

Delimitación de zonas con potencial geotérmico aplicando técnicas de percepción remota que correlacionan las características físicas de temperatura de superficie terrestre y densidad del subsuelo: Caso de estudio Nayarit

Delimitation of areas with geothermal potential applying remote sensing techniques that correlate the physical characteristics of land surface temperature with subsoil density: Nayarit case study

Guillermo Isaac Nájera-Rocha*

Ernesto Caetano*

Verónica Totolhua-Ramírez*

Recibido: octubre 29 de 2021.

Aceptado: agosto 19 de 2022.

Resumen

En el contexto actual, donde los combustibles fósiles generan un grave problema ambiental, se han buscado nuevas fuentes de energía alternativa más amigables con el medio ambiente, entre ellas se encuentran la energía solar, eólica, de oleaje y geotérmica; esta última no depende de las condiciones climáticas ni del tiempo meteorológico de la región donde se aplique. En México, las condiciones geológicas del territorio favorecen la existencia de potencial geotérmico, lo cual lo ha destacado actualmente como el 4° país con mayor capacidad geotérmica-eléctrica instalada con 958 [MW]; se estima que el potencial total del país alcanza los 9,686 [MW] diferidos en 276 localidades de México. Un problema existente para la delimitación de estas localidades geotérmicas es que se requieren estudios muy puntuales y costosos que no cubren el potencial de una región; como consecuencia, en este trabajo se propone una técnica para conocer esta información con el uso de imágenes satelitales, a las cuales les serán aplicadas técnicas de percepción remota y análisis en sistemas de información geográfica para correlacionar características físicas de la Tierra, tales como la temperatura de superficie terrestre y la densidad del subsuelo mediante anomalías gravimétricas que sirven como indicadores de actividad geotérmica. La técnica propuesta funciona como una prospección inicial de muy bajo costo para futuros estudios de campo más detallados; además fue utilizada para delimitar tres zonas geotermiales en Nayarit, México.

Palabras clave: energía alternativa, imágenes satelitales, temperatura de superficie terrestre, anomalía gravimétrica, correlación.

Abstract

In the current context where fossil fuels generate a serious environmental problem, in recent decades new sources of alternative energy that are more environmental friendly have been sought, including solar, wind, wave and geothermal energy, the latter being the only one that does not depend on the climatic conditions or meteorological weather of the region where it is applied. In Mexico, the geological conditions of its territory favor the existence of geothermal potential, being currently the 4th country with the highest installed geothermal-electrical capacity with 985 MW, however, it is estimated that the country's total potential reaches 9,686 MW deferred in 276 locations in Mexico. An existing problem for the delimitation of these geothermal locations is that very specific and expensive studies are required that do not over the potential of a region, consequently, with this work a technique is proposed to know this information using satellite images and applying remote sensing techniques and analysis in geographic information systems to correlate physical characteristics of the Earth such as the land surface temperature and the density of the subsoil using gravimetric anomalies that serve as indicators of geothermal activity. This technique performs as a very low cost initial survey for more detailed field studies, and it was also used to delimit 3 geothermal zones in Nayarit, Mexico.

Keywords: alternative energy, satellite images, land surface temperature, gravimetric anomaly, correlation.

* Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Ingeniería, México. Correos electrónicos: isaac11najera@gmail.com, caetano@unam.mx, totolhua@gmail.com

Introducción

Los objetivos de este trabajo son proponer una metodología para mapear zonas con potencial geotérmico correlacionando características físicas de la superficie terrestre con estimativas de percepción remota, y demostrar la viabilidad de la información de libre acceso y el uso de análisis en sistemas de información geográficos para la exploración y delimitación de dichas zonas con potencial de generar energía a través del calor de la Tierra.

La geotermia, como indica su etimología, se refiere al calor producido debido a diversos procesos de la misma Tierra y que es transferido a niveles corticales superficiales. Dicho calor se genera a partir de la desintegración de isótopos radioactivos de elementos como el torio, uranio y potasio presentes en las rocas (Santoyo y Barragán-Reyes, 2010), y de los movimientos magmáticos convectivos profundos en los límites de la Tierra (astenosfera), así como el calor latente formado durante la cristalización del núcleo externo. Esta energía es irradiada en las erupciones freato-magmáticas hacia el exterior, la cual deja pruebas visibles en los volcanes, aguas termales, fumarolas y géiseres.

Por otro lado, la geofísica es una ciencia derivada de la geología. Estudia las propiedades físicas de la Tierra que comprenden aspectos como la composición interna del planeta y el estudio de los campos físicos terrestres. De manera consecuente, debido al contexto de génesis y efectos corticales, la geofísica se apoya de la geotermia para estudiar el calor existente en el interior del planeta para su posterior aprovechamiento como energía generadora de electricidad (Servicio Geológico Mexicano, 2017). Los usos adicionales de la geotermia van desde procesos industriales hasta los usos domésticos.

Un recurso geotérmico es la proporción del calor extraído del interior de la Tierra para ser aprovechado por el hombre en ámbitos técnicos y económicos; por lo tanto, el aprovechamiento de esta energía resulta de gran importancia para las sociedades modernas; sin embargo, la utilización de la geotermia se limita a áreas con condiciones geológicas favorables, y México es uno de los países con mayor potencial al ocupar el sexto lugar a nivel mundial (Richter, 2019).

A diferencia de otras energías renovables, la geotérmica es la que mejores resultados arroja, pues no está condicionada a cuestiones temporales ni climáticas ya que el calor interno de la Tierra es constante y no es afectado por el cambio climático en contraste con la energía solar y eólica (Goldstein *et al.*, 2011).

La inmensa cantidad de energía térmica producida continuamente en el interior de la Tierra y los largos períodos geológicos requeridos para su agotamiento vuelven a la geotermia una fuente alterna de energía renovable y prácticamente inagotable. A pesar de eso, actualmente solo una pequeña fracción de los recursos mundiales se explota para producir electricidad y algunas otras aplicaciones de calentamiento.

La geotermia es una fuente renovable para generar energía eléctrica; ha sido utilizada desde 1911 en el mundo, y en México inició en 1959 con la primera planta geotermoeléctrica localizada en Pathé, Hidalgo con una capacidad de 3.5 MW. En México, las condiciones geológicas de su territorio favorecen la existencia de potencial posicionándose actualmente como el 4° país con mayor capacidad geotérmica-eléctrica instalada con 958 MW (Hiriart, 2011) a través de la explotación de cuatro campos geotérmicos: Cerro Prieto, Baja California con 720 MW; Los Azufres, Michoacán con 195 MW; Los Humeros, Puebla con 40 MW; y Las Tres Vírgenes, Baja California con 10 MW; no obstante, se estima que el potencial total del país alcanza los 9,686 MW diferidos en 276 localidades de México.

Esta energía renovable es una de las que mayor sustentabilidad y madurez tecnológica tiene, lo cual es avalado por los largos períodos de explotación que han exhibido los campos geotérmicos sin afectar sus reservas energéticas, como Larderello en Italia con casi 100 años, los Géiseres en Estados Unidos cerca de 78 años y Cerro Prieto en México con aproximadamente 45 años (Santoyo y Barragán-Reyes, 2010).

La viabilidad de un proyecto de exploración y explotación geotérmico se define a partir de diversos indicadores preliminares de la presencia de un sistema geotermal identificado en el área, que como ya se mencionó, suelen ser aguas termales y fumarolas. De esta manera, la verificación de la existencia del recurso, o fase de exploración de un proyecto general, implica una serie de actividades que proporcionan progresivamente indicios de la calidad del recurso geotérmico (Ussher y Schwimmer, 2016).

El propósito de realizar una exploración geotérmica es definir el tamaño, forma y estructuras geológicas principales de una zona para determinar características como el tipo de fluido que contiene, su temperatura, composición química y su capacidad de producir energía. La exploración geotérmica se puede dividir en dos etapas: la exploración superficial y la exploración profunda. Dado que la perforación para obtener registros geofísicos de pozo para exploración profunda resulta muy cara, la exploración superficial es de vital importancia para la reducción de costos y riesgos; es aquí donde la geofísica es la más requerida al aplicar diferentes técnicas en la interpretación de las propiedades físicas de la Tierra y en la determinación de las condiciones del subsuelo (Molina, Honda, El-Qady y Ushijima, 2006). Asimismo, se requieren estudios complementarios tales como los geológicos, geoquímicos e hidrológicos.

Por otra parte, reconstruir el marco estructural en áreas geotermiales es fundamental para entender las relaciones entre la roca sello, el depósito y la circulación de los fluidos hidrotermales (Giordano *et al.*, 2012). Existe una estrecha relación entre las aperturas en las rocas como fallas y fracturas, pues actúan como canalizadores de las soluciones hidrotermales en su ascenso a la superficie (Valdés, 2015).

Es común que el mayor riesgo en un proyecto geotérmico se presente en la fase de exploración debido al conocimiento limitado que se tiene acerca del recurso; a pesar de ello, la incertidumbre disminuye de manera progresiva cuando se comienza con una revisión y análisis de los datos disponibles, de la exploración superficial y de la exploración en pozos. Por consiguiente, siempre será más favorable la aplicación de la mayor cantidad de técnicas de exploración acordes al presupuesto para garantizar los buenos resultados, por lo que la percepción remota en los inicios de la exploración tiene grandes beneficios en la parte de delimitación del área de estudio aunado al bajo costo con los que estos se realizan.

Percepción remota

Es una disciplina basada en ciencia y tecnología que permite desarrollar, capturar, procesar y analizar imágenes obtenidas desde sensores en el espacio, sensores aerotransportados y con sensores que capturan datos de mediciones *in situ* con el fin de identificar rasgos físicos de la Tierra (Centro de Investigaciones en Ciencias de Información Geoespacial, 2022).

La radiación electromagnética es la base para toda la percepción remota. Se refiere a la energía emitida en forma de onda por los objetos con una temperatura mayor al cero absoluto ($-273\text{ }^{\circ}\text{C}$) (Aguirre, 2002). El espectro electromagnético es el continuo de todos los tipos de radiación y está ordenado de acuerdo con su longitud de onda. Cada material con temperatura mayor al cero absoluto es capaz de emitir radiación electromagnética en diferentes rangos del espectro debido a las propiedades físicas intrínsecas; de este modo se han desarrollado sensores capaces de captar el rango de la radiación emitida por los materiales de la superficie terrestre de acuerdo con el objetivo; así se obtienen las imágenes espectrales.

A partir del procesamiento de imágenes espectrales, la percepción remota tiene amplias aplicaciones en diferentes disciplinas desde la ciencia hasta la vida cotidiana como en la agricultura, la astronomía y la medicina (Centro Nacional de Prevención de Desastres, 2022). Permite estudiar el modo en que están distribuidos los recursos naturales del planeta, los fenómenos meteorológicos y los fenómenos que ocurren en la superficie terrestre tales como la contaminación, desertificación y los asentamientos humanos (Lira, 2003).

En consecuencia, en México, instituciones como el Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), la Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO), el Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED), entre otros, emplean técnicas de percepción remota y uso de Sistemas de Información Geográfica (SIG) para adquirir diversos datos y estadísticas que les conciernen.

Landsat-8 es el último satélite lanzado al espacio por parte de la *National Aeronautics and Space Administration* (NASA) en función de las misiones Landsat que comenzaron a inicio de la década de los setenta. Con ayuda del satélite es posible la adquisición de datos para conocer los rasgos físicos de la superficie terrestre de forma remota y con una gran resolución espacial. Basta ingresar a la página de *United States Geological Survey* (USGS) para delimitar la zona de la que se requiere información y buscar una imagen que se ajuste a las necesidades de localización y de temporalidad para el estudio.

A bordo del satélite se tienen dos sensores (cuadro 1): el primero es el sensor *Operational Land Imager* (OLI), el cual incluye nueve bandas espectrales que abarcan el espectro visible pasando por los infrarrojos y el espectro de ondas cortas; el segundo sensor *Thermal Infrared Sensor* (TIRS) detecta espectros térmicos y se compone de dos bandas espectrales.

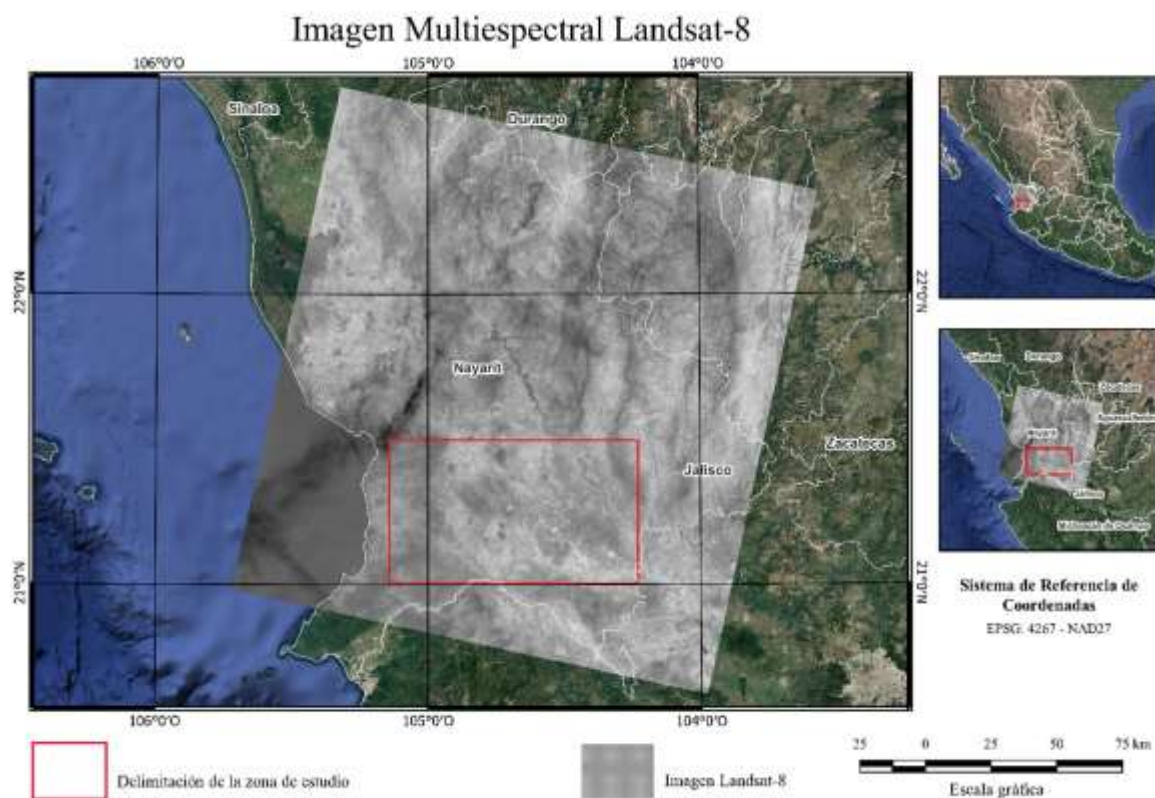
Cuadro 1. Características de las bandas espectrales de Landsat-8

Banda Landsat 8	Sensor	Longitud de onda [μm]	Resolución espacial [m]	Resolución radiométrica
1. Ultra azul	OLI	0.43 – 0.45	30	16 bits
2. Azul	OLI	0.45 – 0.51	30	16 bits
3. Verde	OLI	0.53 – 0.59	30	16 bits
4. Rojo	OLI	0.64 – 0.67	30	16 bits
5. Infrarrojo Cercano (NIR)	OLI	0.85 – 0.88	30	16 bits
6. Onda Corta Infrarroja (SWIR) 1	OLI	1.57 – 1.65	30	16 bits
7. Onda Corta Infrarroja (SWIR) 2	OLI	2.11 – 2.29	30	16 bits
8. Pancromática	OLI	0.52 – 0.90	15	16 bits
9. Cirrus	OLI	1.36 – 1.38	30	16 bits
10. Infrarrojo Térmico 1	TIRS	10.60 – 11.19	100	16 bits
11. Infrarrojo Térmico 2	TIRS	11.50 – 12.51	100	16 bits

Fuente: elaboración propia con base en información del USGS (2020a).

La radiación infrarroja es captada por los sensores de Landsat-8 como una representación de imágenes, las cuales proporcionan una buena sensibilidad a la temperatura (Buntebarth, 1994). El contraste de temperatura está relacionado a diferentes propiedades térmicas del suelo.

Figura 1. Imagen multiespectral correspondiente a la banda 10 del sensor TIRS, descargada el 20 de abril de 2020



Fuente: elaboración propia con fondo de satélite Google (junio 2020).

Ubicación de la zona de estudio

Se eligió un área del estado de Nayarit por la posibilidad de poder trabajar de manera simultánea tres subsecciones ya identificadas y catalogadas con potencial geotérmico (Hiriart, 2011), y debido a la proximidad entre ellas, las cuales coinciden dentro del área de una misma imagen Landsat-8. Estas tres subsecciones se describen a continuación:

Zona Geotérmica de Los Hervores-El Molote, Nayarit

Los Hervores-El Molote se localiza en la parte sureste del estado de Nayarit, a unos 15 km al occidente de la ciudad de Compostela y a 50 km al suroeste de Tepic. Sus coordenadas geográficas aproximadas son 21°15' en latitud norte y 105°00' en longitud oeste. La zona pertenece al extremo occidental de la Faja Volcánica Transmexicana (FVTM).

Zona geotérmica del Graben de Compostela, Nayarit

El Graben de Compostela se localiza en la parte sur del estado de Nayarit a unos 19 km al sureste de la ciudad de Compostela y a unos 5 km al sur del poblado de San Pedro Lagunillas. Sus coordenadas geográficas aproximadas son 21°09'46" en latitud norte y 104°43'18" en longitud oeste. Esta zona se encuentra en el extremo occidental de la FVTM, colindando al sur con la Provincia de la Sierra Madre del Sur y al occidente con la Provincia de la Sierra Madre Occidental (Hiriart, 2011).

Zona geotérmica del Volcán Ceboruco, Nayarit

La zona del Volcán Ceboruco se encuentra en la parte sureste del estado de Nayarit, aproximadamente a 20 km al noroeste de la población de Ixtlán del Río. Sus coordenadas geográficas aproximadas son de 21°06' y 21°18' en latitud norte y 104°28' y 104°35' en longitud oeste. Tiene una elevación que oscila entre los 1000 msnm en el valle, hasta 2200 msnm en la cima del volcán. Esta zona se encuentra en el extremo occidental de la FVTM, cerca del límite con la provincia de la Sierra Madre Occidental.

Geología y estudios geotérmicos preliminares

Zona Geotérmica de Los Hervores-El Molote, Nayarit

En el área afloran rocas metamórficas, sedimentarias, vulcanoclásticas, volcánicas e intrusivas donde las más antiguas son filitas de edad jurásica. En secuencia de edad sigue un cuerpo intrusivo clasificado como microgabro de edad del Cretácico inferior, al cual lo sobreyacen areniscas cretácicas y andesitas e ignimbritas del Oligoceno-Mioceno (Gastil y Krummenacher, 1977). También se encuentra un intrusivo granodiorítico emplazado hace 67 millones de años. Las andesitas son de volcanes El Molote, en cuyo cráter se observa una estructura cómica. Las rocas más jóvenes son las andesitas Mazatlán extruidas por los volcanes cuaternarios ubicados al sur de Mazatlán. Las estructuras tienen una orientación este-oeste predominantemente, mientras que los manantiales termales de El Molote están asociados a estructuras noreste-suroeste.

Se han identificado tres grupos de manantiales termales. El Molote, en la parte central, constituido por 14 manantiales distribuidos en una superficie de 3 km² con temperaturas superficiales entre 65°C y 91°C y aguas de composición variable de clorurado sódico a bicarbonatado sódico. El grupo de La Ínsula-Los Hervores al oeste del rancho El Molote presenta temperaturas superficiales aproximadamente de 28°C con agua de composición bicarbonatada sódica y contenido de boro de hasta 22 ppm. El grupo Agua Caliente Jamurca al sur y sureste del poblado de Las Varas tiene temperaturas superficiales de 49°C con aguas cloruradas sódicas. El yacimiento geotérmico inferido en la zona podría estar contenido en las rocas intrusivas granodioríticas y, probablemente, en las rocas vulcanoclásticas y sedimentarias.

Zona geotérmica del Graben de Compostela, Nayarit

Es una zona formada por domos de composición dacítica con edades entre 0.85 y 0.04 millones de años alineados en una dirección noroeste-sureste (Gutiérrez-Negrín, 1988). Los domos se asocian a flujos piroclásticos, pómez y ceniza, y probablemente a los manantiales termales de Las Cuevas. Se infiere que su formación es consecuencia de la presencia de cámaras magmáticas diferenciadas y relativamente someras, lo cual las vuelve una fuente de calor para un potencial yacimiento geotérmico.

Hay un consenso de que el graben sufre un proceso de apertura (*rifting*), lo que implica que se encuentra sujeto a esfuerzos distensivos. Los domos parecen haberse emplazado en una fractura regional de la misma dirección NW-SE. Este sistema parece que estará activo afectando a las rocas cuaternarias. Hay pocos manantiales termales cercanos a los domos y presentan temperaturas superficiales de 34°C y aguas de composición bicarbonatada sódica. El probable yacimiento geotérmico podría alojarse en rocas intrusivas (granitos) y/o sedimentarias (calizas), así como en rocas volcánicas (andesitas, dacitas y rocas piroclásticas) con una permeabilidad secundaria de media a alta.

Zona geotérmica del Volcán Ceboruco, Nayarit

Es un estratovolcán de composición que va de andesítica a riolítica cuya formación empezó en el Plioceno (Demant, 1981), y sus últimas erupciones de lavas andesíticas y riolíticas ocurrieron en 1875. El volcán se encuentra emplazado en el Graben de Tepic-Zacoalco de dirección noroeste-sureste de manera puntual en la porción conocida como Graben de Ahuacatlán-Jala. Se considera que el graben se encuentra en un proceso de apertura (*rifting*), por lo cual está sometido a esfuerzos distensionales. El volcán parece haberse emplazado en una fractura regional de misma dirección NW-SE. Aunque se considera un volcán activo, actualmente es muy poco probable una nueva erupción (Hiriart, 2011).

Las manifestaciones termales son fumarolas, suelos calientes y manantiales; sólo las dos primeras están asociadas directamente al volcán. Las fumarolas del volcán presentan temperaturas entre 82°C y 92°C. Los gases de las fumarolas del llamado cráter Cinco Bocas son típicos de sistemas geotérmicos de alta temperatura. Se estima que el probable yacimiento geotérmico estaría contenido en la secuencia de rocas andesíticas, basálticas, riolíticas y piroclásticas que constituyen el basamento de la Faja Volcánica Transmexicana y/o el límite suroriental de la Sierra Madre Occidental restringido en superficie a un área equivalente a la que ocupa de primera caldera de 3.5 km de diámetro.

La Comisión Federal de Electricidad (CFE) ha realizado estudios en tales zonas. Correspondientes a Los Hervores-El Molote se han llevado a cabo investigaciones geológicas y geoquímicas de detalle; sin embargo, no se han realizado levantamientos geofísicos. Con ayuda del método Volumétrico-Montecarlo del USGS (2020b) se estima un potencial en el campo de 36 MW. En el Graben de Compostela se han realizado campañas

exploratorias intensas con métodos eléctricos, magnéticos, gravimétricos, así como geológicos y geoquímicos y la perforación de pozos. Con el método Volumétrico-Montecarlo el campo presenta un potencial de 110 MW. En la zona del Volcán Ceboruco y sus alrededores se han realizado estudios geológicos y geofísicos a detalle, así como perforación de pozos. El campo presenta un potencial de 74 MW (Hiriart, 2011).

Fundamentos teóricos

Temperatura de superficie terrestre LST (Land Surface Temperature)

A partir de la ecuación de balance de la energía, donde la temperatura de la superficie terrestre representa la relación entre la energía emitida por la superficie y la recibida en el sensor satelital, si se asumiera que no existe la atmósfera, bastaría conocer el flujo emitido en el suelo para saber su temperatura, ya que la radiación emitida por un objeto es una función de su temperatura, esto de acuerdo con la Ley de Planck. No obstante, esta ley está definida para un emisor perfecto que se conoce como cuerpo negro (Fernández, 2018). Con respecto al problema real, donde no se tiene un cuerpo negro, se deben considerar los efectos de la atmósfera, así como la relación entre la emisividad de una superficie determinada y la que se produce en un cuerpo negro a la misma temperatura. Tomando estas consideraciones, se definen tres tipos de temperatura:

- Temperatura de brillo: es la existente en el techo de la atmósfera.
- Temperatura de brillo en la superficie: la temperatura obtenida tras corregir los efectos atmosféricos.
- Temperatura de superficie corregida de emisividad: la temperatura resultante tras aplicar la emisividad de cada cubierta. Es la variable física conocida como temperatura de superficie terrestre, *Land Surface Temperature (LST)*.

A continuación, se describen los pasos para obtener la temperatura de superficie. Este proceso es un algoritmo desarrollado para automatizar la obtención de LST utilizando específicamente imágenes satelitales de LANDSAT 8 (Avdan y Jovanovska, 2016). Todos los datos requeridos se pueden encontrar en el archivo de metadatos MTL que se descarga con las imágenes Landsat.

- a) Cálculo de TOA (*Top of Atmospheric*) o radiancia espectral

$$TOA = M_L * B_x + A_L \dots (\text{Ec. 1})$$

Donde:

M_L : factor de reescalamiento multiplicativo específico de banda.

RADIANCE_MULT_BAND_x (donde x es el número de banda, ya sea 10 o 11).

B_x : banda térmica.

A_L : factor de reescalamiento aditivo específico de banda.

RADIANCE_ADD_BAND_x (donde x es el número de banda, ya sea 10 o 11).

- b) Conversión de TOA a *Brightness Temperature* (Temperatura de Brillo)

$$BT = \frac{k_2}{\ln(\frac{k_1}{l_k} + 1)} \dots (\text{Ec. 2})$$

Donde:

K_1 y K_2 : constantes de conversión térmica específicas de la banda.

l_k : TOA o radiancia.

*Los resultados obtenidos se encuentran en grados Kelvin, por lo que basta restar 273.15 para obtener los valores en °C.

$$BT = \frac{k_2}{\ln(\frac{k_1}{l_k} + 1)} - 273.15 \dots (\text{Ec. 2.1})$$

- c) Cálculo del NDVI (Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada por sus siglas en inglés)

$$NDVI = \frac{(\text{Banda 5} - \text{Banda 4})}{(\text{Banda 5} + \text{Banda 4})} \dots (\text{Ec. 3})$$

- d) Cálculo de la proporción de vegetación P_v

$$P_v = \sqrt{\frac{(NDVI_i - NDVI_{\min})}{(NDVI_{\max} - NDVI_{\min})}} \dots (\text{Ec. 4})$$

Donde $NDVI_i$ es el valor de NDVI correspondiente a cada punto del ráster.

- e) Cálculo de la Emisividad ε [μm]

$$\varepsilon = 0.004 * P_v + 0.986 \dots (\text{Ec. 5})$$

Donde las constantes son valores de corrección.

- f) Cálculo de la Temperatura de Superficie Terrestre (LST)

$$LST = \left(\frac{BT}{1 + \frac{0.00115 * BT}{1.4388}} \right) * \ln(\varepsilon) \dots (\text{Ec. 6})$$

Gravimetría

Es un método basado en el campo natural de la gravedad que estudia la variación del componente vertical del campo gravitacional terrestre. Las pequeñas variaciones o anomalías de la gravedad se generan por las distintos componentes de la corteza terrestre donde la propiedad que se mide es la densidad de los materiales del subsuelo. Su fundamento físico y matemático yace en la Ley de la Gravitación Universal de Newton.

$$F = G \frac{m_1 m_2}{r^2} \dots \text{(Ec. 7)}$$

Donde F es la fuerza de atracción gravitacional, G la constante de gravitación, m_1 y m_2 dos cuerpos de masa y r^2 es el cuadrado de la distancia entre dichos cuerpos.

La aceleración o atracción gravitacional es la fuerza de gravitación que actúa sobre una unidad de masa y corresponde a la medición del campo gravitacional actuando en cualquier punto, de esta manera la ecuación 1 puede representarse de la siguiente forma:

$$g \rightarrow \frac{F}{m_2} = G \frac{m_1}{r^2} \dots \text{(Ec. 8)}$$

Es decir:

$$g = G \frac{m_1}{r^2} \dots \text{(Ec. 9)}$$

Si la ecuación 3 es tratada como un campo vectorial, la atracción gravitacional g observada en un punto del espacio P, debido a una masa con densidad ρ y que ocupa la región con volumen V, está dada por el gradiente del potencial gravitacional U, como lo desarrolló Nava (2010):

$$U(P) = \gamma \int_v \frac{\rho}{|\vec{r} - \vec{r}_0|} dV \dots \text{(Ec. 10)}$$

Es decir:

$$g(\vec{r}) = \nabla U \dots \text{(Ec. 11)}$$

$$g(\vec{r}) = - \gamma \int_v \frac{\vec{r} - \vec{r}_0}{|\vec{r} - \vec{r}_0|^3} dV \dots \text{(Ec. 12)}$$

Donde ρ es la densidad del cuerpo, $\vec{r}$ y $\vec{r}_0$ son los vectores de posición del elemento de volumen dV y del punto de observación P respectivamente, y γ es la constante de gravitación universal. En gravimetría se considera únicamente la componente vertical de g.

Si se tiene en cuenta únicamente la componente vertical de la atracción gravitacional en el punto P, de la ecuación 6 se obtiene:

$$g_z(\vec{r}) = \frac{\partial U}{\partial z} = \gamma \int_v \rho(x', y', z') \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{1}{|\vec{r} - \vec{r}'|} \right) dV \dots \text{(Ec. 13)}$$

Desarrollando la ecuación 7:

$$g_z = \gamma \int_{x'} \int_{y'} \int_{z'} \rho(x', y', z') \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{1}{\sqrt{(x-x')^2 + (y-y')^2 + (z-z')^2}} \right) dx' dy' dz' \dots \text{(Ec. 14)}$$

Obteniendo finalmente

$$g_z = -\gamma \int_{x'} \int_{y'} \int_{z'} \rho(x', y', z') \frac{(z-z')}{[(x-x')^2 + (y-y')^2 + (z-z')^2]^{3/2}} dx' dy' dz' \dots \text{(Ec. 15)}$$

En el Sistema Cegesimal de Unidades, la gravedad se mide en unidades de longitud sobre tiempo al cuadrado (cm/s^2) que equivale a un gal. Sin embargo, la aceleración gravitacional promedio es 980 cm/s^2 , equivalente a 980 gales, por lo que la unidad estándar en geofísica para la gravimetría es el miligal (mGal).

El método gravimétrico se basa en la medición en la superficie de pequeñas variaciones del campo gravitacional. Estas diferencias son causadas por cualquier alteración lateral en la distribución de las masas en el interior de la Tierra; por lo tanto, si el contexto geológico del subsuelo involucra rocas de diferente densidad, la irregularidad resultante en la distribución de masas generará un cambio correspondiente en la aceleración de la gravedad. Las variaciones medidas se interpretan en términos de probables distribuciones de masa en el subsuelo que son el cimiento para inferir las POSIBLES condiciones geológicas existentes (Nettleton, 1976).

Correcciones de gravedad

Estas correcciones sirven para que el valor de la gravedad esté libre de efectos no geológicos. Antes de poder interpretar los resultados de un estudio gravimétrico, es necesario corregir todas las variaciones en el campo gravitacional terrestre que no sean el resultado de las diferencias de la densidad en las rocas subyacentes. A este proceso se le conoce como reducción de la gravedad (LaFehr, 1991), donde se toma un nivel de referencia para la gravedad. El nivel de referencia aceptado en México es el geoide WGS84, el cual es consistente con el *International Reference Frame 1992* (ITRF92).

- Corrección por latitud. Se realiza debido a la variación de la aceleración de la gravedad que depende de la latitud, ya que, debido a la forma achatada de la Tierra, la aceleración gravitacional es mayor conforme se acerca a los polos y es menor en el ecuador. Además, también se ve afectada en una menor proporción por la fuerza centrífuga por el efecto de la rotación que disminuye en los polos y aumenta en el ecuador.

$$C_{lat} = 0.81 \sin^2 \lambda \Delta y \text{ [mgal]} \dots (\text{Ec. 16})$$

También se le conoce como corrección por gravedad normal:

$$g_n = 978031.846(1 + 5.3024 \times 10^{-3} \sin^2 \lambda - 5.8 \times 10^{-6} \sin^2 2\lambda) \text{ [mgal]} \dots (\text{Ec. 17})$$

Donde:

λ es la latitud de la estación base donde se realizó la medición.

Δy es la diferencia de latitudes entre la estación medida y la base, en radianes.

- Corrección atmosférica. Sustrahe la masa de la atmosfera incluida en g_n

$$C_{atm} = -0.874 + 9.9 \times 10^{-5} h - 3.56 \times 10^{-9} h^2 \text{ [mgal]} \dots (\text{Ec. 18})$$

Donde h es la elevación de la estación.

- Corrección por aire libre. Se refiere a las variaciones en g causadas por las diferencias de elevaciones. Se determina al derivar g.

$$C_{AL} = -0.3086 \Delta h \text{ [mgal]} \dots (\text{Ec. 19})$$

Donde Δh es la diferencia entre la altura de la base con la estación.

- Corrección de Bouguer. Compensa el exceso de masa localizado debajo de los puntos de observación con una diferencia de elevaciones. Se considera el efecto de un estrato infinito:

$$C_B = 2\pi G \rho h = 0.04192 \rho h \text{ [mgal]} \dots (\text{Ec. 20})$$

Donde ρ es la densidad del estrato, G es la constante gravitacional y h la elevación de la estación.

- Corrección por terreno o topografía

$$C_T = 2\pi G\rho [R_e - R_i + (R_i^2 + z^2)^{1/2} - (R_e^2 + z^2)^{1/2} \dots \text{(Ec. 21)}$$

Donde R_e es el radio externo y R_i el radio interno para el formato de corrección por terreno.

- Anomalía de aire libre

$$\Delta g_{AL} = g_{obs} - (g_n + C_{atm} + C_{lat} + C_{AL}) \dots \text{(Ec. 22)}$$

- Anomalía de Bouguer simple

$$\Delta g_{BS} = \Delta g_{AL} - C_B = g_{obs} - (g_n + C_{atm} + C_{lat} + C_{AL} + C_B) \dots \text{(Ec. 23)}$$

- Anomalía de Bouguer Completa. A la reducción de la gravedad observada al nivel de la estación base, la cual incluye todas las correcciones mencionadas anteriormente y al compararla con la gravedad teórica, es lo que comúnmente se conoce como Anomalía de Bouguer:

$$\Delta g_{BC} = \Delta g_{BS} - C_T = g_{obs} - (g_n - C_{atm} + C_{lat} + C_{AL} + C_B) + C_T \dots \text{(Ec. 24)}$$

Metodología

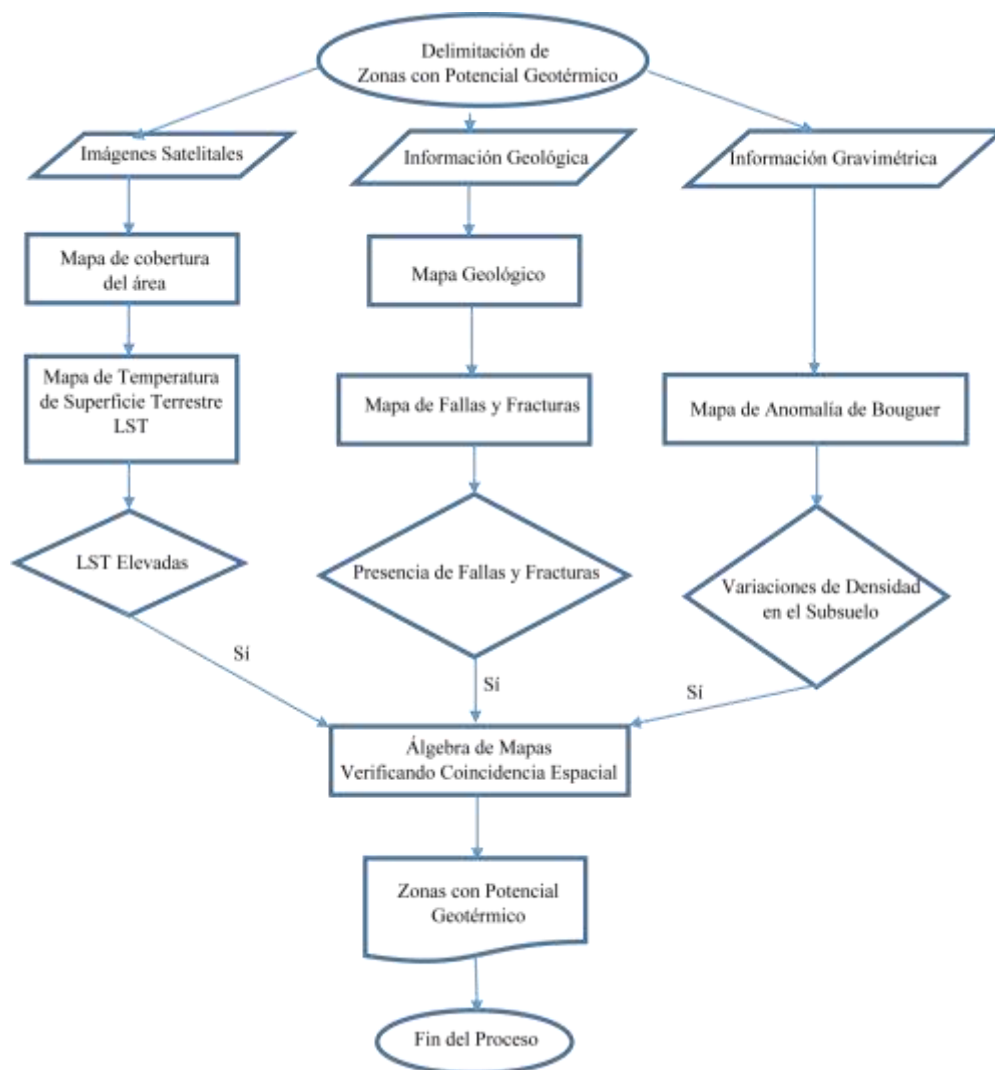
Se organizaron los siguientes pasos; primeramente, para el caso de estudio, las imágenes satelitales multiespectrales fueron descargadas de la plataforma del Servicio Geológico de Estados Unidos (USGS, 2020b), obtenidas por la misión Landsat-8 a las 11:23, horario de México, del 20 de abril de 2020, la cual fue elegida entre otras por cubrir completamente la zona, además por no estar afectada por la presencia de nubes (0% de nubosidad) que pudieran interferir en las mediciones de los sensores del satélite (figura 1).

Posteriormente, se obtuvo el mapa de LST, un mapa de fallas y fracturas geológicas y un mapa de anomalía de Bouguer; todo mediante software libre e información abierta. Por último, con ayuda del SIG se aplicó álgebra de mapas para localizar las zonas de interés que cumplen las condiciones descritas en la metodología propuesta por Lago y Rodríguez (2019) (cuadro 2). De manera independiente a estos pasos, se debe verificar que las resoluciones de los mapas generados sean iguales.

El sistema de información geográfico utilizado es el software QGIS versión 3.4.15. Se utilizó información de curvas de nivel para modelar el terreno con datos obtenidos del INEGI. La información geológica, tal como los mapas de fallas y fracturas, se obtuvieron de las cartas geológicas del Servicio Geológico Mexicano (SGM) Ixtlán F13-D42, Santa María del Oro F13-D32, Compostela F13-D41, Xalisco F13-D31, Las Varas F13-C49 y Jalcocotán F13-C39, de donde se georreferenciaron los datos con ayuda del SIG.

La información de litología se obtuvo del banco de datos del Servicio Geológico Mexicano como un archivo vectorial shapefile. El mapa de anomalía de Bouguer se obtuvo con el software GeoMapApp versión 3.6.10, el cual es un visualizador de información terrestre. Por último, el mapa de temperatura de superficie terrestre LST, se calculó a partir de las bandas espectrales de Landsat-8, usando un algoritmo en lenguaje Python.

Cuadro 2. Diagrama de flujo de trabajo



Fuente: elaboración propia con base en Lago y Rodríguez (2019).

Obtención de datos

Topografía del terreno

Para visualizar de mejor manera el terreno donde se llevó a cabo el estudio, se buscó información de topografía en los catálogos de información disponible del INEGI. Dicha información fue de curvas de nivel para el estado de Nayarit descargadas con escala de 1:20,000 en formato shape con las cuales se trabajaron para realizar un modelo digital de elevación (MDE) y así obtener un modelo de sombras (figura 2). También es posible visualizar de forma precisa la ubicación del sitio en estudio.

Figura 2. Modelo de elevación sombreado del área en estudio localizada en el estado de Nayarit, México, abarcando los municipios de San Blas, Xalisco, Compostela, Tepic, San Pedro Lagunillas, Ahuacatlán, Amatlán de Cañas, Ixtlán del Río, Santa María del Oro, La Yesca y Del Nayar

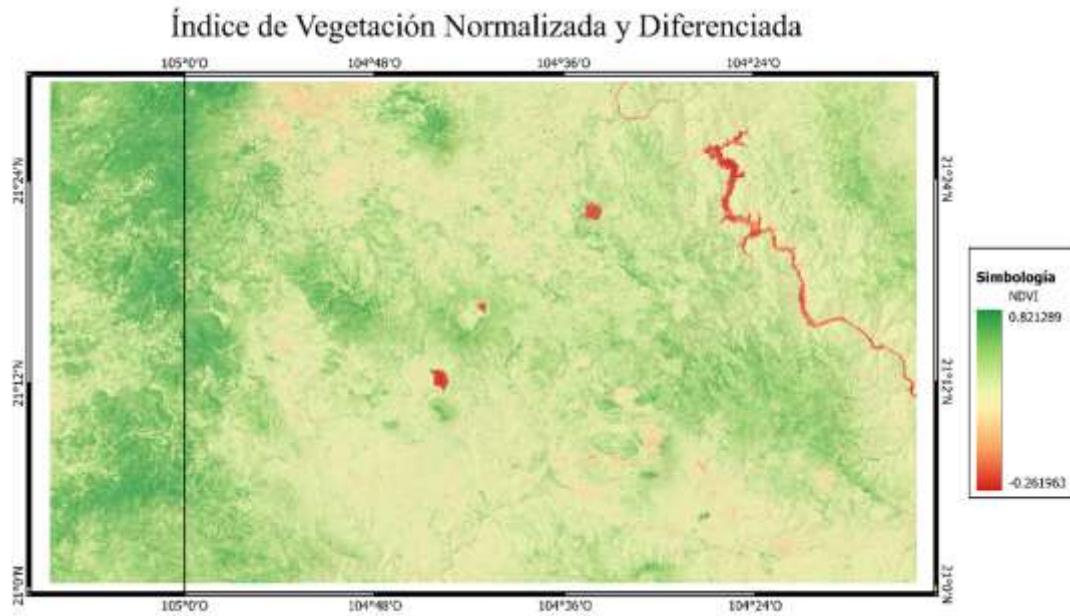


Fuente: elaboración propia con información topográfica de INEGI (2020).

Mapa de Índice de Vegetación Diferenciada y Normalizada (NDVI)

Como se muestra en el apartado acerca del cálculo de temperatura de superficie, es importante reconocer la presencia o porcentaje de vegetación. Así se generó un mapa de NDVI donde se logra apreciar la cantidad de vegetación en la zona, así como los cuerpos de agua (figura 3).

Figura 3. Mapa de NDVI en la zona de estudio. Los valores cercanos a 1, es decir, las tonalidades verdes, indican presencia de vegetación sana y en abundancia, mientras que en tonos amarillos y naranjas sugiere vegetación escasa o en mal estado. Los cuerpos en color rojo del mapa representan masas de agua



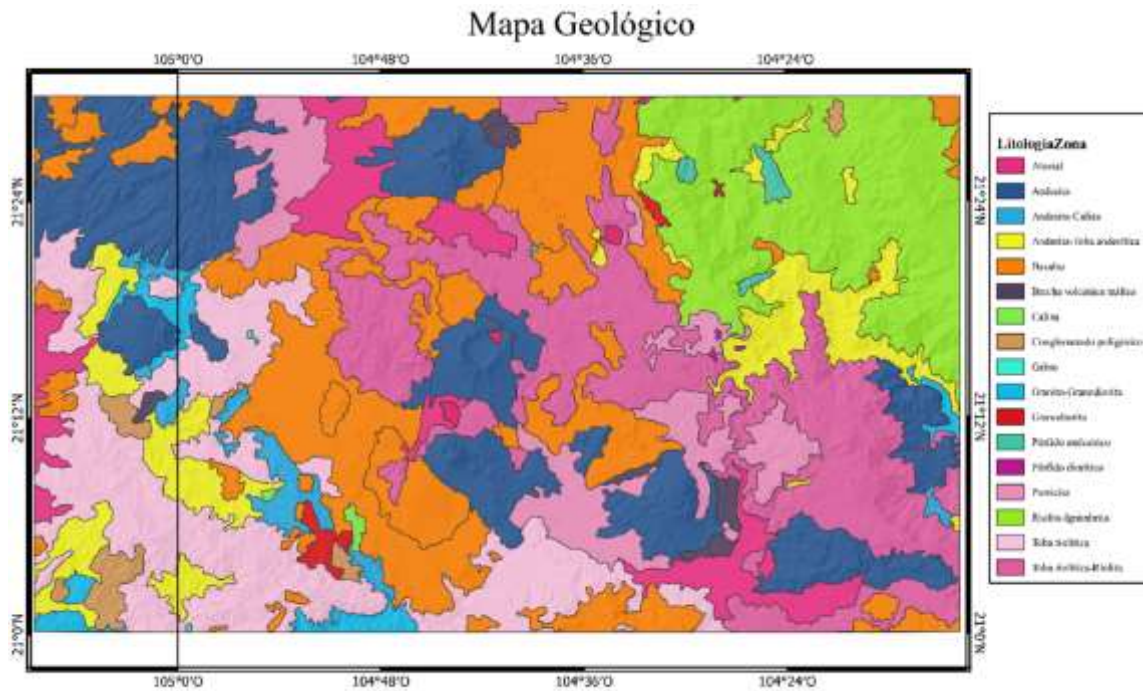
Fuente: elaboración propia.

El NDVI es un índice no dimensional; sus valores van de -1 a 1, y se encarga de medir la relación entre la energía absorbida y la emitida por los objetos terrestres; de igual manera, proporciona valores de intensidad del verdor en la zona y puede ser usado para inferir la condición de la vegetación presente y su vigor vegetativo. En la práctica, los valores por debajo de -0.1 corresponden a cuerpos de agua y nieve; los valores negativos cercanos a 0 sugieren presencia de rocas, arena y suelo desnudo mientras que los valores más altos son indicadores de mayor actividad fotosintética, es decir, mayor abundancia de vegetación (Heredia, Malmond, Castro y Tejada, 2016).

Información geológica

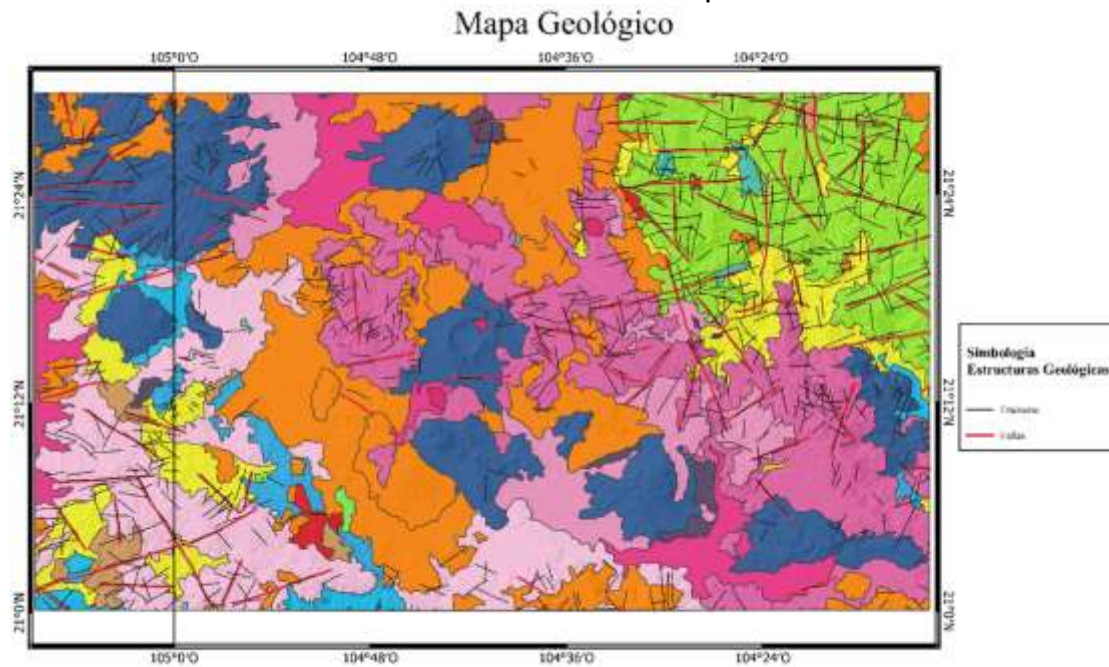
Se buscaron datos de geología para relacionar las zonas geotérmicas con sus manifestaciones en estructuras, tales como las fracturas y fallas en el suelo. Esta información fue obtenida de las cartas geológicas escala 1:50,000 del Servicio Geológico Mexicano, cuyas claves son Ixtlán F13-D42, Santa María del Oro F13-D32, Compostela F13-D41, Xalisco F13-D31, Las Varas F13-C49 y Jalcocotán F13-C39 (figura 4 y figura 5).

Figura 4. Mapa geológico de la zona de estudio modelado con información topográfica. Se muestra la distribución de la litología presente en el área de estudio. En dicha litología predominan las rocas ígneas de carácter extrusivo



Fuente: elaboración propia con datos del Servicio Geológico Mexicano (2020).

Figura 5. Mapa geológico con información estructural. Se muestra la presencia de los sistemas de fallas y fracturas en el área de estudio con una orientación relativamente predominante Este-Oeste

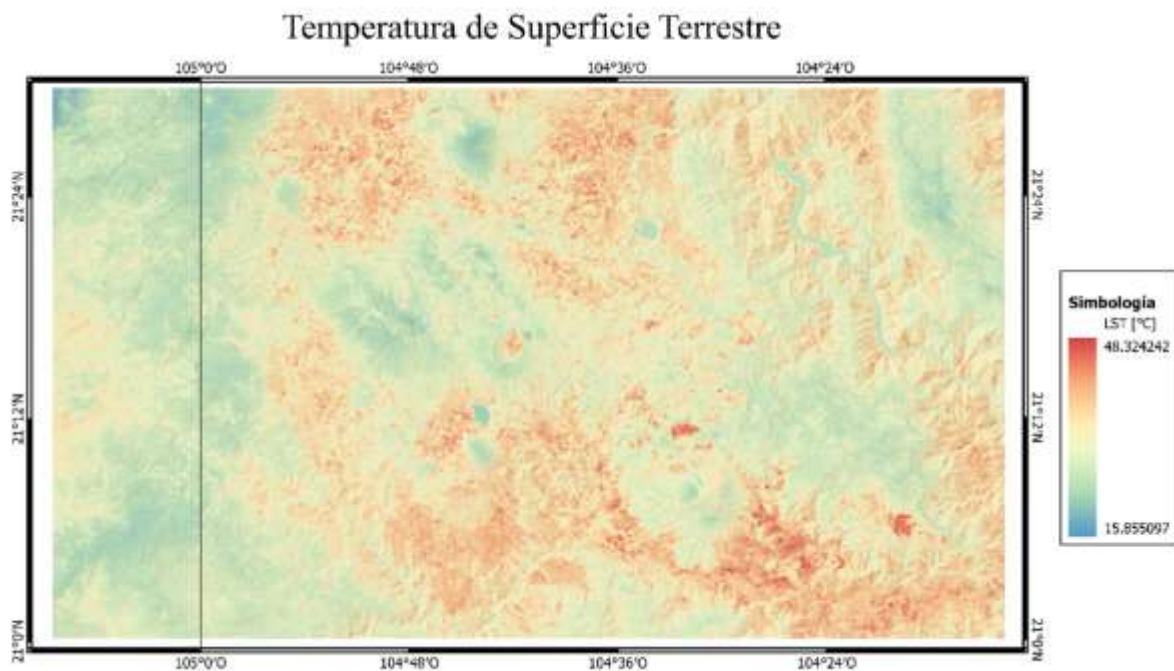


Fuente: elaboración propia con datos del Servicio Geológico Mexicano (2020).

Mapa de temperatura de superficie

Se calculó la temperatura de superficies terrestres del 20 de abril de 2020 a través de imágenes multiespectrales descargadas de Landsat-8 (figura 6). El cálculo operacional se realizó mediante un programa escrito en Python basado en el algoritmo de Avdan y Jovanovska (2016), esto para mantener el control del proceso de obtención de los diferentes parámetros implicados en el cálculo. La decisión de utilizar una sola fecha para validar la temperatura calculada fue que las imágenes Landsat-8 de los días adyacentes tenían un porcentaje de nubosidad que podía alterar los cálculos.

Figura 6. Se muestra la temperatura de superficie de la zona de estudio variando desde los 15°C y alcanzando los 48°C. La zonas con tonalidades rojas (alta LST) son las de interés



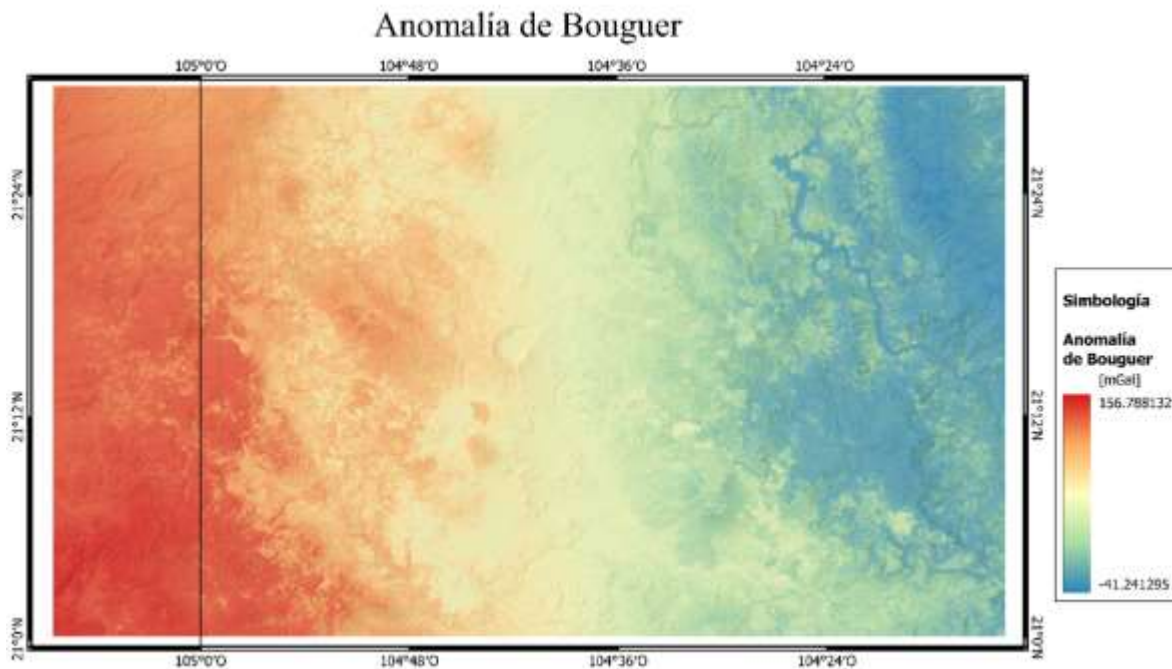
Fuente: elaboración propia.

Mapa de anomalía de Bouguer

El mapa de anomalía de Bouguer se obtuvo usando el software GeoMapApp de donde, utilizando la capa *WGM 2012 Bouguer Anomalies*, se obtuvo la capa de valores de anomalía, la cual representa de manera gráfica las zonas donde existe una variación del valor de aceleración gravitacional respecto al valor de referencia del geoide (figura 7). A esta capa se le aplicó la técnica de reducción de escala (*downscaling* estadístico) debido a que suele tener buenos resultados frente a problemas de diferencias de resolución espacial en cuestiones de climatología (Benestad, Hanssen-Bauer y Chen, 2008).

Se define como el proceso de relacionar el estado de alguna variable que representa un espacio grande y el estado de otra que representa un espacio mucho menor (Benestad *et al.*, 2008), o bien, el proceso de reprojectar de forma precisa la información disponible a gran escala sobre la regional (Von Storch, Zorita y Cubasch, 1993). Esto se debe a que el tamaño de píxel de la capa original descargada del software era aproximadamente de 3.5 km. El procedimiento se realiza tomando una variable de una resolución deseada, en este caso el mapa de temperatura de superficie de la figura 6, el cual tiene una resolución de 30 m, y mediante regresión lineal genera una nueva variable con su misma resolución, que es el mapa de la figura 7.

Figura 7. Se muestra un mapa con los valores de anomalía de Bouguer indicando en tonalidades azules deficiencias de masa, es decir, densidades del subsuelo bajas, y en tonalidades rojas excesos de masa que representan densidades del subsuelo altas



Fuente: elaboración propia con datos obtenidos del software GeoMapApp.

En este mapa se pueden identificar valores de anomalía de Bouguer altos hacia el lado este debido a la cercanía de la costa y, en consecuencia, presencia de corteza oceánica, pues esta tiene un valor promedio de $\rho = 3 \frac{g}{cm^3}$, mientras que hacia el lado oeste del mapa se aprecian valores menores de la anomalía debido a la presencia de la corteza continental con valor promedio de $\rho = 2.67 \frac{g}{cm^3}$. A pesar de ello, en la zona central podemos encontrar valores máximos locales que contrastan con los valores de densidad que los rodean. De esta manera, esos valores de densidad que representan una variación de la intensidad del campo gravitatorio (García, 1982), pueden ser interpretados como un indicador de fuente geotermal.

En primera instancia, y como se muestra en la figura 5, la anomalía puede referir estructuras geológicas como las fallas presentes en la zona. Por otra parte, los aumentos de densidad representados en la anomalía de Bouguer y dentro del contexto estructural y litológico, podrían inferir la presencia de cuerpos magmáticos que ayudan a explicar las altas temperaturas del suelo, como lo expusieron en Chan, Chang y Dao (2018) en su estudio geotérmico en el Norte de Taiwán.

Resultados y discusión

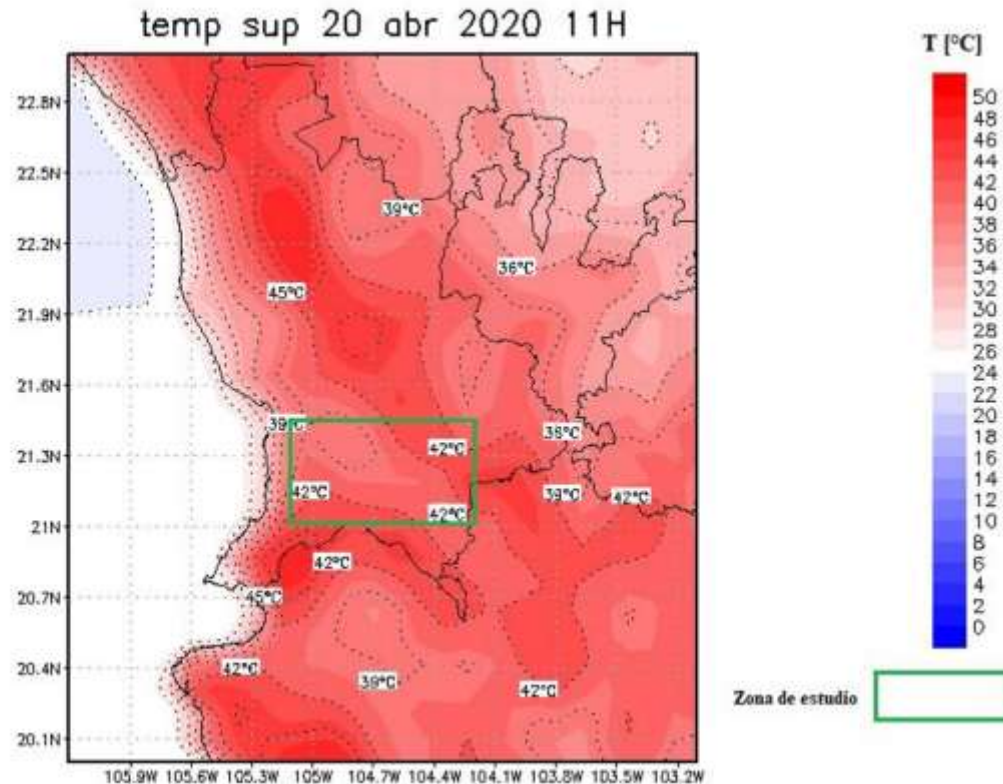
Es importante tener en cuenta que no se pueden asociar directamente los mapas de fallas y fracturas (figura 5) con el de temperatura de superficie (figura 6) para delimitar una zona con potencial geotérmico, pues existen otros factores a considerar. La presencia de estas estructuras geológicas ayuda a inferir la posible existencia de cuerpos magmáticos que, debido a su ascenso y distribución, generan actividad hidrotermal causante del fracturamiento y fallamiento de las rocas adyacentes como se muestra en la figura 5.

Otro elemento a considerar es el de las islas de calor que existe debido a la presencia de zonas urbanas e infraestructura en general; podría confundirse con manifestaciones termales del subsuelo debido a la alta temperatura que generan ya sean construcciones, viviendas o vías de comunicación terrestre. De esta forma, la anomalía de Bouguer se puede correlacionar para descartar zonas del subsuelo que están influenciadas por factores no geológicos.

Luego de considerar estos elementos, se obtuvo un mapa delimitando las zonas con potencial geotérmico donde se han llevado a cabo estudios por diferentes instancias gubernamentales (CFE), e institucionales como el Instituto de Geofísica de la UNAM, y que, empleando la metodología descrita, pueden ayudar a constatar la existencia de campos geotérmicos en la zona de estudio, como lo hicieron Lago y Rodríguez en 2019 en su estudio en la provincia de Ourense localizada en Galicia, España.

El cálculo de la temperatura de superficie luego de descartar amplias zonas urbanas en el área es otro indicador geotermal, pues en la figura 6 se aprecian temperaturas de hasta 50°C en la superficie. Dicha información obtenida de LST fue validada comparando con los datos proporcionados por la *National Oceanic and Atmospheric Administration* (2020) (NOAA) de temperatura en superficie para el día 20 de abril de 2020 a la misma hora de la imagen Landsat-8 que se usó; ésta se adquirió a las 11:23, hora local para horario de México.

Figura 8. Mapa de temperatura de superficie de la NOAA para las 11:00 horas del 20 de abril de 2020, generado por el sistema *North American Mesoscale Forecast System* (NAM)



Fuente: imagen proporcionada por la NOAA.

De la figura 8 se puede comprobar que los valores de temperatura de superficie calculados con el algoritmo de Jovanovska son consistentes con los de la NOAA a pesar de que estos últimos cuentan con una resolución de 12 x 12 km. El sistema NAM es uno de los principales modelos para pronóstico ambiental del *National Centers for Environmental Prediction's* (NCEP) y, como se puede observar, los valores de temperatura dominantes coinciden con los calculados en la figura 6, gracias a eso, fue favorable continuar con el análisis.

La dificultad para corroborar la información a escala local radicó en las pocas y muy separadas estaciones meteorológicas que se encuentran en los alrededores de la zona de estudio, por lo que una interpolación con la información que proporcionan para obtener un mapa de LST comparable con el generado con la metodología propuesta no parecía viable.

El mapa de anomalía de Bouguer indica el complejo contexto estructural de la zona y el probable exceso de masa que se presenta a nivel superficie, pues recordando la Ley de Gravitación Universal, un cuerpo con mayor masa genera una mayor fuerza de atracción; para este caso dicha fuerza es el valor de la gravedad. Esto se explica por la presencia de cuerpos de mayor densidad que los de sus alrededores.

Bien se puede notar en la figura 4 y figura 5 que la zona está predominantemente ocupada por rocas ígneas, y al existir manifestaciones hidrotermales como los géiseres y manantiales hidrotermales se infiere la existencia de una importante actividad magmática, además que las rocas han estado expuestas a fluidos calientes que modifican su estructura química favoreciendo la alteración de rocas y minerales; en consecuencia, su densidad varía en comparación con las rocas originales (Lagat, 2010). Estos cambios en la densidad son los que se registran con los levantamientos gravimétricos, tal como se muestra en la figura 7.

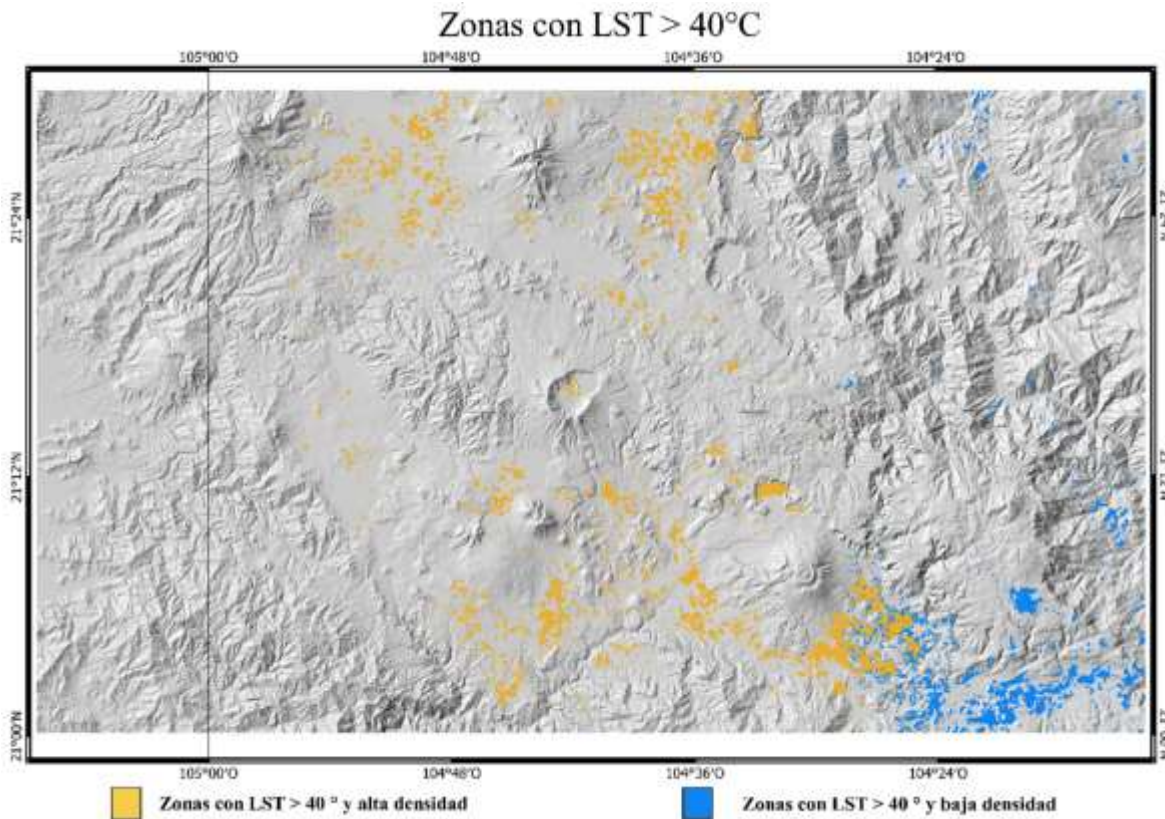
Se vuelve necesario mencionar que la falta de información a nivel local vuelve un tanto difícil la visualización, pues el área se encuentra muy cerca de la zona de subducción del Pacífico. A pesar de esto, en el mapa de anomalía de Bouguer es posible identificar valores máximos locales que infieren aumentos de densidad en determinadas áreas respecto al medio que los rodea, así como la presencia de estructuras geológicas que se pueden relacionar a actividad magmática (Chan *et al.*, 2018).

En la figura 5 se aprecia que la litología predominante es de rocas volcánicas, y que la mayor parte del área en estudio se encuentra influenciada por sistemas de fallas y fracturas, la cual es una característica requerida especificada en la metodología (cuadro 2); de ese modo se infiere la presencia de cuerpos magmáticos capaces de actuar como fuentes geotérmicas en el área, por ello la característica estructural quedó implícita en el análisis.

Con ayuda del SIG, se aplicó álgebra de mapas para identificar zonas con valores de interés tanto de LST como de anomalía de Bouguer que coinciden espacialmente. Dichos valores considerados son acordes a los factores anteriormente mencionados: altas temperaturas en la superficie y cambios de densidad en el subsuelo.

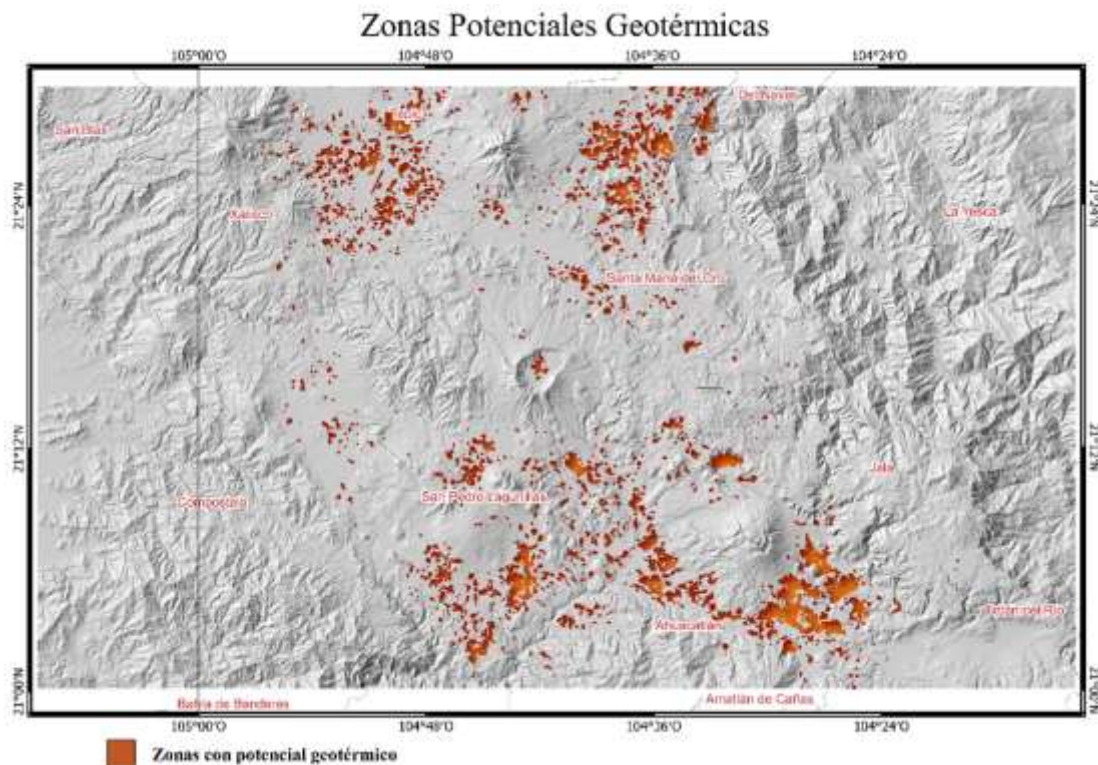
Posteriormente se separaron las zonas cuya LST fue igual o mayor a los 40 °C. De manera consecuente se hizo un análisis donde dichas zonas de LST elevada interactúan con apreciables variaciones de valores en la anomalía de Bouguer que sugieren cambios en la densidad del subsuelo relacionados a alteración hidrotermal (generadora de los valores de LST altas) en las rocas (figura 9).

Figura 9. Mapa de zonas con valores de LST igual o mayor a 40 °C. Se observa que las altas densidades se relacionan más con las altas temperaturas en comparación con las bajas densidades



Fuente: elaboración propia.

Por último, se ubicaron las zonas que cumplen todas las condiciones establecidas en el cuadro 2 para poder delimitar en qué áreas resulta favorable llevar a cabo una futura exploración en busca de potenciales geotérmicos. En la figura 10 se definen las zonas con indicadores geotérmicos pertenecientes a la región del Volcán Ceboruco en los municipios de Ahuacatlán, Jala, Ixtlán del Río y de Santa María del Oro, la región del Graben de Compostela perteneciente a los municipios de San Pedro Lagunillas y al de Compostela y a la región de Hervores-El Molote perteneciente a los municipios de Xalisco y de Tepic, todos pertenecientes al estado de Nayarit que conforman un área total de 149.865 km² con características y manifestaciones geotérmicas importantes.

Figura 10. Zonas que cumplen condiciones para inferir potencial geotérmico

Fuente: elaboración propia.

Conclusiones

Hoy en día las técnicas para exploración geotérmica son muy variadas y sin duda el trabajo de campo nunca podrá ser sustituido; sin embargo, el objetivo de este estudio es comprobar la eficiencia de la percepción remota en conjunto con el análisis de datos geoespaciales con el uso de un SIG para facilitar la etapa de exploración de un sitio. También es cierto que existen diferentes estudios en todo el mundo que utilizan el cálculo de LST para delimitar zonas con actividad geotermal, pero, como se demostró, la integración de información estructural y de anomalía de Bouguer permite añadir más criterios que justifican las altas temperaturas en la superficie terrestre dejando fuera aspectos no geológicos. El conocimiento y aprovechamiento de la energía geotérmica tiene más de un siglo siendo aplicado, por lo que los indicadores utilizados para su exploración están muy bien definidos.

También es importante mencionar y tener en cuenta que el manejo de todos los datos se dificulta cuando estos no son compatibles en formato unos con otros, pues si bien existe la información, la calidad y disponibilidad no siempre son las mejores. Mucha información que se encontró varía en sus actualizaciones, pues algunas son de hace casi 3 décadas que contrasta con otras de hace 5 años a pesar de que prácticamente son de zonas adyacentes.

La mayor parte de la información de estructuras geológicas se encontraba en formatos PDF y el trabajo de convertirla a un archivo compatible con el SIG fue uno de los mayores obstáculos que se encontraron al realizar este estudio, ya que al elaborar los procesos de georreferenciación de dicha información se requiere cuidar mucho la precisión. El mayor reto fue la información de gravimetría, pues para México en tal ámbito sólo existe una carta gravimétrica generada por el INEGI creada con una escala que cubre el país por completo a manera de representar la distribución de las densidades de masa del territorio, por lo que para realizar algún tipo de estudio local, no resulta viable su uso. En consecuencia, la información obtenida por el software GeoMapApp fue de gran utilidad en la cuestión de resolución espacial; resulta curioso que tal información no haya sido obtenida por ninguna institución nacional.

Como resultado de esta investigación, se busca recalcar que los estudios geofísicos, geológicos e, incluso, topográficos en un país como México deberían cobrar una mayor relevancia y encontrarse disponibles de mejor manera, pues, como se mostró, aún con ciertas limitaciones, los resultados fueron bastante favorables y muy provechosos con la posibilidad de tener mayores aplicaciones en los estudios relacionados a las ciencias de la Tierra.

Las técnicas de teledetección o percepción remota son algunas de las herramientas más útiles en el campo de las geociencias, las cuales, si son utilizadas de manera correcta y complementadas con técnicas geomáticas en sistemas de información geográfica, vuelven los procesos de exploración de la superficie terrestre bastante sencillos y de buena calidad. Esto permitió, de manera satisfactoria, comprobar la hipótesis planteada de correlacionar estructuras geológicas, como lo son las fallas y fracturas, con las variaciones de densidad y de temperatura de superficie terrestre para asociarlas a la actividad geotermal.

Por último, los objetivos de este trabajo se cumplieron plenamente teniendo cuidado al realizar cada proceso establecido en la metodología y comprobando que los resultados obtenidos fueran válidos. De esta forma, se busca incentivar la creación de los tipos de mapas a nivel nacional para tener mejores catálogos de información acerca de las energías limpias y renovables. El tema se vuelve cada vez de mayor importancia entre la comunidad científica internacional e incluso en las actuales cuestiones y decisiones políticas. Al tener disponible información, como la que se obtuvo, se facilita la planeación de nuevos proyectos sustentables con el fin de coadyuvar al desarrollo del país.

Referencias

- Aguirre, R. (2002). *Los mares mexicanos a través de la percepción remota*. Instituto de Geografía, Universidad Nacional Autónoma de México. Recuperado de: <http://www.publicaciones.igg.unam.mx/index.php/ig/catalog/book/57>
- Avdan, U. y Jovanovska, G. (2016). algorithm for automated mapping of land surface temperature using LANDSAT 8 Satellite Data. *Journal of Sensors*, 2016 (1480307), 1-4. Recuperado de: <https://www.hindawi.com/journals/js/2016/1480307/>
- Benestad, R., Hanssen-Bauer, I. y Chen, D. (2008). Empirical-Statistical Downscaling. *World Scientific Publishing Company*. 2008, 1-3. <https://doi.org/10.1142/6908>
- Buntebarth, G. (1994). *Geotermia, Introducción a los Aspectos Aplicados y Teóricos de la Conducción del Calor en la Tierra*. México: Grafos Editores
- Centro de Investigaciones en Ciencias de Información Geoespacial. (2022). *Percepción Remota*. Recuperado de: <https://www.centrogeo.org.mx/investigacion/percepcion-remota>
- Centro Nacional de Prevención de Desastres. (2022). *Tecnología Espacial y Percepción Remota en la Prevención de Desastres*. Recuperado de: [https://www.gob.mx/cenapred/articulos/tecnologia-espacial-y-percepcion-remota-en-la-prevencion-de-desastres#:~:text=La%20percepci%C3%B3n%20remota%20o%20teledetecci%C3%B3n,1987\)](https://www.gob.mx/cenapred/articulos/tecnologia-espacial-y-percepcion-remota-en-la-prevencion-de-desastres#:~:text=La%20percepci%C3%B3n%20remota%20o%20teledetecci%C3%B3n,1987)).
- Chan, H., Chang, C., y Dao, P. (2018). Geothermal anomaly mapping using landsat ETM+ Data in Ilan Plain, Northeastern Taiwan. *Pure and Applied Geophysics*. 175 (2018). 303-323. Recuperado de: <https://doi.org/10.1007/s00024-017-1690-z>
- Demant, A. (1981). Plio-Quaternary Volcanism of The Santa Rosa Area, Baja California, Mexico. *Geological Society of America. Cordilleran Section, Annual Meeting*, 295-305.
- Fernández S., A. (2018). *Cálculo de temperatura de superficie a partir de imágenes NOAA, Landsat y Sentinel-3*. RiuNet Repositorio UPV. 5-6. Recuperado de: <https://riunet.upv.es/handle/10251/103166?show=full>
- García A., J. (1982). *Estudio gravimétrico en la zona geotérmica de La Presita* (Tesis de Maestría). Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada. Baja California, México. Recuperado de: <http://cicese.repositorioinstitucional.mx/jspui/handle/1007/1418>
- Gastil, G., y Krummennacher, D. (1977). Reconnaissance Geology of Coastal Sonora between Puerto Lobos and Bahía Kino. *Geological Society of America Bulletin*. 88. (189-198).
- Giordano, G., Pinton, A., Cianfarra, P., Baez, W., Chiodi, A., Viramonte, J., Norini, G., Gropelli, G. (2012). Structural control on geothermal circulation in The Cerro Tuzgle-Tocomar geothermal volcanic area (Puna Plateau, Argentina). *Journal of Volcanology and Geothermal Research*. (249). 77-94. Recuperado de: <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2012.09.009>
- Goldstein, B.A., Hiriart L. B., G. Tester, J., Gutiérrez-Negrin, L. C., y Huenges, E. H. (2011). Great Expectations for Geothermal Energy to 2100. *Proceedings 36th Workshop on Geothermal Reservoir Engineering* (665), 1. Recuperado de: https://scholar.google.com/citations?view_op=view_citation&hl=es&user=EV0Va3EAAAAJ&citation_for_view=EV0Va3EAAAAJ:0EnyYjriUFMC
- Gutiérrez-Negrín, L. (1988). La Primavera, Jalisco, Mexico: Geothermal Field. *Transactions of the Geothermal Research Council*. 12, 161-165.
- Heredia, S., Malmond, A., Castro, C., y Tejada, S. (2016). *Índice de Vegetación NDVI, para la Visualización de la Dinámica Espacial de Áreas en Expansión*. Ponencias de las XI Jornadas IDERA. (140-141). República de Argentina.

- Hiriart L. B., G. (2011). *Evaluación de la energía geotérmica en México*. Informe para el Banco Internacional de Desarrollo y la Comisión Reguladora de Energía, 49-56, 89-92. México. Recuperado de: <https://www.cre.gob.mx/documento/2026.pdf>
- INEGI. (2020). *Catálogo de datos Ixtlán F13-D42, Santa María del Oro F13-D32, Compostela F13-D41, Xalisco F13-D31, Las Varas F13-C49 y Jalcocotán F13-C39*. Instituto Nacional de Estadística y Geografía Recuperado de: <https://www.inegi.org.mx/temas>
- LaFehr, T.R. (1991). *Standardization in Gravity Reduction*. Geophysics. Society of Exploration Geophysicists.
- Lagat, J. (2010). Hydrothermal alteration mineralogy in geothermal fields with case examples from Olkaria Domes Geothermal Field, Kenya. *Short Course on Exploration for Geothermal Resources*. 2-3. Recuperado de: <http://hdl.handle.net/10802/13871>
- Lago, D., y Rodríguez, P. (2019). Detection of Geothermal Potential Zones Using Remote Sensing Techniques. *Remote Sensing*. 11 (20: 2403), 2-8. Recuperado de: <https://doi.org/10.3390/rs11202403>
- Lira, J. (2003). *La percepción remota: nuestros ojos desde el espacio*. México: Fondo de Cultura Económica.
- Molina, A. III., Honda, M., El-Qady, Gad., Ushijima, Keisuke. (2006). Exploration of Geothermal Reservoir of Cerritos Colorados, Jalisco, México, Using 1D and 2D Inversión of Resistivity Data. *Geotermia*. 19 (1), 3. Recuperado de: <https://biblat.unam.mx/es/revista/geotermia/articulo/exploration-of-the-geothermal-reservoir-of-cerritos-colorados-jal-mexico-using-1-d-and-2-d-inversion-of-resistivity-data>
- National Oceanic and Atmospheric Administration, (2020). *North America Mesoscale Forecast System*. Recuperado de: <https://www.ncei.noaa.gov/products/weather-climate-models/north-american-mesoscale>
- Nava, M. (2010). *Modelado por Métodos Potenciales de Estructuras Salinas Inferidas por Sismología de Reflexión*. (Tesis de Maestría). Universidad Nacional Autónoma de México, México. Recuperado de: <https://repositorio.unam.mx/contenidos/102221>
- Nettleton, L.L. (1976). *Gravity and Magnetism in Oil Prospecting*. New York, United States: McGraw-Hill.
- Richter, A. (2019). *The Top 10 Geothermal Countries 2019 – based on installed generation capacity (MWe)*. Think Geoenergy. Recuperado de: <https://www.thinkgeoenergy.com/the-top-10-geothermal-countries-2019-based-on-installed-generation-capacity-mwe/>
- Santoyo, E y Barragán-Reyes R. (2010). Energía geotérmica. *Ciencia – Academia Mexicana de Ciencias*. 61 (2), 40-51. Recuperado de: <https://biblat.unam.mx/es/revista/ciencia-academia-mexicana-de-ciencias/articulo/energia-geotermica>
- Servicio Geológico Mexicano. (2020). *Cartas Geológicas Ixtlán F13-D42, Santa María del Oro F13-D32, Compostela F13-D41, Xalisco F13-D31, Las Varas F13-C49 y Jalcocotán F13-C39*. Banco de datos. Recuperado de: <https://www.sgm.gob.mx/CartasDisponibles/>
- Servicio Geológico Mexicano (2017). *¿Qué es la geofísica?* Museo virtual. Recuperado de: <https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/157796/Que-es-la-Geofisica.pdf>
- USGS (2020a). *What are the band designations for the Landsat satellites?* United States Geological Survey. USGS science for a changing world. Recuperado de: https://www.usgs.gov/faqs/what-are-band-designations-landsat-satellites?qt-news_science_products=0#qt-news_science_products
- USGS (2020b). *Earth Explorer*. United States Geological Service, USGS science for a changing world. Recuperado de: <https://earthexplorer.usgs.gov/>
- Ussher, G., y Schwimmer, A. (2016). Reduciendo el riesgo geotermal y los tiempos de ejecución para una campaña de exploración. *Geotermia-Revista Mexicana de Geoenergía*. 29 (1), 6-8. Recuperado de: <https://www.geotermia.org.mx/app/assets/media/2017/11/Geotermia-Vol29-1.pdf>

- Valdés, B. (2015). *Identificación de lineamientos minerales asociados a alteraciones hidrotermales en la Bahía de La Paz, Baja California Sur, México, mediante imágenes satelitales Landsat ETM* (Tesis de Licenciatura). Universidad Nacional Autónoma de México, México. Recuperado de: <http://132.248.52.100:8080/xmlui/handle/132.248.52.100/6838>
- Von Storch, H., Zorita, E., y Cubasch, U. (1993). Downscaling of global climate change estimates to regional scales: an application to Iberian Rainfall in Wintertime. *Journal of Climate*. 6().[https://doi.org/10.1175/1520-0442\(1993\)006%3C1161:DOGCCE%3E2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(1993)006%3C1161:DOGCCE%3E2.0.CO;2)