



CENTRO DE INVESTIGACIÓN EN GEOGRAFÍA Y GEOMÁTICA

"ING. JORGE L. TAMAYO", A.C.

CentroGeo

Centro Público de Investigación CONACYT

**Aplicación de Percepción Remota para el Estudio de
Áreas con un Potencial Geotérmico.**

La Soledad (Jalisco) y los Negritos (Michoacán)

TESIS

Que para obtener el grado de Maestro en Geomática

Presenta

EDGAR OMAR CALZADA IGLESIAS

Director de Tesis

Dra. Alejandra López Caloca

Jurado

Dr. José M. Sánchez Gamboa

Codirector de Tesis

Dra. Carmen Reyes

Jurado

Mtro. Camilo Caudillo Cos

Ciudad de México, junio, 2016

Resumen

La percepción remota es una disciplina que integra los desarrollos más recientes en observación, exploración y monitoreo del planeta tierra. Los sensores remotos cumplen la misión de ofrecer información en diferentes regiones del espectro electromagnético. La capacidad de registrar información en las regiones del espectro electromagnético, permite caracterizar objetos en la superficie terrestre dependiendo de la región que se trabaja y es una fuente de información relevante para estimar variables biofísicas como por ejemplo la temperatura.

En especial, la información almacenada en la banda del infrarrojo térmico tiene la capacidad de registrar las emisividades de los cuerpos para su posterior estimación de temperatura de la superficie terrestre. La propuesta de investigación se orienta a tomar ventaja de la percepción remota en el dominio del infrarrojo térmico para aplicaciones en el ámbito de la investigación de recursos geotérmicos y su relación con estructuras geológicas. El conocimiento de la temperatura de superficie tiene gran interés en la distribución de áreas con potencial geotérmico. Las zonas geotérmicas se encuentran en función de condiciones geológicas que tienen su origen en el interior de la tierra y se reflejan en la corteza a través de manifestaciones superficiales tales como manantiales termales, los géiseres, pozas de lodo, entre otros.

Las características tectónicas y vulcanológicas de México lo hacen candidato natural al aprovechamiento de recursos geotérmicos, sin embargo, no todo el territorio presenta condiciones uniformes y en este sentido, la península de Yucatán, las zonas de vulcanismo activo en Chiapas y el Cinturón Volcánico Transmexicano (CVT) destacan por la presencia de manifestaciones superficiales físicas asociadas con el calor contenido en el interior de la tierra. El CVT es considerado la zona de mayor importancia por su extensión territorial y antecedentes geológicos, razón por la cual en el presente trabajo de investigación fueron elegidas dos sub-áreas ubicadas en el centro de Jalisco y Occidente de Michoacán. Una forma eficiente para estudiar la variabilidad de temperatura de superficie en grandes coberturas de superficie terrestre como el CVT, es la percepción remota utilizada en esta investigación para la detección de lugares con potencial geotérmico en los campos de La Soledad, Jalisco y Los Negritos, Michoacán. La variabilidad espacial de la temperatura de superficie se puede caracterizar mediante el uso de sensores que operan en la región del infrarrojo térmico a través del procesamiento de información de imágenes multispectrales Landsat 7 ETM+, basado en un modelo sugerido por (Qin et al., 2011) y (Sobrino, 2001 & 2004).

De este modo, este trabajo propone y desarrolla un proceso experimental para temperatura de superficie que pueda aportar en la fase de diagnóstico en los estudios de reconocimiento y prefactibilidad en los procesos relacionados con la exploración de recursos geotérmicos.

“Es muy probable que las mejores decisiones no sean fruto de una reflexión del cerebro sino del resultado de una emoción”

Eduardo Punset

Reconocimientos

Debo un especial reconocimiento a mi mamá que, con sus enseñanzas y ejemplo de vida ha sido mi inspiración y guía. A mi papá que desde pequeño me alentó a pensar y ser diferente; a cada día esforzarme al máximo para lograr mis objetivos. También quiero reconocer a mi hermana por su peculiar compañía e inagotable apoyo. Agradezco a Andy por ser mi compañera, por su entusiasmo, y aliento para ayudarme a hacer posible este trabajo de investigación.

Un enorme reconocimiento a mis sinodales por haberse dado el tiempo para leer este trabajo y en especial a la Dra. Alejandra López por el apoyo y gran sensibilidad que mostro durante todo el proceso de redacción y creación del presente documento. Agradezco a la Dra. Carmen Reyes y al Mtro. Camilo Caudillo por sus apreciables contribuciones para la complementación en el enfoque de mi investigación.

Un eterno agradecimiento al CentroGeo y al CONACYT por el soporte brindado para la realización de mis estudios de maestría.

Tabla de contenido

1. Introducción	1
1.1 Antecedentes	1
1.2 Justificación y relevancia	7
1.3 Planteamiento del problema	8
1.4 Pregunta de investigación	9
1.5 Hipótesis	9
1.6 Objetivos	9
2. Percepción remota en la exploración de recursos geotérmicos	10
2.1 Bloques disciplinarios propuestos para apoyar estudios de geotermia	10
2.2 Tecnologías satelitales para el aprovechamiento de la energía geotérmica	13
3. Área de estudio y datos	17
3.1 Imágenes Landsat 7 ETM+	18
3.2 Campo geotérmico La Soledad, Jalisco	20
3.3 Campo geotérmico Los Negritos, Michoacán	22
3.4 Datos para validación	23
4. Propuesta experimental	25
4.1 Principios físicos.....	26
4.2 Metodología de la estimación de temperatura de la superficie terrestre (ETM + LST)	28
4.2.1 Calibración radiométrica	30
4.2.2 Corrección atmosférica	32
4.2.3 Cálculo de emisividad	33
4.2.4 Cálculo de temperatura de la superficie terrestre	36
4.3 Procesamiento de datos para validación	37
5. Análisis y resultados	38
5.1 Identificación de áreas geotermiales	38
5.2 Resultados. Campo Geotérmico La Soledad, Jalisco	40
5.3 Resultados. Caso de Estudio. Campo Geotérmico Los Negritos, Michoacán	44
5.4 Validación.....	48
6. Discusiones y Conclusiones	50
6.1 Limitaciones en la metodología de estimación de temperatura ETM+ LST.....	51
6.2 Limitaciones en el proceso de validación.....	52
6.3 Líneas de investigación a futuro	53
7 Bibliografía	55

Lista de tablas

Tabla 3.1 (NASA, 1999)	18
Tabla 3.2 (NASA, 1999)	23
Tabla 4.1 Cuadro comparativo. Fuente: Elaboración propia	34
Tabla 5.1 Comparación. Fuente: Elaboración propia	48

Lista de figuras

Figura 1.1 Zonas con recursos geotérmicos en México.	3
Figura 1.2 Zonas con recursos geotérmicos en la parte occidente del Cinturón Volcánico Transmexicano.	3
Figura 1.3 Ubicación de campos geotérmicos mexicanos.	5
Figura 1.4 Producción de plantas en México.	5
Figura 2.1 Esquema representativo entre geología, geotermia y su relación con percepción remota	10
Figura 3.1 Localización del área de estudio. La Soledad, Jalisco y Los Negritos, Michoacán (marcado por cuadros azules).....	17
Figura 3.2 Mapa geológico de La Soledad, Jalisco y sus alrededores.....	20
Figura 3.3 Mapa geológico de Los Negritos, Michoacán.....	22
Figura 4.1 Diagrama de flujo.	28
Figura 4.2 Calibración radiométrica.....	30
Figura 4.3 Histograma de valores de NDVI corregido atmosféricamente y visualización de imagen L7 ETM+.	35
Figura 4.4 Organización de los productos MODLAND en tiles.....	37
Figura 5.1 Mapa de ETM+ LST del campo geotérmico La Soledad, Jalisco. Ubicación de áreas A, B, C y D.....	40
Figura 5.2 Mapa del campo geotérmico La Soledad, Jalisco. Ubicación de áreas A, B, C y D sobre una imagen Landsat ETM+ 2003.....	41
Figura 5.3 Mapa del campo geotérmico La Soledad, Jalisco en 3D sobre una imagen Landsat ETM+ 2003.....	42
Figura 5.4 Mapa de ETM+ LST del campo geotérmico La Soledad, Jalisco en 3D. Ubicación de áreas A, B, C y D.....	43
Figura 5.5 Mapa de ETM+ LST del campo geotérmico Los Negritos, Michoacán. Ubicación de áreas E, F y G.....	44
Figura 5.6 Mapa del campo geotérmico Los Negritos, Michoacán. Ubicación de áreas E, F y G sobre una imagen Landsat ETM+ 2003.....	45
Figura 5.7 Mapa del campo geotérmico Los Negritos, Michoacán en 3D sobre una imagen Landsat ETM+ 2003.....	46
Figura 5.8 Mapa de ETM+ LST del campo geotérmico La Soledad, Jalisco en 3D. Ubicación de áreas E, F y G.....	47

1. Introducción

1.1 Antecedentes

La crisis energética mundial es el resultado directo de la dependencia de la generación de energía eléctrica a partir de combustibles fósiles. El combustible fósil mayormente explotado es el petróleo, su desarrollo y explotación es de vital importancia para la economía nacional. Sin embargo, la explotación del petróleo y de otros combustibles fósiles conlleva repercusiones ambientales. Por lo tanto es necesaria la búsqueda de energías alternativas tales como las renovables que son fuentes de energías limpias y que ocasionan menor impacto ambiental.

Se ha argumentado que México está en una etapa de transición energética que requiere la implementación de energías renovables en un marco de desarrollo sustentable. La sustitución de energías convencionales por alternativas renovables implica un importante reto por satisfacer demandas sociales, económicas, complejidades técnicas y en algunos casos riesgos ambientales menores a los generados por las energías no renovables.

Por consiguiente, las estrategias gubernamentales por parte de la Secretaría de Energía (SENER) están dedicando importantes esfuerzos en áreas básicas de investigación relacionadas con energía solar, eólica, oceánica, biomasa y geotérmica.

Dentro de las energías renovables se encuentra la energía geotérmica la cual consiste en el aprovechamiento de la energía almacenada en el interior de la tierra en forma de calor. En este sentido, los beneficios ecológicos, sociales y económicos de la producción de energía geotérmica en el territorio nacional se deben identificar como estrategias ante la problemática ambiental principalmente por la presencia de recursos geotérmicos que se presenta a lo largo del país en forma de sistemas volcánicos e hidrotermales. El estudio de la distribución de recursos geotérmicos supone un análisis focalizado para el conocimiento al máximo de la diversidad geográfica y posterior ubicación de lugares con potencial estratégico.

Los procesos efectuados para la ubicación de dichos lugares contemplan la exploración del espacio geográfico y requieren del conocimiento previo de sus antecedentes geológicos. Una acertada visualización de este espacio permite hacer explícitos aquellos lugares que presenten características potenciales para la exploración y uso del recurso geotérmico.

La energía geotérmica en México tiene un enorme potencial por ser explotado sobre todo en fuentes hidrotermales ubicadas generalmente en regiones de vulcanismo activo, donde las placas tectónicas se separan y forman fallas y fracturas geológicas, de las cuales se desprende calor. México se posiciona como uno de los países a nivel mundial con mayor producción de energía geotérmica con una capacidad instalada de 1055 (MW) que representa aproximadamente el 7% de la producción a nivel mundial.

Sin embargo, el potencial estimado del país podría alcanzar la cantidad de 9,686 (MW), es decir, actualmente solo hay una capacidad instalada que apenas supera el 10% (Ordaz et al., 2011).

Desde la década de los setenta se han efectuado diversas estimaciones y estudios sobre el potencial geotérmico de México. Alonso (1985) presentó una primera estimación del potencial geotermoeléctrico del país, con una capacidad total del orden de 4000 MW, en donde los campos geotérmicos de La Soledad (Jalisco) y Los Negritos (Michoacán) resultaron considerados como zonas de interés, debido a que su ubicación geográfica coincide con el Cinturón Volcánico Mexicano y presenta altos niveles de temperatura.

Un segundo estudio, calculó un potencial superior a los 13 mil MW a partir de la estimación del volumen de roca porosa y permeable en cada zona geotérmica, Para el campo La Soledad se estimó un potencial de 86 MW (Mercado, 1976).

A nivel nacional se realizó un estudio del potencial térmico, aplicando un método volumétrico sobre un total de 276 localidades termales distribuidas en 20 estados, entre ellos Jalisco y Michoacán (Iglesias & Torres, 2009). El estudio más reciente (Fig. 1.1 y Fig. 1.2) se realizó en colaboración de la Comisión Reguladora de Energía (CRE) y el Banco Interamericano de Desarrollo (BID), titulado “Evaluación de la Energía Geotérmica en México” (Hiriart, 2011). En este informe se propusieron 20 zonas con potencial geotérmico, de las cuales 5 se encuentran en Jalisco y 4 en Michoacán. De acuerdo con las estimaciones realizadas en modelos de tipo volumétrico y simplificado de descompresión gradual, destacan La Soledad y Los Negritos con valores de 51 MW y 20 MW, respectivamente. A partir de la revisión bibliográfica de diferentes años que muestran los lugares de potencial geotérmico en el país, es factible el mapeo de temperatura de superficie en estos casos de estudio. Los campos geotérmicos de La Soledad, los Negritos y sus alrededores, se eligieron de acuerdo al informe “Evaluación de la Energía Geotérmica en México” (Hiriart, 2011).

Esta tesis realizara un estudio que incluye el campo de La Soledad, Jalisco y los Negritos, Michoacán, áreas con importante cantidad de recursos geotérmicos que forman parte del Cinturón Volcánico Transmexicano. El empleo de percepción remota en el infrarrojo térmico permite la estimación de la temperatura de la superficie terrestre cuyo parámetro es un indicador clave de la existencia de recursos geotérmicos. La relación e interacción entre geología, geotermia y percepción remota como elemento de exploración del planeta tierra posibilita la elaboración de metodologías complementarias que auxilien en las fases de diagnóstico para la identificación de áreas con potencial geotérmico.



Figura 1.1 Zonas con recursos geotérmicos en México.
Fuente: Elaboración propia con datos de (Hiriart, 2011)

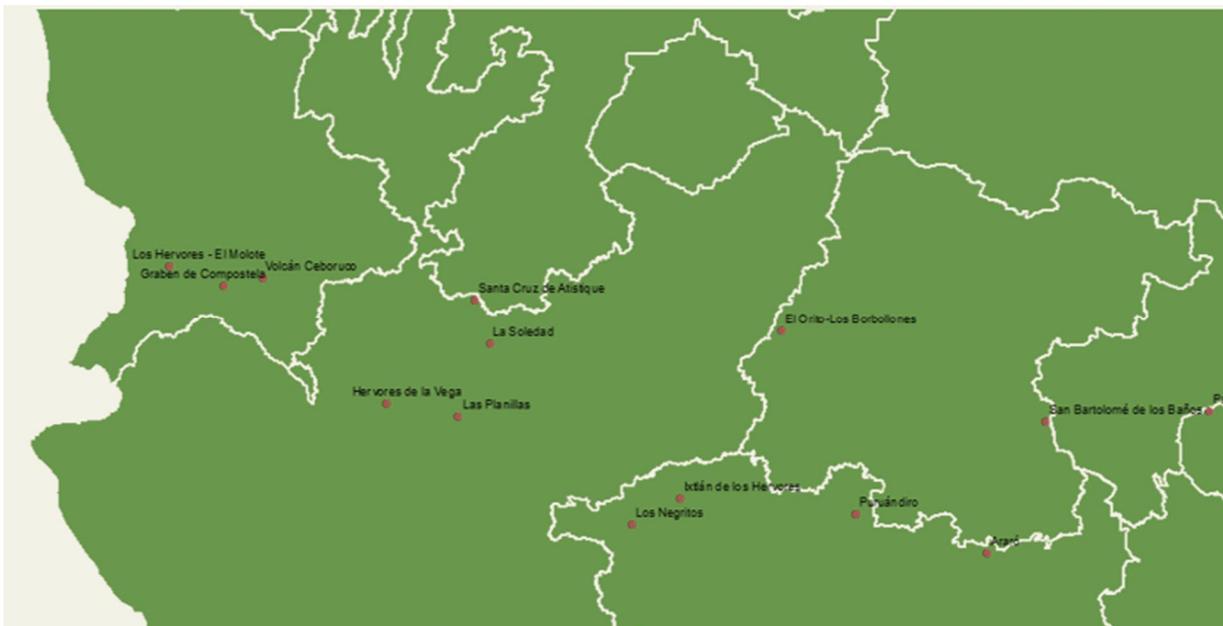


Figura 1.2 Zonas con recursos geotérmicos en la parte occidente del Cinturón Volcánico Transmexicano.
Fuente: Elaboración propia con datos de (Hiriart, 2011).

Una de las zonas geotérmicas considerada de mayor importancia es la parte central del país en razón que cuenta con una importante cantidad de manifestaciones superficiales termales debido a su ubicación geográfica coincidente con el Cinturón Volcánico Transmexicano que contiene volcanes tales como Ceboruco, Popocatepetl, Volcán de Colima, Pico de Orizaba, Paricutín, Jorullo, Xitle, entre otros

El Cinturón Volcánico Transmexicano o Faja Volcánica Transmexicana es definido como un arco magmático continental constituido por cerca de 8,000 estructuras volcánicas y algunos cuerpos intrusivos, que se extiende desde las costas del Pacífico, en San Blas, Nayarit y Bahía de Banderas, Jalisco, hasta las costas del Golfo de México en Palma Sola, Veracruz (Demant, 1978). La estructura de la provincia geológica del CVT está constituida por valles y cuencas que se encuentran comprendidas por sistemas de bloques limitados por fallas y fracturas en constante tensión. Es justo en los límites de éstos sistemas donde se presentan manifestaciones superficiales termales tales como erupciones volcánicas producto de los movimientos entre las placas tectónicas. Cuando dos placas chocan entre sí y una se coloca debajo de la otra se presenta un proceso conocido como subducción que da origen a la formación de magma que puede actuar como fuente de calor y por su naturaleza como evidencia de manifestación susceptible al aprovechamiento del recurso geotérmico para la generación de energía eléctrica.

Los datos publicados electrónicamente por la Asociación Geotérmica Mexicana (2015), en relación a la energía geotérmica indican que existen 5 campos geotérmicos en operación, los cuales son: Cerro Prieto, Los Azufres, Los Humeros, Las Tres Vírgenes y Domo San Pedro. En Baja California se encuentra el campo geotérmico de Cerro Prieto con capacidad neta de 720 MW distribuido por cuatro unidades de 110 MW, cuatro unidades de 37.5 MW, una unidad de baja presión de 30 MW y cuatro unidades más de 25 MW cada una. Las unidades de 37.5 MW se encuentran fuera de operación razón por la que la capacidad efectiva es únicamente de 570 MW. En Michoacán se encuentra el campo geotérmico de Los Azufres cuya capacidad instalada es de 221.6 MW y capacidad operativa de 218.4 MW constituida por seis unidades a condensación (una de 52 MW, otra de MW y cuatro de 26.6 MW brutos) dos unidades a contrapresión de 5 MW cada una y dos unidades de ciclo binario de 1.6 MW cada una, que se encuentran fuera de servicio. En Puebla, el campo geotérmico de Los Humeros cuenta con una capacidad instalada de 93.6 MW y capacidad operativa de 68.6 MW constituida por ocho unidades a contrapresión de 5 MW cada una y dos unidades a condensación de 26.8 MW cada una. En Baja California Sur está ubicado el campo de Las Tres Vírgenes con capacidad instalada y operativa de 10 MW creada por dos unidades a condensación de 5 MW cada una. El último campo geotérmico es el denominado Domo San Pedro ubicado en Nayarit con una capacidad instalada y operativa de 10 MW resultado de dos unidades a contrapresión de 5 MW. Es importante mencionar que este es el primer campo operado y explotado por una empresa privada (Fig. 1.3).

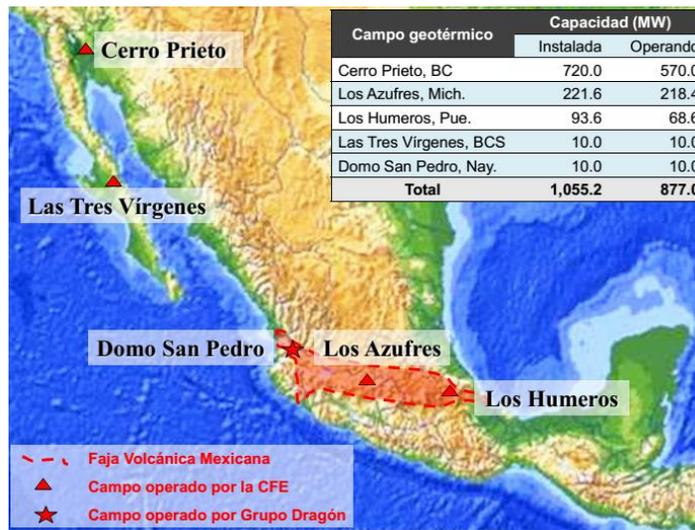


Figura 1.3 Ubicación de campos geotérmicos mexicanos.
Fuente: (Asociación Geotérmica Mexicana, 2015)

En los últimos 20 años México ha realizado importantes esfuerzos para el aumento de la capacidad instalada y operativa de plantas geotermoeléctricas (Gutiérrez-Negrín, et al., 2015). Los resultados han colocado la mayoría de las veces al país en las primeras posiciones y de tener en el año 1995 una capacidad 753 MW paso en el año 2015 a tener 1055 MW, cantidad que representa un aumento del orden del 40% con respecto al año 1995 con una tasa promedio anual de crecimiento del 2% (Fig. 1.4).

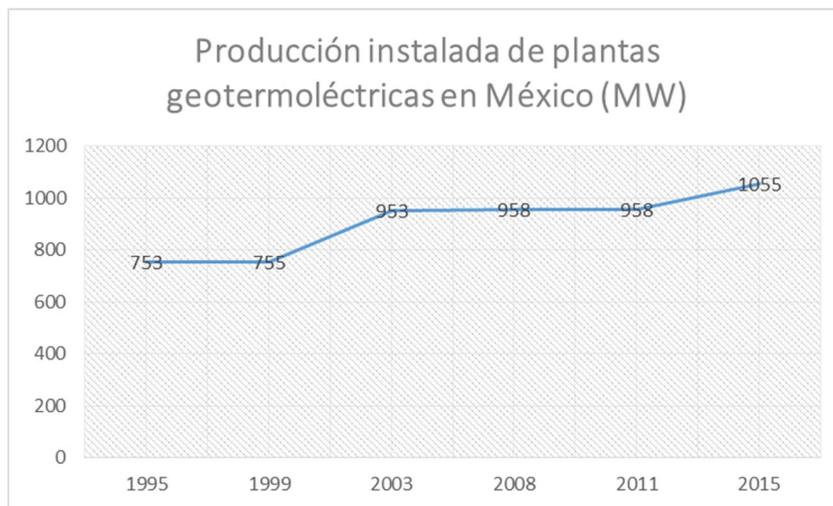


Figura 1.4 Producción de plantas en México.
Fuente: Elaboración propia con datos de Gutiérrez-Negrín et al., 2015)

Como un cambio de paradigma en el aprovechamiento de los recursos naturales con que cuenta el territorio mexicano, el 31 de octubre de 2014 se publicó en el Diario Oficial de la Federación (DOF) el Reglamento de la Ley de Energía Geotérmica, que estipula el aprovechamiento y explotación de los yacimientos geotérmicos para la generación de energía eléctrica y además se incluye la participación del sector privado en las actividades de producción. Hasta antes del 2014 la Comisión Federal de Electricidad (CFE) había sido la única dependencia encargada del desarrollo de la industria geotérmica.

Hay grandes expectativas para la energía geotérmica, debido al nuevo marco regulatorio y la fundación de un Centro Nacional de Innovación Geotérmica (CeMIE-Geo) (Gutiérrez-Negrín, et al., 2015). CeMIE-Geo es un grupo conformado por 23 instituciones académicas y de orden privado, encabezados por el Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada (CICESE) para la investigación científica, desarrollo tecnológico y para potenciar la innovación de todas las áreas de la industria geotermal (Romo & Grupo CeMIE-Geo, 2015). En este mismo sentido, el pasado 9 de mayo de 2016 fue inaugurado el CEMIE-Geo en Ensenada, Baja California nueva sede para contribuir al aprovechamiento de la energía geotérmica y el fortalecimiento de la industria geotérmica nacional.

1.2 Justificación y relevancia

La identificación de áreas con potencial geotérmico requiere de un proceso exploratorio que consiste en diferentes etapas que combinan estudios geológicos y geofísicos. Dichos estudios implican una importante complejidad técnica, alta demanda de recursos económicos y larga duración en las fases del proceso exploratorio. La primera fase es conocida como de reconocimiento y considera superficies de aproximadamente 10,000 km², consiste en la ejecución de métodos superficiales para detectar las áreas con mayores posibilidades en el proceso de exploración. La segunda fase denominada de prefactibilidad busca definir las características del yacimiento geotérmico para determinar la ubicación de los pozos de exploración y se consideran superficies de entre 500 y 2.000 km². Esto implica una inversión económica fuerte en trabajo de campo.

En México se ha realizado poco esfuerzo de análisis de información territorial que considere estrategias de aplicación de técnicas de percepción remota para auxiliar en el proceso diagnóstico de exploración geotérmica en las fases de reconocimiento y prefactibilidad realizados directamente en campo. Por ello, esta tesis realizará un estudio con la información de las imágenes multiespectrales Landsat ETM+, que a manera de hipótesis pueden ayudar a comprender la geología de superficie y la distribución de la temperatura de superficie en la zona de estudio para la ubicación puntual de lugares con potencial geotérmico.

En Jalisco se eligió La Soledad y un área de influencia debido a las siguientes razones (Hiriart, 2011):

1. Se encuentra dentro de la zona de imágenes L7 ETM+ disponibles.
2. Alto valor en cuanto a la estimación de potencial geotérmico (51 MW).
3. Cercanía con Guadalajara y fácil acceso vial (15 km al norte de la capital del estado).
4. Particular configuración geológica entre la Sierra Madre Occidental y el Cinturón Volcánico Mexicano (CVM).
5. Presencia de manantiales con desprendimiento de vapor y gases en torno a temperaturas de 30 a 96 °C.

En Michoacán se eligió Los Negritos, al considerar los siguientes argumentos (Hiriart, 2011):

1. Se encuentra dentro de la zona de imágenes L7 ETM+ disponibles.
2. Alto valor en cuanto a la estimación de potencial geotérmico (20 MW).
3. Cercanía con la ciudad de Sahuayo (10 km al oriente de la ciudad).
4. Fisiográficamente se encuentra ubicada en el CVM, en particular el denominado Bloque Michoacán.
5. Presencia de manifestaciones termales tales como manantiales, fumarolas y volcanes de lodo, con temperaturas superficiales aproximadas entre 30 y 82 °C.

De esta manera se podrá generar información sobre recomendaciones para futuras investigaciones en análisis de recursos geotérmicos con contribuciones de datos de percepción remota.

1.3 Planteamiento del problema

La producción de energía eléctrica en nuestro país tiene gran importancia en el desarrollo de la sociedad, sin embargo, las formas convencionales hasta ahora desarrolladas implican la explotación de combustibles fósiles que provocan el deterioro del medio ambiente. Por su conformación, el territorio mexicano presenta una importante variación de recursos renovables susceptibles a su implementación para la producción de energía eléctrica como es el caso específico de la energía geotérmica, en áreas con intensa actividad tectonovolcánica.

La visión global de percepción remota puede aportar información de la superficie terrestre desde una perspectiva que permita la ubicación precisa de recursos geotérmicos dado que las técnicas hasta ahora empleadas implican costosas inversiones económicas y un complejo trabajo técnico realizado directamente en campo. Desde hace varios años, a nivel mundial existen diferentes investigaciones enfocadas en la búsqueda de recursos geotérmicos que aplican percepción remota en la exploración de recursos geotérmicos durante las etapas de desarrollo intermedias.

El reto actual consiste en la creación, generación, transmisión y distribución de energía eléctrica basada en la exploración de recursos geotérmicos con la finalidad de mitigar el deterioro ambiental, obteniendo un costo competitivo y el mayor provecho posible de las configuraciones geológicas del país a través de la contribución de la percepción remota para las etapas iniciales de reconocimiento y prefactibilidad en la búsqueda de lugares potenciales.

Una manera de encontrar, explorar y en algunos casos comprobar lugares con alto potencial susceptible al recurso geotérmico es la aplicación de técnicas de procesamiento de imágenes en la región del infrarrojo termal para la localización de anomalías a nivel regional. Los campos geotérmicos de La Soledad (Jalisco) y Los Negritos (Michoacán) han sido evaluados en distintos periodos de tiempos a través de técnicas que incluyen muestras geofísicas, geoquímicas tomadas directamente en campo, no obstante, otro tipo de técnicas indirectas no han sido aplicadas en las mismas. El análisis de dichos campos, nos ofrece la oportunidad de inspeccionar la visión desde percepción remota a partir de propuestas metodológicas complementarias que funcionen como comprobación de alto potencial geotérmico.

1.4 Pregunta de investigación

¿Es posible identificar áreas con alto potencial geotérmico en La Soledad (Jalisco) y Los Negritos (Michoacán) -reconocidas por sus características tectónicas y vulcanológicas para el complemento de estudios de reconocimiento y prefactibilidad realizados en campo- a través de información de imágenes multiespectrales Landsat 7 ETM+?

1.5 Hipótesis

Se plantea a manera de hipótesis que la información contenida en las imágenes Landsat 7 ETM+ puede coadyuvar a la identificación de zonas dentro de sistemas geotérmicos en la parte central de Jalisco (campo La Soledad) y occidente de Michoacán (campo Los Negritos).

1.6 Objetivo

Identificar las oportunidades de los datos de percepción remota como una alternativa en las fases de prefactibilidad y seguimiento de sistemas geotérmicos a través de una metodología capaz de localizar áreas con potencial geotérmico mediante información de imágenes L7 ETM+.

Objetivos específicos

Identificar y desarrollar una metodología de percepción remota que permita generar información de mapeo de temperatura de superficie.

2. Percepción remota en la exploración de recursos geotérmicos

2.1 Bloques disciplinarios propuestos para apoyar estudios de geotermia

Desde la esquina de la Geomática, esta investigación propone en forma general retomar elementos conceptuales que incluyen a la percepción remota, geología y geotermia y como a partir de su interacción y posterior vinculación, definir una metodología complementaria en las fases de diagnóstico del proceso de exploración del recurso geotérmico.

Para la representación esquemática del problema planteado fue diseñada una circunferencia compuesta por tres elementos, en cuyo centro se encuentra el planeta tierra. El primer elemento es la percepción remota como herramienta para la extracción de información a partir de una medición indirecta de la temperatura de superficie. El segundo elemento trata de la geología, en especial de las manifestaciones superficiales termales como evidencias visuales del calor contenido en el interior de la tierra. Finalmente, la geotermia planteada como producto de la identificación de anomalías termales especialmente en áreas con antecedentes geológicos relacionados con actividad tectónica y vulcanológica (Fig.2.1).

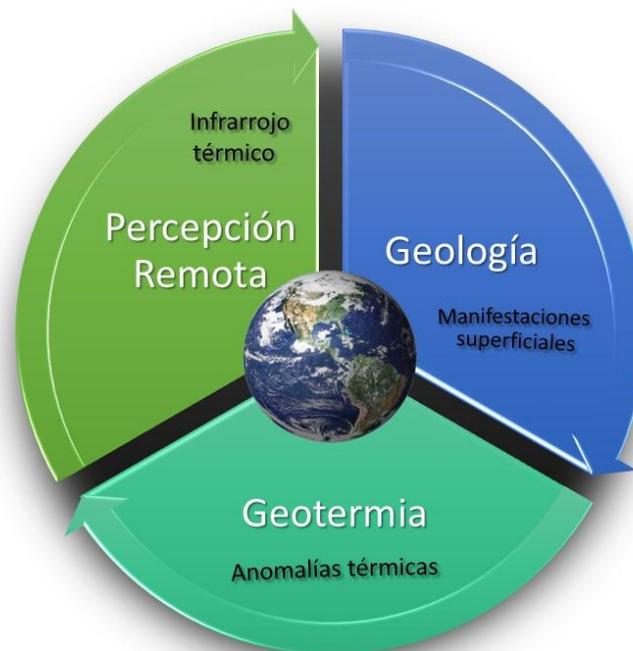


Figura 2.1 Esquema representativo entre geología, geotermia y su relación con percepción remota
Fuente: Elaboración propia

El esquema está dividido en apartados los cuales permiten adentrarnos a los conceptos que giran en torno a este problema y que dan una visión global de la geotermia y sus implicaciones a nivel geológico.

El primer elemento retoma las principales técnicas de percepción remota que involucran la extracción de información en las diferentes regiones del espectro electromagnético. Se hace un énfasis especial en técnicas que aprovechan los datos de la región del espectro electromagnético del infrarrojo térmico como un elemento que pueda brindar información complementaria en las fases iniciales del proceso de exploración geotérmica.

El segundo elemento hace referencia a los principios de geología en geotermia, que explica la estructura y materiales que la componen y provoca que el planeta tierra contenga un inmenso potencial de energía que se presenta en diferentes formas como el calor contenido en el interior de la tierra cuya liberación es producida por procesos de conducción y convección hasta llegar a la capa más superficial denominada corteza terrestre en donde estructuras geológicas como fallas y fracturas permiten el desprendimiento del calor en forma de vapor o alteraciones hidrotermales. Las principales áreas de interés para la exploración de recursos geotérmicos son las fronteras entre las placas en las que el material del manto se desplaza a la superficie y al encontrarse a mayor temperatura que los materiales de la corteza da origen a anomalías térmicas. Las capas internas de la tierra están constituidas por magma y materia incandescente, a una profundidad de aproximadamente 6370 km con temperaturas cercanas a los 5000 °C. La temperatura de la tierra se encuentra en función de la profundidad, razón por la que a medida que se profundiza hacia el interior de la tierra la temperatura aumenta. En la parte correspondiente a la corteza terrestre, a la variación de la temperatura con respecto a la profundidad se le llama gradiente geotérmico y en las áreas del planeta en las que no se tiene rastro de anomalías termales se presenta un valor promedio de 30°C / km (Prol, 1988). El comportamiento de la corteza como aislante y mal conductor de calor provoca que el calor proveniente del núcleo y del manto tienda a desprenderse hacia la superficie de forma natural generando flujos ascendentes que se liberan a través de conductos como fallas y fracturas geológicas. Sin embargo, a pesar de la estructura de la corteza el calor se sigue produciendo al interior de la tierra por reacciones nucleares (Verma, 2000).

El tercer elemento es la energía geotérmica, la energía almacenada en el interior de la tierra en forma de calor. Ésta fuente de energía se presenta como una alternativa para satisfacer las necesidades energéticas del país. La existencia de recursos geotérmicos se puede demostrar a través de la presencia de manifestaciones superficiales, tales como aguas termales, calentamiento de tierra, fumarolas (gas caliente fuera de la tierra), lodos, y otros (Bujung et al., 2011, citado por Siahaan, 2011). Los manantiales termales, los géiseres, pozas de lodo, terrazas de sílice, pozas calientes y suelos vaporizantes, son también otros tipos de manifestaciones relacionados con la exploración del recurso geotérmico. Dentro de las manifestaciones superficiales es

importante diferenciar aquellas que implican las liberaciones de agua o vapor conocidas como hidrotermales y las zonas de vulcanismo activo que arrojan lava mezcla de roca fundida, gases y vapor a temperaturas mayores de 600°C.

La percepción remota, geología y geotermia se muestran como los bloques de conocimiento básicos, de esta forma su interrelación permite la identificación de áreas con potencial geotérmico a través de la combinación de expresiones geoespaciales — como es la cartografía de temperatura de superficie— producto de la identificación de patrones anómalos en la concentración de temperatura en la superficie.

2.2 Tecnologías satelitales para el aprovechamiento de la energía geotérmica

La percepción remota es un campo de estudio que consiste en adquirir imágenes de la superficie terrestre desde sensores espaciales que se encargan de registrar la interacción entre la energía electromagnética y el objeto de estudio. La capacidad de obtener información a partir de imágenes en cualquier parte de la superficie terrestre muestra una nueva perspectiva para la búsqueda de recursos geotérmicos.

Al presente la única manera para determinar áreas aptas y con un potencial geotérmico requiere de un proceso exploratorio realizado directamente en campo y dividido en diferentes etapas. La exploración consiste en una serie de estudios geológicos, geofísicos y geohidrológicos cuya finalidad es la definición de las características de los posibles yacimientos geotérmicos para determinar la ubicación precisa de los lugares potenciales. Las etapas del proceso exploratorio suponen una importante inversión económica y de larga duración que a medida que avanza la operación mayores complejidades técnicas se presentan.

La visión sinóptica de la percepción remota permite obtener una cobertura global de áreas susceptibles al recurso geotérmico y una de las ventajas radica en que la extracción de la información se genera a partir de las imágenes satelitales, lo cual implica no realizar trabajo directamente en campo. En cuanto al proceso de exploración geotérmica, la percepción remota puede aportar en las fases iniciales de reconocimiento y de pre-factibilidad para la definición de las mejores posibilidades y la ubicación de las mismas.

Se espera que el uso de la percepción remota en las perspectivas de exploración geotérmica aporte una imagen más clara de los ámbitos de la energía geotérmica y pueda identificar las áreas que pueden tener los recursos geotérmicos para asistir a los fines de una mayor exploración (Kristinsson, 2010, p.8). Consecuentemente, la percepción remota se presenta como una nueva herramienta que puede asistir al proceso de exploración geotérmica y complementarlo con el trabajo realizado directamente en campo.

Es indispensable se desarrollen nuevas técnicas de percepción remota, y en este aspecto, desde hace varios años podemos encontrar diferentes investigaciones realizadas a nivel mundial. La literatura relacionada presenta a la percepción remota en el infrarrojo térmico (TIR, por sus siglas en inglés) como una opción donde a partir del cálculo de la Temperatura de la Superficie Terrestre (LST, por sus siglas en inglés) se detecten anomalías térmicas susceptibles al recurso geotérmico.

La percepción remota en el infrarrojo térmico es una técnica innovadora en la exploración de recursos geotérmicos y su desarrollo tiene origen a comienzos de la década de los sesenta en colaboración del Laboratorio de Regiones Frías Investigación e Ingeniería del Ejército de EE.UU y la Universidad de Michigan. Este trabajo fue realizado en 1961 y consistió en un estudio geotermal del Parque Nacional Yellowstone

a partir de una técnica de escaneo en el infrarrojo termal que permitió satisfactoriamente detectar aguas termales y otras anomalías geotermales cerca de la superficie en un área total de 8.983 km² (Zhou, 1998). Un trabajo científico desarrollado posteriormente propuso que los datos del infrarrojo termal en diferentes tiempos pueden ser usados para la estimación de la profundidad de fuentes termales asociadas con áreas anómalas (Prakash et al., 1995).

Otros estudios se encuentran principalmente enfocados en la composición mineralógica y su relación con yacimientos geotermales a partir de información de imágenes tanto multiespectrales como hiperespectrales. En esta misma línea de investigación podemos mencionar un estudio encargado del mapeo de minerales presentes en la superficie terrestre asociados con aguas termales en Nevada, Estados Unidos a través de información obtenida mediante diferentes composiciones en el infrarrojo termal cubriendo un área de 12 km² con una resolución espacial por pixel de 90 m (Vaughan et al. 2005).

En cuanto a los estudios encaminados a la estimación de la temperatura de la superficie terrestre como un indicador clave de la existencia de recursos geotermales, podemos mencionar diferentes aportaciones realizadas en el ámbito de la investigación que correlacionan las características geológicas asociadas con un potencial geotérmico, a partir de la extracción de información de imágenes satelitales. Un artículo científico reportó una primera representación cuantitativa de actividades geotermales superficiales provenientes de datos del infrarrojo termal del sensor ETM+ en el Parque Nacional Yellowstone (Fred et al., 2008).

La extracción de la información no es exclusiva de la región infrarroja del sensor ETM+, existiendo trabajos que son complementados con información de otros sensores. En este sentido, se encuentra el caso de las aguas termales de Brady en Nevada, Estados Unidos, donde a partir de información de imágenes Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER) fueron detectadas anomalías geotermales para su posterior análisis de factibilidad (Coolbaugh et al., 2007). Otras aportaciones no se concentran únicamente en la detección y ubicación de anomalías geotermales, sino también en el mínimo tamaño que puede ser percibido de acuerdo a la longitud de onda del sensor empleado. Algunos autores concluyen que las anomalías termales identificadas a partir de datos ASTER Thermal Infrared (TIR) pueden ser medidas asumiendo que las fuentes de calor geotermales pueden ser detectadas a nivel subpixel (Vaughan et al., 2010). Otros ejemplos incluyen la variable de la elevación topográfica la cual debe tener un procesamiento especial para la adecuada interpretación de los datos de temperatura, debido a que se pueden presentar falsas anomalías que conlleven a una alteración de los resultados (Eneva & Coolbaugh, 2009).

Hoy en día, las investigaciones están más avanzadas en relación con la mejora de productos LST a partir de la obtención de información de las plataformas Sentinel 2

MultiSpectral Instrument (MSI) y Sentinel 3 Ocean and Land Colour Instrument (OLCI). Un completo desarrollo es mostrado en un trabajo mediante información de Sentinel 2 MSI, basado en propuestas de Spectral Mixture Analysis (SMA) y umbrales para la precisa parametrización de la emisividad empleando un mapa de cobertura de suelo con tres diferentes métodos: monocanal (infrarrojo termal), split-window (dos bandas infrarrojo termal) y dual angle (dos bandas infrarrojo termal con diferentes ángulos de visión); para la obtención de LST con alta resolución espacial (Sobrino et al., 2013). La labor pendiente en cuanto a las investigaciones antes mencionadas, reside en que el producto LST MSI puede contribuir en la aplicación de estudios de áreas geotermales en cuanto a la detección de anomalías termales.

Una investigación altamente desarrollada en un capítulo dedicado a la revisión de los sistemas de percepción remota en el infrarrojo termal para ayudar al estudio de los sistemas geotermales, estos últimos considerados como fuentes de energías renovables (Haselwimmer & Prakash, 2013)

La comunidad de percepción remota geológica ha contribuido con gran cantidad de artículos de investigación y aplicaciones en estudios de áreas geotermales que no se acotan exclusivamente a la región de los sensores multiespectrales pasivos, como lo es el caso del Radar de Apertura Sintética (SAR, por sus siglas en inglés) para el monitoreo de subsidencias y deformaciones en la superficie. Las características físicas de las señales SAR implican una mayor profundidad al momento de tocar la superficie terrestre y la técnica más usada para la medición de subsidencias es la interferometría que consiste en la comparación de un par de imágenes de la misma área de estudio en diferentes tiempos. Un estudio publicado por el Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana cuantificó la subsidencia del campo de Cerro Prieto ubicado en el Valle de Mexicali provocada por la extracción de fluidos geotermales mediante datos de Interferometría Diferencial de Radar de Apertura Sintética (DInSAR, por sus siglas en inglés) para su posterior comparación con datos históricos de nivelación de precisión (Sarychikhina et al., 2011). Investigaciones actuales, plantean la deformación de la superficie como una consecuencia directa de la producción de fluidos geotermales. En nuestro país, el caso más investigado es el campo de Cerro Prieto, donde fue aplicado un estudio a través de técnicas DInSAR con imágenes Environmental Satellite (ENVISAT) para la medición de los desplazamientos verticales y horizontales de la superficie durante el periodo 1993 – 2014 causado por el desarrollo de la producción en dicho campo geotermal (Sarychikhina et al., 2016).

En percepción remota son empleadas diferentes aplicaciones para el estudio de áreas geotermales. En este proceso de exploración existen aplicaciones que reconstruyen la relación entre la cuantificación de emisiones gaseosas y áreas geotermales activas. El complejo volcánico Latera en el centro de Italia fue analizado con datos multiespectrales de Thematic Mapper (TM), del instrumento multiespectral Canadiense Compact Airborne Spectrographic Imager (CASI), y Light Detection and Ranging

(LIDAR) para el mapeo del CO₂ de los respiraderos de la estructura geológica (Bateson et al., 2008).

La estratigrafía, las estructuras geológicas y la hidrogeología presentan una relación en áreas geotermales que permite la liberación del calor contenido en el interior de la tierra. El uso de productos de imágenes multispectrales mejorados y productos derivados de Modelos Digitales de Terreno (MDT) provenientes de datos SAR y LIDAR son útiles para el mapeo de estructuras geológicas como lo presentan estudios realizados en el Cerro Tuzgle-Tocomar de Argentina en el área volcánica geotermal (Giordano et al., 2013).

La riqueza de información tanto de imágenes multispectrales como hiperespectrales es de valiosa ayuda para la identificación de alteraciones mineralógicas relacionadas con actividad geotermal. Una completa aplicación de mapeo mineral fue realizada en el Lago Pirámide localizado en el estado de Nevada a partir de un estudio con imágenes ASTER e Hiperspectral Mapper airborne hyperspectral (HyMAP) enfocado en la detección de alteraciones hidrotermales, y elementos químicos susceptibles al potencial de energía geotermal (Kratt et al., 2010).

Otra herramienta de exploración geotérmica se encuentra orientada en la estimación del Flujo de Calor Geotermal (GHF, por sus siglas en inglés) los cuales son estimados a partir de medidas indirectas de sensores tales como Landsat ETM+ (Watson et al., 2008) ASTER y Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS), (Vaughan et al., 2012) enfocados en la detección de anomalías geotermales.

Existen trabajos de investigación menos desarrolladas que los anteriores, cuyo argumento principal sostiene que las condiciones químicas de los suelos anómalos influyen en la distribución espacial de la vegetación. Los ejemplos desarrollados demuestran como la cobertura de líquenes interviene en la correlación negativa con la temperatura (Fahselt, 1995) y la relación entre el estado de salud de la vegetación y las ocurrencias geotermales (Nash et al., 2003).

Una revisión muy específica del potencial de percepción remota en exploración de recursos geotermales se encuentra en un compendio que contiene las diferentes aplicaciones divididas en deformaciones de la superficie, emisiones gaseosas, análisis estructural, mapeo mineral, temperatura, medida de flujo de calor y geobotánica (Van der Meer et al., 2014).

El uso de imágenes satelitales en nuestro país tiene mucho futuro para profundizar en la investigación en torno a las energías renovables como es el caso de la geotermia. El proceso experimental expuesto en este trabajo a través de percepción remota, facilita la identificación de áreas geotermales (considerando las resoluciones de los sensores empleados) y asiste en los procesos de exploración realizados directamente en campo, siendo factible su aplicación en próximas investigaciones.

3. Área de estudio y datos

El informe más reciente sobre el potencial geotérmico de México (Hiriart, 2011), propone 20 zonas geotérmicas de las cuales 5 se encuentran en Jalisco y 4 en Michoacán. Por su alto potencial geotérmico, destacan los campos de La Soledad (Jalisco) y Los Negritos (Michoacán) con valores de 51 MW y 20 MW, respectivamente. Ambos campos se presentan como potenciales para la exploración del recurso geotérmico y mediante imágenes multispectrales e información que da cuenta de la geología podemos comprender la distribución de temperatura en la superficie terrestre.

El área de estudio está localizada entre $102^{\circ}11' - 103^{\circ}39'O$, $19^{\circ}15' - 21^{\circ}15'N$ que abarca la parte central del estado de Jalisco y occidente de Michoacán. Dentro de la colindancia de dichos estados, se encuentran los campos geotérmicos de la Soledad y los Negritos (Fig. 3.1).

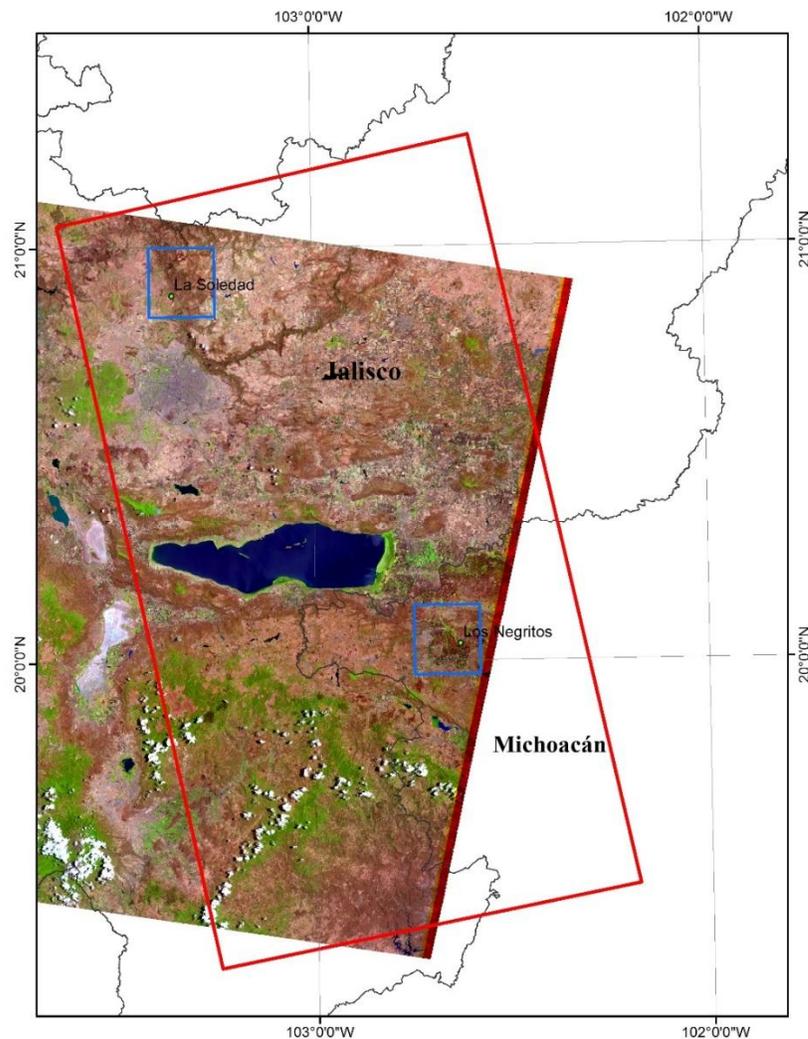


Figura 3.1 Localización del área de estudio. La Soledad, Jalisco y Los Negritos, Michoacán (marcado por cuadros azules).
Fuente: Elaboración propia

3.1 Imágenes Landsat 7 ETM+

A comienzos de la década de los setenta, Estados Unidos creó el programa Landsat (Land=tierra y Sat=satélite), el cual, consistía en una serie de satélites construidos y puestos en órbita para el monitoreo de los recursos terrestres. El mantenimiento y operación se encontraba a cargo de la Administración Nacional de la Aeronáutica y del Espacio (NASA, por sus siglas en inglés). En sus diferentes etapas, los satélites Landsat llevaron a bordo diferentes sensores, el primero denominado Multispectral Scanner Sensor (MSS) se enfocaba en estudios agrícolas y operaba en cuatro bandas espectrales, dos en el visible y dos en el infrarrojo cercano. Posteriormente fue diseñado el sensor Thematic Mapper (TM), el cual contenía un mayor número de bandas espectrales distribuidas tres en el visible, una en el infrarrojo cercano, dos en el infrarrojo medio y una en el infrarrojo termal; con resolución espacial de 30 metros en las bandas del visible e infrarrojo medio y 120 metros en la banda del infrarrojo termal.

El satélite Landsat 7 fue lanzado el 15 de Abril de 1999 y se encontraba equipado con el sensor Enhanced Thematic Mapper Plus (ETM+), sucesor del Thematic Mapper (TM). Los datos del satélite Landsat 7 ETM+ son usados ampliamente para diversos estudios ambientales. ETM+ registra la radiación en 8 bandas espectrales, tres de ellas en el rango del visible, dos en el infrarrojo cercano, dos en el infrarrojo medio y una banda pancromática (Tabla 4.1). La resolución espacial sobre el terreno en las bandas multiespectrales es de 30 metros, mientras en la banda térmica (ETM6) con 60 m.

Satélite	Lanzamiento	Altitud (km)	Periodicidad (días)	Sensor	Banda: Intervalo espectral (μm)	Resolución espacial (m)
Landsat 7	15-4-99	705	16	ETM+	(1) 0.45-0.52	30
					(2) 0.52-0.60	30
					(3) 0.63-0.69	30
					(4) 0.76-0.90	30
					(5) 1.55-1.75	30
					(6) T 10.4-12.5	60
					(7) 2.08-2.35	30
					PAN 0.50-0.90	15

Tabla 3.1 (NASA, 1999)

La banda 6 (ETM6) corresponde al canal termal en dos diferentes modalidades: low gain y high gain. Esta banda permite varias opciones de análisis y aplicaciones tales como la obtención de temperatura radiante o absoluta. La obtención de la temperatura de superficie a partir de los satélites Landsat presenta dificultad dado que poseen una sola banda térmica y requieren del uso de modelos de transferencia de radiación y emisividad para su cálculo (Sobrino et al., 2004 & Zhang et al., 2006).

Este proyecto de investigación, propone una metodología para identificar áreas con potencial geotérmico a través del procesamiento de imágenes L7 ETM+. El criterio para la determinación de áreas potenciales, está basado principalmente, en la evaluación de anomalías térmicas presentes en el mapeo de la estimación de Temperatura de la Superficie Terrestre (LST, por sus siglas en inglés).

Los datos del infrarrojo termal, provenientes del sensor ETM+ tienen múltiples beneficios, entre los que se puede destacar su resolución espacial para la localización de áreas con anomalías térmicas a nivel regional. La imagen Landsat 7 ETM+ procesada (cortesía USGS), corresponde al 22 de Mayo de 2003 (Path = 029, Row =046), escena LE70290462003142EDC01 en tipo de datos L1T. Fue adquirida en formato GeoTiff, proyección UTM y datum WGS84. La imagen se encuentra en buena calidad con un 2% de cobertura de nubes. Para el cálculo de temperatura, fue procesada la banda termal (ETM6) en modalidad low gain (6L) debido a su amplio rango de temperatura (130 a 350 °K).

3.2 Campo geotérmico La Soledad, Jalisco

El campo geotérmico de La Soledad, se encuentra a 15 km al norte de Guadalajara, Jalisco, sus coordenadas son 20°54'03"N y 103°21'30"O. Fisiográficamente está en el límite de la Sierra Madre Occidental y del Cinturón Volcánico Mexicano, siendo el Río Grande de Santiago el límite entre ambas.

Es un área asociada a domos volcánicos cuaternarios de composición riolítica e incluye andesitas, basaltos, ignimbritas y rocas piroclásticas (Fig. 3.2). Se encuentra afectada por sistemas estructurales de dirección noroeste-sureste, noreste-suroeste y este-oeste, estando los dos últimos probablemente activos y afectando a las rocas volcánicas más recientes. La falla La Soledad y otras de dirección noreste-suroeste son los principales conductos de las manifestaciones termales.

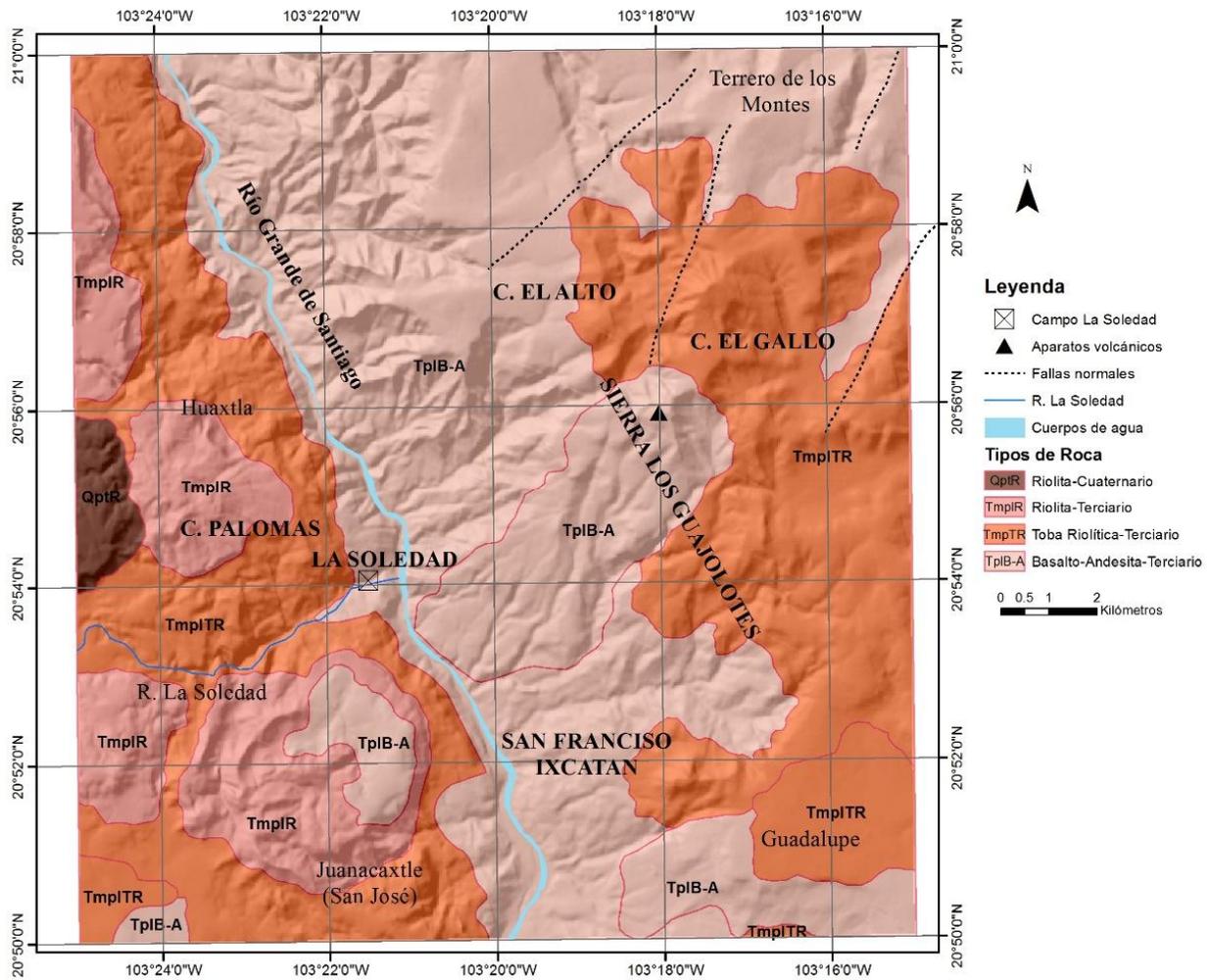


Figura 3.2 Mapa geológico de La Soledad, Jalisco y sus alrededores.
Fuente: Elaboración propia

Cuenta con 30 manantiales termales algunos con presencia de vapor y gases asociados a la falla La Soledad y otras de dirección noreste-suroeste como la falla del Río Grande de Santiago, con temperaturas superficiales de 30 a 96°C. Los estudios realizados por la CFE (Hiriart, 2011), sostienen que la fuente de calor podría ser la cámara volcánica que origino los últimos domos y derrames riolíticos. La evaluación de los anteriores estudios (geología, geoquímicos y geofísicos), determinó una zona de interés de 18 km² con tres áreas de mayor interés geotérmico en las que coinciden las anomalías geofísicas interpretadas en una superficie de 5.5 km².

3.3 Campo geotérmico Los Negritos, Michoacán

El campo geotérmico de Los Negritos, se encuentra al noroeste del estado de Michoacán, 10 km al oriente de la ciudad de Sahuayo con coordenadas 20°02'24"N y 102°37'56"O (Fig. 3.3). Se encuentra ubicado en el Cinturón Volcánico Mexicano, en específico, la porción central denominada Bloque Michoacán. La zona se encuentra en la confluencia de las provincias tectónicas del Graben de Chapala y la Meseta Tarasca.

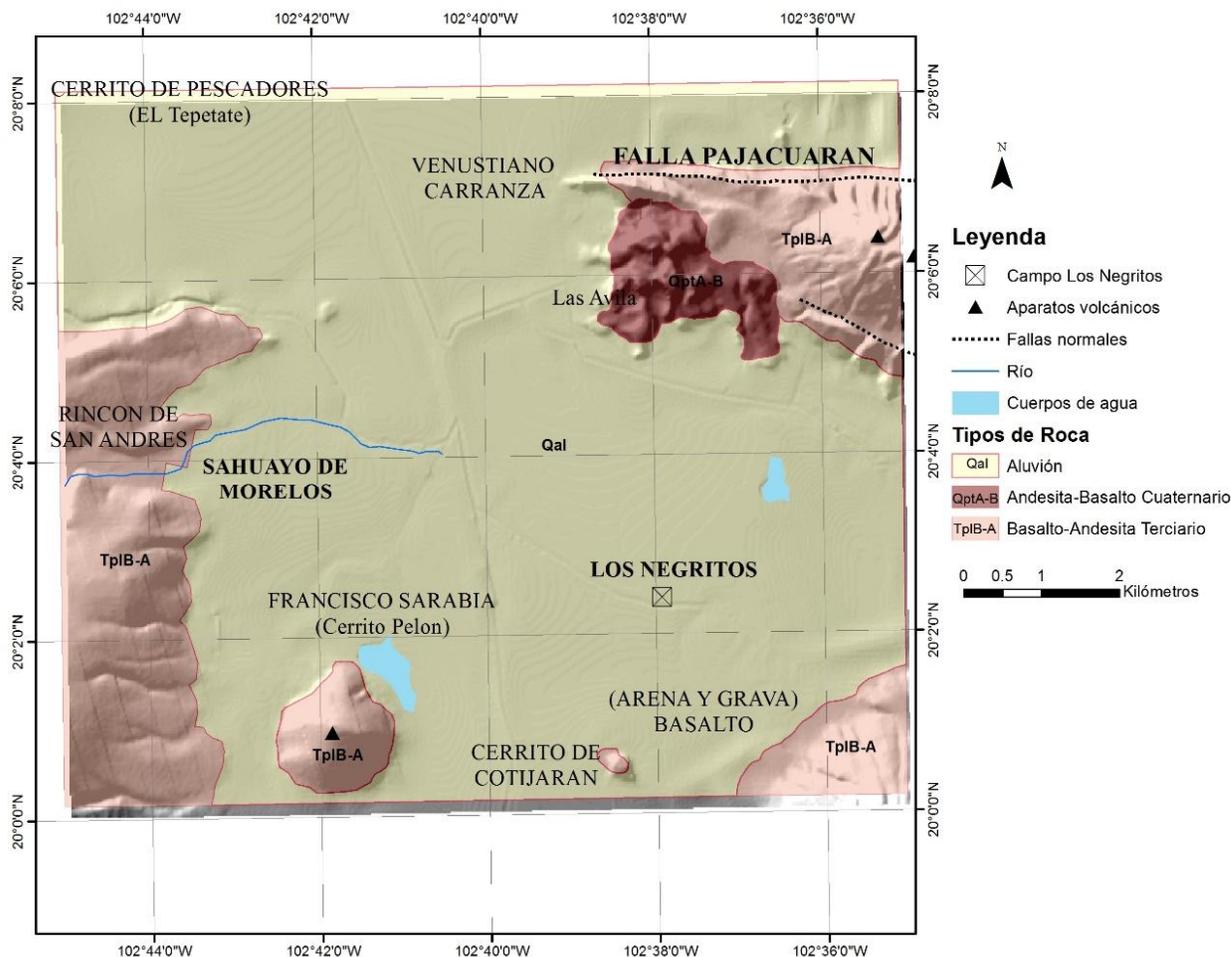


Figura 3.3 Mapa geol3gico de Los Negritos, Michoac3n.
Fuente: Elaboraci3n propia.

En el 3rea destacan fallas regionales de direcci3n este-oeste, de tipo normal, entre la que destaca la Falla Pajacuar3n que delimita el borde sur del Graben de Chapala. El 3rea est3 en la porci3n centro-oriental del Valle de Sahuayo asociado a rocas volc3nicas de composici3n andes3tica y bas3ltica, adem3s de aparatos volc3nicos monogen3ticos. Tambi3n se presentan manifestaciones termales tales como manantiales, fumarolas y volcanes de lodo probablemente relacionados al cruce de dos estructuras, una de direcci3n este-oeste (Falla El Platanal) y otra de direcci3n noreste-suroeste (Falla Los Negritos). Los estudios realizados por la CFE (Hiriart,

2011), sostienen que el probable yacimiento geotérmico podría estar contenido en las rocas volcánicas más antiguas, que se encuentran en los sedimentos lacustres del valle.

3.4 Datos para validación

Existen diferentes sensores para el monitoreo de la cubierta terrestre, dentro de estos se puede mencionar el Espectroradiómetro para Imágenes de Resolución Moderada (MODIS, por sus siglas en inglés). Se encuentra a bordo de dos plataformas, Terra y Aqua que debido a sus características espaciales y espectrales lo hacen uno de los más utilizados para el monitoreo de procesos de cambios en la tierra.

El instrumento MODIS registra la radiación en 36 bandas espectrales en un rango de longitud de onda de 0.4 a 14.4 μm . Las primeras 7 bandas son útiles para aplicaciones terrestres, las bandas 8 a la 16 para observaciones oceánicas y de la 17 a 19 para mediciones atmosféricas. Este proyecto de investigación, presta especial atención en las bandas 20 a la 36 que cubren la región del infrarrojo térmico en el rango de 3.6 a 14.4 μm (Tabla 3.2).

Satélite	Lanzamiento	Altitud (km)	Sensor	Banda: Intervalo espectral (μm)	Uso	R. Espacial (km)
Terra	18/12/1999	708	MODIS	(20) 3.660 - 3.840	Temperatura superficie /nubes	1
				(21) 3.929 - 3.989	Temperatura atmosférica	1
				(22) 3.929 - 3.989		1
				(23) 4.020 - 4.080		1
				(24) 4.433 - 4.498		1
				(25) 4.482 - 4.549	Vapor de agua de nubes	1
				(26) 1.360 - 1.390		1
				(27) 6.535 - 6.985	Propiedades de las nubes	1
				(28) 7.175 - 7.475		1
				(29) 8.400 - 8.700		1
				(30) 9.580 - 9.880	Ozono	1
				(31) 10.780 - 11.280	Temperatura de la superficie /nubes	1
				(32) 11.770 - 12.270		1
				(33) 13.185 - 13.485	Altitudes de las nubes	1
				(34) 13.485 - 13.785		1
				(35) 13.785 - 14.085		1
(35) 14.085 - 14.385	1					

Tabla 3.2 (NASA, 1999)

MODIS elabora una gran cantidad de productos, entre ellos MODLAND, el cual, se divide en tres grandes grupos: variables relacionadas con el balance de energía, variables biofísicas con la vegetación y características de la cubierta terrestre (Morisete et al., 2002). En las variables referentes a energía, MOD11 registra la temperatura y emisividad de la superficie terrestre utilizando 7 bandas del infrarrojo medio y térmico (bandas 20, 22, 23, 29 y 31-33). Los productos MOD11 tienen una resolución espacial de 1000 m con base diaria y cada 8 días (MOD11A1 y MOD11A2).

4. Propuesta experimental

La percepción remota permite la obtención de variables biofísicas en la superficie que pueden ser medidos por los satélites de observación para el monitoreo de la tierra. Los sensores ubicados en las plataformas satelitales, cubren la totalidad del planeta tierra en diferentes regiones del espectro electromagnético. En especial, la percepción remota en el infrarrojo térmico es una herramienta eficiente para la obtención de la temperatura de la superficie terrestre (LST). Una forma de acceder a este parámetro, consiste en la estimación de la emisividad debido a su relación directa con la composición de la superficie.

La medición de temperatura por percepción remota, es una alternativa para los métodos de exploración tradicional. Las variaciones de temperatura en la superficie terrestre en relación a la presencia de fuentes de calor puede ser medido y mapeado usando la radiación en el infrarrojo termal. La identificación de anomalías térmicas (puntos calientes) puede sugerir indicios de áreas con recurso geotermal.

A través de percepción remota, pueden identificarse evidencias de actividad geotermal, divididas en directas e indirectas. Las evidencias directas son las características superficiales como estructuras de calderas, aguas termales, tierras de vapor y fumarolas. En algunos casos, incluye mapeo de lineamientos asociados a fallas. Las evidencias indirectas describen variaciones en la temperatura, posibles deformaciones, acumulación de gases geotermales, estrés de vegetación, etc.

Un ejemplo de evidencias indirectas corresponde a un estudio realizado en el área Tengchong (provincia Yunnan) en China utilizando Landsat-7 ETM+ para detección de áreas geotermales (Qin et al., 2011).

En cuanto a los algoritmos para obtención de LST, se puede mencionar Mono-window algorithm (Qin 2001), Single-channel method (Jimenez-Muñoz & Sobrino's 2003) y A single-channel algorithm (Artis & Carnahan, 1982).

4.1 Principios físicos

En percepción remota el espectro electromagnético es el conjunto de los diferentes tipos de radiación clasificados en función de su longitud de onda y su frecuencia que se encuentran comprendidos desde el espectro visible, el infrarrojo (cercano, medio y térmico) y las microondas. La región infrarroja térmica cubre desde los 8 a 14 μm e incluye la porción emisiva del espectro terrestre utilizada para detectar el calor proveniente de las diferentes cubiertas terrestres.

La temperatura de la superficie terrestre puede ser estimada con ayuda de la energía registrada por los sensores montados en las plataformas satelitales. El cálculo de la temperatura tiene sus fundamentos físicos principalmente en la teoría de los cuerpos negros y la fórmula de Planck. Los fundamentos físicos se remontan a comienzos de 1900, año en el que el físico alemán Max Planck desarrolla la Ley de Planck que explicaba la distribución de energía de la radiación emitida por un cuerpo negro en diferentes longitudes de onda.

Un cuerpo negro está considerado como aquel objeto que absorbe y emite toda la energía que recibe, es decir, un emisor perfecto. Por lo tanto, la emisividad para un cuerpo negro es 1, siendo para objetos reales menor a la unidad y variable de acuerdo con la longitud de onda y el tipo de material. La percepción remota considera a los cuerpos negros como un parámetro de medición para encontrar el comportamiento real de los objetos en la superficie terrestre, de acuerdo con un conjunto de valores característicos y propios de cada uno provenientes de los diferentes campos del espectro de los que se obtiene información. El conocimiento de la emisividad es necesario para estimar la temperatura de la superficie terrestre.

La ley de Planck establece que cualquier objeto por encima del cero absoluto ($-273\text{ }^\circ\text{C}$) radia energía, y que ésta aumenta con la temperatura. A mayor temperatura, ese cuerpo radiará con más intensidad en longitudes de onda más cortas. De acuerdo con la teoría del cuerpo negro, la radiancia emitida de un objeto puede ser calculada de la función de radiancia de Planck:

$$B(\lambda, T) = \frac{c_1 \lambda^{-5}}{\pi \left(\exp\left(\frac{c_2}{\lambda T}\right) - 1 \right)} \quad (4.1)$$

donde $B(\lambda, T)$ es la radiancia espectral de un cuerpo negro en unidades de $\text{Wm}^{-2} \mu\text{m}^{-1} \text{sr}^{-1}$. λ es la longitud de onda en metros, T es la temperatura en $^\circ\text{K}$, c_1 y c_2 son las constantes espectrales $c_1 = 3.7418 \times 10^{-16} \text{ Wm}^2$ y $c_2 = 1.4388 \times 10^{-2} \text{ mK}$.

Mediante la inversión de la función de radiancia de Planck es posible la determinación de la temperatura de brillo T (temperatura registrada por el sensor ETM+) en la banda termal (ETM6). La inversión de la función queda establecida de la siguiente manera:

$$T = \frac{c_2}{\lambda \ln \left[\left(\frac{c_1}{\pi \lambda^5 B(\lambda, T)} \right) + 1 \right]} \quad (4.2)$$

4.2 Metodología de la estimación de temperatura de la superficie terrestre (ETM + LST)

El trabajo realizado se basa en la propuesta implementada por Sobrino (2001), en el que a través del método de los umbrales del Índice Diferencial de Vegetación Normalizado (NDVI, por sus siglas en inglés) se obtiene una estimación de la emisividad y posteriormente un cálculo de la temperatura de la superficie terrestre. El objetivo de esta propuesta de investigación es el diseño de una metodología capaz de identificar áreas con potencial geotérmico mediante información de imágenes L7 ETM+.

Las imágenes satelitales requieren un pre-procesamiento especial para la corrección de los datos presentados por diferentes factores tales como variaciones de iluminación en la escena, condiciones atmosféricas y distorsiones radiométricas provocados por el sensor. Dicho procesamiento varía en función del tipo de sensor y los objetivos de investigación.

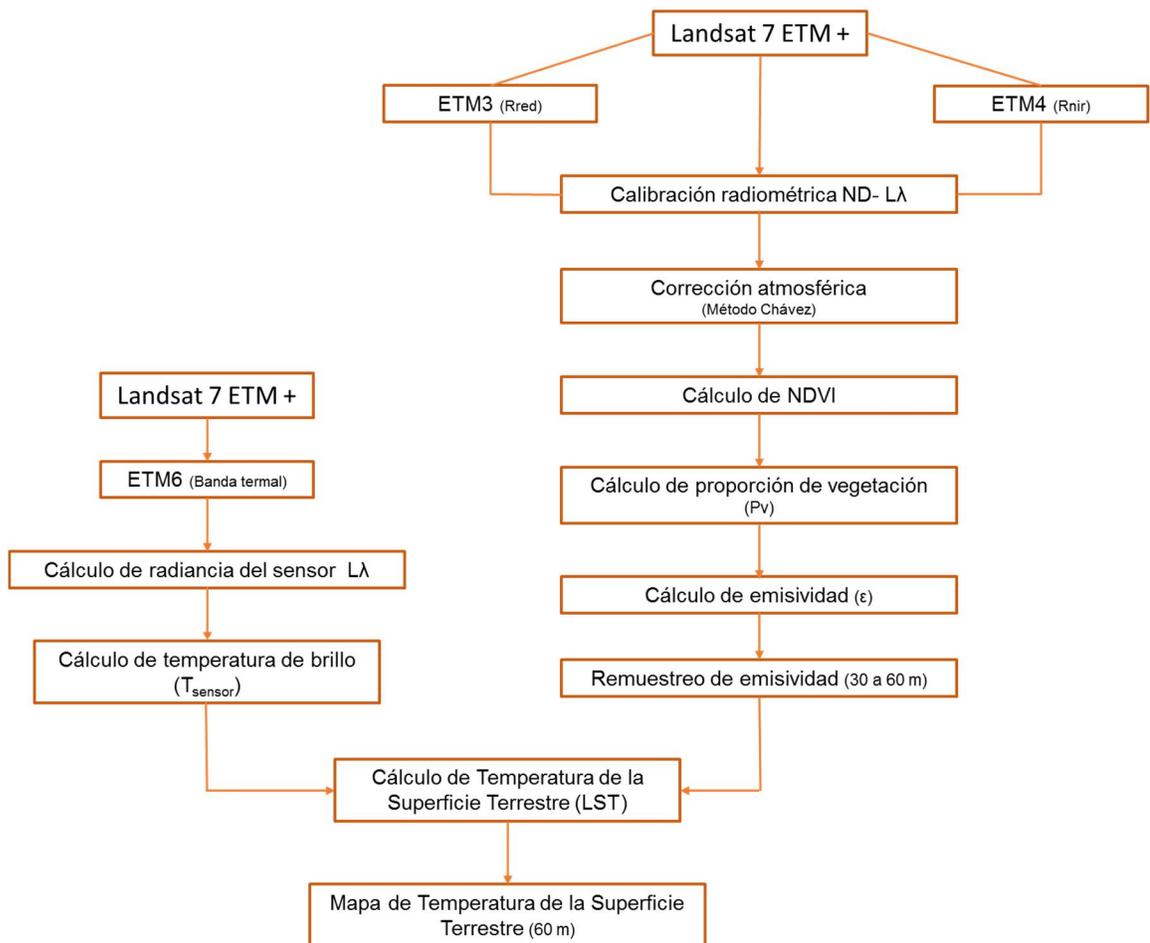


Figura 4.1 Diagrama de flujo.
Fuente: Elaboración propia

La metodología diseñada en la presente propuesta sigue un flujo de trabajo dividido en dos diferentes etapas (Fig. 4.1). Los insumos requeridos para su implementación incluyen la extracción de la banda térmica (ETM6) y las bandas del rojo (ETM3) e infrarrojo cercano (ETM4) usando datos de Landsat 7 ETM+.

La primera etapa está centrada en la banda térmica (ETM6). Los procedimientos necesarios para su implementación incluye inicialmente el cálculo de radiancia del sensor para su posterior conversión a valores de temperatura de brillo. La segunda fase requiere las bandas del rojo (ETM3) e infrarrojo cercano (ETM4) las cuales como procesamiento inicial incluyen una calibración radiométrica, corrección atmosférica, cálculo de umbrales de NDVI, cálculo de proporción de la vegetación y finalmente el cálculo de la emisividad.

Con el cálculo de brillo de temperatura y de la emisividad fue obtenida la temperatura de la superficie terrestre (ETM+ LST) a través de una ecuación matemática que relaciona la temperatura registrada por el sensor y la emisividad obtenida a partir de los canales del rojo (ETM3) e infrarrojo cercano (ETM4).

Derivado de la previa revisión bibliográfica fueron localizados lugares con potencial geotermal. Para la presente propuesta fueron ubicados los campos de La Soledad (Jalisco) y los Negritos (Michoacán) en la escena Landsat 7 ETM+ (Path = 029, Row =046), misma que fue procesada para la obtención del mapa final de LST. La determinación de anomalías térmicas en el mapa de LST considero como criterios el tamaño y un umbral de temperatura.

4.2.1 Calibración radiométrica

Las imágenes satelitales capturadas por los sensores remotos requieren de medidas consistentes y calibradas. La calibración radiométrica es un paso fundamental que consiste en la conversión de niveles digitales (ND) a valores de radiancia. Esta transformación se basa en una curva de calibración de números digitales a radiancia que es calculado por los sistemas de operación del satélite (Fig. 4.2).

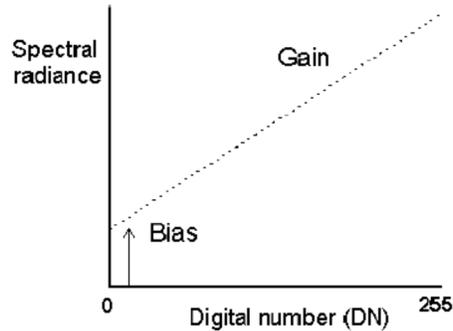


Figura 4.2 Calibración radiométrica

La radiancia representa la medición de energía registrada por el sensor del satélite. La corrección es llevada a cabo de acuerdo con la siguiente expresión (Chander et al., 2009):

$$L_{\lambda} = G_{\text{rescale}} * Q_{\text{cal}} + B_{\text{rescale}} \quad (4.3)$$

$$L_{\lambda} = G_{\text{rescale}} * Q_{\text{cal}} + B_{\text{rescale}} \quad (4.4)$$

Donde

$$G_{\text{rescale}} = \frac{L_{\text{MAX}\lambda} - L_{\text{MIN}\lambda}}{Q_{\text{calmax}} - Q_{\text{calmin}}} \quad (4.5)$$

$$B_{\text{rescale}} = L_{\text{MIN}\lambda} - \left(\frac{L_{\text{MAX}\lambda} - L_{\text{MIN}\lambda}}{Q_{\text{calmax}} - Q_{\text{calmin}}} \right) Q_{\text{calmin}} \quad (4.6)$$

donde L_λ es la radiancia espectral para cada banda multiespectral en $W / (m^2 \text{ sr } \mu\text{m})$, Q_{cal} es el valor del pixel DN, Q_{calmin} y Q_{calmax} representa los valores mínimo y máximo del pixel con $L_{\text{MIN}\lambda}$ y $L_{\text{MAX}\lambda}$ en ND. Los valores de $L_{\text{MIN}\lambda}$ y $L_{\text{MAX}\lambda}$ representan las radiancias espectrales mínima y máxima para Q_{calmin} y Q_{calmax} en $W / (m^2 \text{ sr } \mu\text{m})$. Finalmente G_{rescale} es el factor gain de cambio de escala por cada banda en $(W / (m^2 \text{ sr } \mu\text{m}))/\text{DN}$ y B_{rescale} es el factor bias de cambio de escala por cada banda en $W / (m^2 \text{ sr } \mu\text{m})$.

4.2.2 Corrección atmosférica

Debido a la influencia de la atmosfera y al espesor de las capas que la componen, la radiancia recibida por el sensor del satélite no es la misma que la que sale del suelo. La radiancia no registrada por el sensor implica una distorsión en las imágenes satelitales. Para corregir dichas distorsiones es necesaria la aplicación de una corrección atmosférica cuya función principal radica en la obtención de los parámetros reales de la superficie terrestre sin la influencia directa de la atmosfera y fenómenos tales como la absorción y la dispersión.

Las correcciones atmosféricas se han abordado siguiendo cuatro procedimientos (King et. al., 1999; Robin, 1998; Sobrino, 2000):

1. A partir de medidas *in situ*, se toman en cuenta consideraciones atmosféricas durante la captura de la imagen.
2. A partir de imágenes de otros sensores que permitan estimar el estado de la atmósfera.
3. A partir de modelos físicos de transferencia radiativa.
4. A partir de datos de la propia imagen.

El presente trabajo requirió una corrección atmosférica para la obtención de valores reales de ETM+ LST. Se utilizó un modelo denominado The Dark Object Subtraction (DOS) basado en datos de la propia imagen (Chávez, 1996), aplicado para remover el efecto atmosférico en las bandas del rojo (ETM3) e infrarrojo cercano (ETM4) con datos de Landsat 7 ETM+. Las bandas fueron procesadas en el software The Environment for Visualizing Images (ENVI) versión 4.7 mediante el módulo “Dark Subtract” para la aplicación de la corrección atmosférica.

El método consiste en asumir que las áreas cubiertas con materiales de fuerte absorción tales como aguas o zonas de sombra deberían presentar una radiancia espectral cercana a cero. La aproximación del algoritmo, consiste en restar el valor mínimo de cada histograma (radiancia) y sustraerlo al resto de los ND de la imagen, como se presenta a continuación:

$$\rho_{\lambda} = \frac{\pi (L_{\lambda} - L_{HAZE}) d^2}{ESUN_{\lambda} \cos(\theta_s)} \quad (4.7)$$

donde ρ_{λ} es la reflectividad de la superficie corregida atmosféricamente (adimensional), π es la constante matemática igual a 3.14159 (adimensional), L_{λ} es la radiancia espectral de apertura del sensor en unidades de $W / (m^2 \text{ sr } \mu\text{m})$, d es la distancia de la tierra al sol en unidades astronómicas, $ESUN_{\lambda}$ es la irradiancia solar exoatmósferica en $W / (m^2 \mu\text{m})$, θ_s es el ángulo zenital solar y L_{HAZE} es el valor derivado de la imagen digital usando el criterio Dark Object en unidades $W / (m^2 \text{ sr } \mu\text{m})$.

4.2.3 Cálculo de emisividad

La medida de la radiancia que realiza un sensor situado a bordo de un satélite se hace suponiendo que las superficies observadas son cuerpos negros, siendo por tanto necesaria una buena determinación de las emisividades de los elementos de la superficie terrestre, en orden a tener un conocimiento exacto de la temperatura a la que éstos se encuentran (Becker, 1978).

La emisividad de la superficie terrestre 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 pixel y el ángulo de observación (Sobrino, 2000).

Los procedimientos para medir o determinar la emisividad se pueden clasificar en medidas de campo o laboratorio, relaciones empíricas o semi-empíricas, técnicas de inversión y medidas espaciales (Sobrino, 2000). El conocimiento de la emisividad es necesario para obtener la temperatura de la superficie terrestre. Sin embargo, el hecho de solo procesar un canal termal (banda 6 de ETM+) obliga a centrarnos en el desarrollo de métodos semi-empíricos.

Dentro de los métodos semi-empíricos, existen dos formas para obtener la emisividad. En la primera, los valores de emisividad son asignados para cada clase derivado de una clasificación de imagen convencional, es poco operativo debido a que se requiere un buen conocimiento del área de estudio y depende de la precisión de la clasificación. La segunda propuesta está basada en el método de los umbrales del NDVI tomado de (Sobrino, 2001).

En este proyecto de investigación, aplicó el método de umbrales por NDVI que se fundamenta en la introducción de parámetros efectivos considerando una superficie dada como constituida por una mezcla de suelo desnudo y vegetación (Sobrino et al., 1990).

El NDVI (Rouse et al., 1974) es el índice más utilizado en percepción remota por su sencillez matemática, fácil interpretación y poder de normalización de la respuesta espectral de sistemas de vegetación. Para calcularlo, son necesarias las bandas corregidas atmosféricamente en reflectancia del rojo (ETM3) e infrarrojo cercano (ETM4) correspondiente al sensor ETM+:

$$NDVI = \frac{R_{nir} - R_{red}}{R_{nir} + R_{red}} = \frac{ETM4 - ETM3}{ETM4 + ETM3} \quad (4.8)$$

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. Puede derivarse del NDVI de acuerdo con la ecuación (Carlson & Ripley, 1997):

$$P_v = \left(\frac{NDVI - NDVI_s}{NDVI_v - NDVI_s} \right)^2 \quad (4.9)$$

donde P_v es la proporción de vegetación, $NDVI_v$ y $NDVI_s$ representan el NDVI de la vegetación y el suelo, respectivamente.

El método de umbrales $NDVI^{UMB}$ (Sobrino et al., 2001) es una modificación de un método semi-empírico para calcular emisividad, basado en la aplicación de diferentes criterios en función del valor dado por el NDVI de la imagen ETM+. Los valores de emisividad son calculados a partir de tres diferentes casos. Después de una revisión en la literatura existente a continuación, se presenta un cuadro comparativo de los casos A, B y C en donde se usan diferentes umbrales en cada intervalo:

NDVI ^{UMB}				
Caso	A	B	C	Área de estudio
Sobrino et al., (2004)	NDVI < 0.2	NDVI > 0.5	0.2 ≤ NDVI ≤ 0.5	Valencia, España
Jiménez - Muñoz (2009)	NDVI < 0.18	NDVI > 0.85	0.18 ≤ NDVI ≤ 0.85	Albacete, España
Quin et al., (2011)	NDVI < 0.2	NDVI > 0.65	0.2 ≤ NDVI ≤ 0.65	Tengchong, China

Tabla 4.1 Cuadro comparativo. Fuente: Elaboración propia

- (A) En este caso, el pixel es considerado como suelo desnudo ($P_v=0$) y la emisividad del suelo (ϵ_s) le corresponde un valor medio de 0.97 (Sobrino et al., 2004)
- (B) Se considera que los pixeles están totalmente cubiertos de vegetación ($P_v=1$) con un valor constante para la emisividad de la vegetación (ϵ_v) de 0.99 (Sobrino et al., 2004)
- (C) Se refiere al caso de superficies heterogéneas y rugosas. El pixel está compuesto por una mezcla de suelo desnudo y vegetación. Para este caso, la emisividad es calculada de acuerdo con la siguiente ecuación (Sobrino et al., 2004):

$$\epsilon = mP_v + n \quad (4.10)$$

Con

$$m = \epsilon_v - \epsilon_s - (1 - \epsilon_s)F\epsilon_v \quad (4.11)$$

$$n = \epsilon_s + (1 - \epsilon_s)F\epsilon_v \quad (4.12)$$

donde F es un factor de forma (Sobrino et al., 1990) cuyo valor es 0.55. La expresión final para el cálculo de emisividad se expresa de la siguiente forma:

$$\epsilon_{ETM6} = 0.004 P_v + 0.986 \quad (4.13)$$

Para la decisión de los umbrales de cada intervalo, fue necesaria una revisión de los valores del histograma del área de estudio (paisaje) asociados a vegetación y suelo desnudo (Fig. 4.3). Los umbrales más adecuados resultaron los propuestos por Sobrino et al. (2001) con $NDVI_v$ como 0.5 y $NDVI_s$ como 0.2.

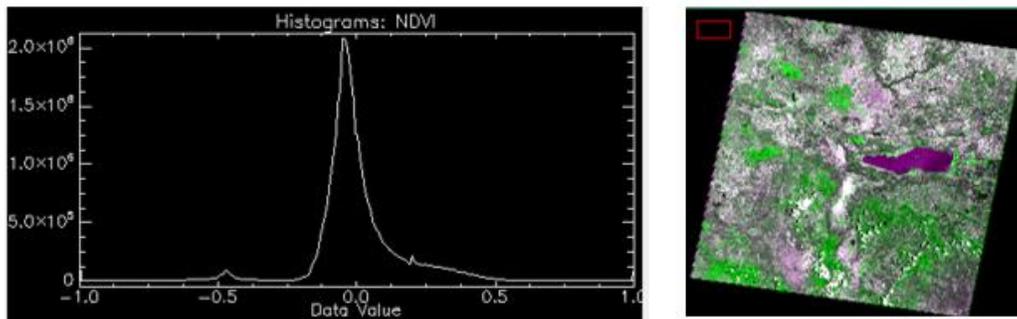


Figura 4.3 Histograma de valores de NDVI corregido atmosféricamente y visualización de imagen L7 ETM+.

Fuente: Elaboración propia

4.2.4 Cálculo de temperatura de la superficie terrestre

Existen diferentes métodos propuestos en la literatura para obtener LST. La mayoría de algoritmos requieren como datos de entrada valores *in situ*. Por ejemplo, aunque el método desarrollado por Jiménez-Muñoz & Sobrino (2003) requiere solo un canal termal, entre sus inconvenientes se encuentra requiere el contenido de vapor de agua. Por lo anterior, este trabajo se basa en el algoritmo propuesto por Artis & Carnahan (1982), el cual, solicita los parámetros mínimos como se muestra en la ecuación:

$$T_{\text{ETM} + \text{LST}} = \frac{T_{\text{brillo}}}{1 + (\lambda * T_{\text{brillo}} / \rho) \ln \epsilon} \quad (4.14)$$

λ es la longitud de onda de radiancia emitida ($\lambda = 11.5 \mu\text{m}$ (Weng et al., 2004)), ρ es la relación de la constante de Planck, la velocidad de la luz y la constante de Stefan – Boltzmann definido como $\rho = h \times c / j$ en unidades mK, donde h es la constante de Planck ($6.626 \times 10^{-34} \text{ J s}$), c es la velocidad de la luz ($2.998 \times 10^8 \text{ m/s}$), y j es la constante de Stefan - Boltzmann ($1.38 \times 10^{-23} \text{ J/K}$) y T_{brillo} es la temperatura de brillo en el sensor en (K) dada por (Chander et al., 2009):

$$T_{\text{brillo}} = \frac{K_2}{\ln\left(1 + \frac{K_1}{L_{\text{sensor}}}\right)} \quad (4.15)$$

donde K_1 y K_2 son las constantes de calibración 1 y 2, respectivamente. $K_1 = 666.09$ en unidades de $\text{W m}^{-2} \text{sr}^{-1} \mu\text{m}^{-1}$ y $K_2 = 1282.71$ en grados K y L_{sensor} es la radiancia espectral del sensor en la banda termal (ETM6) en $\text{W m}^{-2} \text{sr}^{-1} \mu\text{m}^{-1}$.

Se obtiene como resultado una mapa de temperatura de la superficie terrestre (ETM+LST) con resolución espacial de 60 (m), al igual que la banda ETM6. Para mantener coherencia con respecto a la resolución del resto de las bandas, los datos de emisividad (provenientes del rojo e infrarrojo cercano) fueron remuestreados de 30 a 60 (m) para la obtención del mapa final de ETM+LST.

4.3 Procesamiento de datos para validación

La validación de los datos de temperatura ETM+ LST fue realizada mediante la comparación con el producto MODIS LST, en específico, la versión 5 de MODIS/TERRA Land Surface Temperature and Emissivity Daily L3 Global 1 km (MOD11A1) disponibles en <http://ladsweb.nascom.nasa.gov/data/search.html>. La información raster con datos de ETM+ LST y MODIS LST fueron procesadas mediante el software ArcGIS for Desktop versión 10.1 en el módulo referente a estadísticas zonales.

Los productos MODLAND están organizados en una retícula de aproximadamente 1000 x 1000 km, cada cuadro se llama tile y se localiza por un número de columna (h) y línea (v). Para este proyecto, fueron procesadas dos imágenes MOD11A1 del 22 de Mayo de 2003 correspondientes a los mosaicos (tile) h08v06 & h08v07 (Fig. 4.4).

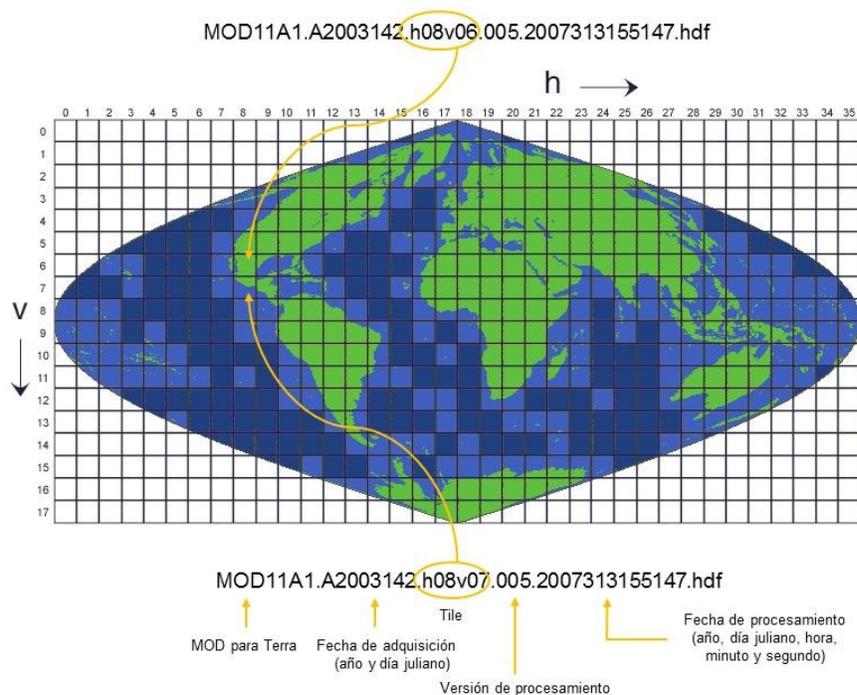


Figura 4.4 Organización de los productos MODLAND en tiles.
Fuente: Elaboración propia

Las escenas elegidas fueron adquiridas en tipo de datos L3 (producto de valor agregado derivado de variables biofísicas mapeadas), en formato HDF- EOS y proyección sinusoidal (SIN). Por consiguiente fue necesaria una reproyección al sistema de coordenadas Universal Transversa de Mercator (UTM) con la herramienta *MODIS Reprojection Tool* disponible en https://lpdaac.usgs.gov/tools/modis_reprojection_tool. Como resultado, se obtuvo un mapa de temperatura que incluye las ubicaciones de los campos geotérmicos de La Soledad y Los Negritos con resolución espacial de 1 km.

5. Análisis y resultados

En la escena Landsat ETM+ y el mapa de ETM+ LST procesados, fueron ubicados los campos de la Soledad y los Negritos, ambos, por su alto valor potencial en cuanto a recurso geotérmico. Primero, se ubicaron las posiciones puntuales de los campos a través de sus coordenadas geográficas. Posteriormente se generaron dos cuadrículas con un cubrimiento de 10' de latitud y 10' de longitud (319.91 km²), en el centro, aproximadamente se ubican los campos y el resto de superficie se consideró como parte del contexto geográfico.

Para comprobar si los valores de ETM+ LST son válidos, fue necesario realizar una comparación entre los productos MODIS/Terra LST y ETM+ LST correspondientes al 22 de Mayo de 2013. Debido a que ambos sensores tienen diferentes resoluciones espaciales, los datos originales ETM+ LST (60m) fueron remuestreados a 1 km, misma resolución del producto MODIS LST (Qin et al., 2011).

5.1 Identificación de áreas geotermales

En este estudio se asumió que las anomalías térmicas de ETM+ LST se sitúan en aquellas áreas en que los píxeles son iguales o exceden los 40°C (313.15° K). Este umbral se determinó para asegurar una tasa baja de falsas anomalías (Murphy et al., 2013). Para definir el tamaño de las anomalías térmicas se consideró la resolución espacial de los píxeles ETM+ (es decir, 60m). De lo anterior, resulta el área nominal de un píxel ETM+ LST es de 3600 m². Por este motivo, fue asignado el valor de una superficie de 3600 m² como tamaño mínimo para la identificación de anomalías térmicas en el mapa de ETM+ LST.

En el proceso de validación, el valor mínimo de superficie, para comprobar si las temperaturas fueron acertadas se situó en el interior de una superficie de un kilómetro cuadrado. Resolución espacial manejada por el producto MODIS/Terra LST. Para este estudio, aquellas áreas identificadas como anomalías térmicas, y con superficies menores a 1 km² el proceso de validación no fue realizado. La heterogeneidad de valores de temperatura en zonas tan pequeñas no se ven reflejadas en resoluciones espaciales medianas como la del sensor MODIS.

En la revisión de los mapas de ETM+ LST para la identificación de anomalías térmicas, resultaron 7 áreas (ver tabla 5.1) con posible potencial geotérmico, las ubicaciones de A, B, C, D pertenecen al campo geotérmico de La Soledad y las ubicaciones E, F y G al campo geotérmico de Los Negritos. De estas 7 áreas sólo dos exceden los 2 km² de superficie. Lo anterior, representó una dificultad para el proceso de validación debido a que los productos MODIS/Terra tienen una resolución espacial de 1 km. Por lo anterior, la validación de valores de temperatura entre ambos sensores (ETM+ LST y ETM + MODIS/Terra) fue realizada exclusivamente en las ubicaciones C y E (5.28 y 2.28 km²) que cuentan con un área suficientemente grande para extraer sus estadísticas de comparación.

A pesar que se siguió una metodología reportada en la literatura, los resultados en el proceso de validación no fueron los más favorables para áreas de una representatividad menor de 2 km². El problema principal radica en el pequeño tamaño de las anomalías térmicas. Áreas menores al kilómetro cuadrado presentan una importante variación de valores de temperatura que no son registrados en mayores resoluciones.

5.2 Resultados. Campo Geotérmico La Soledad, Jalisco

Los resultados finales son mostrados en el mapa de ETM+ LST (Fig. 5.1 y 5.4). Las estadísticas del mapa muestran que la más baja temperatura en el área de estudio fue de 299.51°K y la más alta de 325.67°K con rangos de color de púrpura a rojo. Fueron identificados 4 áreas (A, B, C, D) con posible potencial geotérmico, aproximadamente 6-10°K mayor que la temperatura de sus pixeles vecinos (contexto geográfico).

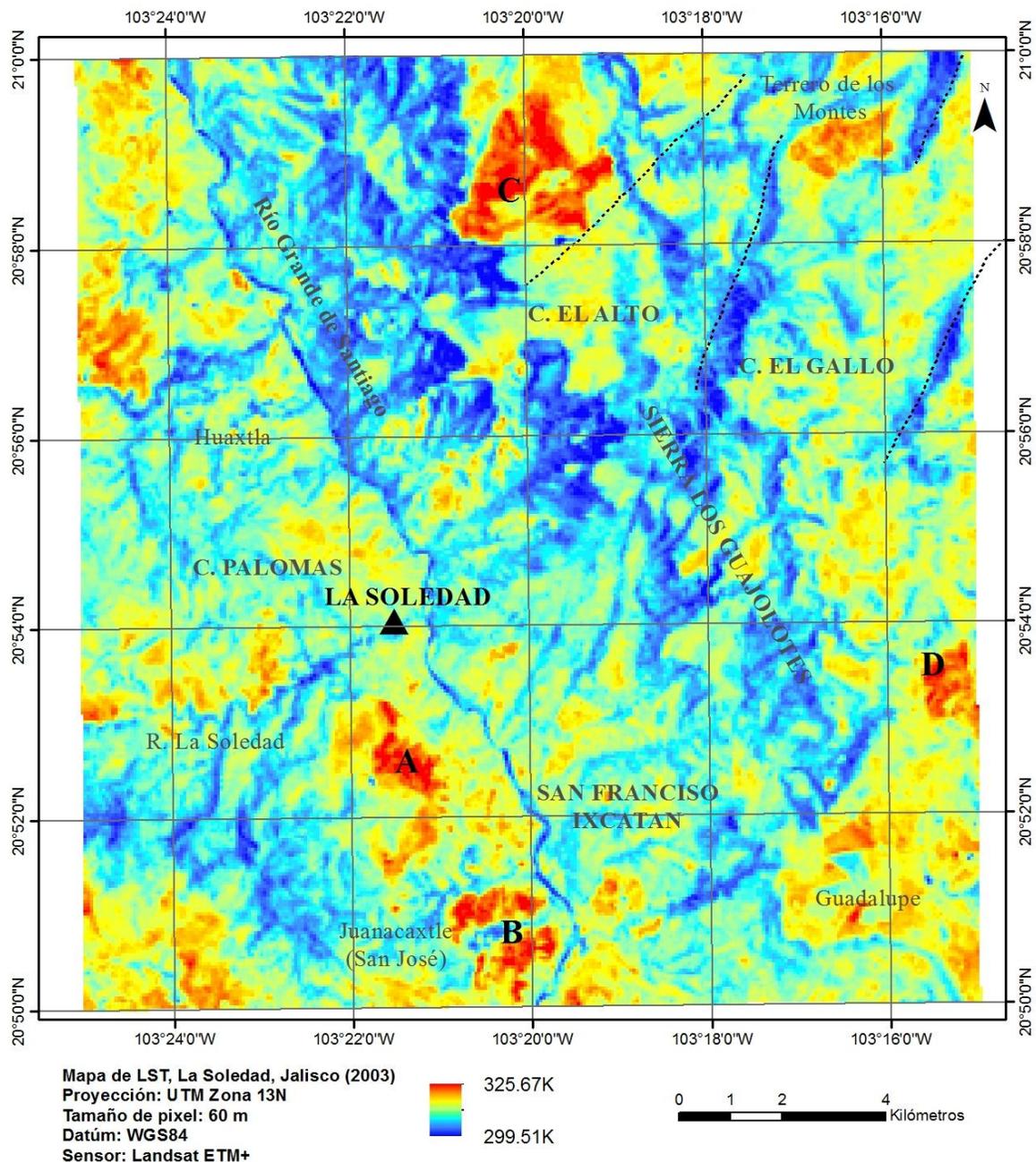


Figura 5.1 Mapa de ETM+ LST del campo geotérmico La Soledad, Jalisco.
Ubicación de áreas A, B, C y D.
Fuente: Elaboración propia

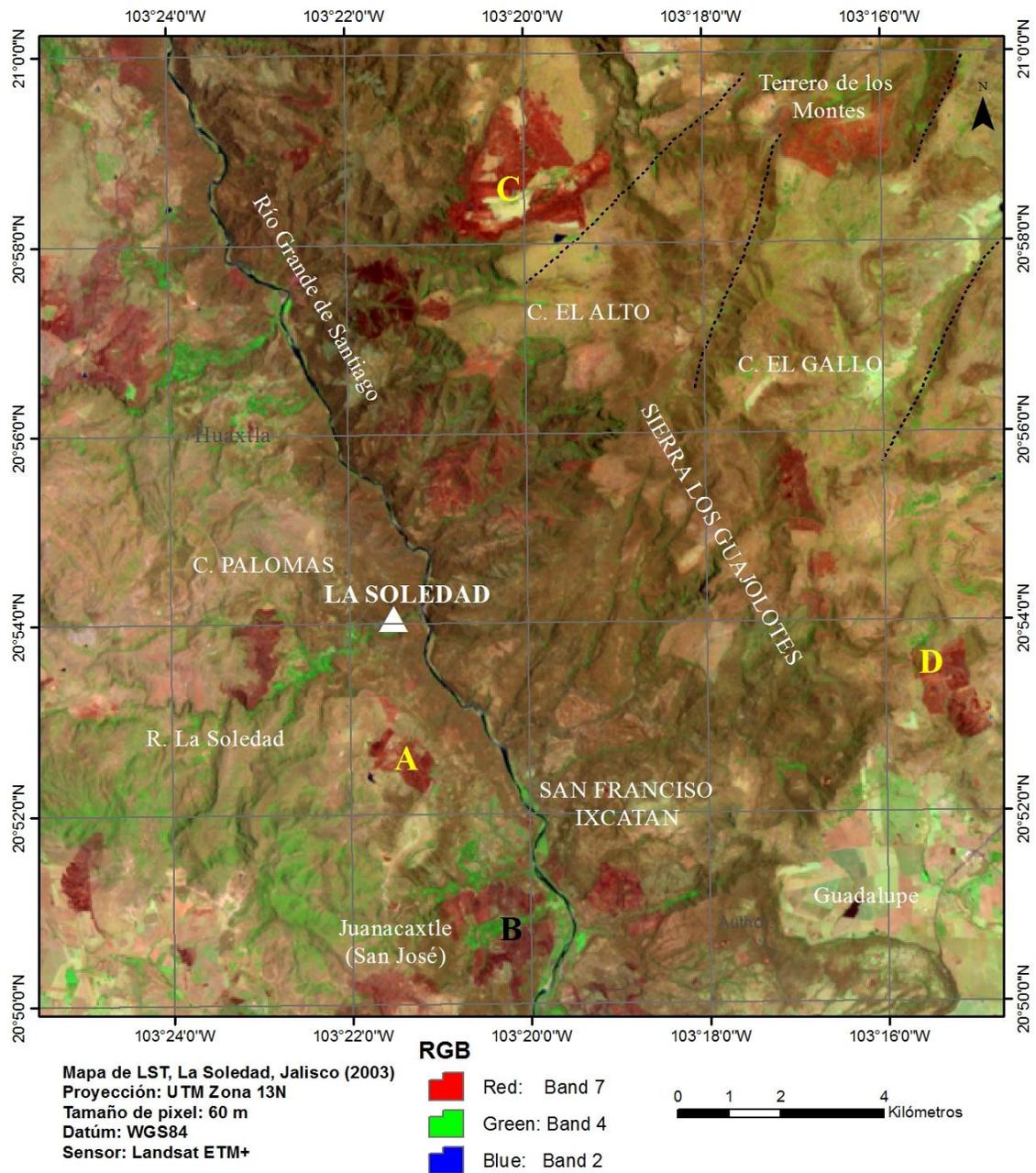


Figura 5.2 Mapa del campo geotérmico La Soledad, Jalisco.
 Ubicación de áreas A, B, C y D sobre una imagen Landsat ETM+ 2003.
 Fuente: Elaboración propia

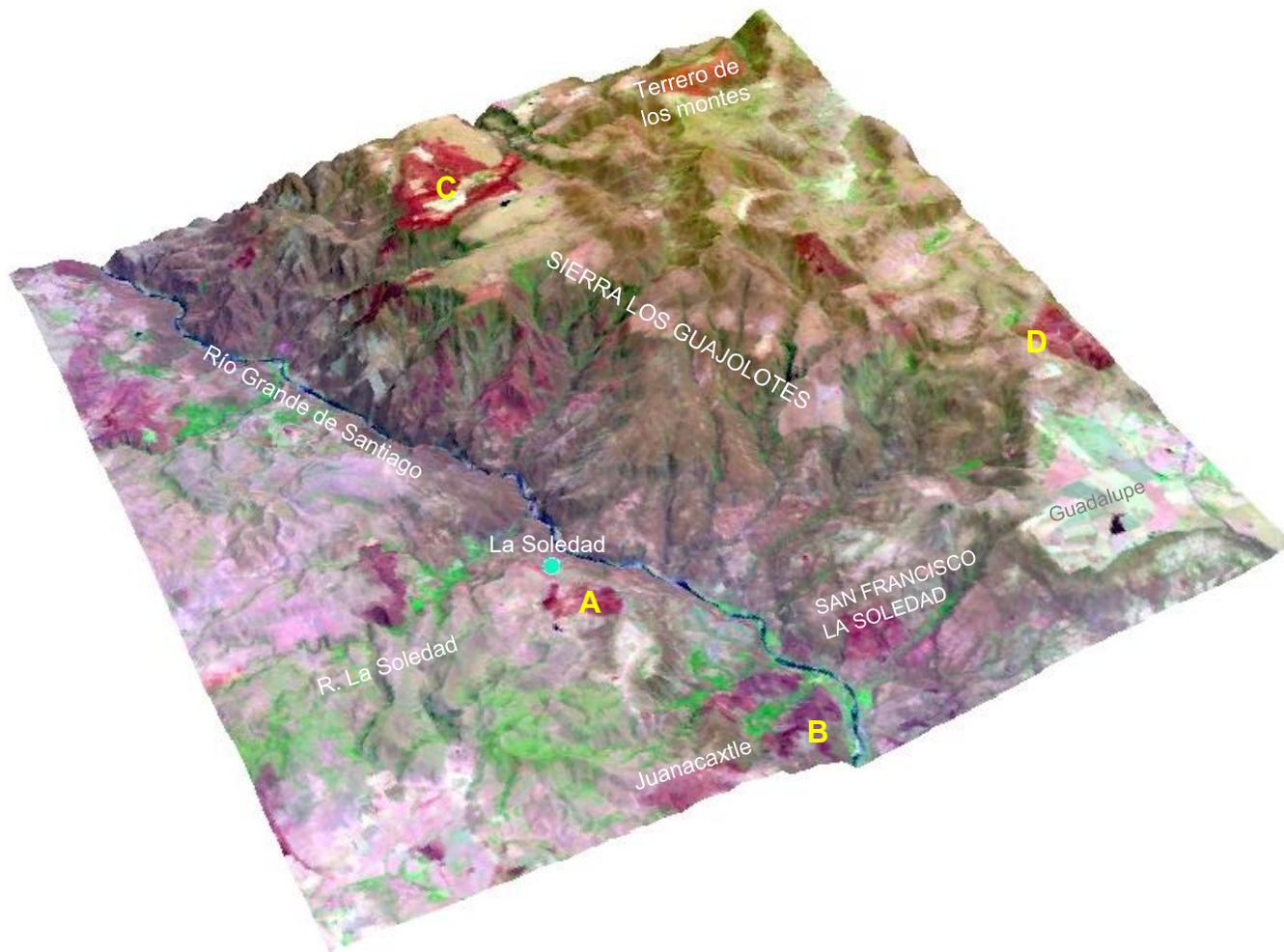


Figura 5.3 Mapa del campo geotérmico La Soledad, Jalisco en 3D sobre una imagen Landsat ETM+ 2003.
Fuente: Elaboración propia

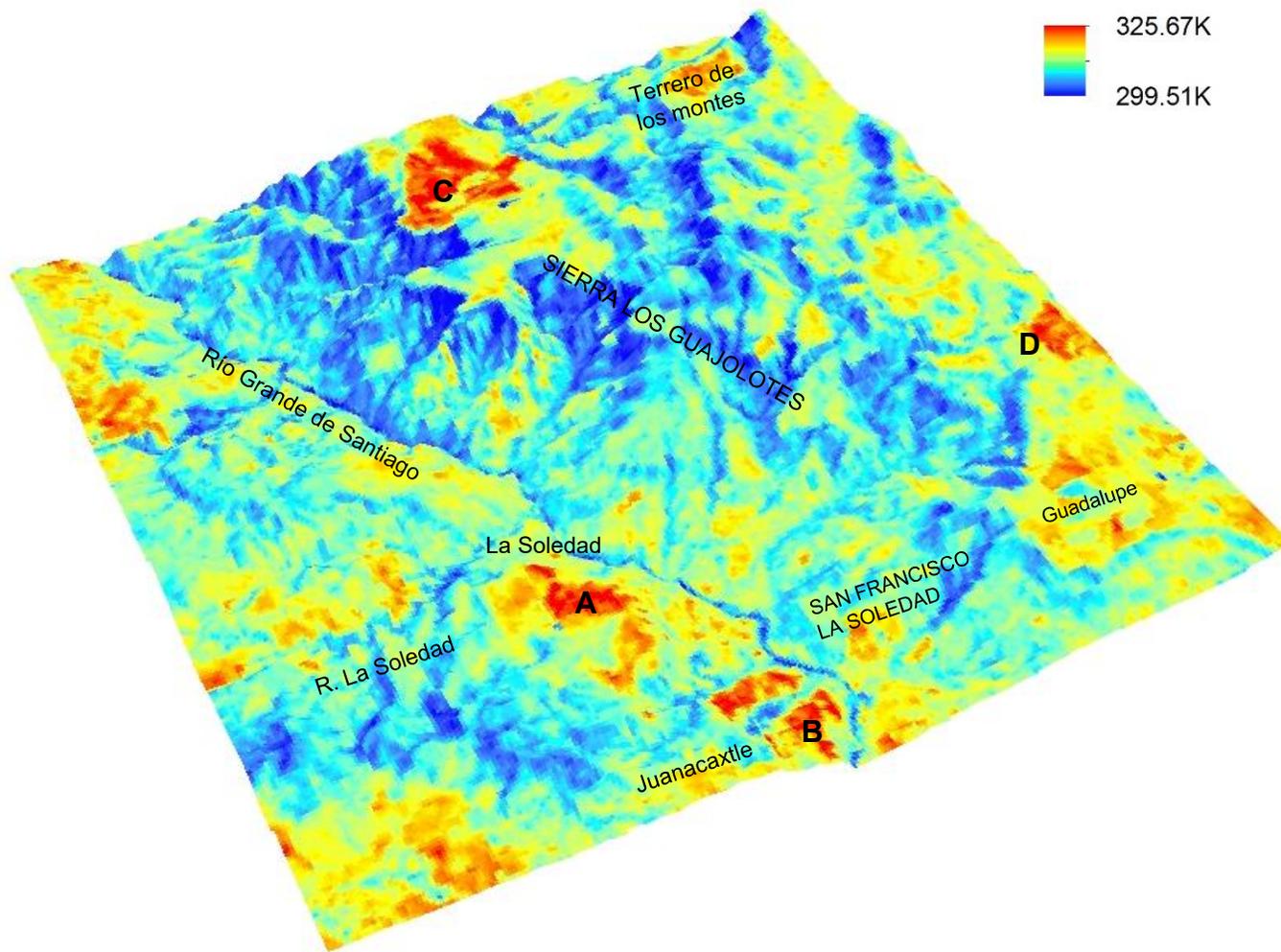


Figura 5.4 Mapa de ETM+ LST del campo geotérmico La Soledad, Jalisco en 3D. Ubicación de áreas A, B, C y D.
Fuente: Elaboración propia

5.3 Resultados. Caso de Estudio. Campo Geotérmico Los Negritos, Michoacán

Los resultados finales son mostrados en el mapa de ETM+ LST (Fig. 5.5 y 5.8). Las estadísticas del mapa muestran que la más baja temperatura en el área de estudio fue de 296.90°K y la más alta de 322.20°K con rangos de color de púrpura a rojo. De acuerdo al criterio previamente establecido ($>313.15^{\circ}$ K), en ésta zona de estudio no fueron encontrados áreas con potencial geotérmico. Sin embargo, se pueden mencionar tres áreas (E, F, G) que oscilan entre los 318 – 320K, aproximadamente mayor a 7°K que sus pixeles vecinos.

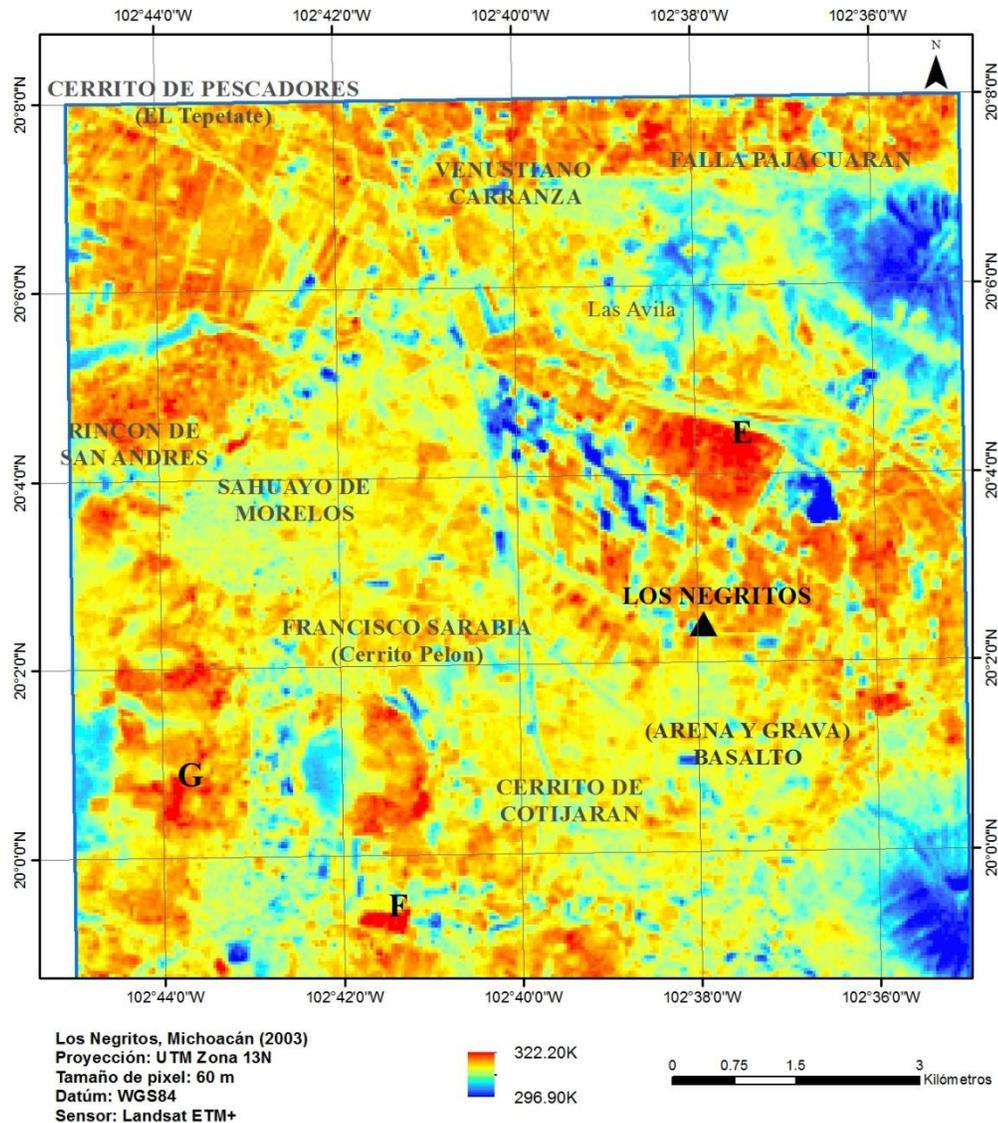


Figura 5.5 Mapa de ETM+ LST del campo geotérmico Los Negritos, Michoacán. Ubicación de áreas E, F y G.

Fuente: Elaboración propia

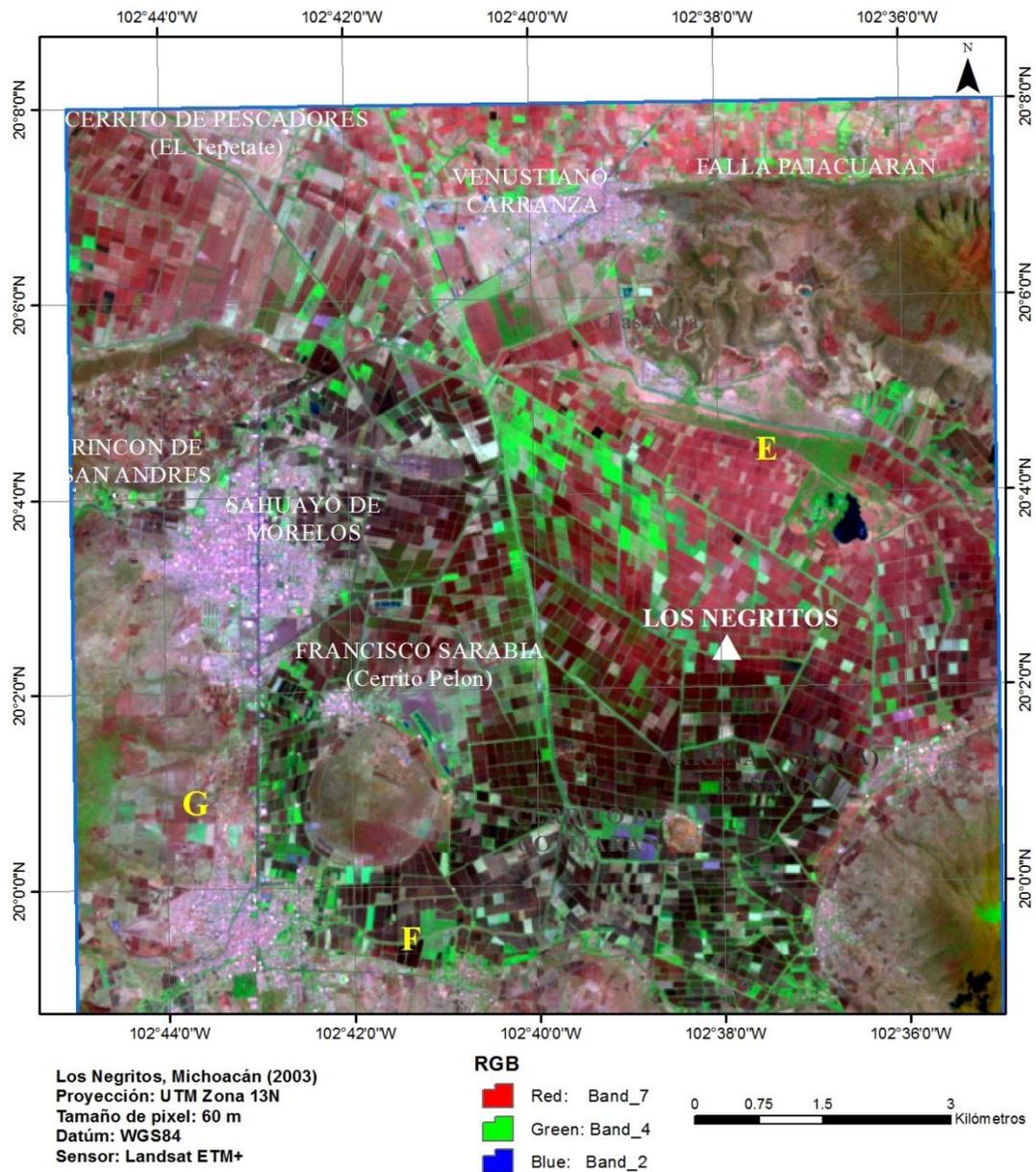


Figura 5.6 Mapa del campo geotérmico Los Negritos, Michoacán. Ubicación de áreas E, F y G sobre una imagen Landsat ETM+ 2003.
 Fuente: Elaboración propia

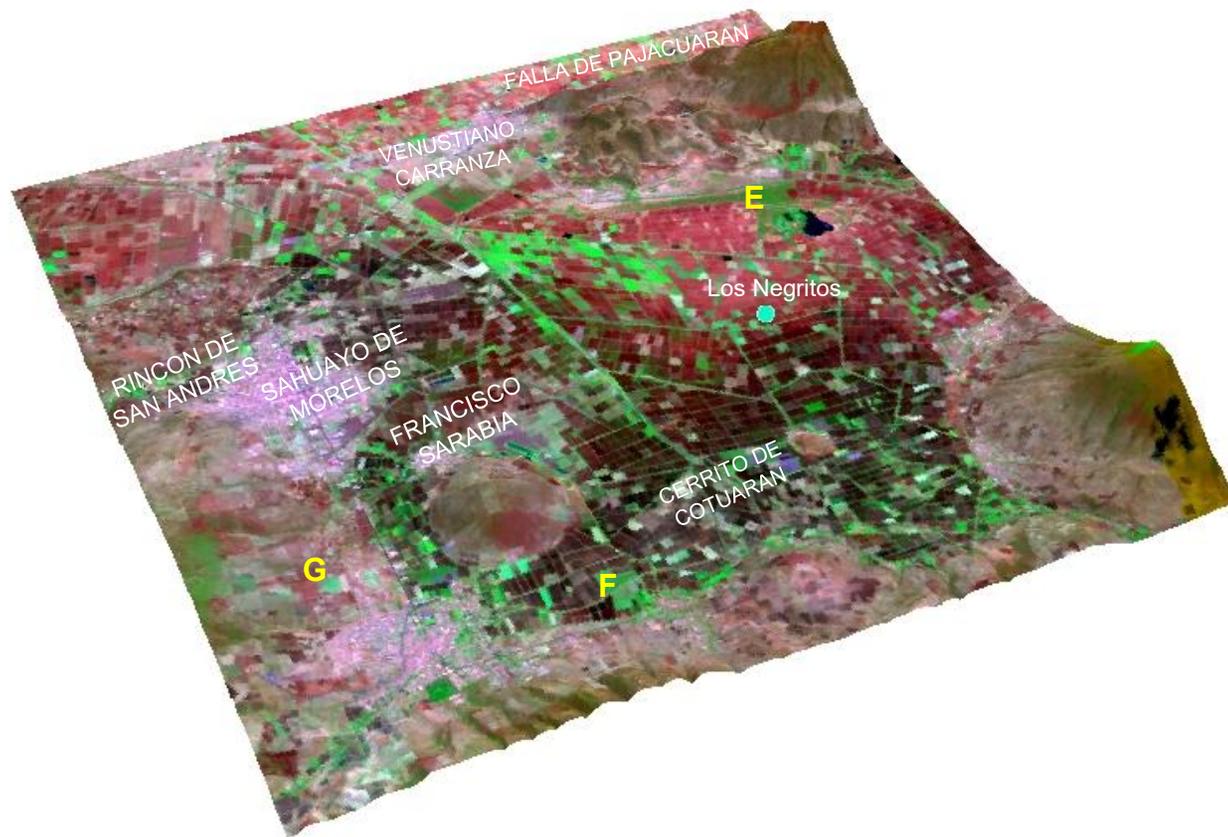


Figura 5.7 Mapa del campo geotérmico Los Negritos, Michoacán en 3D sobre una imagen Landsat ETM+ 2003.
Fuente: Elaboración propia

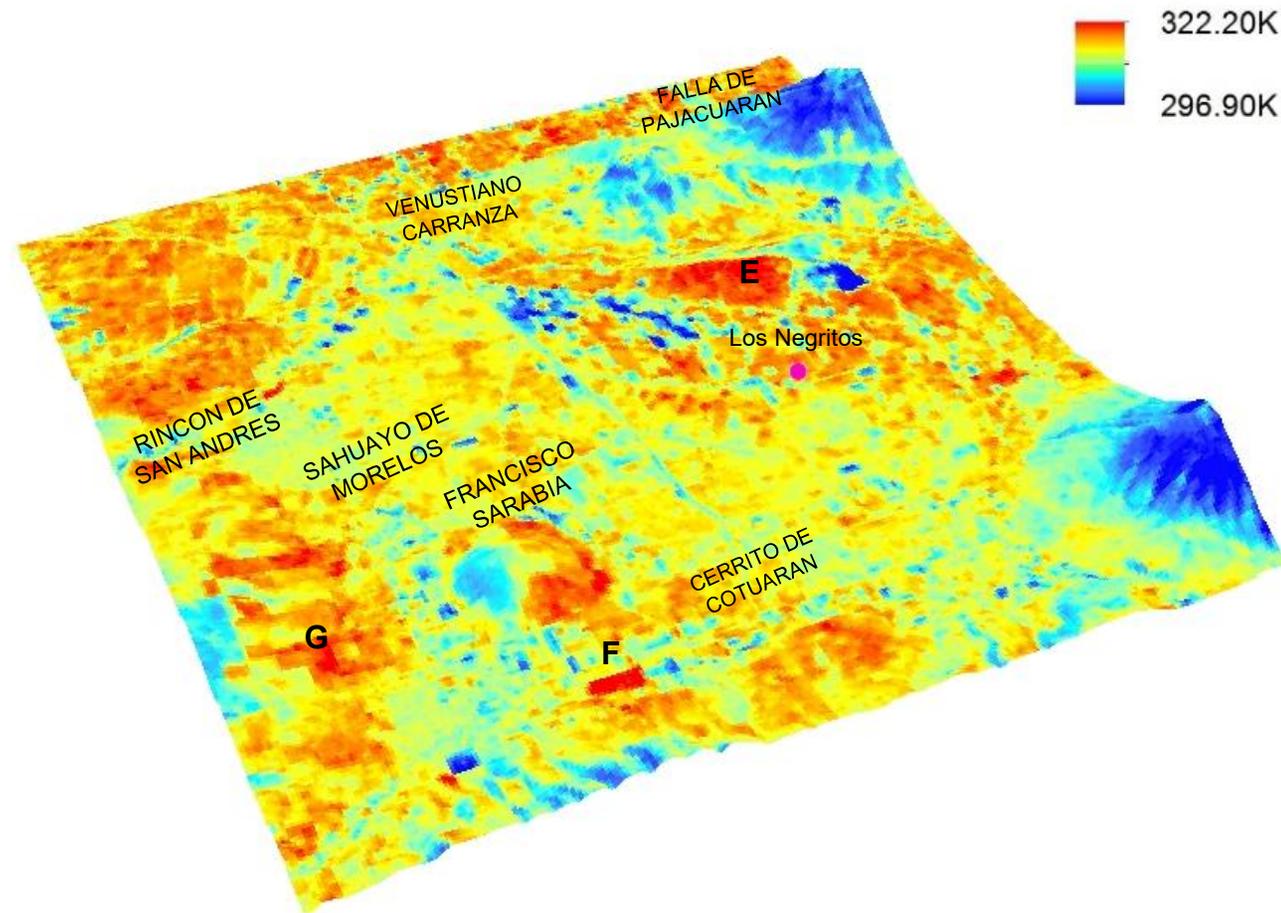


Figura 5.8 Mapa de ETM+ LST del campo geotérmico La Soledad, Jalisco en 3D. Ubicación de áreas E, F y G.
Fuente: Elaboración propia

5.4 Validación

La comparación entre los mapas de ETM+ LST (60m, 1km) y MODIS LST (1km) muestra las estadísticas de las ubicaciones A, B, C, D, E, F y G (Tabla 5.1). Las ubicaciones de A, B, C, D en el campo geotérmico de La Soledad presentan los valores más altos de temperatura (313.15°K) promediando entre 319 a 324 °K. En el campo geotérmico de Los Negritos, las estadísticas muestran un rango de temperatura más estrecho respecto del anterior. Las ubicaciones E, F y G promedian entre 317 a 324 °K.

Ubicación	Sensor	Resolución espacial	Mínimo (K)	Máximo (K)	Promedio (K)	Desviación estándar (K)	Promedio MODIS - Promedio ETM+	Área (km ²)
A	ETM+	60 m	315.96	325.64	320.75	1.75	3.89	1.07
		1 km	-	-	-	-		
	MODIS	1 km	-	-	-	-		
B	ETM+	60 m	310.32	323.9	319.11	2.48	3.89	2.03
		1 km	-	-	-	-		
	MODIS	1 km	-	-	-	-		
C	ETM+	60 m	319.79	325.66	319.43	1.31	3.89	5.28
		1 km	318.84	323.15	320.76	1.53		
	MODIS	1 km	322.73	327.32	324.65	1.45		
D	ETM+	60 m	312.51	323.57	319.29	2	3.89	1.07
		1 km	-	-	-	-		
	MODIS	1 km	-	-	-	-		
E	ETM+	60 m	313.81	321.48	318.08	1.26	7.1	2.28
		1 km	316.39	318.87	317.2	1.04		
	MODIS	1 km	323.05	326.61	324.3	1.42		
F	ETM+	60 m	317.69	322.2	319.68	0.97	7.1	0.28
		1 km	-	-	-	-		
	MODIS	1 km	-	-	-	-		
G	ETM+	60 m	317.12	320.23	318.87	0.62	7.1	0.21
		1 km	-	-	-	-		
	MODIS	1 km	-	-	-	-		

Tabla 5.1 Comparación. Fuente: Elaboración propia

Dada la resolución espacial del sensor MODIS/Terra, únicamente se seleccionaron las ubicaciones C y E para el proceso de validación. En dichas ubicaciones, las diferencias de promedios (entre ETM+ LST 1Km y MODIS LST 1Km) fueron de 3.89 y 7.1 °K respectivamente. Para que un resultado en la comparación de valores sea válido, entre MODIS y ETM+ se permite una máxima diferencia de 2°C (Srivastava et al., 2009). Las diferencias resultantes en este estudio, se encuentran bastante alejadas de dicho umbral, en especial la ubicación C con casi tres veces más de lo permitido.

El modelo de validación bajo esta metodología, se encuentra limitado por la resolución de las imágenes MODIS LST y solo se permite detectar anomalías termales en zonas con una superficie superior a 1 km². Por lo anterior, dicho modelo de validación no fue aplicable para nuestra zona de estudio, en específico, en las ubicaciones A, B, D, F, G cuyas áreas son menores al kilómetro cuadrado. El tamaño de área (menores a 1km²) y la sensibilidad del sensor ETM para encontrar variabilidades térmicas no pueden ser comprobados con imágenes MODIS/Terra LST, se sugiere tomar otro sensor de respuesta para el proceso de validación como Sentinel 2.

Por lo anterior, fue concluido que las diferencias de temperatura (C y E) se incrementaron debido a que la extensión de las anomalías térmicas es apenas superior al kilómetro cuadrado. Entre más pequeña sea la zona, mayor distorsión de valores se encontró en el proceso del remuestreo. En el estudio de Srivastava (2009), los valores en la diferencia de promedios son similares, debido a que sus anomalías térmicas son de mayor área y la variación en los valores de temperatura no es tan marcada, es decir, se mantiene una homogeneidad. Además, al momento del remuestreo se modifican y mezclan los valores de los píxeles con los de su alrededor resultando en valores sobreestimados. Los valores originales de ETM+ LST se afectan y no presentan su valor original. De acuerdo a la experiencia recorrida en este estudio, en la validación con MODIS/Terra LST es recomendada una extensión de 5 km² como área mínima para tener 5 píxeles de comparación.

6. Discusión y Conclusiones

El campo de la percepción remota es extenso y una de las áreas en las cuales puede aportar radica en la búsqueda de energías renovables para disminuir el deterioro ambiental que viene sufriendo el planeta tierra. México en un marco de desarrollo sustentable ha implementado importantes esfuerzos económicos y de investigación en torno a energías renovables. Los resultados son presentados en las Prospectivas del Sector Eléctrico publicadas año tras año y son distintos de acuerdo al tipo de energía en explotación. Sin embargo, México destaca como el cuarto país a nivel mundial en cuanto a la producción de energía geotérmica. Aun cuando el panorama es optimista el desarrollo de este tipo particular de energía presenta un potencial mayor al que actualmente está siendo utilizado.

Si bien la energía geotérmica se despliega como una prometedora opción para la mitigación del deterioro a nivel mundial, su desarrollo incluye diferentes etapas que suponen una importante demanda de recursos económicos, complejidad técnica, tiempo, planeación a largo plazo y una adecuada gestión del territorio. En nuestro país la apuesta por esta energía, requiere de un mapeo adecuado de áreas con potencial geotérmico. El enfoque de exploración del recurso geotérmico supone la fase inicial de reconocimiento realizada directamente en campo. Esta primera fase es inevitable, no obstante podemos apoyarnos de tecnologías alternativas que aporten una diferente perspectiva en el proceso de identificación de áreas potenciales para focalizar los esfuerzos del trabajo de campo.

En este estudio se reconoce y demuestra la importancia de la percepción remota para la identificación de áreas geotermales y se reduzca el tiempo en las fases iniciales de reconocimiento y ubicación de áreas puntuales. El proceso de identificación, al igual que lo realizado en esta propuesta, plantea el estudio en aquellas áreas con antecedentes geológicos de índole vulcanológica o tectónica que suponga hallazgos del recurso geotermal.

6.1 Limitaciones en la metodología de estimación de temperatura ETM+ LST

El planteamiento y el diseño de la metodología se enfocaron principalmente en las aplicaciones de percepción remota realizadas previamente en la región del infrarrojo térmico. Una de las aplicaciones es la estimación de la Temperatura de la Superficie Terrestre (ETM+ LST) debido a que la energía radiada en la región del infrarrojo térmico corresponde con lo que emite la superficie terrestre en forma de calor, justo lo buscado para la identificación de áreas con potencial geotérmico.

El proceso de exploración geotérmica obliga desde la percepción remota a orientarnos en sensores cuyo campo de aplicación corresponda a la región térmica, como es el caso de las imágenes Landsat 7 ETM+. Una de las limitaciones en la metodología desarrollada, es la disponibilidad de las imágenes y las condiciones climáticas de las mismas. En este caso, únicamente se utilizó una escena, sin embargo, en el proceso de elección, tuvieron que desecharse varias escenas debido a la mala calidad de las imágenes, alto porcentaje de cobertura de nubes o a los problemas del bandeo en las imágenes Landsat 7 ETM+.

La implementación de la identificación de áreas geotermales mediante datos Landsat 7 ETM+ en los campos de La Soledad, los Negritos y sus alrededores permitió evaluar algunos de los alcances y limitaciones de la metodología propuesta.

El primer criterio para la identificación de lugares con potencial geotérmico está sujeto al nivel de detalle obtenido en el mapa final de ETM+ LST con resolución espacial de 60 m. Es decir, las áreas susceptibles al recurso geotermal y menores a 60 m no pueden ser identificadas bajo esta propuesta. Por consiguiente, previo a la ejecución de una propuesta, en los antecedentes geológicos deben considerarse áreas lo suficientemente grandes como para discriminarse con las resoluciones antes mencionadas.

El segundo criterio reside en el umbral del diferencial del NDVI para la identificación de anomalías térmicas basadas en temperatura y la diferencia de valores con respecto a sus vecinos (contexto geográfico).

Después de la experiencia recabada a lo largo del trabajo, se recomienda la aplicación de esta metodología en áreas lo bastante homogéneas en cuanto a valores termales y tamaño suficiente para su correcta discriminación e identificación de áreas. Como complemento se puede utilizar información de otros sensores que puedan auxiliar en el proceso inicial de exploración o incluso el registro de valores aleatorios de temperatura tomados directamente en campo. En lugares cuyos antecedentes geológicos no sean tan claros, se puede utilizar una serie de imágenes para su posterior procesamiento y registro histórico en cuanto a valores de temperatura para su discriminación conforme a valores de temperatura.

6.2 Limitaciones en el proceso de validación

Para el caso de los campos geotérmicos de la Soledad (Jalisco) y los Negritos (Michoacán), como se argumentó con anterioridad el modelo de validación utilizado en esta metodología está limitado por la resolución de las imágenes MODIS LST que únicamente permiten detectar anomalías termales en zonas con una superficie superior a 1 km². De las 7 ubicaciones puntuales detectadas en el presente trabajo solamente 5 (A; B, C, D, E) apenas excedieron el tamaño mínimo de 1 km² razón por la cual fue tan complejo y en la mayoría de los casos no fue posible realizar el proceso de validación.

Las limitantes en el proceso de validación obedecen a dos principales razones, la primera, consiste en la sensibilidad del sensor MODIS que cumple con los parámetros de una resolución espacial diseñada para un sensor con visión global que recorra grandes coberturas terrestres, no interesa el nivel de detalle sino la máxima cobertura. La segunda razón, está enfocada en las condiciones propias de ambas zonas de estudio, dadas las características y los estudios de potencial previamente realizados en estas ubicaciones corresponden a estudios locales cuyo tamaño no es perfectamente identificable conforme a las resoluciones del sensor ETM+ (60m).

Debido a los inconvenientes presentados con la resolución y a las características de los campos geotérmicos de la Soledad y los Negritos, en la validación con MODIS/Terra LST es recomendada una extensión de 5 km² como área mínima para tener, por lo menos 5 píxeles de comparación. Por el contrario, en superficies menores a 1 km² la sensibilidad del sensor ETM para encontrar variabilidades térmicas no es compatible ni puede ser comprobado con imágenes MODIS/Terra LST por lo cual es necesario la elección de otro sensor como ASTER.

6.3 Líneas de investigación a futuro

En su fase inicial este trabajo pretendía hacer uso conjunto de datos multiespectrales y de SAR para proponer un método de identificación de zonas con potencial de explotación de energía geotérmica sin embargo su implementación fue interrumpida para focalizar los esfuerzos exclusivamente en la detección de patrones anómalos en la concentración de temperatura en la superficie terrestre. Una labor pendiente considera la posibilidad de tomar diferentes fechas para verificar la estabilidad de los clusters (agrupaciones de píxeles) de campos térmicos anómalos complementando los estudios mediante series de tiempo de LST con información de imágenes correspondientes al sensor ASTER cuyas resoluciones espaciales son comparables con las de Landsat 7 ETM+.

Durante el desarrollo de esta investigación se ha seguido una línea enfocada al potencial del recurso geotérmico a través de la detección de anomalías térmicas en campos cuyas características geológicas los posicionan como susceptibles al aprovechamiento de este tipo de energía. Sin embargo, dados los avances de la comunidad de percepción remota geológica se han diseñado aplicaciones en estudios de exploración de recursos geotermales en ámbitos variados que incluyen deformaciones de la superficie, emisiones gaseosas, análisis estructural, mapeo mineral, medida de flujo de calor y geobotánica; una tarea por examinar consiste en incluir dichos diseños (de acuerdo a su pertinencia) que complementen los estudios de reconocimiento y prefactibilidad realizados en campo.

La complejidad técnica y alta inversión económica de las fases iniciales de reconocimiento y prefactibilidad realizados directamente en campo supone la búsqueda de nuevas alternativas que auxilien en el proceso de diagnóstico de exploración geotérmica, la información aportada a través de medidas indirectas de sensores satelitales puede presentarse como una alternativa eficaz para afinar la detección puntual de lugares con potencial. Mediante el análisis a partir de imágenes satelitales se puede aumentar el grado de certeza y la reducción del margen de error en cuanto a la ubicación precisa de los campos con potencial geotérmico, reflejándose en el proceso de exploración física para evitar la injustificada perforación de pozos y excavación de lugares que según sus características son inviables para su explotación. Lo antes expuesto, también conlleva a la disminución del deterioro de paisajes, contaminación ambiental y al injustificado gasto de recursos económicos que no llevan a un beneficio social.

A medida que se vaya profundizando la investigación de los recursos geotermales mediante técnicas de percepción remota en ámbitos no tan desarrollados y con adecuados diseños experimentales, insumos necesarios (imágenes satelitales) e información básica recaba en campo puede acelerarse la fase de reconocimiento para comprender la geología de la superficie, la distribución de la temperatura, y en su caso

composición mineralógica susceptible al recurso. Los elementos definidos en la fase de reconocimiento sirven de pauta para la revisión y análisis de prefactibilidad.

Hacia el desarrollo de las energías renovables en México es requerida la inclusión de recursos tecnológicos y diseños metodológicos que ayuden a explotar el verdadero potencial del país, la percepción remota se presenta como una herramienta óptima para el mejor conocimiento del territorio que incentive el crecimiento energético del país.

La evaluación de las áreas potenciales de recursos geotérmicos nacionales, no solo incluye las condiciones físicas adecuadas para su implantación, además repercute en distintos ámbitos que incluyen aspectos, sociales, ambientales y económicos del país. La demanda de producción de energía eléctrica puede ser cubierta a través de la implantación de plantas geotermoeléctricas distribuidas por redes de abastecimiento a hogares y empresas.

Los beneficios principales que aporta el aprovechamiento de esta energía incluye la implementación de soluciones renovables evitando la dependencia para la generación de energía a través de las formas tradicionales, aislando y disminuyendo del consumo de combustibles fósiles. Además, se reduce la emisión de gases contaminantes a la atmósfera por lo que disminuye el efecto invernadero, se desarrolla la industria y la economía de la región en la que se instala y si su generación se hace cerca de los puntos de consumo reduce las pérdidas de transporte de energía.

La diversificación de la producción de electricidad a partir de geotermia y otras energías renovables puede cubrir la demanda en lugares cuya ubicación se encuentra lejos de los principales centros urbanos. El acceso del país a la diversificación de producción mediante energía geotérmica provocará:

- 1) Una mayor participación del sector público y privado.
- 2) Menores costos de producción de la energía, considerando la generación de cada megawatt-hora (MWh).

El desarrollo de la industria geotérmica, en próximos años, requiere de un monitoreo del impacto ambiental local que considere las afectaciones físicas a nivel superficial y subterráneo enlistadas a continuación: i) contaminación de aguas producto de las perforaciones de pozos subterráneos de sustancias como arsénico y amoníaco; ii) disturbios en el ecosistema local principalmente deforestación local por cambios de temperatura de superficie; iii) infiltraciones durante el proceso de exploración en los pozos; iv) erosión del suelo causados por procesos de degradación en las capas orgánicas y v) problemas de subsidencia a corto o largo plazo provocados por la extracción de fluidos geotermales.

7 Bibliografía

- Alonso. (1985). Present and planned utilization of Geothermal Resources in Mexico. *Geothermal Resources Council Transactions*, 135-140.
- Artis, D., & Carnahan, W. (1982). Survey of emissivity variability in thermography of urban areas. *Remote Sensing of Environment*, 12(4), 313-329.
- Bateson, L., Vellico, M., Beaubien, S., Pearce, J., & Annunziatellis, A. (2008). The application of remote-sensing techniques to monitor CO₂-storage sites for surface leakage: method development and testing at LATERA (Italy) where naturally produced CO₂ is leaking to the atmosphere. *International Journal Greenhouse Gas Control*, 2(3), 388–400.
- Becker, F. (1978). *Principes Physiques et Mathématiques de la Teledetection*. Toulouse: C.N.E.S.
- Carlson, T., & Ripley, D.A. (1997). On the relation between NDVI, fractional vegetation cover, and leaf area index. *Remote Sensing of Environment*, 62(3), 241-252.
- Chander, G. M. (2009). Summary of current radiometric calibration coefficients for Landsat MSS, TM, ETM+, and EO-1 ALI sensors. *Remote Sensing of Environment*, 113(5), 893-903.
- Chávez, P. (1996). Image-based atmospheric correction-revisited and improved. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 62(9), 1025-1036.
- Coolbaugh, M., Kratt, C., Fallacaro, A., Calvin, W., & Taranik, J. (2007). Detection of geothermal anomalies using Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER) thermal infrared images at Bradys Hot Springs, Nevada, USA. *Remote Sensing of Environment*, 106(3), 350-359.
- Demant, A. (1978). El Eje Neovolcanico Transnortino, sus problemas de interpretación. *Revista del Instituto de Geología*, 2, 172-187.
- Eneva, M., & Coolbaugh, M. (2009). Importance of elevation and temperature inversions for the interpretation of thermal infrared satellite images used in geothermal exploration. *Proceedings Geothermal Resources Council Transactions*, 33, 415–418.
- Fahselt, D. (1995). Growth form and reproductive character of lichens near active fumaroles in Japan. *Symbiosis*, 18(3), 211-231.
- Fred, G., Watson, R., Lockwood, W., Newman, T., & Anderson, R. (2008). Development and comparison of Landsat radiometric and snowpack model inversion techniques for estimating geothermal heat flux. *Remote Sensing of Environment*, 112(2), 471-481.
- Giordano, G., Pinton, A., Cianfarra, P., Baez, W., Chiodi, A., Viramonte, J., & Norini, G. (2013). Structural control on geothermal circulation in the Cerro Tuzgle-Tocomar geothermal volcanic area (Puna plateau, Argentina). *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, 249, 77-94.
- Gutiérrez-Negrín, Maya-González, & Quijano-León. (Abril 19- 24, 2015). Present Situation and Perspectives of Geothermal in Mexico. *Proceedings World Geothermal Congress 2015*, 1-10.
- Haselwimmer, C., & Prakash, A. (2013). Thermal infrared remote sensing of geothermal systems. *Thermal Infrared Remote Sensing*, 22, 453-473.
- Hiriart Le Bert, G. (2011). Evaluación de la Energía Geotérmica en México. *Informe para el Banco Interamericano de Desarrollo y la Comisión Reguladora de Energía*. Distrito Federal, México.

- Holmberg, J. (1992). *Making Development Sustainable: Redefining Institutions, Policy and Economics*. Washington, D.C: Island Press.
- Iglesias, E., & Torres, R. (2009). Primera estimación de las reservas geotérmicas de temperatura intermedia a baja en veinte estados de México. *Geotermia*, 22(2), 54-65.
- Jiménez-Muñoz, J. C. (2003). A generalized single channel method for retrieving land surface temperature from remote sensing data. *Journal of Geophysical Research*, 108(D22).
- Jiménez-Muñoz, J. C. (2009). Revision of the Single-Channel Algorithm for Land Surface Temperature Retrieval From Landsat Thermal-Infrared Data. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 47(1).
- King, M. D., Kaufman, Y. J., Tanré, D., & Nakajima, T. (1999). Remote Sensing of Tropospheric Aerosols from Space: Past, Present and Future. *Bulletin of the American Meteorological Society*(80), 2229-2259.
- Kratt, C., Calvin, W., & Coolbaugh, M. (2010). Mineral mapping in the Pyramid Lake basin: hydrothermal alteration, chemical precipitates and geothermal energy potential. *Remote Sensing of Environment*, 114(10), 2297–2304.
- Kristinsson, G. M. (2010). Proceedings World Geothermal Congress 2010. *Proceedings World Geothermal Congress 2010*, 25-29.
- Landsat 7 Science Data Users Handbook [M/OL]*. (2009). Obtenido de http://landsathandbook.gsfc.nasa.gov/pdfs/Landsat7_Handbook.pdf
- Mercado, S. (1976). The Geothermal Potential Evaluation of Mexico by Geothermal Chemistry. *Proceedings of of the International Congress on Thermal Waters, Geothermal Energy and Vulcanism of the Mediterranean Area*.
- Morisette, J., Privette, J., & Justice. (2002). A framework for the validation of MODIS Land products. *Remote Sensing of Environment*(96), 77-96.
- Murphy, S. W. (2013). MODIS and ASTER synergy for characterizing thermal volcanic activity. *Remote Sensing of Environment*, 131, 195-205.
- Nash, G., Moore, J., & Sperry, T. (2003). Vegetal-spectral anomaly detection at the Cove Fort-Sulphurdale thermal anomaly, Utah, USA: implications for use in geothermal exploration. *Geothermics*, 32(2), 109–130.
- Ordaz Méndez, C., Flores Armenta, M., & Ramírez Silva, G. (2011). Potencial geotérmico de la República Mexicana. *Geotermia*, 24-1, 50-58.
- Prakash, A., Sastry, R., Gupta, R., & Saraf, A. (1995). Estimating the depth of buried hot features from thermal IR remote sensing data: a conceptual approach. *International Journal of Remote Sensing*, 16(13), 2503–2510.
- Prol, R. M. (1988). *El calor de la tierra*. Distrito Federal, México: Fondo de Cultura Económica.
- Qin, Q., Zhang , N., Nan, P., & Leilei , C. (2011). Geothermal area detection using Landsat ETM plus thermal infrared data and its mechanistic analysis-A case study in Tengchong, China. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 13(4), 552-559.
- Qin, Z., A. Karnieli, & P. Berliner. (2001). A Mono-Window Algorithm for Retrieving Land Surface Temperature from Landsat TM Data and its applications to the Israel-Egypt Border. *Journal of Remote Sensing*(22), 3719-3746.

- Robin, M. (1998). *La Télédétection*. Paris: Nathan.
- Romo, J., & Grupo CeMIE-Geo. (19-25 de Abril de 2015). The Mexican Center for Innovation in Geothermal Energy (CeMIE-Geo). *Proceedings World Geothermal Congress 2015*, 1-7.
- Rouse, J., Haas, R., Schell, J., & Deering, D. (1974). Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS. *Third ERTS-1 Symposium, 10-14 Dec. 1973 NASA SP-351*, 309-317.
- Sarychikhina, O., Glowacka, E., & Mojarro, J. (2016 por publicar). Surface deformation associated with geothermal fluids extraction at the Cerro Prieto Geothermal Field, Baja California, Mexico revealed by DInSAR technique. *Conferencia Mayo, ESA*.
- Sarychikhina, O., Glowacka, E., Suárez, F., Mellors, R., & Ramirez, J. (2011). Aplicación de DInSAR a los estudios de subsidencia en el Valle de Mexicali. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 63(1), 1-13.
- Secretaría de Gobernación. (31 de Octubre de 2014). *Diario Oficial de la Federación*. Recuperado el 12 de Junio de 2016, de Reglamento de la Ley de Energía Geotérmica.: http://dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5366670&fecha=31/10/2014
- Secretariat, R. (2012). *Renewables 2012 Global Status Report*. Paris. Obtenido de http://www.ren21.net/Portals/0/documents/Resources/GSR2012_low%20res_FINAL.pdf
- Servicio Geológico Minero. (2012). Energía Geotérmica. 1-17.
- Siahaan, M., Soebandrio, A., & Wikantika, K. (2011). Geothermal Potential Exploration Using Remote Sensing Technique Case Study: Pathua Area West Java. *Asia Geospatial Forum*.
- Sobrino, J., Jiménez-Muñoz, J., Brockmann, C., Ruescas, A., Danne, O., North, P., Sòria, G. (2013). Land surface temperature retrieval from Sentinel 2 and 3 Missions. *Proceedings of the Sentinel-3 OLCI/SLSTR and MERIS/(A)ATSR Workshop 15–19 October 2012 Frascati, Italy*.
- Sobrino, J. A. (1990). Significance of the remotely sensed thermal infrared measurements obtained over a citrus orchard. *ISPRS Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 44(6), 343–354.
- Sobrino, J. A. (2000). *Teledetección*. Valencia: Servicio de Publicaciones, Universidad de Valencia.
- Sobrino, J. A. (2001). A comparative study of land surface emissivity retrieval from NOAA data. *Remote Sensing of Environment*, 75(2), 256–266.
- Sobrino, J. A. (2008). Land surface emissivity retrieval from different VNIR and TIR sensors. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 46(2), 316-327.
- Sobrino, J. A.-M. (2004). Land surface temperature retrieval from Landsat TM5. *Remote Sensing of Environment*, 90(4), 434–440.
- Srivastava, P. K. (2009). Surface temperature estimation in Singhbhum Shear Zone of India using Landsat-7 ETM+ thermal infrared data. *Advances in Space Research*, 43(10), 1563–1574.
- Torres, I., & Santoyo, E. (2010). La energía de nuestro planeta. En Centro de Investigación en Energía, *Energías Renovables. 25 años de la UNAM en Temixco* (págs. 103-118). México: UNAM.

- van der Meer, F., Hecker, C., van Ruitenbeek, F., van der Werff, H., de Wijkersloothb, C., & Wechsler, C. (2014). Geologic remote sensing for geothermal exploration: A review. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 33, 255–269.
- Vaughan , R., Keszthelyi, L., Lowenstern, J., Jaworowski, C., & Heasler, H. (2012). Use of ASTER and MODIS thermal infrared data to quantify heat flow and hydrothermal change at Yellowstone National Park. *J. Volcanol. Geotherm. Res*, 233, 72–89.
- Vaughan, R. G. (2005). Surface mineral mapping at Seamount Springs, Nevada, USA, with multi-wavelength thermal infrared images. *Remote Sensing of Environment*, 99(1-2), 140–158.
- Vaughan, R., Keszthelyi, L., Davies, A., Schneider, D., Jaworowski, C., & Heasler, H. (2010). Exploring the limits of identifying sub-pixel thermal features using ASTER TIR data. *J. Volcanol. Geotherm. Res*, 189(3-4), 225-237.
- Verma, P. (2000). Geochemical evidence for a lithospheric source for magmas from Los Hornos caldera, Puebla, Mexico. *Chemical Geology*(164), 35-60.
- Watson, F., Lockwood, R., Newman, W., Anderson, T., & Garrott, R. (2008). Development and comparison of Landsat radiometric and snowpack model inversion techniques for estimating geothermal heat flux. *Remote Sensing of Environment*, 112(2), 471–481.
- Weng, Q., Lu, D, & Schubring, J. (2004). Estimation of land surface temperature–vegetation abundance relationship for urban heat island studies. *Remote Sensing of Environment*, 89(4), 467–48.
- Zhang. (2006). Comparison of Different Global Information Sources Used in Surface Radiative Flux Calculation: Radiative Properties of the Surface. *Journal of Geophysical Research*, 111(D13).
- Zhou, Y. (1998). The application of thermal infrared remote sensing techniques in geothermal surveying. *Remote Sensing for Land & Resources*, 4, 24-28.