

Mapeo de alteraciones hidrotermales mediante el uso de combinaciones de banda de imágenes satelitales con fines de prospección geotérmica en la zona norte del estado de Chihuahua, México

Lizbet Lucero Mata Toledo

Universidad Autónoma de Ciudad Juárez

Marianggy Del Carmen Gómez Ávila*

Universidad Autónoma de Ciudad Juárez

 0000-0003-1211-8666

Efraín Gómez Arias

CONAHCYT-División de Ciencias de la Tierra, Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de

Ensenada, Baja California

 0000-0002-3707-384X

Sergio Alvarado Soto

Universidad Autónoma de Ciudad Juárez

 0000-0003-0857-9291

Manuel Alejandro Lira Martínez

Universidad Autónoma de Ciudad Juárez

 0000-0002-9554-3192

Eli Rafael Pérez Ruiz

Universidad Autónoma de Ciudad Juárez

 0000-0003-4954-0238

Recibido: 4 de diciembre de 2024 | *Aceptado:* 12 de diciembre de 2024 | *Publicado en línea:* 14 de diciembre de 2024 |

Resumen: En el estado de Chihuahua diferentes autores han reportado alrededor de 53 manifestaciones hidrotermales, por esta razón se presume que dicho estado tenga potencial geoenergético de mediana a baja entalpía, la cual pudiera utilizarse para distintos usos directos. El objetivo general de este trabajo fue mapear zonas de alteración hidrotermal en el norte del estado de Chihuahua, con la finalidad de determinar zonas de alteración hidrotermal que puedan contribuir a la etapa de prospección geotérmica. Se siguió una metodología utilizando Percepción Remota y SIG para corregir

imágenes multiespectrales del satélite Landsat 7 (ETM) y Landsat 8 (OLI) y con éstas localizar zonas con presencia de minerales de alteración hidrotermal. Se utilizó estadística de bandas realizando variaciones y cálculo de Factor de Índice Óptimo (OIF) para determinar las combinaciones de banda a utilizar. Los resultados obtenidos muestran que el uso de la exploración geológica digital y el uso de SIG para identificar alteraciones de tipo hidrotermal son una herramienta útil que puede ayudar a lograr una reducción en el costo de inversión en la etapa temprana de un proyecto geotérmico, que es la exploración geotérmica. En el área de estudio se muestran cuatro zonas, en las cuales se observan diferentes tipos de alteraciones hidrotermales: la zona A que se encuentra en el noroeste del área de estudio fue identificada con presencia de alteración hidrotermal cuarzo-sericitica, la zona B al noreste se definió con presencia de alteración argílica, la zona C al suroeste se define con alteración argílica avanzada y la zona D al sureste con alteración argílica intermedia a argílica avanzada; por lo tanto, se presume que el oeste del área de estudio cuenta con un mayor potencial para exploración y prospección geotérmica debido a sus características geológicas, tectónicas y geoquímicas.

Cómo citar:

Mata Toledo, L.L., Gómez Ávila, M. del C., Gómez Arias, E., Alvarado Soto, S., Lira Martínez, M.A. y Pérez Ruiz, E.R. (2024). Mapeo de alteraciones hidrotermales mediante el uso de combinaciones de banda de imágenes satelitales con fines de prospección geotérmica en la zona norte del estado de Chihuahua, México. *Revista Multidisciplinaria de Ciencia Básica, Humanidades, Arte y Educación*, 2(9), 111-120. DOI 10.5281/zenodo.14478737 [[.RIS](#)]

© Licencia Creative Commons Atribución-NoComercial-SinDerivadas 4.0 Internacional.

Palabras clave: SIG; OIF; geotermia; alteración hidrotermal; prospección geotérmica.

Title: *Mapping of hydrothermal alterations using satellite image band combinations for geothermal prospecting purposes in the northern area of the state of Chihuahua, Mexico.*

Abstract: In the state of Chihuahua, different authors have reported about 53 hydrothermal manifestations; for this reason, it is presumed that this state has geoenvironmental potential of the medium to low enthalpy, which could be used for different direct uses of the geothermal resource. The general objective of this work is to map hydrothermal alteration zones in the north of the state of Chihuahua to determine hydrothermal alteration zones that can contribute to geothermal prospecting. A methodology was followed using Remote Sensing and GIS to correct multispectral images from Landsat 7 (ETM) and Landsat 8 (OLI) satellites to locate areas with the presence of hydrothermal alteration minerals. Band statistics, variations, and calculation of Optimum Index Factor (OIF) were used to determine the band combinations to be used. The results show that the use of digital geological exploration and the use of GIS to identify hydrothermal alterations is a useful tool that reduces investments in the initial stages of geothermal exploration. Four zones are shown in the study area, in which different types of hydrothermal alterations are observed: zone A, which is located in the NW of the study area, was identified with the presence of quartz-sericitic hydrothermal alteration, zone B to the NE was defined with the presence of argillic alteration, zone C to the SW is defined with advanced argillic alteration and zone D to the SE with intermediate to advanced argillic alteration; therefore, it is presumed that the west of the study area has a more significant (greater) potential for geothermal exploration and prospecting due to its geological, tectonic and geochemical characteristics.

Keywords: GIS; OIF; geothermal energy; hydrothermal alteration; geothermal prospecting.

Introducción

La energía geotérmica proviene del calor que se emana desde el núcleo de la Tierra, que fluye a través del manto y es transferido hasta la corteza; en la actualidad se cuenta con técnicas geoquímicas, geológicas y geofísicas para la exploración, localización, explotación y usos de estas fuentes de energía renovable como lo es la geotermia; una de las técnicas que más llaman la atención es la utilización de Teledetección y Sistemas de

Información Geográfica (SIG); esta tecnología emplea la visión infrarroja para la detección de fuentes de calor desde satélites espaciales. Se considera que estos métodos de exploración son muy útiles para la prospección de campos geotérmicos o de zonas mineralizadas asociadas a procesos de alteración de tipo hidrotermal, ya que permiten identificar las alteraciones hidrotermales presentes en una determinada área de estudio, las cuales a su vez, suelen estar asociadas a anomalías geotérmicas o mineralizadas, aportando zonas de exploración de campo, que permitan corroborar su existencia y continuidad en la zona delimitada (Peláez Zapata, 2017).

En los últimos años se han realizado diversas estimaciones del flujo de calor a lo largo de la República Mexicana, con el objetivo de localizar zonas anómalas o que cuenten con la posibilidad de realizar la explotación del recurso geotérmico. La generación de electricidad en México por medio de recursos geotérmicos inició alrededor de 1959 en Pathé, Hidalgo, que actualmente es un campo que ya no opera. Hoy en día, están en operación cinco plantas geotérmicas: Cerro Prieto en Baja California, Los Azufres en Michoacán, Los Hornos en Puebla, Las Tres Vírgenes en Baja California Sur y Domo San Pedro en Nayarit (Romo-Jones *et al.*, 2020).

Para el año 2018 se contaba con un 21% de generación de energía limpia (que incluían hidroeléctrica, solar, biomasa y eólica) donde la energía geotérmica proveía cerca de 2% del total. Por lo tanto, se esperaba que con los proyectos futuros se llegará a las metas del 2024 y 2050 que correspondían a un 35 y 50% respectivamente. Sin embargo, el panorama general ha cambiado por completo estos últimos años, por un lado, la exploración en nuevas zonas se encuentra detenida debido a la falta de inversión, lo que ha limitado el desarrollo de nuevos campos geotérmicos (Prol-Ledezma, 2020).

Los yacimientos geotérmicos de alta, mediana o baja entalpía se encuentran generalmente en áreas de vulcanismo reciente, por lo tanto, es importante realizar un mapeo de alteraciones termales localizadas dentro y en zonas cercanas a estas áreas. La alteración hidrotermal es un término general que incluye la respuesta mineralógica, textural y química de las rocas debido a un cambio ocasionado por la presencia de agua caliente, vapor o gas, temperatura y presión. En un yacimiento geotérmico, este cambio se debe a la interacción de la paragénesis mineral con el fluido hidrotermal. Identificando estos minerales se analizan las diferentes condiciones fisicoquímicas del fluido a distintas profundidades, temperatura y pH (MaksaeV, 2001).

Romo (2016) realizó una descripción de alteraciones hidrotermales en la región geotérmica Los Volcanes, Baja California Sur y mediante análisis geoquímico y microtermométrico encontró temperaturas de homogenización y salinidades correspondientes a un posible sistema geotérmico. El mapeo y estudios de alteración hidrotermal permiten realizar observaciones clasificando las rocas alteradas en grupos. Meyer y Hemley (1967) clasificaron las alteraciones hidrotermales en una tabla de acuerdo con su temperatura y pH (Tabla 1), con base en esta clasificación crearon un esquema de distribución de alteraciones hidrotermales relacionadas con la formación de minerales.

La Comisión Reguladora de Energía (CRE) mediante un informe realizado por Le Bert *et al.* en 2011 realizó estudios en los manantiales de la zona de Maguarichic y San Antonio del Bravo, localizadas en el estado de Chihuahua, con el fin de establecer las características geoquímicas del acuífero somero y su interacción con fluidos geotérmicos. Sus resultados indican que las aguas de los manantiales son del tipo sulfatado-sódico y describen que los manantiales más calientes se encuentran en la zona de equilibrio parcial, mientras que los de menor temperatura se desplazan hacia la región de aguas someras (Elizalde, 2018). Por su parte, Reiter y Clarkson (1984) afirmaron que los patrones de flujo de calor a través del sur de las Montañas Rocosas tienen una gran relación con la actividad tectónica, volcánica e isothermas elevadas asociadas con la corteza adelgazada a lo largo del Río Grande.

Entre las aplicaciones del cálculo de temperatura superficial terrestre (LST) mediante imágenes de satélite se encuentra la estimación de anomalías térmicas como manifestación de energía geotérmica (Romaguera *et al.*, 2018). La corteza en la región sur del Rift del Río Grande contiene datos de flujo de calor que sugieren un engrosamiento de la corteza posiblemente por intrusión en la corteza inferior, un proceso que no está directamente relacionado con la extensión (Keller *et al.*, 1990). Con las investigaciones realizadas en la extensión norte del Rift, en la Caldera Volcánica Valles, en Nuevo México se alberga un proyecto de planta de energía geotérmica conocido como Campo Geotérmico Baca (White *et al.*, 1984; Goff *et al.*, 1981), además de la existencia de dos aparatos con actividad volcánica reciente cercanos al área (Aranda-Gómez *et al.*, 2005). En la tabla 1 se muestran los tipos de alteraciones hidrotermales en función de los minerales principales, de la temperatura del fluido que forma la alteración hidrotermal y en función del pH de dicho fluido.

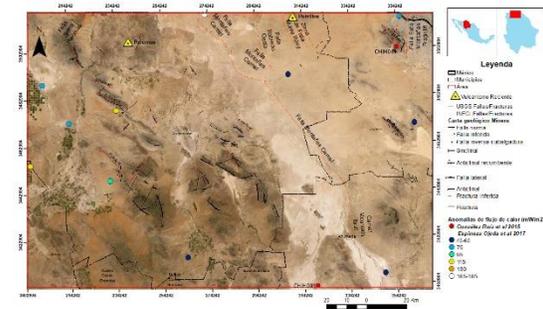
Tabla 1. Clasificación de alteraciones hidrotermales. Modificado de Meyer y Hemley (1967), Romo (2016), Camprubí *et al.*, (2003).

Alteración	pH	Temperatura del Fluido	Minerales característicos
Propilitica	Neutro a Alcalino	200-350°C	Epidota, Clorita, Albita, Calcita, Pirita
Filica o cuarzo-sericita	Alcalino a Ácido	> 350 °C	Cuarzo, Sericita, Pirita, Clorita y en ocasiones Anhidrita
Potásica	Neutro a Alcalino	> 350°C	Biotita y Feldespato potásico
Argílica intermedia	Neutro	<250 °C	Montmorillonita, Esméctica o Arcillas
Argílica avanzada	Ácido	> 350°C	Dickita, Caolinita, Pirofilita, Diásporo, Alunita y Cuarzo

Área de estudio

La zona de estudio (Fig. 1) comprende un área de alrededor de 20,735 km², localizada en el estado de Chihuahua, colindando con el sur de Nuevo México. Comprende los municipios de Juárez, Ascensión Buenaventura, Nuevo Casas Grandes, Ahumada y Janos.

Fig. 1. Mapa de ubicación del área de estudio. Las anomalías geotérmicas y las mediciones de flujo de calor fueron tomadas de González-Ruiz *et al.*, 2015; Espinoza Ojeda *et al.*, 2017. La información de las estructuras geológicas pertenece al SGM y al USGS.



Geología local

La zona de estudio se encuentra localizada cubriendo dos subprovincias fisiográficas: Llanuras y Médanos del Norte y, Sierras plegadas del Norte. Su geología se caracteriza por aluviones, rocas calizas y volcánicas ácidas que conforman las sierras (Fig. 2) producto del levantamiento de bloques tectónicos y bolsones en las depresiones estructurales, así como, rocas basálticas que

se localizan en los Médanos de Samalayuca en el municipio de Juárez y en el centro del municipio de Ascensión (INEGI, 2003). En el municipio de Juárez abundan las llanuras desérticas con basamento rocoso y en Samalayuca con fase salina, al igual que llanuras aluviales con fase salina. Cuenta con un depósito de rocas carbonatadas del Cretácico Inferior que fueron sustituidas por el depósito de terrígenos derivados de los terrenos volcánicos emergidos del oeste. El continuo levantamiento regional produjo el movimiento de las líneas de costa hacia el oriente, de manera que el territorio estatal emergió totalmente a finales de este período. La erosión de las sierras se acumuló en los abanicos aluviales que han rellenado los bolsones a través del tiempo (López Ramos, 1979).

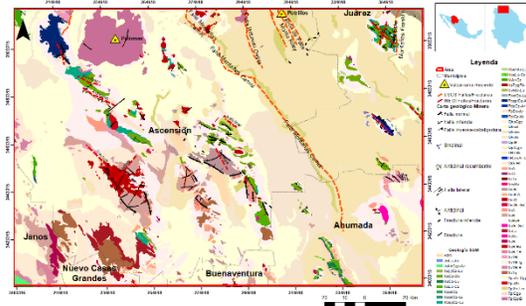
Maar Potrillo

El Maar Potrillo se encuentra en la superficie de La Mesa, al sur de la región de Doña Ana, Nuevo México, y se extiende hacia la parte norte del estado de Chihuahua, México (Fig. 2). La caldera es elíptica, tiene un diámetro de este a oeste de 3.22 km (cresta a cresta) y un diámetro de norte a sur de aproximadamente 4.83 km. El relieve máximo, que se encuentra en la parte noreste y noroeste del maar en el límite internacional, es de unos 60.96 m. La parte central del maar está ocupada por un flujo basáltico y al menos cuatro conos de ceniza. Esto es inusual ya que solo se conocen otras dos maar con conos centrales, aunque la última etapa del desarrollo de maar es aparentemente una de extrusión de lava (Reeves, 1965).

Campo volcánico Palomas

Comprende un área de aproximadamente 150 km² ubicado al oeste de Ciudad Juárez en el municipio de Ascensión, Chihuahua, está ubicado en el flanco occidental del rift del Río Grande (Fig. 2). Se conocen alrededor de 30 conos cineríticos debido a derrames de lava, en el campo también se observan diques de basalto de orientación norte-sur y otros de forma curva, en este complejo hay afloramientos de andesitas y traquitas, basaltos y también están presentes lavas almohadilladas y diques. No existe un reporte de edad isotópica y se concluye que su formación se originó en el Plioceno (Frantes y Hoffer, 1982).

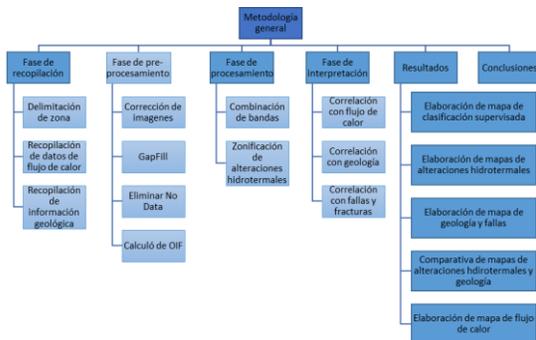
Fig. 2. Mapa geológico escala 1:250,000. Elaboración propia a partir de los datos abiertos vectoriales, tomados del Servicio Geológico Mexicano, 2008.



Metodología

El diagrama de flujo metodológico propuesto (Fig. 3) tuvo como objetivo zonificar e identificar alteraciones hidrotermales mediante imágenes multispectrales del satélite Landsat.

Fig. 3. Diagrama de flujo de la metodología general



Fase de recopilación

En esta fase (Fig. 3) se obtuvo la información bibliográfica de investigaciones previas en el área de estudio, referente a datos de flujo de calor, anomalías geotérmicas, geología, litología, fallas y fracturas y alteraciones minerales. Las imágenes multispectrales obtenidas se descargaron desde la librería digital del USGS disponibles en <https://earthexplorer.usgs.gov/>. Dichas imágenes corresponden al satélite Landsat 7 y Landsat 8. Los datos de flujo de calor se extrajeron de la investigación llevada a cabo por Espinoza-Ojeda *et al.* (2017) con datos de pozos de la Comisión Federal de Electricidad (CFE) y PEMEX. La información litológica superficial e información geoquímica obtenida proviene de la base de datos del Servicio Geológico Mexicano

(SGM) en una escala 1:250,000. En cuanto las fallas y fracturas de la zona se obtuvieron con base en los datos del SGM y la librería digital del USGS.

Fase de pre-procesamiento

En esta fase (Fig. 3) se realizó una serie de correcciones a las imágenes obtenidas para lograr eliminar errores que pudieran contribuir a resultados erróneos al momento de la combinación de bandas para la identificación de minerales de alteración hidrotermal.

Se realizó un relleno de bandeado a las imágenes multiespectrales obtenidas del satélite Landsat 7, resultantes de la corrección atmosférica debido a que su SLC dejó de funcionar y presentan zonas con falta de información; este proceso se realizó en el software ENVI classic 5.3 mediante la herramienta de Basic tools/Preprocessing/Data-specific utilities/Landsat TM/Landsat GapFill, éste utiliza un intercambio de píxeles con los datos disponibles de unas fechas próximas a las imágenes dañadas o sin información.

Cálculo de Factor de Índice Óptimo (OIF)

Para establecer las bandas a utilizar que mostraran una mejor respuesta para la identificación de minerales de alteración hidrotermal se realizó una investigación previa de la longitud de onda de estos mismos con el fin de descartar bandas alejadas de estos valores, estas longitudes de onda se obtuvieron de una investigación realizada por Hunt (1977) donde describía las firmas espectrales de minerales particulados en el visible y cercano a infrarrojos.*

De acuerdo con la longitud de onda de las bandas y los minerales de alteración hidrotermal identificados, Cruz (2017) generó una identificación de bandas. Con esta información se realizará el cálculo de variaciones ordinarias (ver Ec. 1).

$$V_m^n = \frac{m!}{(m-n)!} \text{ Ec. 1}$$

donde m el número de elementos disponibles y n el número de elementos por variación, considerándose que estas sean distintas unas de otras por diferencias de elementos o de orden (Wilhelm, 2004). El cálculo de OIF (ecuación 2) se realizó para cada una de las variaciones resultantes.

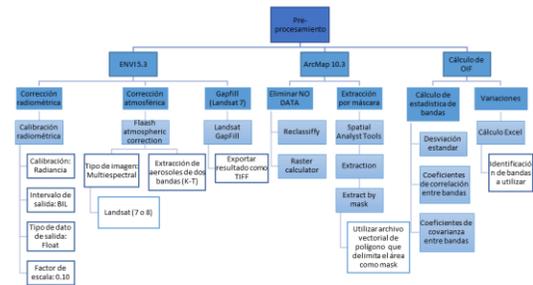
$$OIF = \frac{\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3}{|r_{(1,2)}| + |r_{(1,3)}| + |r_{(2,3)}|} \text{ Ec. 2}$$

donde $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ corresponden a la desviación estándar de las bandas y $r(i, j)$ son los coeficientes de correlación entre dichas bandas (Noyola *et al.*, 2005). Los resultados con un mayor OIF resultante indican las bandas con mayor posibilidad de discriminación de coberturas estudiadas de acuerdo con el mineral de alteración correspondiente.

Fase procesamiento

En esta fase se emplearon los resultados obtenidos de los cálculos realizados en la fase de pre-procesamiento (Fig. 4).

Fig. 4. Diagrama de flujo de la metodología general



Combinación de bandas

En imágenes de satélite con más de tres canales espectrales, se pueden realizar combinaciones asignando los diferentes canales a los colores primarios rojo, verde y azul (configuración RGB), generando imágenes en color natural y en falso color (Baldor, 1966).

Las bandas para utilizar fueron obtenidas de la preclasificación por longitudes de onda realizada por Huntt (1977), por lo tanto, las bandas 2, 5, 6 y 7 tienen mayor relación con minerales de alteración arcillosos y 2, 4, 5 y 6 con minerales de alteración óxidos.

Zonificación de alteraciones hidrotermales

Las combinaciones de banda son reclasificadas para una mejor detección de las zonas con minerales de alteración hidrotermal. De acuerdo con los resultados para minerales arcillosos las absorciones en la banda 7 se asocian a filosilicatos, sulfatos y anfíboles. Los minerales de sílice hidratado y los minerales de arcilla tienen absorción en la banda 5 y 6, estos minerales son comunes en zonas de alteración arcillosa avanzada. Los

carbonatos, la clorita, la epidota, los filosilicatos con contenido de magnesio pueden identificarse en la banda 7.

Mediante un proceso de reclasificación se plantea asociar los pixeles con valor de 1 a los minerales de alteración hidrotermal buscados según sea el caso de la combinación de banda.

Resultados

Cálculo de OIF

De acuerdo con el cálculo de OIF se obtienen diferentes ternas para la identificación de minerales arcillosos y

minerales de oxidación presentes en las alteraciones hidrotermales. Para el caso de minerales arcillosos y óxidos de hierro presentes en alteraciones hidrotermales se tienen 48 y 144 variaciones ordinarias de las cuales se identificaron 6 y 11 respectivamente (ver Tabla 2). Los valores obtenidos de la variación entre desviaciones estándar y coeficientes de correlación utilizan como indicador principal pesar las varianzas individuales de cada banda con respecto a otra, es decir, los valores obtenidos serán la mejor relación entre bandas existente que mostrara mediante firmas espectrales la existencia de los minerales característicos de cada combinación de banda. Los valores de desviación estándar y coeficientes de correlación se toman como absolutos, por lo tanto, el signo de correlación con otras bandas no afecta el cálculo.

Tabla 2. Mejores combinaciones de banda para minerales arcillosos según OIF y su correspondencia según el sensor. Los recuadros rojos muestran aquellas combinaciones de banda que generaran firmas espectrales en las cuales se puedan identificar minerales óxidos y arcillosos de alteración hidrotermal con mayor eficacia.

Minerales arcillosos									
BANDAS ETM y OLI			Desv. Estándar			Coeficientes de correlación			OIF
R	G	B	σ_1	σ_2	σ_3	$r_{(12)}$	$r_{(13)}$	$r_{(23)}$	
TM5	TM7	OLI7	3471.3815	3454.9022	2496.8398	-0.23393	-0.23692	-0.22193	13601.89687121450
OLI6	OLI7	TM7	2425.2905	2496.8398	3454.9022	-0.23692	-0.22915	-0.22193	12175.91933139540
BANDAS OLI			Desv. Estándar			Coeficientes de correlación			OIF
R	G	B	σ_1	σ_2	σ_3	$r_{(12)}$	$r_{(13)}$	$r_{(23)}$	
6	7	5	2425.2905	2496.8398	2372.6494	0.98692	0.90045	0.86063	2654.57776564774
5	7	2	2372.6494	2496.8398	1873.9664	0.86063	0.88502	0.90108	2547.84416997578
2	6	5	1873.9664	2425.2905	2372.6494	0.90335	0.88502	0.90045	2481.35103874562
6	7	2	2425.2905	2496.8398	1873.9664	0.98692	0.90335	0.90108	2434.69887330503

Mapa de minerales y zonas de alteración hidrotermal

Mediante la clasificación supervisada se creó un archivo de firmas espectrales, los resultados obtenidos son mapas con clasificación de acuerdo con la firma espectral (Fig. 5). Para la interpretación se utilizaron los datos geológicos recopilados del área de estudio, la sección se divide en cuatro principales zonas.

Zona A: Se logran identificar minerales de alteración hidrotermal arcillosos y se considera que surgen como producto de la meteorización y erosión en las zonas bajas del terreno, principalmente en áreas de vidrio volcánico existentes en esta zona por la presencia de un complejo volcánico de actividad reciente conocido como Campo Volcánico Palomas, también se identificaron óxidos en

el sitio, se observa que su extensión volcánica es mayor que la del complejo Palomas; de igual manera existen zonas con micas y cuarzo, los minerales indican la existencia de una alteración mineral hidrotermal tipo cuarzo-sericítica.

Zona B: Se distinguen zonas con alteración de tipo arcillas que se encuentran cercanos a la zona conocida como Maar Potrillo, además de zonas pequeñas con depósitos sedimentarios de edad Cuaternaria además de que se atribuye su origen a su ubicación topográfica lo cual lo condiciona a efímeras inundaciones. Los minerales de alteración existentes se podrían atribuir a un tipo de alteración argílica.

Zona C: Esta zona al igual que la zona A tiene una gran distribución de minerales arcillosos de alteración hidrotermal, que podrían corresponder al reemplazo del vidrio volcánico, así mismo también cuenta con presencia de óxidos de alteración y algunas zonas con sílice, lo cual podría determinar una zona con alteración hidrotermal tipo argílica avanzada.

Zona D: Esta zona tiene un carácter de origen sedimentario, las alteraciones presentes según los resultados obtenidos corresponden a minerales arcillosos, que podrían asociarse a la ubicación geomorfológica, ya que debido a su baja altura podrían ser producto de hidratación, intemperismo químico o erosión; de acuerdo con la información proporcionada en la Tabla 1, estos minerales en conjunto podrían indicar una zona de alteración hidrotermal argílica o argílica avanzada.

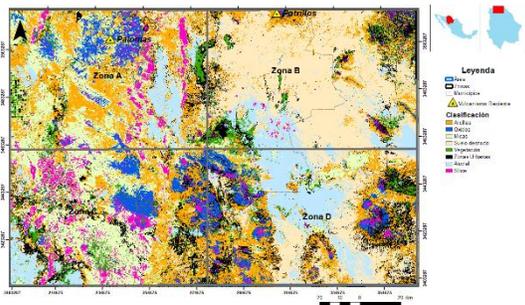
temperatura estimados para este tipo de alteración podrían ser mayores a 350°C.

Zona B: la información disponible sugiere que en esta zona se desarrolla un tipo de alteración hidrotermal argílica debido a la cantidad de minerales arcillosos de alteración y a la escasez de otro tipo de minerales, este tipo de alteración hidrotermal tiene temperaturas estimadas menores a 250°C.

Zona C: la clasificación de minerales de alteración hidrotermal realizada por Meyer y Hemley (1967), Romo (2016), Camprubí *et al.* (2003) sugieren que esta zona se clasifica con alteración argílica avanzada, los datos de flujo de calor en esta área son elevados y se asocian a las fallas y fracturas presentes, las temperaturas asociadas a este tipo de alteración hidrotermal podrían ser mayores a 350°C.

Zona D: esta zona se clasifica con presencia de alteración hidrotermal argílica, debido a su geología superficial y a la falta de estructuras geológicas y/o volcánicas que pudieran aumentar los datos de flujo de calor, las temperaturas en esta área se estiman por debajo de los 250°C.

Fig. 5. Mapa de clasificación de minerales de alteración hidrotermal.



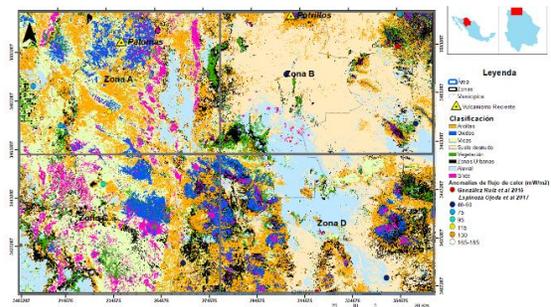
Mapa de asociación de alteraciones hidrotermales y datos de flujo de calor

Cada zona se encuentra emplazada sobre áreas con características geológicas y tectónicas diferentes, por lo tanto, los datos que presenten tendrán variaciones significativas relacionadas a estas. La presencia de actividad volcánica reciente en el área es un factor de vital importancia al momento de realizar una correlación entre los minerales de alteración hidrotermal identificados, datos de flujo de calor y la zonificación de alteraciones hidrotermales.

Zona A: el análisis de esta zona determina alteración hidrotermal de tipo cuarzo-sericitica, los datos de flujo de calor oscilan entre 75 y 175 mW/m² (Fig. 6), lo cual se asocia a la actividad volcánica reciente y que se correlaciona con la alteración hidrotermal de acuerdo con la información presentada en la Tabla 1. Los valores de

De manera general, los resultados sugieren que, en la zona oeste del área de estudio y principalmente al norte del campo volcánico Palomas existe una mayor posibilidad de encontrar anomalías de temperatura, debido a que los datos de flujo de calor son más elevados en esta zona, además del historial de actividad volcánica en el área. La zona este del área de estudio cuenta con datos de flujo de calor menos elevados y la cantidad de minerales de alteración hidrotermal disminuye de igual forma, éstos se podrían asociar a erosión, intemperismo o interacción con fluidos debido a estancamiento por su bajo nivel topográfico, a pesar de la existencia de fallas y fracturas registradas.

Fig. 6. Mapa de correlación de flujo de calor con minerales de alteración hidrotermal.



Discusión

Para validar los resultados obtenidos en este trabajo, se realizó una comparación de las alteraciones hidrotermales mapeadas en este estudio con las alteraciones reportadas por el SGM (2006-2013). Como se puede visualizar en la Fig. 7, hay una correlación entre las alteraciones hidrotermales mapeadas en las zonas A, B, C y D con los datos geoquímicos reportados por GEOINFOMEX (2016).

En el área de estudio se logran ubicar cuatro datos de alteraciones hidrotermales (ver Fig. 5) identificadas como: silicificación-propilitización para la zona A y oxidación-argilización para la zona C. Será necesario realizar una investigación *in situ* y realizar un muestreo geológico y recopilación de datos geoquímicos del área para conocer la causa de la diferencia de alteraciones existentes en una misma coordenada.

La base de datos de GEOINFOMEX (2016) proporciona datos de exploración geoquímica superficial de toda la República Mexicana (Figuras 7 y 8), los datos geoquímicos son expresados en ppm (partes por millón) y sirven para identificar el tipo de roca aflorante en la región, por lo tanto, es posible realizar una asociación mineralógica con base en el tipo de alteración hidrotermal mapeada.

Fig. 7. Mapa de Alteraciones hidrotermales. Los círculos de colores corresponden a las alteraciones superficiales reportadas por el Servicio Geológico Mexicano (SGM, 2006-2013).

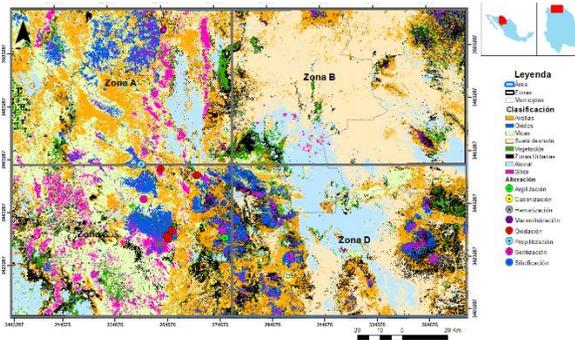
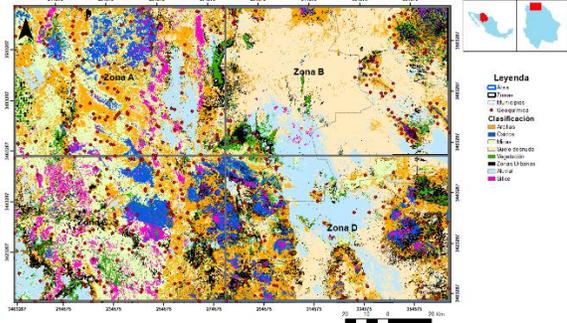


Fig. 8. Datos geoquímicos obtenidos del Servicio Geológico Mexicano (SGM) en GEOINFOMEX.



Conclusión

Las combinaciones de banda efectuadas ofrecen información acerca de la localización de cada tipo de alteración hidrotermal basándose en las firmas espectrales de minerales característicos para cada tipo de alteración y una correlación con la geología superficial reportada por diversos autores. De acuerdo con esta correlación y la metodología empleada para la obtención de resultados se concluye que:

- La utilización de las bandas del infrarrojo cercano de Landsat 7 y 8 para caracterización de zonas con alteración de minerales puede ser una herramienta eficiente. Sin embargo, la herramienta estadística *gapfill* para recuperar bandeado de Landsat 7 puede generar problemas en la visualización de ciertas zonas.
- El uso de estadística de bandas nos proporciona información para un análisis multivariado; el uso del cálculo del Índice de Factor Óptimo (IOF) es una metodología funcional para establecer correlaciones de tres bandas en composiciones RGB, en las cuales se obtenga información superficial de minerales de alteración hidrotermal.
- Las características espectrales de las alteraciones hidrotermales permiten poder realizar una exploración geológica digital, por lo tanto, se emplearán menos recursos económicos al momento de iniciar un proyecto de exploración con fines de prospección geotérmica.
- Los datos de flujo de calor reportados coinciden con las características geológicas y tectónicas de la zona, tal es el caso de las zonas con actividad volcánica reciente conocidas como Campo Volcánico Palomas

y la extensión del Campo Volcánico Potrillos en México (Maar Potrillo).

- Los datos recopilados en conjunto con los obtenidos con la metodología empleada aportan información que reduce el costo de las campañas de exploración geotérmica; sin embargo, el uso de imágenes satelitales con características más avanzadas podría definir puntos específicos para perforaciones exitosas.
- Las zonas identificadas como A y C que se encuentran al oeste del área de estudio cuentan con las características geológicas, tectónicas, de flujo de calor y además con una clasificación de alteraciones de minerales hidrotermales, las cuales indican que posiblemente esta zona es la más indicada para continuar los estudios e investigaciones aplicadas con otras técnicas de prospección geotérmica.

En suma, la integración de imágenes satelitales, datos geológicos, parámetros térmicos y análisis estadísticos de bandas representa un enfoque prometedor para la exploración geotérmica en el norte del estado de Chihuahua. Esta metodología permite delinear zonas con mayor potencial, lo cual optimiza la toma de decisiones y reduce los costos en las fases iniciales de la prospección. De este modo, se establecen bases más sólidas para crear estrategias de exploración efectivas y aumentar la probabilidad de éxito al identificar recursos geotérmicos explotables de manera sostenible.

Agradecimientos

Los autores agradecen a la Universidad Autónoma de Ciudad Juárez por el uso de la licencia de Arcmap, CONAHCYT y el CONAHCYT-División de Ciencias de la Tierra, Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, Baja California por el apoyo y préstamo de equipos.

Referencias

- Aranda-Gómez, J. J., Luhr, J. F., Housh, T. B., Valdez-Moreno, G., y Chávez-Cabello, G. (2005). El volcanismo tipo intraplaca del Cenozoico tardío en el centro y norte de México: una revisión. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 57(3), 187-225. <https://doi.org/10.18268/bsgm2005v57n3a1>
- Camprubí, A., González-Partida, E., Levresse, G., Tritlla, J., y Carrillo-Chávez, A. (2003). Depósitos epitermales de alta y baja sulfuración. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 56(1), pp. 10-18.

[http://boletinsgm.igeolcu.unam.mx/bsgm/vols/epoc_a03/5601/5601-\(2\)Camprubi.pdf](http://boletinsgm.igeolcu.unam.mx/bsgm/vols/epoc_a03/5601/5601-(2)Camprubi.pdf)

- Cruz Sarmiento, N. (2017). *Identificación preliminar de alteraciones hidrotermales mediante percepción remota, en la zona geotérmica San Diego, Caldas* [Tesis de especialidad]. Universidad Militar Nueva Granada.

<https://repository.unimilitar.edu.co/items/a434be9d-b353-403d-bb7a-6295db616762>

- Elizalde Guerrero, J. D. (2018). *Exploración geotérmica con SIG en Maguarichic, Chihuahua* [Tesis de Maestría]. Universidad Nacional Autónoma de México.

<http://132.248.9.195/ptd2018/julio/0776556/0776556.pdf>

- Espinoza Ojeda, O. M., Prol-Ledesma, R. M., and Iglesias, E. R. (2017, May). Continental heat flow data update for México—constructing a reliable and accurate heat flow map. In *42nd Workshop on Geothermal Reservoir Engineering*. Stanford University. Vol 2., 12-14.

<https://pangea.stanford.edu/ERE/pdf/IGAstandard/S/GW/2017/Espinozaojeda2.pdf>

- Frantes, T. J., and Hoffer, J. M. (1982). Palomas volcanic field, southern New Mexico and northern Chihuahua. *New Mexico: Geology*, 4(1), 6-8.

https://geoinfo.nmt.edu/publications/periodicals/nmg/4/n1/nmg_v4_n1_p6.pdf

- GEOINFOMEX. (2016). *El banco de datos del Servicio Geológico Mexicano*. SGM GeoInfoMex.

<https://www.sgm.gob.mx/GeoInfoMexGobMx/>

- Goff, F., & Grigsby, C. O. (1982). Valles Caldera geothermal systems, New Mexico, U.S.A. *Journal of Hydrology*, 56(1), 119–136.

[https://doi.org/10.1016/0022-1694\(82\)90061-0](https://doi.org/10.1016/0022-1694(82)90061-0)

- González-Ruiz, L. E., González Partida, E., Garduño Monroy, V. H., Martínez, L., Pironon, J., Díaz-Carreño, E. H., & Romero-Rojas, M. C. (2015).

Distribución de anomalías geotérmicas en México: Una guía útil en la prospección geotérmica [PDF].

https://riiit.com.mx/apps/site/files/distribucion_de_anomalias_geotrmicas.pdf

- INEGI. (2003). Síntesis de información geográfica del estado de Chihuahua. Instituto Nacional de Estadística y Geografía. <https://t.ly/73AH6>

- Keller, G. R., Morgan, P., and Seager, W. R. (1990).

Crustal structure, gravity anomalies and heat flow in the southern Rio Grande rift and their relationship to extensional tectonics. *Tectonophysics*, 174(1), 21-37. [https://doi.org/10.1016/0040-1951\(90\)90382-I](https://doi.org/10.1016/0040-1951(90)90382-I)

- Le Bert, G. H., Gutiérrez-Negrín, L. C., Quijano León, H. L., Ornelas Celis, A., Espindola, S., y Hernández

Carrillo, I. (2011). Evaluación de la energía geotérmica en México. Informe para el banco Interamericano de Desarrollo y la Comisión

- Reguladora de Energía.
<https://www.cre.gob.mx/documento/2026.pdf>
- López Ramos, E. (1979). Provincia de Chihuahua. En *Geología de México Tomo II* (7-186). Trillas.
- Maksaev, V. (2001). *Apuntes del curso Metalogénesis*. Departamento de Geología, Universidad de Chile.
www.ccc.uchile.cl/~vmaksaev/metalogenesis.html
- Meyer, C., & Hemley, J. J. (1967). Wall rock alteration. In H. L. Barnes (Ed.), *Geochemistry of hydrothermal ore deposits* (1st ed., pp. 166-235). Holt, Rinehart, and Winston.
- Noyola-Medrano, M. C., Hinojosa-Corona, A., y Martín-Barajas, A. (2005). Caracterización litológica de regiones desérticas mediante técnicas de percepción remota: Un ejemplo en la franja costera central de Baja California, México. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 22(2), 229-245.
https://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S1026-87742005000200229&script=sci_abstract
- Peláez Zapata, R. (2017). Geotermia en México: Un potencial de energía “inagotable”. *PetroQuiMex*, 88, 10-12.
- Prol-Ledezma, R. M. (2020). *La geotermia en el futuro energético de México*. Conferencia en línea del SGM, agosto. <https://t.ly/jQJqZ>
- Reeves, C. C., & DeHon, R. A. (1965). Geology of Potrillo maar, New Mexico and northern Chihuahua, Mexico. *American Journal of Science*, 263(5), 401-409.
<https://doi.org/10.2475/ajs.263.5.401>
- Reiter, M., and Clarkson, G. (1984, October). Analysis of terrestrial heat-flow profiles across the Rio Grande rift and southern Rocky Mountains in northern New Mexico. In *Rio Grande Rift: Northern New Mexico. New Mexico Geological Society 35th Field Conference Guidebook* (pp. 39-44).
https://nmgs.nmt.edu/publications/guidebooks/downloads/35/35_p0039_p0044.pdf
- Romaguera, M., Vaughan, R. G., Ettema, J., Izquierdo-Verdiguier, E., Hecker, C. A., & van der Meer, F. D. (2018). Detecting geothermal anomalies and evaluating LST geothermal component by combining thermal remote sensing time series and land surface model data. *Remote Sensing of Environment*, 204, 534-552.
<https://doi.org/10.1016/j.rse.2017.10.003>
- Romo I. A. (2016). Caracterización de depósitos y alteraciones hidrotermales de la región geotérmica Los Volcanes, Baja California Sur [Tesis -Ingeniero Geólogo]. Universidad Nacional Autónoma de México. Facultad de Ingeniería.
<https://hdl.handle.net/20.500.14330/TES01000746016>
- Romo-Jones, J. M., Gutiérrez-Negrín, L. C., & Canchola-Félix, I. (2020). 2019 México country report. IEA Geothermal.
- Servicio Geológico Mexicano, S. G. (2013). Fichas de campo, carta inventario físico de los recursos minerales Sacramento h13-c56, escala 1:50,000, estado de Chihuahua.
https://mapserver.sgm.gob.mx/InformesTecnicos/InventariosMinerosWeb/T0813RUOA0001_01.PDF
- Servicio Geológico Mexicano, SGM (2006). Fichas para el inventario físico de los recursos minerales del municipio Aldama, Chihuahua.
https://mapserver.sgm.gob.mx/InformesTecnicos/InventariosMinerosWeb/T0806HEVM0001_01.pdf
- Servicio Geológico Mexicano, SGM (2008). Carta de Yacimientos Minerales, Municipio Aldama, escala 1:100,000
- White, A. F., Delany, J. M., Truesdell, A., Janik, C., Goff, F., & Crecraft, H. (1984). Fluid chemistry of the Baca geothermal field, Valles Caldera, New Mexico. In *Field Conference Guidebook* (Vol. 35, pp. 257-263). New Mexico Geological Society.
https://nmgs.nmt.edu/publications/guidebooks/downloads/35/35_p0257_p0263.pdf
- Wilhelm, M. R. (2004). *Combinatoria y probabilidad*. Departamento de Didáctica de la Matemática. Universidad de Granada.
<https://www.ugr.es/~batanero/pages/ARTICULOS/ibrowhilhelmi.pdf>