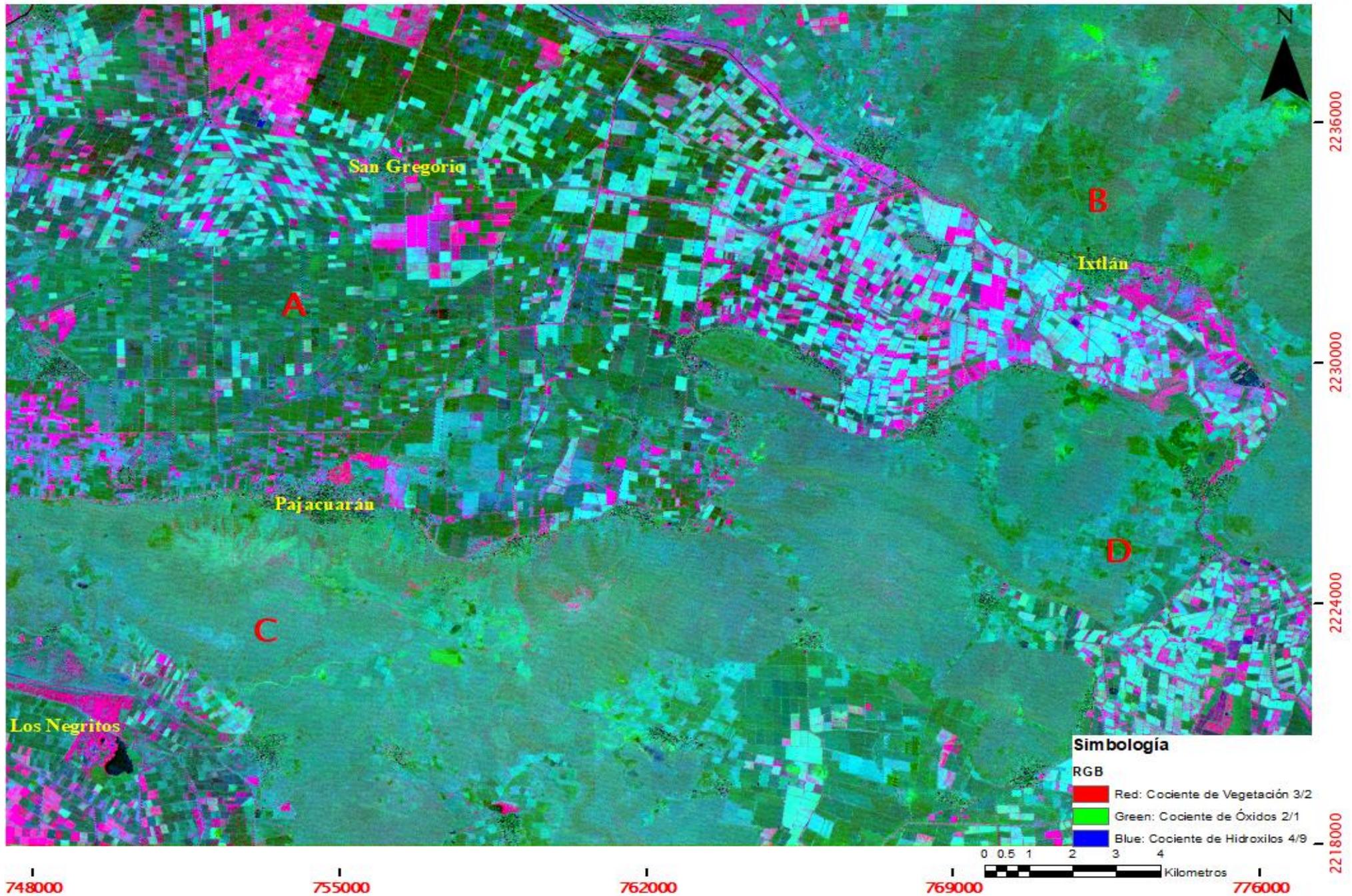


Figura 36. Composición RGB de los cocientes 3N/2 para vegetación, 2/1 para óxidos y 4/9 para hidroxilos.

### Análisis de Componentes Principales (PCA)

Se aplicó el PCA a las nueve bandas de la imagen ASTER. La Tabla 16 proporciona información sobre los resultados de PCA, incluyendo el porcentaje de varianza explicada por cada componente, el eigenvalor (que es la cantidad de varianza explicada por cada componente) y los eigenvectores (vectores propios) correspondientes a cada componente. La tabla indica que la primera componente principal (C1) explica el 63,02% de la varianza total en los datos, la segunda componente (C2) explica el 29,73% y así sucesivamente. En conjunto, las primeras tres componentes explican más del 98% de la varianza total.

**Tabla 16.** *Matriz de eigenvectores de las nueve bandas de la imagen ASTER, producto de PCA.*

Componente	C 1	C 2	C 3	C 4	C 5	C 6	C 7	C 8	C 9
<b>% Varianza</b>	63.02333	29.73207	5.410878	1.130287	0.400717	0.103023	0.084248	0.064632	0.050823
<b>Eigenvalor</b>	1589.176	749.714	136.4389	28.50094	10.10436	2.597799	2.12436	1.629727	1.281544
<b>Eigenvector 1</b>	0.437965	0.19625	-0.31217	0.513876	0.631692	0.072411	0.058723	-0.00568	0.019883
<b>Eigenvector 2</b>	0.539584	0.276655	-0.55721	-0.33493	-0.45235	-0.05263	-0.04188	-0.0029	-0.0224
<b>Eigenvector 3</b>	0.350315	0.585899	0.700585	0.111452	-0.17005	0.031144	-0.02834	0.006073	-0.00585
<b>Eigenvector 4</b>	0.303828	-0.15313	0.221284	-0.67059	0.476945	-0.17617	0.330662	-0.0553	0.121123
<b>Eigenvector 5</b>	0.237267	-0.29223	0.106925	0.048757	-0.00145	-0.14834	-0.61914	-0.57637	0.327032
<b>Eigenvector 6</b>	0.275133	-0.31397	0.123994	-0.13062	0.090032	0.37319	-0.49503	0.590911	-0.22734
<b>Eigenvector 7</b>	0.238548	-0.31786	0.108687	0.182329	-0.10836	-0.37592	0.136125	-0.18986	-0.76771
<b>Eigenvector 8</b>	0.260724	-0.37258	0.091003	0.318909	-0.27538	-0.35721	0.272746	0.414145	0.48362
<b>Eigenvector 9</b>	0.212434	-0.30724	0.073359	0.085168	-0.2104	0.72787	0.404158	-0.32853	0.050028

La Tabla 17 muestra la matriz de carga para las nueve bandas. Cada una de las nueve filas indica los valores de carga de las nueve bandas (C1-C9) para cada eigenvector.

**Tabla 17. Matriz de carga para las nueve bandas de la imagen ASTER, producto de PCA.**

Bandas	C 1	C 2	C 3	C 4	C 5	C 6	C 7	C 8	C 9
<b>Banda 1</b>	0.922009	0.28377	-0.19256	0.144876	0.10604	0.006163	0.00452	-0.00038	0.001189
<b>Banda 2</b>	0.90278	0.317924	-0.27316	-0.07504	-0.06035	-0.00356	-0.00256	-0.00016	-0.00106
<b>Banda 3N</b>	0.61241	0.703507	0.358862	0.026092	-0.0237	0.002201	-0.00181	0.00034	-0.00029
<b>Banda 4</b>	0.887108	-0.3071	0.189314	-0.26221	0.111042	-0.0208	0.035299	-0.00517	0.010043
<b>Banda 5</b>	0.755672	-0.63928	0.099784	0.020796	-0.00037	-0.0191	-0.0721	-0.05879	0.029578
<b>Banda 6</b>	0.778707	-0.61035	0.102829	-0.04951	0.020319	0.042705	-0.05123	0.053558	-0.01827
<b>Banda 7</b>	0.729186	-0.66736	0.097347	0.074639	-0.02641	-0.04646	0.015214	-0.01859	-0.06664
<b>Banda 8</b>	0.704007	-0.69099	0.072001	0.115321	-0.05929	-0.039	0.026927	0.035811	0.037084
<b>Banda 9</b>	0.701398	-0.69676	0.070971	0.037658	-0.05539	0.097165	0.048789	-0.03474	0.004691

### **Análisis de componentes principales para Óxidos y Vegetación**

Los resultados (Tabla 18) se presentan en términos de la matriz de eigenvectores y eigenvalores para las cuatro componentes principales (C1, C2, C3 y C4). Para el análisis de componentes principales en el caso de los óxidos y la vegetación, se emplearon cuatro bandas de entrada: Banda 1, Banda 2, Banda 3N y Banda 4. Se decidió utilizar la Banda 2 de alta reflectancia y la Banda 1 de alta absorbancia para los óxidos. Mediante el análisis de la matriz de carga, se determinó que la componente que resalta los óxidos es la componente 4 negativa (-C4) (Tabla 19).

Para el caso de la vegetación, se utilizó la banda 3N de alta reflectancia y la banda 2 de alta absorbancia, y se determinó que la componente que ayuda a resaltar la vegetación es la componente 2 (C2).

**Tabla 18.** Matriz de eigenvectores para las bandas 1,2,3N,4, de la imagen ASTER, producto de PCA.

Componente	C 1	C 2	C 3	C 4
<b>% Varianza</b>	79.99971	13.74758	5.145335	1.107365
<b>Eigenvalor</b>	1306.154	224.4566	84.00783	18.07993
<b>Eigenvector 1</b>	0.503455	-0.23041	-0.21524	0.804436
<b>Eigenvector 2</b>	0.633455	-0.34137	-0.36371	-0.59154
<b>Eigenvector 3</b>	0.528595	0.820749	0.21322	-0.03869
<b>Eigenvector 4</b>	0.256624	-0.39592	0.880865	-0.03832

**Tabla 19.** Matriz de carga para las bandas 1, 2, 3N y 4 de la imagen ASTER producto de PCA, en rojo se resaltan las cargas de la componente 2 de la Banda 2 y Banda 3N que dieron como resultado el realce de vegetación y de verde se resaltan las cargas de la componente C4 las cargas de la Banda 1 y Banda 2 que dieron como resultado la componente -C4 el realce de óxidos.

Bandas	C 1	C 2	C 3	C 4
<b>Banda 1</b>	0.960878	-0.1823	-0.10418	0.180634
<b>Banda 2</b>	0.960837	-0.21465	-0.13991	-0.10557
<b>Banda 3</b>	0.837756	0.53923	0.085701	-0.00721
<b>Banda 4</b>	0.679293	-0.43445	0.591333	-0.01194

En la Figura 37, se pueden observar valores de alta reflectividad asociados a la presencia de óxidos. Estos valores se encuentran en tres áreas principales: en el cuadrante A, cerca de San Gregorio; en el cuadrante B, cerca de Ixtlán; y en el cuadrante C, cerca de Pajacuarán. Por otro lado, en el cuadrante D, también se encuentran áreas con valores elevados de brillantez. Es importante destacar que estos valores están relacionados con la agricultura de riego anual y semipermanente en lugar de estar asociados a óxidos causados por alteraciones hidrotermales. Esto se debe a que estas parcelas son naturalmente ricas en óxidos debido al proceso de barbecho, durante el cual se acumulan minerales oxidados en el suelo.

Para el caso de la vegetación (Figura 38) los valores de mayor brillo se encuentran en áreas asociadas a la agricultura de riego anual y semipermanente. Además, en el cuadrante C, se observan valores de alta brillantez cerca de la laguna Los Negritos. En contraste, los valores de menor brillo predominan principalmente en la región de lavas andesíticas basálticas del Plioceno, debido a la menor densidad de vegetación en esta topografía volcánica .

Componente principal -C4 para Realce de Óxidos en la Zona de Estudio "Los Negritos-Ixtlán de los Hervores"

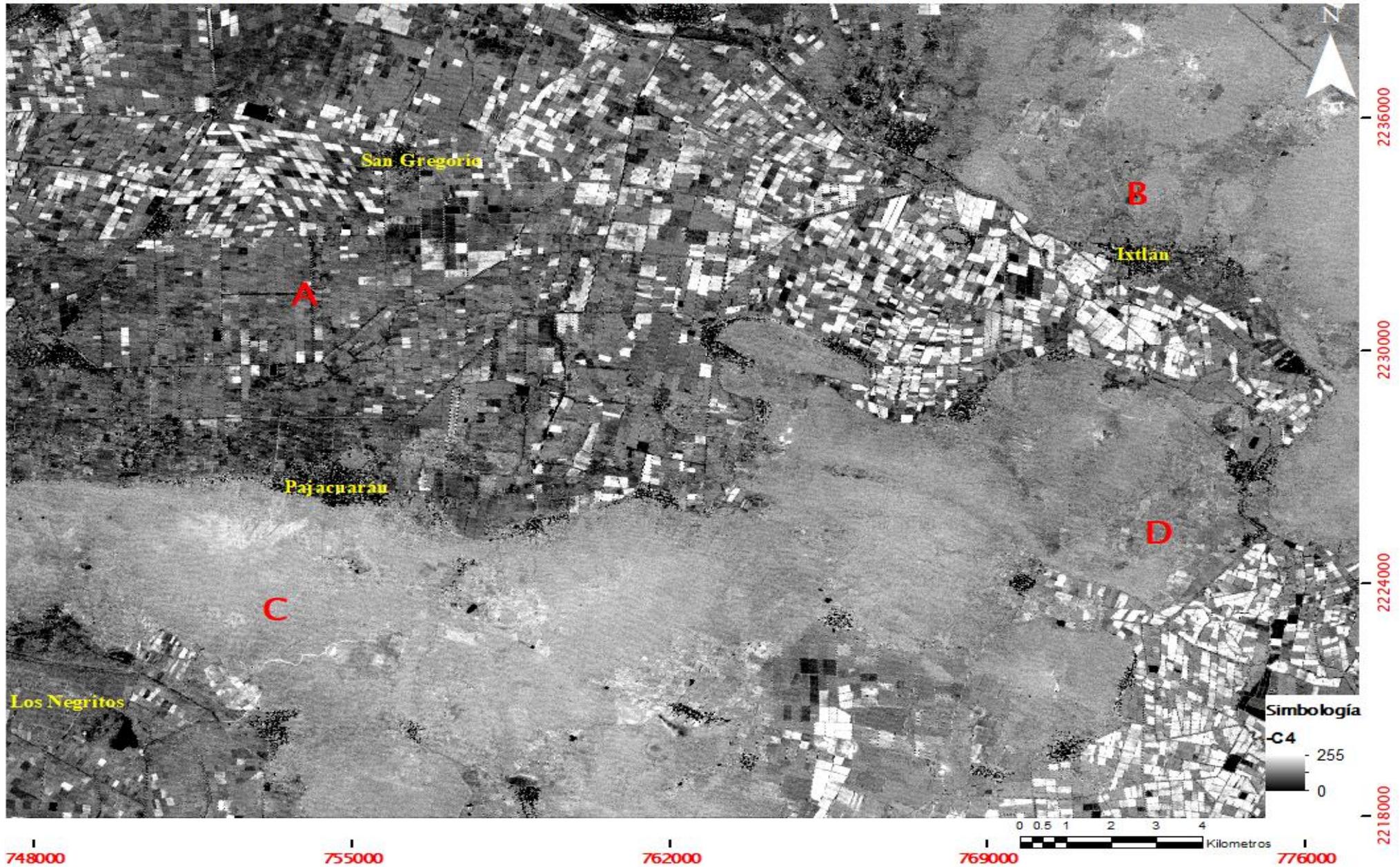


Figura 37. Componente -C4, que representa la respuesta espectral de los óxidos, se obtuvo utilizando la técnica de PCA con stretch lineal y una saturación del 2%.

Componente principal C2 para Realce de Vegetación en la Zona de Estudio "Los Negritos-Ixtlán de los Hervores"

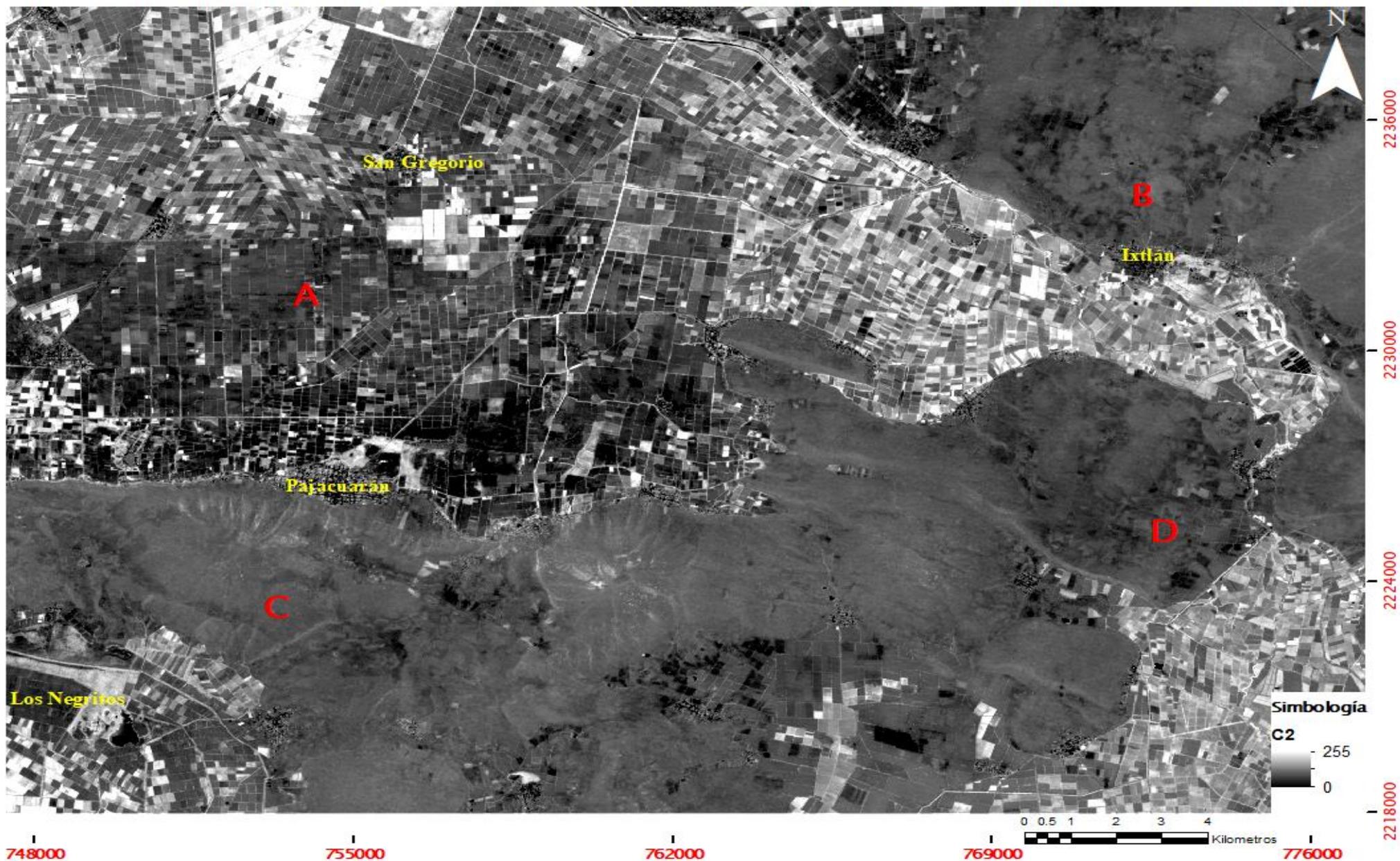


Figura 38. Componente C2, que representa la respuesta espectral de la vegetación, se obtuvo utilizando la técnica de PCA con stretch lineal y una saturación del 2%.

### Análisis de Componentes Principales Para Hidroxilos

Los resultados (Tabla 20) se presentan en términos de la matriz de eigenvectores y eigenvalores para las cuatro componentes principales (C1, C2, C3 y C4).

Para el análisis de componentes principales para el caso de los hidroxilos se utilizaron cuatro bandas de entrada: Banda 3N, Banda 4, Banda 6 y Banda 9. Se decidió utilizar la Banda 4 de alta reflectancia y la Banda 9 de alta absorbancia para los hidroxilos, y se determinó que la componente que ayuda a resaltar los óxidos es la componente 3 negativa, según el análisis de la matriz de carga (Tabla 21).

**Tabla 20.** Matriz de eigenvectores para las bandas 3N,4,6,9, de la imagen ASTER producto de PCA.

Componente	C 1	C 2	C 3	C 4
<b>% Varianza</b>	58.0637	40.69122	1.081425	0.163663
<b>Eigenvalor</b>	616.327	431.9238	11.47897	1.737232
<b>Eigenvector 1</b>	0.734098	-0.65897	-0.16258	0.020658
<b>Eigenvector 2</b>	0.468545	0.317729	0.805636	-0.17454
<b>Eigenvector 3</b>	0.317588	0.458486	-0.50777	-0.65658
<b>Eigenvector 4</b>	0.375104	0.504576	-0.25824	0.733493

**Tabla 21.** Matriz de carga para las bandas 3N, 4,6 y 9 de la imagen ASTER producto de PCA, en color azul se resaltan las cargas de la componente 3 (-C3) de la Banda 4 y Banda 9 que dieron como resultado el realce de hidroxilos.

Bandas	C 1	C 2	C 3	C 4
<b>Banda 3N</b>	0.831984	-0.554046	0.028915	-0.000633
<b>Banda 4</b>	0.823044	0.529297	-0.204359	0.026079
<b>Banda 6</b>	0.617940	0.781137	0.050622	-0.073569
<b>Banda 9</b>	0.513202	0.838500	0.168933	0.070728

Las zonas de mayor brillo relacionadas con hidroxilos (Figura 39) se destacan y se vuelven muy predominantes en los cuadrantes C, B y D, estas áreas se correlacionan con vertisoles pélicos y litosoles. También se observan zonas con alta brillantez en las áreas B y D, pero estas corresponden a hidroxilos relacionados con la agricultura de riego anual y semipermanente. La presencia de óxidos se registra en el cuadrante A, cerca de la localidad de San Gregorio; en el cuadrante B, cerca de Ixtlán de los Hervores; y en el cuadrante C, cerca de la laguna La Alberca.

### **Composición RGB para PCA de Óxidos, Hidroxilos y Vegetación**

Se llevó a cabo una composición RGB utilizando los resultados del análisis de componentes principales (Figura 40). En esta composición, se asignaron colores específicos a cada componente para una mejor visualización de los resultados. La vegetación se representó en el canal rojo, lo que significa que las áreas con tonalidades rojas indican la presencia de vegetación. Los óxidos se asignaron al canal verde, por lo tanto, las zonas con tonos verdes representan la presencia de óxidos. Asimismo, los hidroxilos se asignaron al canal azul, por lo que las áreas con tonalidades azules señalan la presencia de hidroxilos.

Las zonas con tonalidades cian corresponden a áreas donde se han detectado óxidos e hidroxilos relacionados con alteraciones hidrotermales. Estas áreas se localizan principalmente en el cuadrante B, cercano a Ixtlán de los Hervores, así como en la zona adyacente a la laguna La Alberca. También se hacen evidentes tonalidades verdes y cian en la zona cercana a Pajacuarán, asociadas con estas alteraciones hidrotermales.

Las tonalidades rojas son particularmente notables en el cuadrante A, específicamente en las áreas de agricultura anual y semipermanente. Por otro lado, las zonas de tonalidad magenta se distribuyen en toda la escena, aunque en cantidades mínimas, y esta tonalidad indica la presencia de vegetación con hidroxilos. Asimismo, se identificaron áreas con tonalidades verdes, las cuales se relacionan con la presencia de óxidos en zonas de cultivo.

Para mejorar la diferenciación de las alteraciones hidrotermales, se realizó una clasificación supervisada utilizando el método de máxima verosimilitud. Este método se aplicó a los datos de entrenamiento, teniendo en cuenta la distribución estadística de las firmas espectrales de ambas clases. Como resultado, se generó un mapa clasificado que resalta las áreas identificadas como alteraciones hidrotermales (Figura 41).

### **Mapeo de Ángulo Espectral**

A través del mapeo de ángulo espectral se identificaron minerales descritos en la bibliografía de Valle et al., (1970), entre los cuales se encontraron la clorita y la montmorillonita. Las zonas donde se observó la convergencia de estos dos minerales se marcaron como áreas probables de su presencia.

En la Figura 42, se muestra el mapa de ángulo espectral y se utilizó como base los óxidos e hidróxidos derivados de la técnica PCA. Los minerales se representan en tonos verdes, y se han identificado áreas de convergencia que sugieren la probable presencia de estos minerales. En la zona norte del mapa, se observa una mayor concentración de estos minerales, especialmente en las cercanías de la localidad de San Gregorio. Además, se han identificado áreas significativas con presencia de estos minerales cerca de Ixtlán de los Hervores y Los Negritos, en las proximidades de la Laguna La Alberca.

Componente principal -C3 para Realce de Hidroxilos en la Zona de Estudio "Los Negritos-Ixtlán de los Hervores"

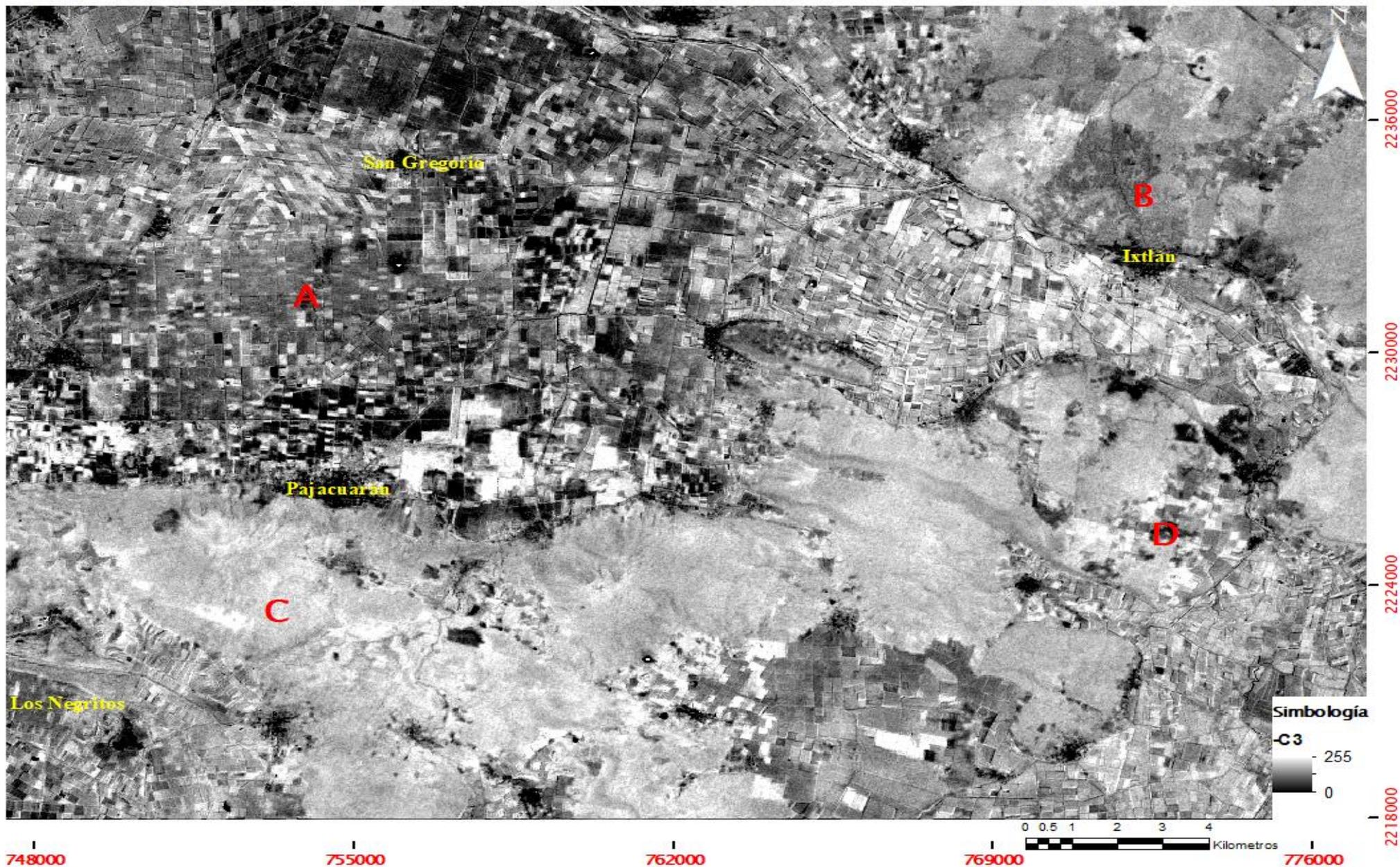


Figura 39. Componente -C3, que representa la respuesta espectral de los hidroxilos, se obtuvo utilizando la técnica de PCA con stretch lineal y una saturación del 2%.

Composición RGB para Componentes Principales (C2,-C4,-C3) en la Zona de Estudio "Los Negritos-Ixtlán de los Hervores"

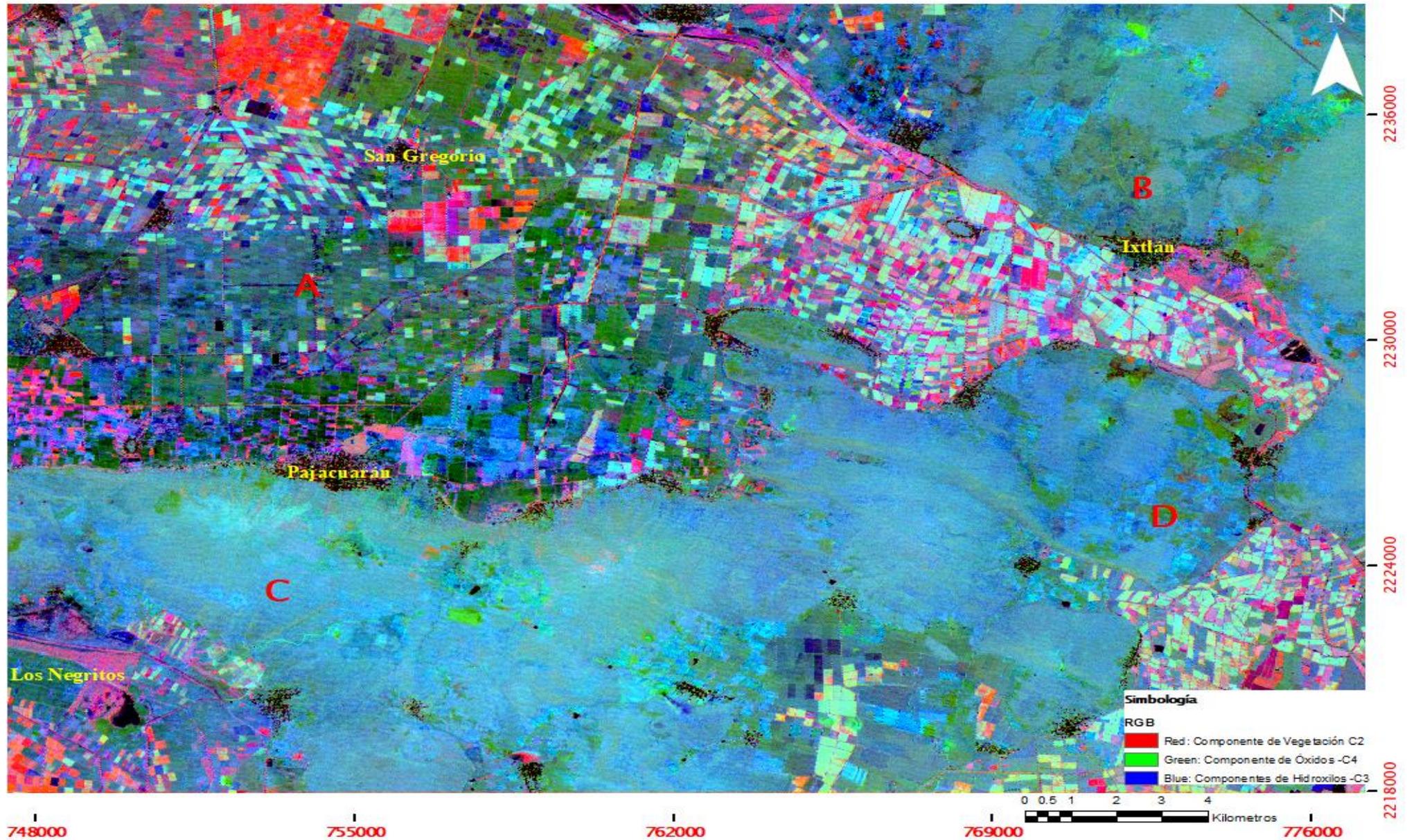
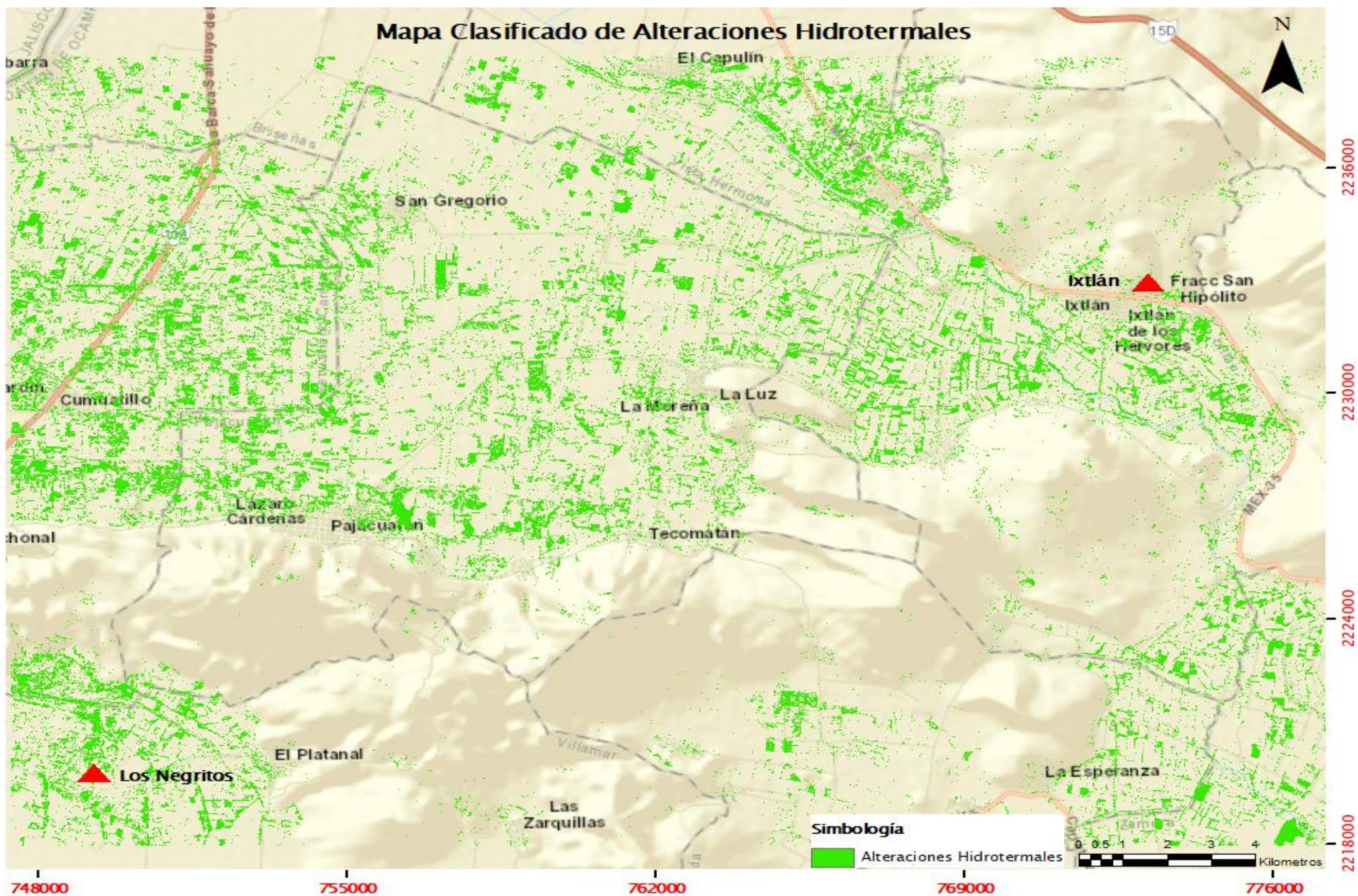


Figura 40. Componentes principales de la composición RGB. La componente C2 se asigna al canal rojo, la componente -C4 se asigna al canal verde y la componente -C3 se asigna al canal azul. Los valores de brillo en cada canal indican la contribución relativa de los componentes correspondientes en la formación de la imagen.



*Figura 41. Mapa resultante de la clasificación supervisada utilizando el método de máxima verosimilitud. Las áreas identificadas como alteraciones hidrotermales se destacan en el mapa de color verde.*

# Mapeo de Ángulo Espectral de la Zona de Estudio "Los Negritos-Ixtlán de los Hervores"

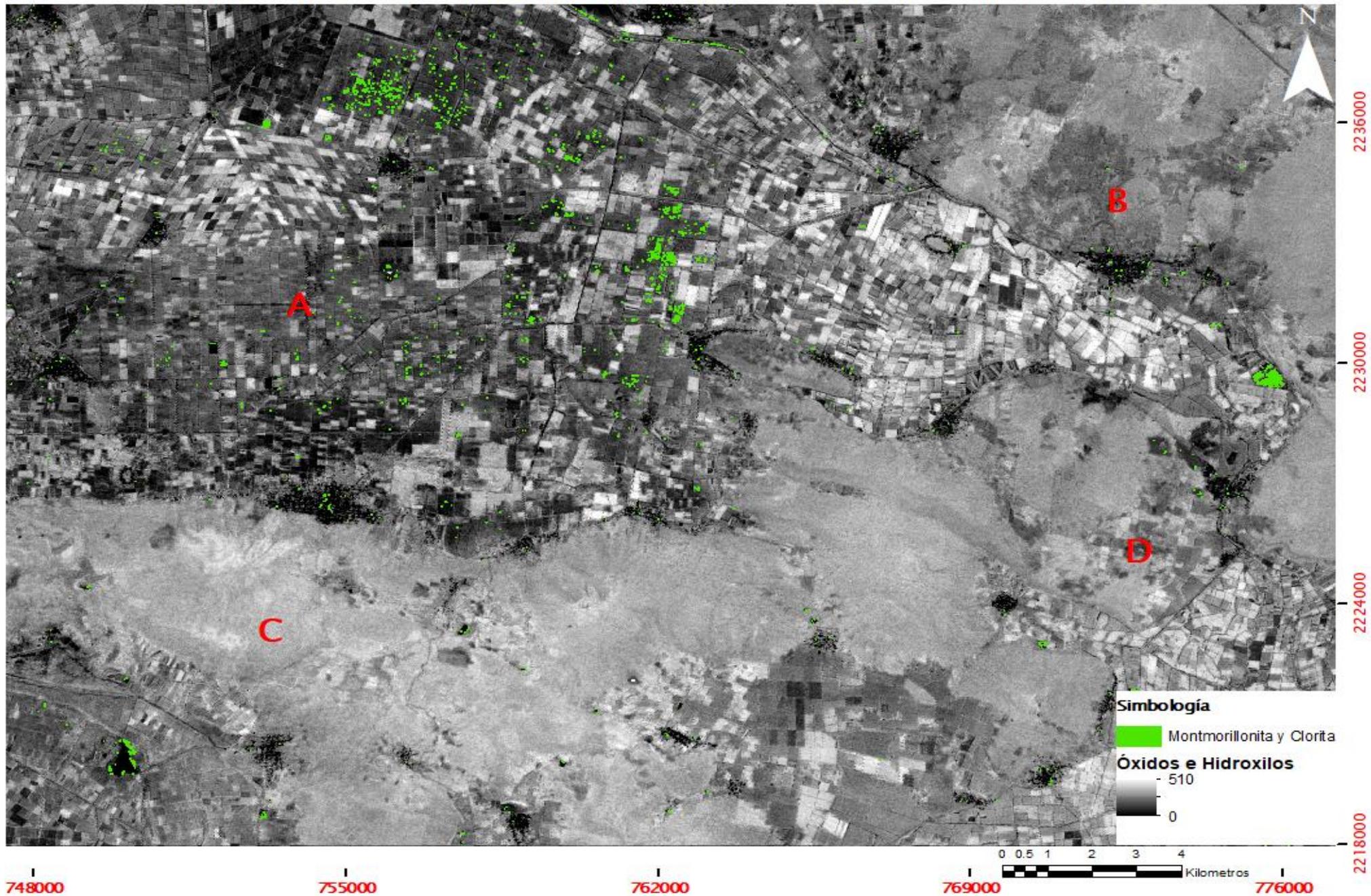


Figura 42. Mapa de ángulo espectral mostrando la distribución potencial de Clorita y Montmorillonita en la región.

## **Realce Espacial**

En el Modelo Digital de Elevación de la zona de estudio en su estado original, sin procesamiento, la visualización de los rasgos topográficos está limitada. Sin embargo, en la Figura 43 se muestra el mapa de sombras generado mediante técnicas de iluminación artificial.

El mapa de sombras resalta y distingue los rasgos topográficos presentes en la zona al manipular la iluminación, lo que proporciona una representación visual más clara de las elevaciones y variaciones del terreno.

Al examinar detalladamente el mapa de sombras, se observa la presencia de características topográficas volcánicas en la parte sur de la escena. Estas se caracterizan por relieves abruptos y escarpados. A medida que nos desplazamos hacia el este, se evidencia una disminución en la presencia de estas características volcánicas, dando paso a áreas con terrenos más planos y suaves. En la zona norte de la escena, predominan las áreas con topografía plana.

## **Digitalización de Lineamientos**

Se llevó a cabo la digitalización de lineamientos estructurales en el área de estudio utilizando técnicas de realce espacial. Estas técnicas permitieron enfatizar y mejorar los contrastes presentes en las imágenes, lo que facilitó la identificación y mapeo de los lineamientos presentes en el terreno.

Mediante el análisis de las variaciones de brillo obtenidas a partir del realce espacial, se logró identificar un total de 58 lineamientos estructurales en la zona de estudio. De estos lineamientos, se determinó que 5 correspondían a fallas normales, utilizando la información proporcionada por GeoInfoMex. Los demás se mantuvieron como lineamientos estructurales. Los lineamientos estructurales en la zona siguen tres direcciones principales. En dirección este-oeste, se encuentra la falla Pajacuarán y la falla El Platanal. En dirección noroeste-sureste, la falla Los Negritos, la falla Ixtlán y la falla El Mezquite. Finalmente, en dirección noreste-suroeste, se encuentra la influencia de la falla Los Nogales (Figura 44).

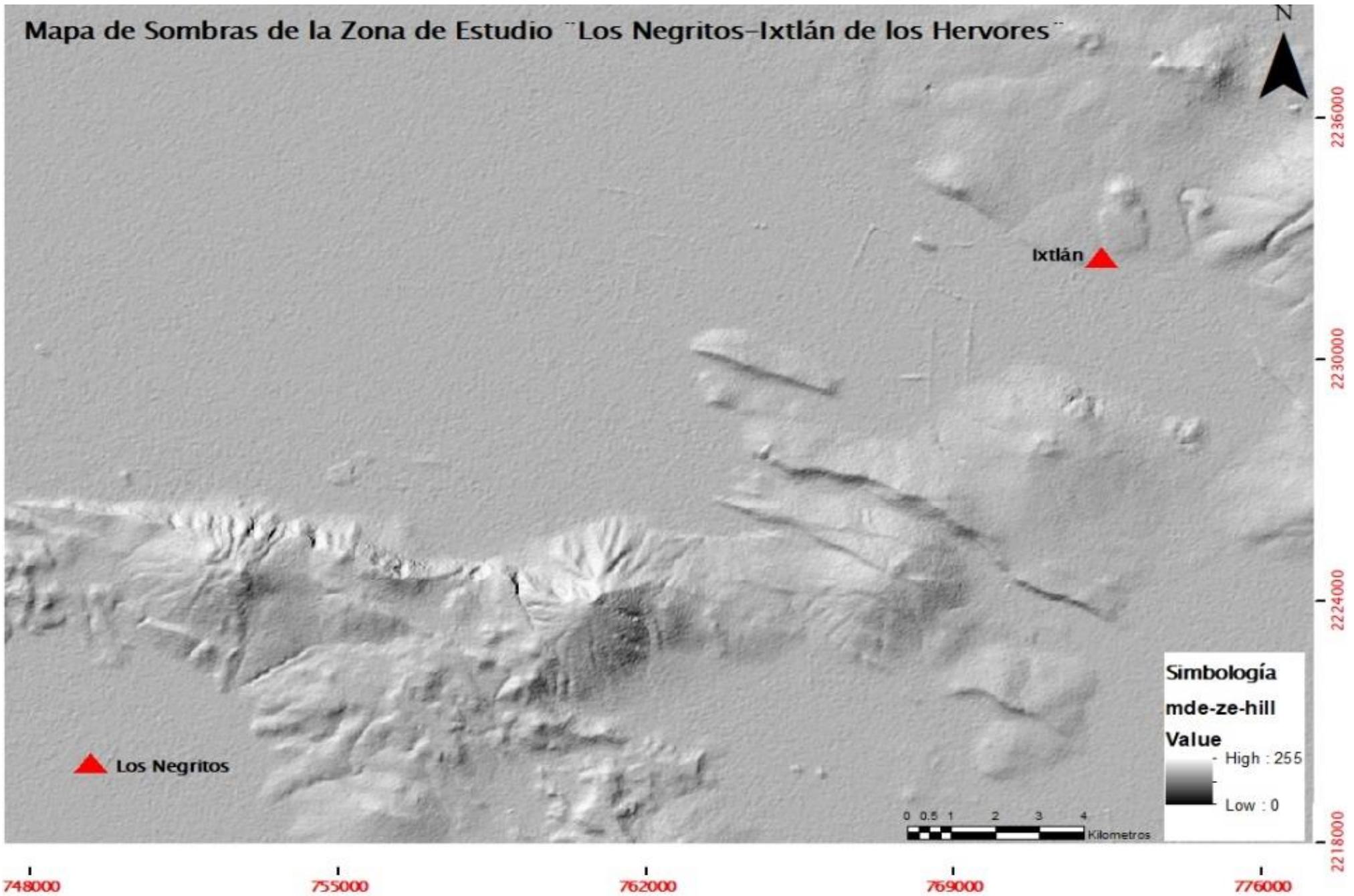


Figura 43. Mapa de sombras destacando los rasgos topográficos en la zona de estudio.

# Lineamientos Estructurales de la Zona de Estudio "Los Negritos-Ixtlán de los Hervores"

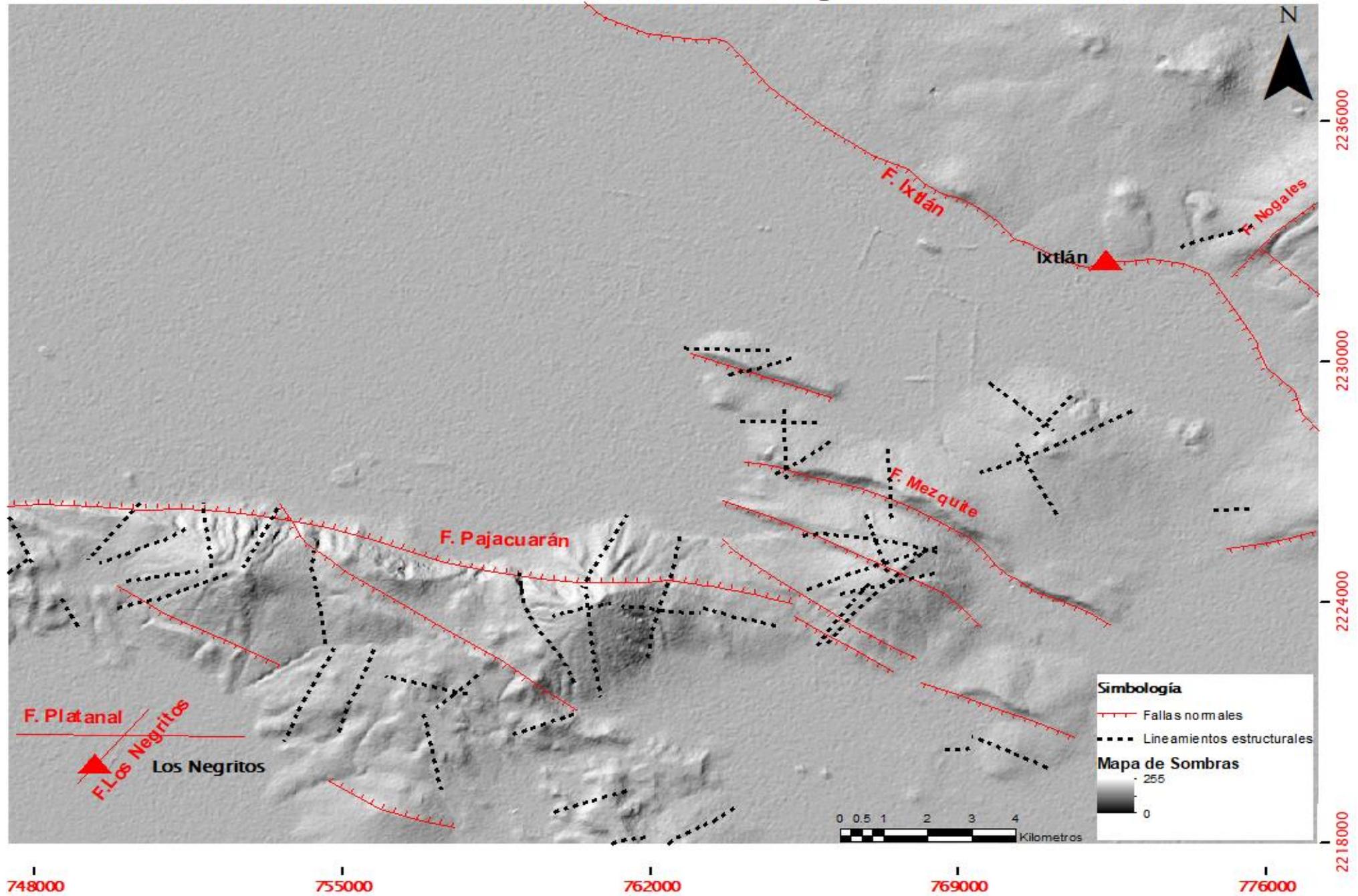


Figura 44. Mapa de lineamientos estructurales digitalizados en el área de estudio, se indican las fallas con "F.".

## **Temperatura Superficial del Suelo**

Los resultados de la temperatura superficial se presentan en la Figura 45. La temperatura mínima del suelo registrada fue de 27.08 °C, mientras que la temperatura más alta alcanzó los 85.46 °C. Las temperaturas más elevadas se observaron al sur de la localidad San Gregorio (85 °C), al suroeste de la localidad El Capulín (66 °C), al este (63 °C) y noreste de la localidad La Cuestita (64 °C).

Las temperaturas más bajas se registraron en los cuerpos de agua, donde se estimaron temperaturas de 27 °C a 30 °C.

Las temperaturas de 30 °C a 40 °C se observaron en las zonas de topografía volcánica baja relacionadas con una vegetación escasa de selva baja caducifolia y una litología de lavas andesíticas basálticas. Se consideraron como significativas las temperaturas superiores a 50 °C, ya que no estaban asociadas con características vegetativas distintivas. Se utilizó el mapa de alteraciones como base para investigar la posible relación con alteraciones hidrotermales, y se confirmó esta relación. Por lo tanto, se seleccionaron estas temperaturas para su análisis detallado (Figura 46).

### **Correlación de la Información (Realce Espectral, Espacial , de Contraste Y LST)**

En la Figura 47, se presentan los resultados obtenidos a través del realce espectral (utilizando componentes principales y mapeo de ángulo espectral), realce espacial, realce de contraste, así como la estimación de la temperatura superficial del suelo, todos ellos como productos de esta tesis. La combinación de estas diversas técnicas permitió identificar un total de 7 zonas con potenciales alteraciones hidrotermales.

# Temperatura Superficial del Suelo en la Zona de Estudio "Los Negritos-Ixtlán de los Hervores"

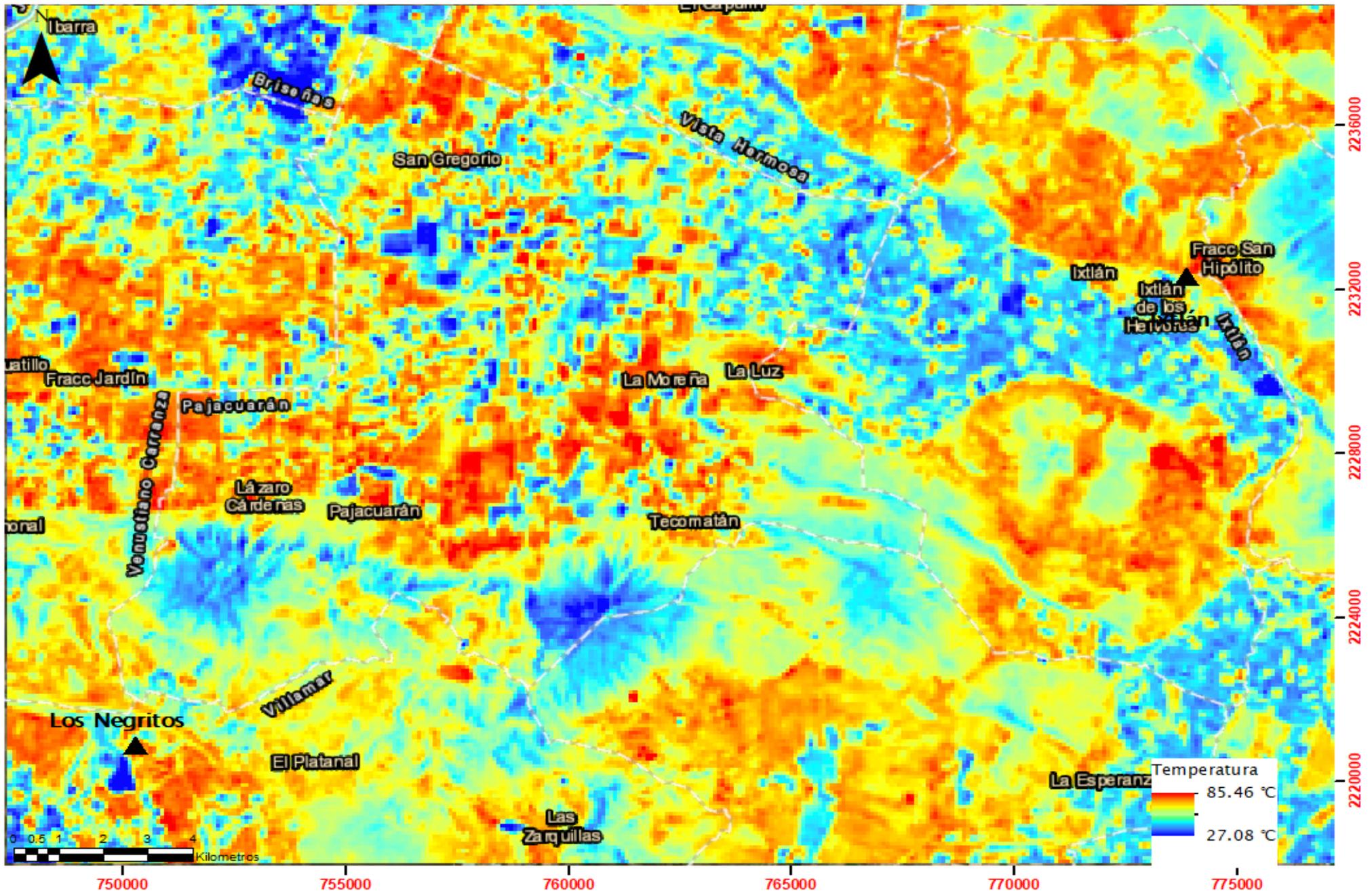


Figura 45. Temperatura superficial del suelo en la zona de estudio "Los Negritos-Ixtlán de los Hervores"

# Temperatura Superficial del Suelo en la Zona de Estudio "Los Negritos-Ixtlán de los Hervores"

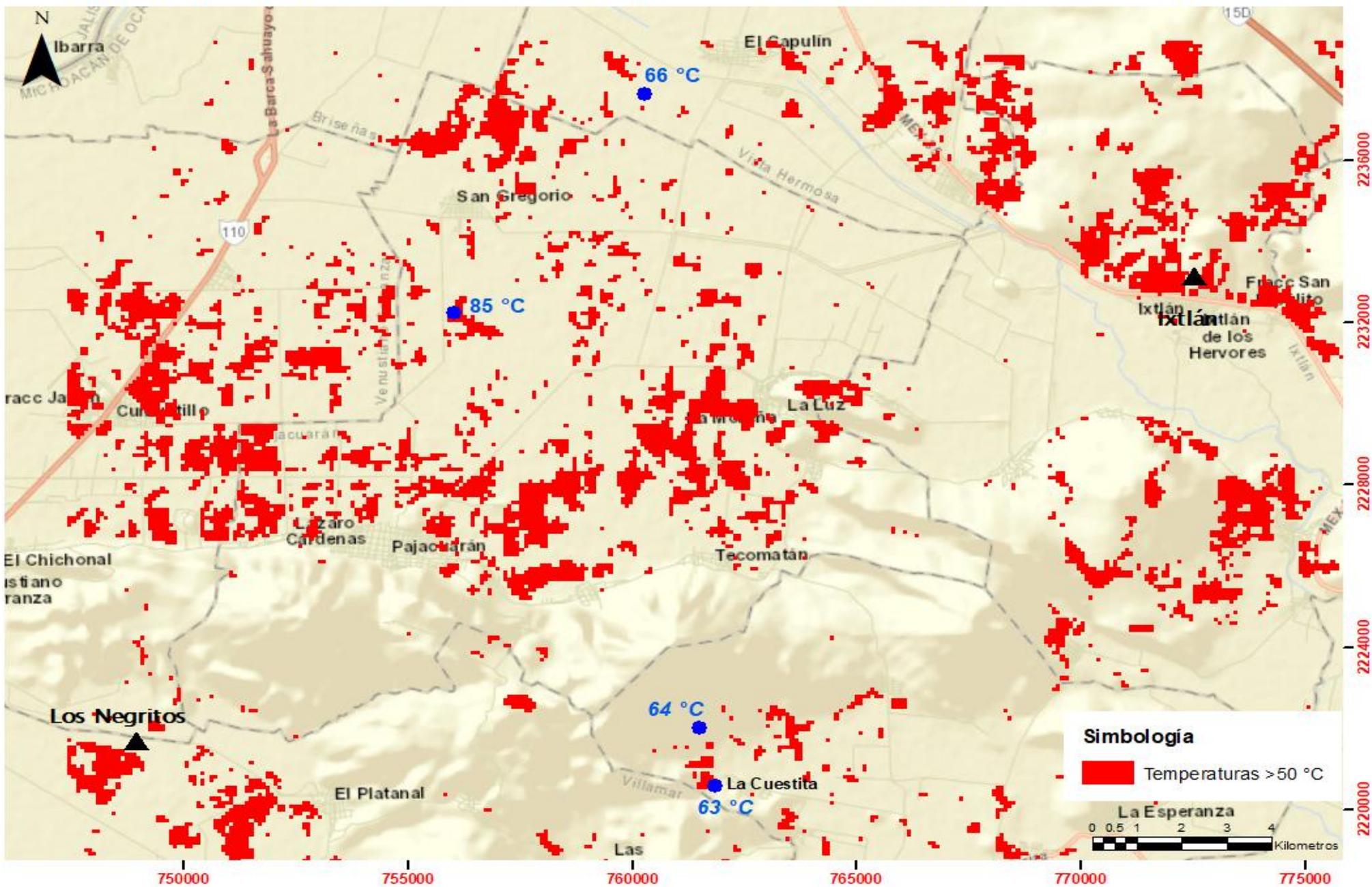


Figura 46. Temperaturas superficiales del suelo en la zona de estudio "Los Negritos-Ixtlán de los Hervores" superiores a 50°C

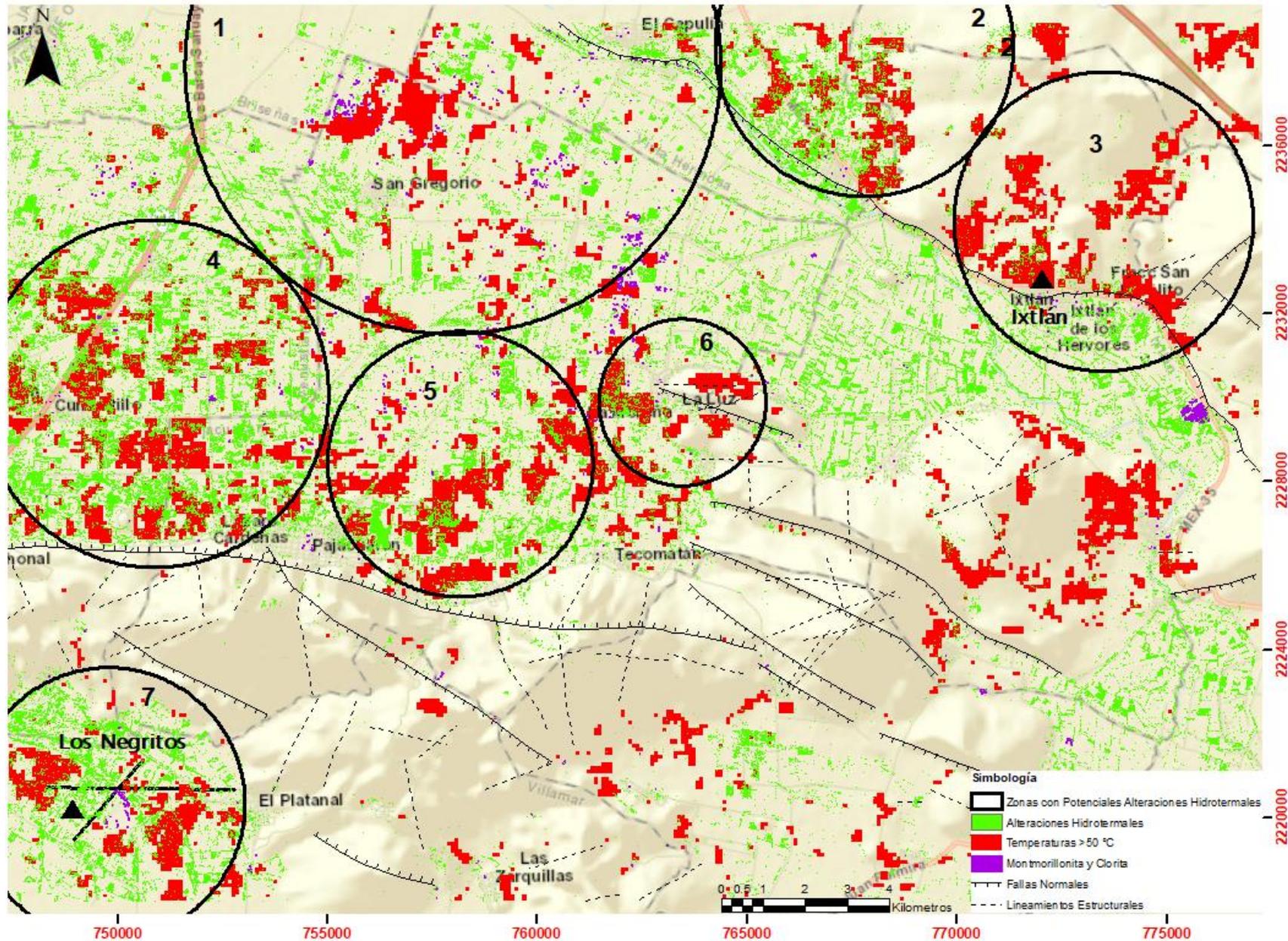


Figura 47. Mapa final de las zonas con alteraciones hidrotermales basado en el realce espectral (cocientes espectrales), el realce espacial y el realce de contraste.

## **Difusión**

### **Geolatinas**

Como parte de la estrategia de difusión, la información se divulgará de forma virtual, en colaboración con "GeoLatinas", una organización cuya misión es acoger, empoderar e inspirar a las mujeres latinas a seguir y prosperar en carreras relacionadas con las Ciencias de la Tierra y Planetarias (GeoLatinas, 2020). Esta divulgación se llevará a cabo a través de la iniciativa "GeoSeminarios en español", de la cual tengo el honor de ser co-líder. El evento está programado para el 8 de diciembre de 2023 (Figura 48).

El GeoSeminario estará disponible para el público y se transmitirá a través de plataformas populares como Facebook y YouTube. El propósito de esta actividad es garantizar que la información llegue a una amplia audiencia, con un enfoque particular en los residentes de las comunidades de la zona de estudio, así como en todas las personas interesadas en el tema. Además, el evento tiene como objetivo facilitar el acceso del público en general a los avances y descubrimientos en el campo de las Ciencias de la Tierra, promoviendo así un mayor acercamiento a la ciencia.

### **Protección civil**

La información generada en esta tesis se entregó y se explicó a Protección Civil de Michoacán con la intención de compartir los resultados de la investigación y promover una discusión sobre cómo estos hallazgos pueden ser empleados de manera efectiva para la identificación de zonas de riesgo y la prevención de desastres. También se recopiló la información bibliográfica disponible sobre las manifestaciones hidrotermales para incluirla en el mapa generado en esta tesis, con el objetivo de tener toda la información posible sobre la zona de estudio. La información bibliográfica se extrajo de IGUM (2022), artículos científicos y reportes técnicos.

En el mapa (Figura 49) se incluyen las manifestaciones hidrotermales y sinter de Olvera et al. (2020), así como los manantiales termales cuyos datos se obtuvieron de Tello (1986). Los pozos exploratorios se basaron en los datos de INEGI (1981), Grupo EYPSA (1979), Tello (1986) y Consultores, S.A. de C.V. (1990). La emanación de gas se respaldó con la información de Martínez et al. (2019), y las descargas directas se sustentaron en los datos obtenidos de Torres, V., et al. (1993). El mapa, que muestra la información recopilada y generada en esta tesis, se presenta en la Figura 50. Es fundamental resaltar que estos esfuerzos tienen como enfoque la mejora de la preparación y la seguridad en las localidades de Ixtlán de los Hervores, El Salitre, Colonia Constitución, Fraccionamiento San Hipólito (Figura 51), Pajacuarán, El Chacolote, El Paracho, La Luz, El Valenciano, Camucuató y El Limón, contribuyendo de esta manera a la salvaguardia de la vida y el bienestar de sus habitantes.

El Comité de Educación y Divulgación de GeoLatinas invita al:

# GeoSeminarario - tesis

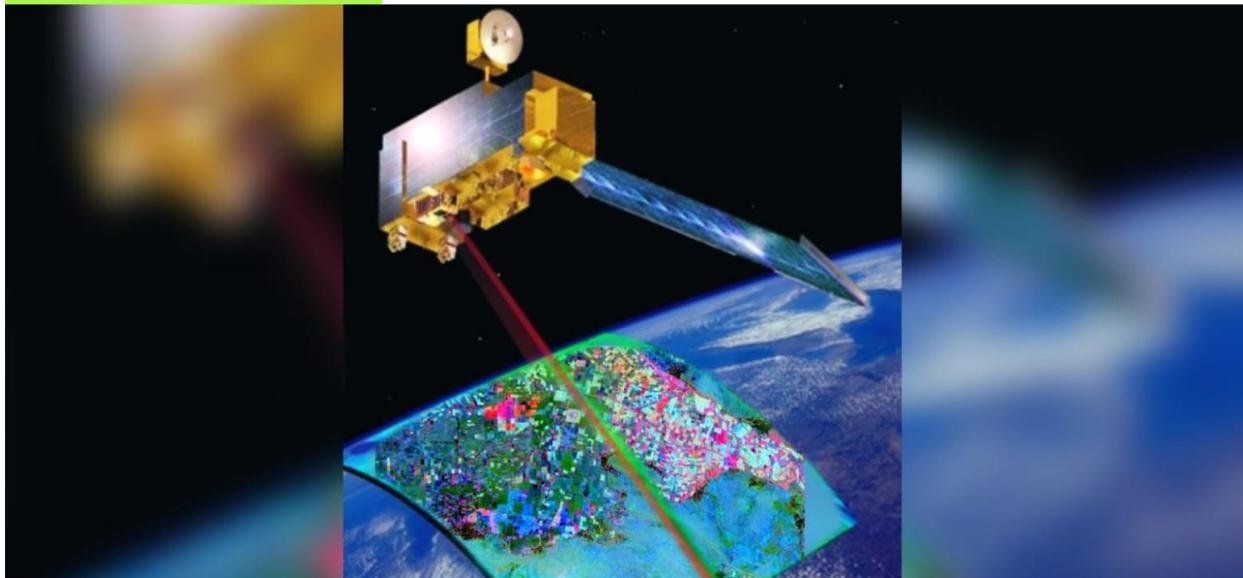
## Identificación de zonas con alteración hidrotermal en la zona Los Negritos - Ixtlán de los Hervores, Michoacán, México.



**VANIA AMARO  
REDONDA**

Licenciada en Geociencias

Esta investigación utilizó la percepción remota a través del procesamiento de una imagen satelital del sensor ASTER para estudiar los prospectos geotérmicos de Los Negritos e Ixtlán de los Hervores en Michoacán, México. Se detectaron alteraciones hidrotermales y se identificaron lineamientos estructurales relacionados con el yacimiento geotérmico. Estos hallazgos son fundamentales para la exploración de recursos geotérmicos en un contexto de creciente interés en la energía geotérmica en México.



**Miércoles, 08 de diciembre, 2023**

11:00 am - Hora México



GeoLatinas



GeoLatinasFace



geolatinasinsta



@GeoLatinas

Figura 48. Cartel del evento para difundir los resultados de esta tesis, organizado en colaboración con Geolatinas.

### Recopilación de Datos Bibliográficos de la Zona de Estudio "Los Negritos-Ixtlán de los Hervores"

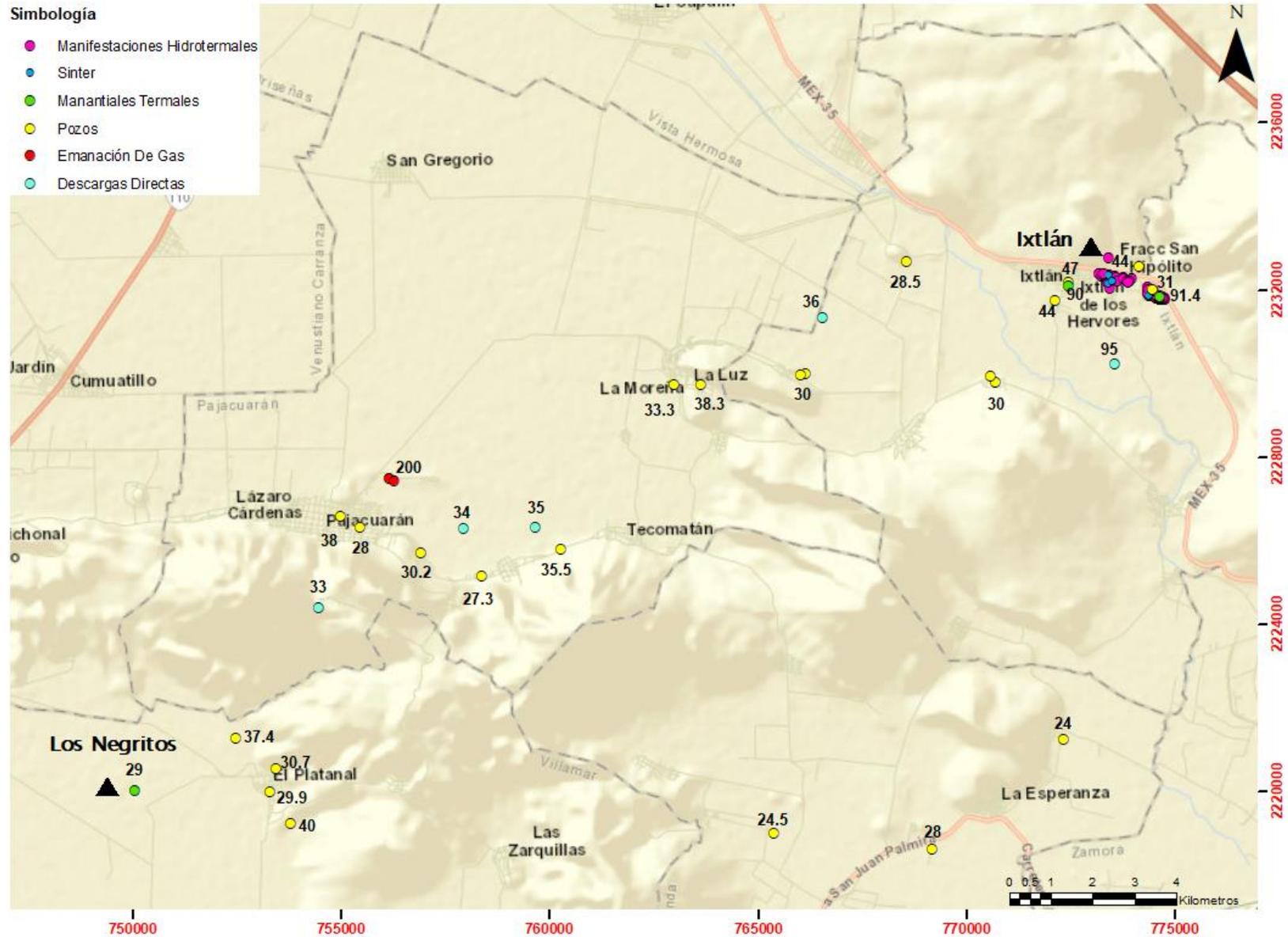


Figura 49. Datos bibliográficos de la zona de estudio. Las cifras representan temperaturas en grados Celsius (°C).

### Mapa Geotérmico Superficial de la Zona de Estudio "Los Negritos-Ixtlán de los Hervores"

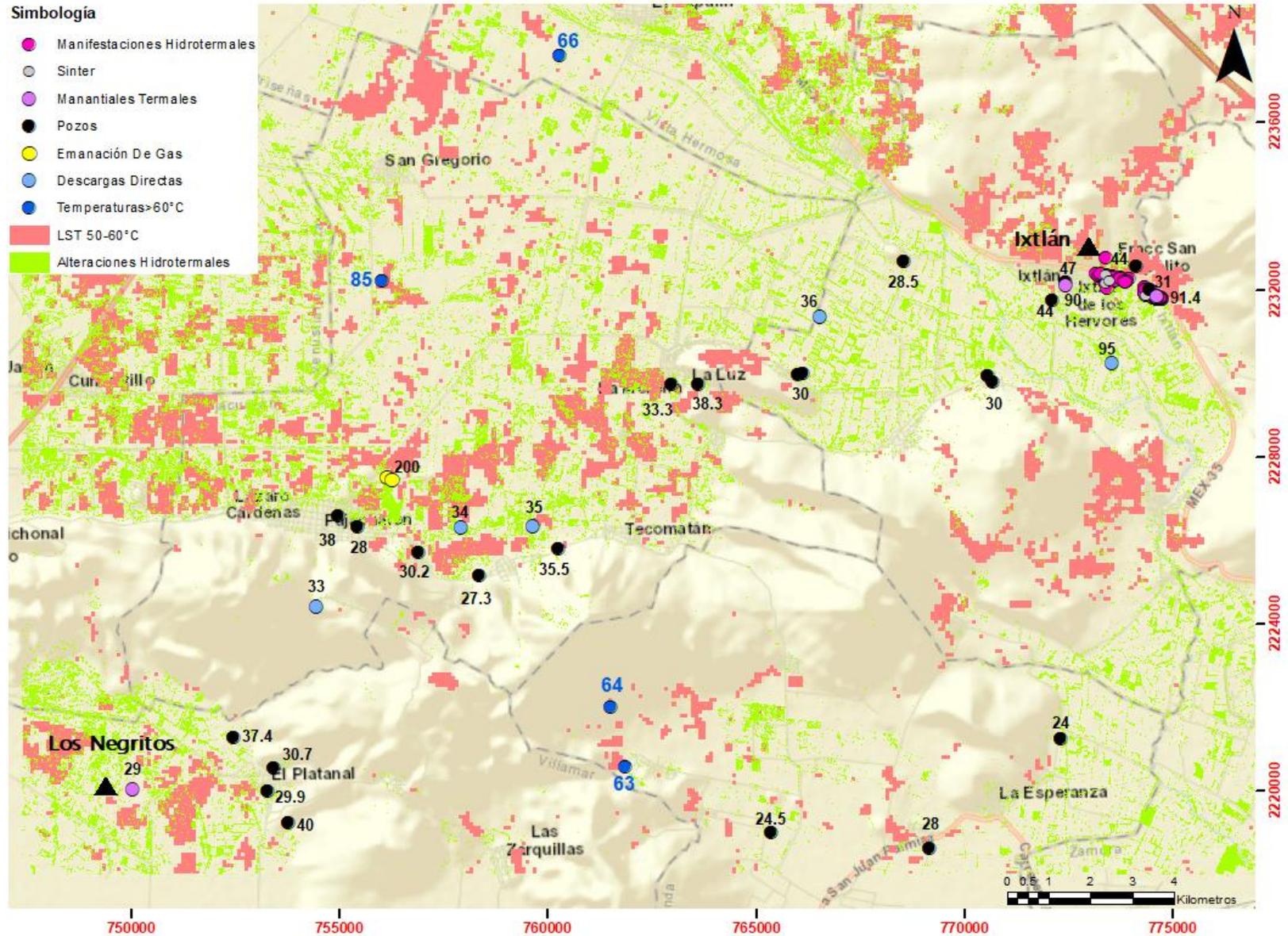
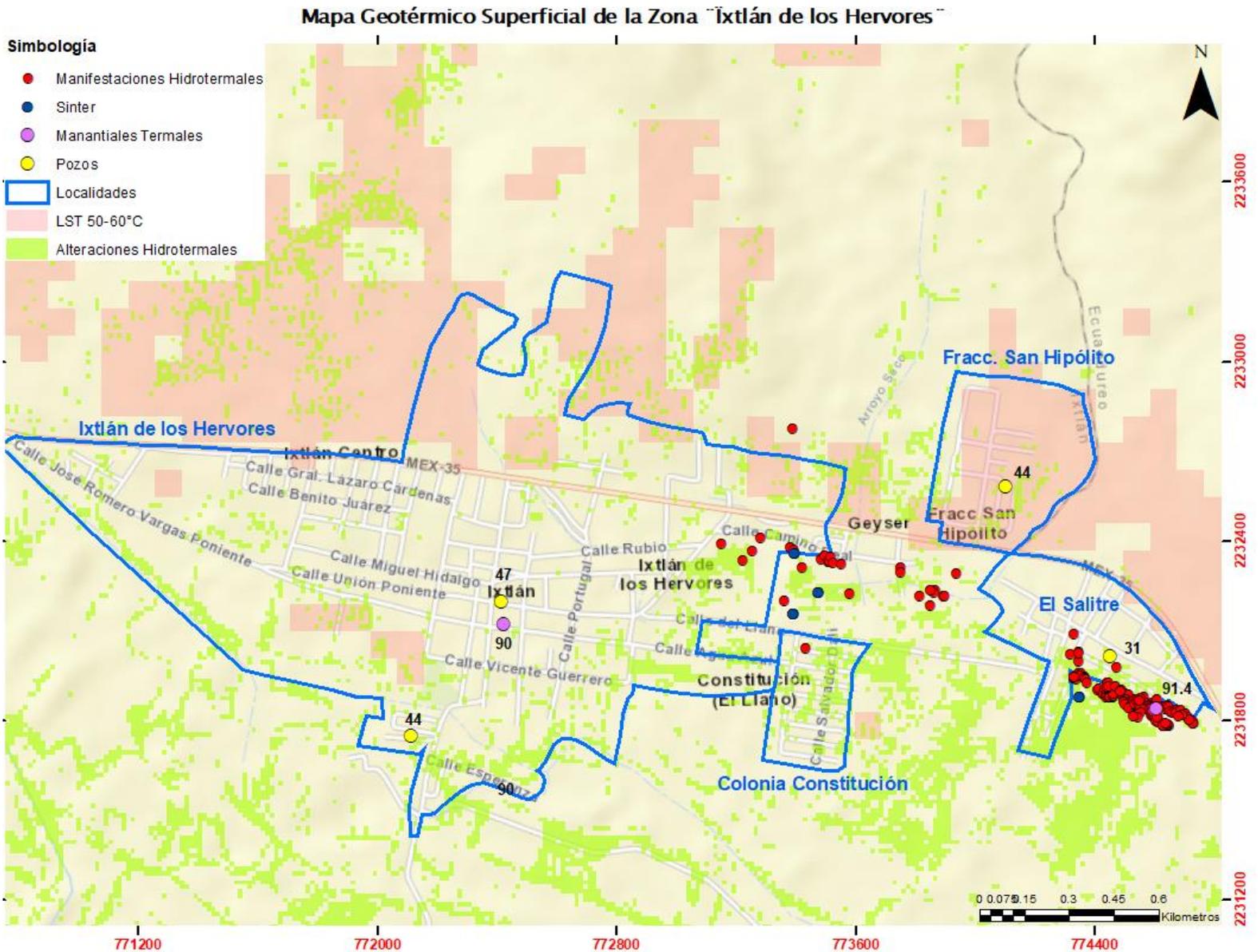


Figura 50. Mapa con toda la información generada y recopilada en esta tesis.



**Figura 51.** Acercamiento del mapa para visualizar las localidades de Ixtlán de los Hervores, Colonia Constitución, Fracc. San Hipólito y El Salitre; con toda la información generada y recopilada en esta tesis.

## Discusiones

La elección de la imagen del sensor ASTER y el uso del producto ASTER L1T han influido positivamente en los resultados y la eficiencia del análisis de datos. La amplia cobertura espectral y las bandas en el infrarrojo cercano (SWIR) han permitido obtener información detallada. Además, la disponibilidad gratuita de la imagen y la facilidad de acceso a través del portal de descarga han simplificado el proceso de obtención de datos. La corrección geométrica y radiométrica del producto L1T ha reducido tiempo y esfuerzo en el preprocesamiento.

En relación con la exploración geotérmica en la zona de estudio, es relevante destacar una limitación importante: solo se han realizado dos estudios anteriores que generaron información con percepción remota. La percepción remota y las técnicas de realce espectral y espacial son herramientas valiosas para identificar áreas de potencial geotérmico antes de las investigaciones de campo. La falta de investigaciones previas subraya la importancia de expandir y profundizar en la aplicación de estas técnicas en futuras investigaciones geotérmicas en la zona, lo que representa una valiosa oportunidad para avanzar en este campo.

Fue difícil identificar alteraciones hidrotermales en esta zona de estudio debido a su dispersión entre parcelas utilizadas para la agricultura de riego, tanto anual como semipermanente. A pesar de que estas áreas presentaban niveles de brillo elevados, se logró discernirlas gracias a las diversas y eficientes técnicas de percepción remota y a la correlación de información.

Se identificaron áreas con características espectrales que inicialmente mostraban similitudes con óxidos e hidroxilos, lo que se manifestaba en tonalidades cian en la composición RGB de cocientes de banda y PCA. Sin embargo, gracias a la correlación de información, se determinó que estas características no estaban relacionadas con alteraciones hidrotermales por lo que se descartaron. En lugar de eso, se identificaron óxidos en las parcelas destinadas a la agricultura de riego, tanto anual como semi-temporal, debido a la presencia de suelos ricos en estos compuestos. Esta riqueza en óxidos se originó como resultado de las prácticas agrícolas, terrenos recién arados o áreas en barbecho en las zonas específicas destinadas a estos tipos de cultivos. Además, se encontraron óxidos relacionados con las lavas andesíticas basálticas del período del Plioceno que se encuentran en la parte sur de la escena.

En lo que respecta a los hidroxilos, se identificaron principalmente en los vertisoles pelíticos, que se caracterizan por su composición arcillosa. También se observó una acumulación de depósitos de arcilla en la parte inferior de la falla Pajacuarán, estableciendo una clara correlación con las corrientes de agua locales. Esto llevó a la formación de depósitos aluviales que contenían arcillas y sedimentos arrastrados por dichas corrientes, lo que, a su vez, explica los valores elevados de brillo registrados en esa área.

La aplicación de técnicas de realce espacial y la digitalización de los lineamientos estructurales en la zona han revelado claramente tres direcciones principales. En la dirección E-O, se han identificado la falla Pajacuarán y la falla El Platanal. En la dirección NO-SE, se ha observado la presencia de la Falla Ixtlán y la Falla El Mezquite. Finalmente, en la dirección NE-SO, se evidencia la existencia de la falla Los Nogales y la falla Los Negritos. Estos lineamientos estructurales son el resultado del régimen tectónico de extensión que prevalece en la zona de estudio debido al punto triple. Cabe destacar que la zona de estudio se encuentra en el extremo este del Graben de Chapala, caracterizado, según Valle et al. (1970), por la presencia de fallas normales que se orientan de NO-SE a E-O. Sin embargo, dada su ubicación en el centro-oeste de la Faja Volcánica Transmexicana (FVTM), también está influenciada por los regímenes transtensivos. (Garduño-Monrroy et al., 2001).

La hidrología de la zona muestra una presencia significativa de fracturas que probablemente contribuyen a la recarga del acuífero al facilitar la infiltración del agua meteórica. Por otro lado, las fallas geológicas sirven como rutas para el ascenso de fluidos subterráneos.

Debido a que las alteraciones hidrotermales se concentraron en la zona de la planicie y no en la zona volcánica, es posible que las fracturas geológicas presentes en los límites de las zonas de planicie, como la falla Ixtlán, la falla Pajacuarán, la falla Mezquite y la falla Nogales, estén actuando como obstáculos naturales que restringen o confinan el cuerpo de calor geotérmico, creando una especie de "trampa" para el calor subterráneo. Esto permite el ascenso de fluidos geotérmicos en esas zonas, pero impide su avance hacia la región de topografía volcánica del Plioceno y Pleistoceno.

Las siguientes descripciones detallan las 7 zonas de alteraciones hidrotermales identificadas como resultado de esta tesis.

#### **Zona 1 (Localidad de San Gregorio):**

En esta zona, no se han registrado manifestaciones superficiales bibliográficas de actividad geotérmica, pero se observan alteraciones hidrotermales. Esto podría sugerir que la actividad geotérmica en esta área es extinta. Sin embargo, para determinar si una zona geotérmica es completamente extinta o simplemente inactiva, se requeriría un análisis más detallado, como estudios geofísicos para mapear las características del subsuelo e identificar posibles reservorios geotérmicos, o bien el monitoreo de las variaciones de temperatura en el suelo a diferentes profundidades, la perforación de pozos de exploración para obtener muestras de fluidos, etc.

#### **Zona 2 (Localidad de La Angostura):**

A pesar de que no se han reportado manifestaciones superficiales bibliográficas, la presencia de alteraciones hidrotermales y temperaturas superficiales elevadas, especialmente cerca de la falla Ixtlán, sugiere un potencial geotérmico en esta zona.

**Zona 3 (Localidades de Ixtlán de los Hervores, El Salitre, Colonia Constitución, Fraccionamiento San Hipólito):**

En esta región, se han registrado más de 200 manifestaciones superficiales geotérmicas en la literatura científica, junto con temperaturas superficiales elevadas y alteraciones geotérmicas superficiales con alineación N0–SE que coinciden con la falla Ixtlán. Esto respalda la existencia de un potencial geotérmico significativo en la zona.

**Zona 4 (Localidades de Cumuatillo, Pueblo Viejo, Las Malvinas, El Fortín):**

Esta zona, ubicada en la dirección E–O y coincidiendo con la falla Pajacuarán, muestra alteraciones hidrotermales y temperaturas superficiales elevadas. Sin embargo, no se han registrado manifestaciones bibliográficas, por lo que se requiere llevar a cabo investigaciones adicionales.

**Zona 5 (Localidades de Pajacuarán, El Chacolote, El Paracho):**

En esta área, se han reportado manifestaciones superficiales bibliográficas, además de alteraciones hidrotermales y temperaturas superficiales elevada en dirección E–O. La proximidad a la falla Pajacuarán fortalece el potencial geotérmico de la zona.

**Zona 6 (Localidad de La Luz):**

La presencia de lineamientos estructurales, manifestaciones geotérmicas reportadas en la literatura y alteraciones hidrotermales, junto con temperaturas del suelo elevadas, indica un potencial geotérmico en esta región.

**Zona 7 (Localidad de Los Negritos, El Platanal):**

En esta zona, se identifican dos lineamientos estructurales, manifestaciones superficiales geotérmicas registradas en la bibliografía, temperaturas superficiales elevadas y alteraciones geotérmicas superficiales, lo que confirma el potencial geotérmico.

Se debe hacer algo para avanzar hacia el uso de energías renovables en México, dado que el país ocupa el 15° lugar en la lista de los países más contaminantes del mundo y es el segundo mayor emisor de gases de efecto invernadero en Latinoamérica (Enlight, 2022). El sector energético es la fuente de alrededor de las tres cuartas partes de las emisiones de gases de efecto invernadero en la actualidad (IEA, 2021). Por lo tanto, es crucial implementar estrategias para reducir estas emisiones.

## **Conclusiones y Recomendaciones**

La metodología aplicada logró identificar con éxito alteraciones hidrotermales en la zona de estudio, a pesar de las dificultades planteadas por la presencia de parcelas agrícolas, lo que tiene importantes implicaciones para la exploración de recursos geotérmicos y futuras investigaciones.

La elección de una imagen ASTER LIT mejoraron la eficiencia del análisis, facilitando la obtención de datos detallados. Se recomienda seguir utilizando para futuros estudios geotérmicos.

Los lineamientos estructurales identificados en la zona de estudio, a través de técnicas de realce espacial y digitalización, revelan direcciones asociadas con el régimen de extensión y transtensión tectónica, siendo de gran relevancia las direcciones E-O, NO-SE y NE-SO.

Las fracturas facilitan la infiltración y recarga del acuífero, mientras que las fallas actúan como vías para el ascenso de fluidos subterráneos.

Las fracturas geológicas en los límites de las zonas de planicie actúan como barreras para el ascenso de fluidos geotérmicos, lo que concentra el calor geotérmico en estas áreas y limita su avance hacia las zonas de topografía volcánica.

Las zonas 2, 3, 4, 5, 6 y 7 presentan potencial geotérmico. En contraste, la zona 1 requiere investigaciones adicionales para determinar si existe actividad geotérmica activa. La continuidad de la investigación en todas las zonas es crucial para mitigar riesgos y prevenir posibles desastres en las comunidades cercanas.

La percepción remota debe tener prioridad en la exploración geotérmica. Su aplicación previa a la exploración de campo proporciona información precisa y detallada, siendo esenciales para la toma de decisiones informadas y eficientes en la búsqueda y explotación de recursos geotérmicos.

Es fundamental avanzar en la transición energética, con un enfoque especial en la energía geotérmica. Se requieren proyectos más ambiciosos para lograr esta transición. La energía geotérmica presenta diversas ventajas, incluyendo la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero, lo que contribuye significativamente a la mitigación del cambio climático. Al ser una fuente de energía renovable, disminuye la dependencia de combustibles fósiles, promoviendo la seguridad energética y proporcionando un suministro constante de energía. Además, puede impulsar el desarrollo económico local.

En este contexto, es esencial definir cómo se aprovechará la energía geotérmica en la zona de estudio, teniendo en cuenta las necesidades locales y considerando tanto su impacto ambiental como social. Esto implica un análisis detallado, priorizando aquellas que sean económicamente viables y que brinden beneficios tangibles a la comunidad.

También se debe mejorar la colaboración entre la industria geotérmica, la academia y las comunidades locales en los proyectos geotérmicos.

Las recomendaciones otorgadas a protección civil fueron las siguientes:

- Monitorear las manifestaciones superficiales en localidades: Ixtlán de los Hervores, El Salitre, Colonia Constitución, Fraccionamiento San Hipólito, Pajacuarán, El Chacolote, El Paracho, La Luz, El Valenciano, Camucuat y El Limón.

- Tener un plan de evacuación específico para áreas de alto riesgo geotérmico. Esto garantiza que los residentes estén preparados para abandonar sus hogares de manera segura en caso de un evento relacionado con la geotermia
- Utilizar redes sociales para informar a las comunidades locales sobre los acontecimientos en las zonas geotérmicas y los riesgos asociados.
- Organizar reuniones comunitarias para dialogar sobre los eventos en las zonas geotérmicas y para escuchar las inquietudes de la comunidad, fomentando la comunicación y la participación activa de los residentes.
- Tomar decisiones relacionadas con el desarrollo urbano en las áreas geotérmicas, incluyendo la posibilidad de establecer restricciones en la construcción o el uso de la tierra en áreas de alto riesgo con el objetivo de prevenir desastres para la población.

## Referencias

- Allan, J. F. (1986). Geology of the Colima and Zacoalco grabens, SW Mexico: Late Cenozoic rifting in the Mexican Volcanic Belt. *Geol. Soc. Amer. Bull.*, 97, 473–485
- Allan, J.F., Nelson S.A., Luhr J.F., Carmichael I.S.E., Wopat M., Wallace P.J., (1991). Pliocene–Holocene Rifting and associated volcanism in southwest Mexico; An exotic terrane in the making, en Dauphin J.P., Simoneit B.R.T., *The Gulf and Peninsular Province of California*: Tulsa, OK., American Association of Petroleum Geologists. (47), 425–445.
- AMS (American Meteorological Society). Brightness Temperature. (2016). [http://glossary.ametsoc.org/wiki/Brightness\\_temperature](http://glossary.ametsoc.org/wiki/Brightness_temperature)
- Anderson, A., y Rezaie, B. (2019). Geothermal technology: Trends and potential role in a sustainable future. *Applied Energy*, 248, 18–34. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.04.102>
- Aviña, H. J. (2021). *Geothermal Agri–food Applications*. IIDEA Group México UNAM, Mexico City.
- Banwell, C. J., & Gómez Valle, R. (1970). Geothermal exploration in Mexico 1968–1969. *Geothermics*, 2, 27–40.
- Berk, A., Anderson, G. P., Acharya, P. K., Chetwynd, J. H., Bernstein, L. S., Shettle, E. P., Matthew, M. W., y Adler–Golden, S. M. (2000). [ftp://ftp.pmodwrc.ch/pub/Vorlesung%20K+S/MOD4\\_user\\_guide.pdf](ftp://ftp.pmodwrc.ch/pub/Vorlesung%20K+S/MOD4_user_guide.pdf)
- Campbell, J. Wynne, R. (2011). *Introduction to Remote Sensing*. New York, USA: The Guilford Press. 5. 667.
- Carlson, T.N. y Ripley, D.A. (1997). On the Relation between NDVI, Fractional Vegetation Cover, and Leaf Area Index. *Remote sensing of Environment*, 62, 241–252.
- Chapman, R., Gasparovic, R. (2022). *Remote Sensing Physics: An Introduction to Observing Earth from Space*. Reino Unido: Wiley.
- Chuvieco, E. (2016). *Fundamentals of satellite remote sensing: An environmental approach*. CRC press.
- Collado et al., (2015). *Kuxulkab*. XXI (40): 23–29
- Crosta, A. P., De Souza–Filho C. R., Azevedo, F. y Brodie C. (2003). Targeting key alteration minerals in epithermal deposits in Patagonia, Argentina, using ASTER imagery and principal component analysis. *Journal of Remote Sensing*, 24, 21, 4233–4240.
- Crosta, A. P., y 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. *Proceedings of the Seventh Thematic Conference on Remote Sensing for Exploration Geology*. 2(6). 1173–1187.
- Davies, J. H., Davies, D. R., 2010. Earth's surface heat flux. *Solid Earth* 1 (1), 5–24. [doi:10.5194/se-1-5-2010](https://doi.org/10.5194/se-1-5-2010).

- Díaz, C.E., (1969) Litología y gráfica de temperatura de los barrenos perforados en Los Negritos Mich. C.F.E. Reporte Interno
- Dickson, M. H., y Fanelli, M. (2004). ¿ Qué es la energía geotérmica? Pisa: Istituto di Geoscienze e Georisorse, CNR.
- DiPippo, R. (2012). Geothermal Power Plants: Principles, Applications, Case Studies and Environmental Impact, Butterworth–Heinemann, Oxford, United Kingdom.
- Enlight (2022). México en COP27: Aumenta su compromiso de reducción de emisiones. [https://www.enlight.mx/blog/mexico-en-cop27-aumenta-su-compromiso-de-reduccion-de-emisiones-para-2030?utm\\_source=blog&utm\\_medium=blog2023&utm\\_campaign=panorama\\_2023&utm\\_id=perspectiva2023](https://www.enlight.mx/blog/mexico-en-cop27-aumenta-su-compromiso-de-reduccion-de-emisiones-para-2030?utm_source=blog&utm_medium=blog2023&utm_campaign=panorama_2023&utm_id=perspectiva2023)
- Enlight (2023). Energía Solar: Perspectiva 2023 en México y el mundo. <https://www.enlight.mx/blog/energia-solar-perspectiva-2023-en-mexico-y-el-mundo>
- ESA (s.f.). Teledetección. [https://www.esa.int/SPECIALS/Eduspace\\_ES/SEMO1U3FEXF\\_0.html](https://www.esa.int/SPECIALS/Eduspace_ES/SEMO1U3FEXF_0.html)
- Fernández de la Vega–Márquez, R. M. Prol–Ledesma y G. Orozco, 2001. Hydrothermal alteration and main structures mapping using TM images in La Primavera geothermal field (Mexico). *Geofísica Internacional*, 40, 3, 147–162.
- Ferrari, L., Orozco–Esquivel, T., Manea, V.C., Manea, M. (2012). The dynamic history of the Trans–Mexican Volcanic Belt and the Mexico subduction zone. *Tectonophysics* 522–523, 122–149.
- Fraser S. J. (1990). Discrimination and identification of ferric oxides using satellite Thematic Mapper data: A Newman case study: *International Journal of Remote Sensing*. 12, 3, 614–635.
- Garduño–Monroy, V. H., Arreygue–Rocha, E., Israde–Alcántara, I. y Rodríguez–Torres, G. M. (2001) 'Efectos de las fallas asociadas a sobreexplotación de acuíferos y la presencia de fallas potencialmente sísmicas en Morelia, Michoacán, México', *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 18, pp. 37–54. [http://satori.geociencias.unam.mx/18-1/\(2\)Garduno.pdf](http://satori.geociencias.unam.mx/18-1/(2)Garduno.pdf)
- Garduño–Monroy, V.H., Spinnler, J., Ceragioli, E., (1993). Geological and structural study of the Chapala Rift, state of Jalisco, Mexico. *Geofis. Int.* 32, 487–499.
- Gaspar Patarroyo, T. L. (2017). Modelo conceptual geológico–vulcanológico–estructural de la zona geotérmica de Ixtlán de los Hervores, Michoacán–México [Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo]. [http://bibliotecavirtual.dgb.umich.mx:8083/xmlui/handle/DGB\\_UMICH/4398](http://bibliotecavirtual.dgb.umich.mx:8083/xmlui/handle/DGB_UMICH/4398)
- Geolatinas (2020). Geolatinas/About us. <https://geolatinas.org/es/about-us/>

- Global Geothermal Alliance. (2019). Geotermia: La solución subterránea. <https://www.globalgeothermalalliance.org/-/media/GGA/Files/Geothermal--The-Solution-Underneath.pdf?rev=10a0fdb3bce940cdac158a3304bef7fb>
- González Acevedo, Z. I., y Olgúin, F. P. (2016). Propuesta metodológica para determinar el desarrollo sustentable de zonas con potencial geotérmico. *REVISTA MEXICANA DE GEOENERGÍA*. 29(2), 37.
- Gutiérrez Negrín, L., Hernández, A. L., y León, J. Q. (1989). Zonas geotérmicas de interés en México. *Rev. Mex. Geoenergía*, 5(3), 283–346.
- Hord, R.M. (1986). *Remote Sensing: Methods and Applications*. New York: John Wiley & Sons
- Hunt, G. R., y Ashley, R. P. (1979). Spectra of Altered Rocks in the Visible and near Infrared. *Economic Geology*, 74 (7), 1613–1629.
- ICGC (Institut Cartogràfic i Geològic de Catalunya). (2011). El origen del calor de la Tierra. <https://www.icgc.cat/es/Administracion-y-empresa/Servicios/Geotermia/El-origen-del-calor-de-la-Tierra>
- IEA: International Energy Agency (2021). Net Zero by 2050. <https://www.iea.org/reports/net-zero-by-2050>
- IGUM: Instituto de Geofísica Unidad Michoacán (2022). Proyecto P02. Unam.Mx. <http://geotermia.geofisica.unam.mx/map>
- INEGI (1973). Mapas. Carta geológica Villa Chavinda. Edición 1973.
- INEGI (2018). División política municipal. Catálogo de metadatos geográficos. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad.
- INEGI (2019). Conjunto de datos vectoriales de información topográfica F13D88 (Villa Chavinda) escala 1:50 000 Serie III. Mich. Mapas topográficos Michoacán de Ocampo.
- INEGI (2019). División política estatal. Catálogo de metadatos geográficos. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad.
- INEGI. (1981). Conjunto de datos vectoriales de la carta de Aguas subterráneas. Escala 1:250 000. Serie I. Guadalajara. Febrero 14, 2018. <http://www.beta.inegi.org.mx/app/biblioteca/ficha.html?upc=702825681562>
- IRENA y IGA. (2023). *Global geothermal market and technology assessment*. International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi; International Geothermal Association, The Hague.
- Jensen, J.R. (1996). *Introductory Digital Image Processing: A Remote Sensing Perspective*. Upper Saddle River, NJ: Prentice-Hall.
- Jensen, J.R. (2005). *Introductory digital image processing—a remote sensing perspective*. 3. 526. ISBN 978-0-13-145361-0
- Jiménez Muñoz, J. C. y Sobrino, J. A. (2010). A Single-Channel Algorithm for Land-Surface Temperature Retrieval From ASTER Data *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 7, 176–179.

- Jiménez Muñoz, J.C.; Sobrino, J.A.; Gillespie, A.; Sabol, D.; Gustafson, W.T. (2006). Improved land surface emissivities over agricultural areas using ASTER NDVI. *Remote Sens. Environ.* 103, 474–487.
- Kruse, F.A., Lefkoff, A.B., Boardman, J.W., Heidebrecht, K.B., Shapiro, A.T., Barloon, P.J., Goetz, A.F.H. (1993). The spectral image processing system (SIPS) – interactive visualization and analysis of imaging spectrometer data. *Remote Sens. Environ.* 44, 145–163.
- Lagat, J. (2009). Hydrothermal alteration mineralogy in geothermal fields with case examples from Olkaria domes geothermal field, Kenya. Dipresentasikan dalam short course IV on exploration for geothermal resources.
- Lillesand, T., Kiefer, R. W., y Chipman, J. (2015). *Remote sensing and image interpretation*. John Wiley y Sons.
- Lillesand, T.M. and Kiefer, R.W. (2000). *Remote Sensing and Image Interpretation*. New York: John Wiley y Sons
- Lintz, J., y D. S. Simonett. (1976). *Remote Sensing of Environment*. Reading, MA: AddisonWesley. 694 pp.
- Lira, J. (1987). *La percepción remota, nuestros ojos desde el espacio*. México: Fondo de Cultura Económica.
- Loughlin, W.P.(1991). Principal Component Analysis for Alteration Mapping: Photogrammetric Engineering and Remote Sensing. Vol. 57 (9), 1163–1169.
- Martínez, J., Moreno Nava, I., Vera–Romero, I., y Ortiz, A. (2019). Estudio Geotérmico Preliminar de la Falla Pajacuaran en el Área de Peribán, Michoacán. [https://www.researchgate.net/publication/344846234\\_Preliminary\\_Geothermal\\_Study\\_of\\_The\\_Pajacuaran\\_Fault\\_in\\_the\\_Area\\_of\\_Periban\\_Mich](https://www.researchgate.net/publication/344846234_Preliminary_Geothermal_Study_of_The_Pajacuaran_Fault_in_the_Area_of_Periban_Mich)
- Mather, P.M. (1998). *Computer Processing of Remotely Sensed Images*. Chichester, U.K.: John Wiley & Sons.
- Mohr, p. J.; Newell, d. B. y Taylor, b. N. (2015). CODATA Recommended Values of the Fundamental Physical Constants: 2014 National Institute of Standards and Technology, Committee on Data for Science and Technology.
- NASA SVS (2017) Remotely Sensing Our Planet. ID: 30892. [earthdata.nasa.gov](http://earthdata.nasa.gov)
- Ninomiya, Y. (2002). Mapping quartz, carbonate minerals and mafic ultramafic rocks using remotely sensed multispectral thermal infrared ASTER data. *Proceedings of The International Society for Optical Engineering*, 4710, 191.
- Olvera–García, E., Garduño–Monroy, V. H., Ostrooumov, M., Gaspar–Patarroyo, T. L., y Nájera–Blas, S. M. (2020). Structural control on hydrothermal upwelling in the Ixtlán de los Hervores geothermal area, Mexico. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 399, 106888.

- Ortega Gutiérrez, F., Mitre-Salazar, L. M., Roldán-Quintana, J., Aranda-Gómez, J. J., Morán-Zenteno, D. J., Alaniz-Álvarez, S. A., Nieto-Samaniego, Á. F., (1992). Carta geológica de la República Mexicana: quinta edición escala 1:2.000,000: México, D. F., Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geología; Secretaría de Energía, Minas e Industria Paraestatal, Consejo de Recursos Minerales, 1 mapa, texto explicativo 74 p.
- Pasquaré, G., Ferrari, L., Garduño-Monroy, V.H., Tibaldi, A., Vezzoli, L. (1991). Geology of the central sector of the Mexican Volcanic Belt, States of Guanajuato and Michoacan. Geological Society of America Maps and Charts Series MCH072, Scale 1:300 000. p. 22.
- Peláez, R. (2017). Geotermia en México, Un Potencial Potencial de Energía “Inagotable”.<https://keeu.com/2021/10/27/energias-limpas-energia-geotermica-en-mexico/>
- Pirajno, F. (2008). Hydrothermal processes and mineral systems. Springer Science & Business Media.
- Prol Ledesma R.M. (1988). El calor de la tierra. Fondo de cultura económica.
- Reinsch, T., Dobson, P., Asanuma, H. et al. Utilizing supercritical geothermal systems: a review of past ventures and ongoing research activities. *Geotherm Energy* 5, 16 (2017). <https://doi.org/10.1186/s40517-017-0075-y>
- Richards, J.A. (1993). Remote Sensing Digital Image Analysis: An Introduction. Berlin, Germany: Springer-Verlag.
- Rosas Elguera, J., Urrutia-Fucugauchi, J., Maciel, R. (1989). Geología del extremo oriental del Graben de Chapala; breve discusión sobre su edad: Zonas geotérmicas Ixtlan de Los Hervores-Los Negritos, México. *Geotermia-Revista Mexicana de Geoenergía* 5, 3-18.
- Rosas, J. (1981). Estudio Geológico de las zonas Geotérmicas de Ixtlán de los Hervores-Los Negritos, Edo., Mich. Tesis Profesional, IPN.
- Rouse, j. W., Haas, r. W., Schell, j. A., Deering, d. H. Y harían, j. C. (1974). Monitoring the vernal advancement andretrogadation (Greenwave effect) of natural vegetation. Greenbelt, MD. USA, NASA/GSFCT.
- Santoyo, E., y Barragán-Reyes, R. M. (2010). Energía geotérmica. *Revista de la Academia Mexicana de Ciencias*, 61(2), 40-51.
- Schowengerdt, R.A. (2007). Remote Sensing, Models, and Methods for Image Processing. Burlington, MA: Elsevier Academic Press.
- SELPER (Sociedad Latinoamericana de Percepción Remota y Sistemas de Información Espacial). (2013). Diccionario. [http:// www.selper.info/diccionario.php](http://www.selper.info/diccionario.php)»
- Serra, J., Soille, P., y Vincent, L. (2002). Remote sensing image processing. Wiley.
- Servicio Meteorológico Nacional. (2019, abril 15). Servicio Meteorológico Nacional. Gob.mx. <https://smn.conagua.gob.mx/es/component/content/article?id=140:d>

- Slater, Phillip N. (1980). *Remote Sensing: Optics and Optical Systems*: Reading, Addison and Wesley Pub. Co., 575 p
- Sobrino, J. A. (2001). A comparative study of land surface emissivity retrieval from NOAA data. *Remote Sensing of Environment*, 75(2), 256–266.
- Tarbut, E. J., Lutgens, F. K., Tasa, D., y Cientificas, A. T. (2005). *Ciencias de la Tierra*. (Vol. 1). Madrid: Pearson Educación.
- Tello, E. (1986) Características químicas e isotópicas del agua de manantiales termales de las zonas geotérmicas de Ixtlán de los Hervores y Los Negritos, Michoacán. *Geotermia*.
- ThinkGeoEnergy (2023). ThinkGeoEnergy's Top 10 Geothermal Countries 2022 - Power Generation Capacity (MW). <https://www.thinkgeoenergy.com/thinkgeoenergys-top-10-geothermal-countries-2022-power-generation-capacity-mw/>
- Trillo, G. L., y Angulo, V. R. (2008). Guía de la energía geotérmica. Dirección General de Industria, Energía y Minas. <https://www.fenercom.com/wp-content/uploads/2008/01/Guia-de-la-Energia-Geotermica-fenercom-2008.pdf>
- USGS (United States Geological Survey). (s.f.). What is remote sensing and what is it used for? Recuperado de <https://www.usgs.gov/faqs/what-remote-sensing-and-what-it-used>
- Valle, R. G., Friedman, J. D., Gawarecki, S. J., y Banwell, C. J. (1970). Photogeologic and thermal infrared reconnaissance surveys of the Los Negritos-Ixtlan de los Hervores geothermal area, Michoacan. Mexico. *Geothermics*, 2, 381–398.
- Viggiano Guerra, J.C., Gutiérrez Negrín, L.C.A. (2006). Lithology and hydrothermal mineralogy of the well Ixtlán 2, Ixtlán de los Hervores, Mexico. *GRC Transactions* 30, 45–48.
- Viggiano Guerra, J.C., Gutiérrez Negrín, L.C.A., (2007). Estudio petrográfico y modelo conceptual preliminar de la zona geotérmica de Ixtlán de los Hervores, Michoacán, México. *Ingeniería hidráulica en México* 22 (4), 61–73.
- Vulcan Energy (2021). ASX Announcements, Retrieved from IRM. [vul.live.irmau.com/site/PDF/6a97ce8a-7fa2-45e2-89ca-08027c32b962/FirstBatteryQualityLithiumHydroxidefromPilotOperation](https://vul.live.irmau.com/site/PDF/6a97ce8a-7fa2-45e2-89ca-08027c32b962/FirstBatteryQualityLithiumHydroxidefromPilotOperation)
- Weng, Q., Lu, D., y Schubring, J. (2004). Estimation of land surface temperature-vegetation abundance relationship for urban heat island studies. *Remote Sensing of Environment*, 89(4), 467–483. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2003.11.005>
- Yimlaz, C., y Kanoglu, M. (2017). Investigation of hydrogen production cost by geothermal energy. *International Advanced Researches and Engineering Journal*. 5–10. [dergipark.org.tr/tr/download/article-file/403086](http://dergipark.org.tr/tr/download/article-file/403086).