

## Identificación de minas y jales en Huautla, Morelos, México

### *Identification of mines and tailings in Huautla, Morelos, Mexico*

Roberto Márquez Huitzil,\* Cristina Martínez-Garza,\*\* Susana Isabel Hinojosa-Espinoza\*\*\* y Valentino Sorani+

Recibido: 12/05/2022. Aprobado: 10/10/2022. Publicado: 28/11/2022.

**Resumen.** En México, la minería ha dejado muchos jales mineros, materiales de desecho, tóxicos e inestables que pueden ser depositados y contenidos por estructuras denominadas presas de jales. Aun así, estos materiales se encuentran a cielo abierto y pueden ser arrastrados por la lluvia o dispersados por el viento. La identificación de los jales es un punto de partida para plantear estrategias para su mitigación. En la zona de Huautla, Morelos, se abandonó abruptamente la actividad minera sin dejar un registro preciso de tales jales. El objetivo de este estudio fue identificar estos depósitos de jales y las minas abandonadas en esa zona. Para ello se revisaron documentos y cartografía, se llevó a cabo una fotointerpretación y una clasificación de imágenes de percepción remota, así como visitas al campo y consultas a los pobladores. De esta forma se localizaron 19 minas, cinco sitios conocidos como depósitos de jales, tres contenidos por presas de jales (dos en Los Molinos y uno en Las Presas) y dos sin contención (Tlalchichilpa y Huautla). Adicionalmente, se encontraron doce depósitos potenciales de jales. La combinación de estas estrategias resultó ser la más adecuada para identificar los jales y describir sus cambios a través del tiempo.

**Palabras clave:** jales, minería, sistemas de información geográfica (SIG), impacto ambiental, selva estacional.

**Abstract.** In Mexico, mining has left many mine tailings, toxic and unstable waste materials that can be deposited and contained by structures called tailings dams. Even so, these materials are found in the open pit and can be washed away by rain or dispersed by the wind. The identification of tailings is a starting point for developing mitigation strategies. In the area of Huautla, Morelos, mining activity was abruptly abandoned without leaving an accurate record of such tailings. The objective of this study was to identify these tailings deposits and abandoned mines in that area. To this end, documents and cartography were reviewed, photo-interpretation and classification of remote sensing images were carried out, as well as field visits and consultations with local people. In this way, 19 mines were located, five sites known as tailings deposits, three contained by tailings dams (two in Los Molinos and one in Las Presas) and two without containment (Tlalchichilpa and Huautla). In addition, twelve potential tailings deposits were found.

\*Centro de Investigaciones en Biodiversidad y Conservación, Universidad Autónoma del Estado de Morelos. Avenida Universidad 1001, Colonia Chamilpa, 62209, Cuernavaca, Morelos, México. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8947-5253>. Email: [huitzil.r@gmail.com](mailto:huitzil.r@gmail.com) Autor de correspondencia

\*\* Centro de Investigación en Biodiversidad y Conservación, Universidad Autónoma del Estado de Morelos. Avenida Universidad 1001, Colonia Chamilpa, 62209, Cuernavaca, Morelos, México. ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-9310-564X> Email: [cristina.martinez@uaem.mx](mailto:cristina.martinez@uaem.mx)

\*\*\* Facultad de Ciencias Forestales y Ambientales, Universidad Juárez del Estado de Durango. Río Papaloapan y Blvd. Durango S/N Col. Valle del Sur C.P. 34120 Durango, Durango, México. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6786-6624>. Email: [susanahinojosa.28@gmail.com](mailto:susanahinojosa.28@gmail.com)

+ Centro de Investigación en Biodiversidad y Conservación, Universidad Autónoma del Estado de Morelos. Avenida Universidad 1001, Colonia Chamilpa, 62209, Cuernavaca, Morelos, México. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7431-1894>. Email: [vsorani@yahoo.com.mx](mailto:vsorani@yahoo.com.mx)

The combination of these strategies proved to be the most adequate to identify the jales and describe their changes through time.

**Keywords:** tailings, geographic information systems (GIS), environmental impact, seasonal rainforest.

## INTRODUCCIÓN

La minería moderna remueve y extrae millones de toneladas de materiales (Sipriano, 2016). Las zonas de extracción, infraestructura y depósito de desechos mineros (jales) afectan amplias superficies de los ecosistemas (ASGMI, 2010). La causa es la regulación legal lenta e insuficiente de la minería, que afectan a la sociedad y la economía (Pérez, 2014). Adicionalmente, la cuantificación de las afectaciones es imprecisa, ya que gran parte de las actividades mineras fueron generadas antes de la regulación (ASGMI, 2010).

Entre las principales afectaciones se encuentra la generación de materiales no útiles para la minería (jales), generados al separar y concentrar los minerales, acumulándose en miles de millones de toneladas (Reyes, 2014). Para generar de 200 a 250 gr de plata o 1 gr de oro se requiere extraer una tonelada de roca, procesando 200 a 1200 toneladas por día (Manzanares *et al.*, 2005). Al terminar la minería, los jales, minas, zonas de beneficio e infraestructura abandonados constituyen serias amenazas ambientales (Aparicio y Hernández, 2017).

Desde 2004, la legislación estableció criterios para sitios donde se construyeran presas de jales (SEMARNAT, 2013; Reyes, 2014). Estos están definidos en la NOM-141-SEMARNAT-2003 (SEMARNAT, 2004) y consideran características biofísicas del sitio y el potencial de daño por la construcción de la presa de jales. También consideran la preparación del sitio, elaboración del proyecto, construcción-operación y posoperación de las presas y su monitoreo (SEMARNAT, 2004). La norma sugiere que las presas de jales pueden ocupar terrenos forestales y cauces naturales si tienen la autorización correspondiente, olvidando la fragilidad de estos sitios por el arrastre de materiales y la biodiversidad. Además, existen miles de depósitos clandestinos y previos a la NOM que incumplen

esta normatividad (Rivera, 2009). Entre otros, hay ejemplos de roturas de estas presas que afectan a los ecosistemas y la sociedad como en Tlalpujahua, Michoacán en 1937 (Sánchez-Núñez *et al.*, 2015) o en Buenavista del Cobre contaminando al río Sonora en 2014 (Luque *et al.*, 2019). Así mismo, los jales interactúan con fenómenos meteorológicos que favorecen la dispersión de partículas y sustancias tóxicas y amenazan con su movimiento en masa (Sánchez-Núñez *et al.*, 2015; Luque *et al.*, 2019).

En México, la minería existe desde la conquista. La población Real de minas de San Francisco de Huautla en Morelos se fundó en 1570 después de descubrir plata entre 1531-1558 (Valle, 1991). Para el siglo XVIII se explotaban cinco minas en la zona: Tlalchichilpa, San Francisco, Santa Ana, Peregrina y Santiago, extrayendo hasta 60 kg de plata (Ag) por tonelada de roca (Valle, 1991; Mac Gregor, 1992; Nieto, 1997).

La minería en Huautla tuvo períodos de activación y cierre, extrayendo principalmente plata (Mac Gregor, 1992; Nieto, 1997). Inicialmente fue rudimentaria, pudiéndose conocer solo por vestigios (tiros, obras secundarias, fortificaciones) (Nieto, 1997). En el siglo XX se dio una dinámica minera más documentada, como se describirá posteriormente. Hoy la actividad está restringida al encontrarse dentro de la Reserva de la Biósfera Sierra de Huautla (POEREM, 2013). A pesar del decreto, existen 13 concesiones mineras vigentes en la zona (Tabla 1).

## MATERIALES Y MÉTODOS

La zona de estudio abarcó las minas del antiguo distrito minero de Huautla, Morelos. Los métodos y herramientas utilizadas fueron los siguientes:

### Revisión documental y compilación de información georreferenciada

Se consultó información documental y cartográfica de la zona. Las geolocalizaciones de minas y jales se integraron en un geodatabase y fueron cartografiadas, delimitando una zona de estudio. Esta información ayudó a reconstruir históricamente la

Tabla 1. Concesiones mineras vigentes en la zona de Huautla (Fuente: CartoMinMex, 2022).

TÍTULO	FECHA DE SOLICITUD	SUPERFICIE (ha.)
224842	2/15/2005	197
225260	01/09/2005	45
225261	4/12/2005	60
225403	2/20/2005	1367.45
227720	1/27/2005	423
227721	1/27/2005	574
229315	9/21/2006	46.16
231601	07/11/2007	456.72
231968	11/08/2007	4365.58
233116	5/18/2008	50
		7584.91

minería y su dinámica en la zona, complementada por las otras fuentes de información.

### Descripción y análisis de imágenes

Se describieron y analizaron imágenes obtenidas por percepción remota, antiguas y recientes, con el programa Qgis. Una secuencia de tres tiempos fue obtenida con estas imágenes: i) etapa activa utilizando dos fotografías aéreas blanco y negro de 1970 de INEGI, 014\_0190 de la línea de vuelo 62 y 033\_0163 de la línea de vuelo 61, resolución 0.54 m con cuatro bandas; ii) etapa inmediata al abandono de minería, utilizando la Ortofoto digital E14A79c blanco y negro de 1995, resolución de 2 m con una banda (INEGI 1995); y iii) etapa actual, analizando una escena del mapa satelital a color, resolución de 0.5 m con tres bandas.

Las imágenes se analizaron mediante fotointerpretación (Ramos-Arroyo y Siebe-Grabach, 2006) y dos métodos de clasificación de imágenes. En las imágenes se identificaron polígonos con características como suelo desnudo, tonalidad, textura y falta de vegetación semejantes a los jales conocidos, clasificándolos como jales potenciales; en la imagen de 2021 se identificaron también áreas con vegetación dispersa, cárcavas y apilamientos irregulares. Esto

elementos también fueron verificados en campo. Los cambios superficiales en los jales conocidos fueron analizados y comparados entre tiempos. Estas características fueron un criterio de confirmación de jales potenciales.

Los métodos de clasificación aplicados fueron dos: clasificación no supervisada (CNS) y análisis de imágenes basado en objetos (OBIA, por sus siglas en inglés), utilizando 11 clases. En la CNS el método organiza los píxeles automáticamente en el número de clases que defina el usuario (Díaz *et al.*, 2014). Mientras que el OBIA organiza los elementos por objetos (Hinojosa *et al.*, 2021), requiriendo de categorías definidas por el usuario. Las categorías propuestas para el OBIA fueron: 1) caminos de terracería, 2) construcción, 3) cuerpo de agua, 4) cultivo, 5) desplazamiento de jales, 6) suelo desnudo, 7) materiales dentro de la presa de jales, 8) vegetación asociada al jal, 9) selva baja caducifolia densa, 10) vegetación secundaria de selva baja caducifolia y 11) selva baja caducifolia. Las categorías asignadas por el OBIA a los jales conocidos y minas fueron otro criterio de confirmación de jales potenciales. Ambas clasificaciones se realizaron con programas libres, Orfeo Toolbox y Qgis.

El valor de similitud de Jaccard (SJ) se utilizó para comparar las categorías entre minas, jales conocidos y jales potenciales confirmados, mediante la fórmula (Jongman *et al.*, 1997):

$$SJ = \frac{c}{A + B - c}$$

donde  $c$  es el número de clases compartidas y  $A$  y  $B$  son el número total de clases para los polígonos ( $y$ ).

### Consulta con habitantes, representantes ejidales y verificación de campo

Se realizaron aproximadamente seis recorridos de campo. Uno acompañados por los representantes del comisariado ejidal de Huautla. Adicionalmente, extrabajadores de la mina y otros pobladores de Huautla compartieron sus conocimientos.

## RESULTADOS

### Compilación de información georreferenciada

Fueron consultadas cartas topográficas a escala 1:50 000 de INEGI (1987, 1995, 1997, 2009, 2015) y del Servicio Geológico Mexicano (SGM) (Salinas y García, 2010) e información documental. En total se encontraron 20 minas en la zona: La Pinta, La Fortuna, La Nueva Peregrina, La Unión, La Pabellonera, Rancho Viejo I, La Reforma, La Plomosa, Tlalchichilpa, El Seco, El Aguacate, San Pedro, San Pedro I, El Aguacate, Xochipala, Xochipala I (Salinas y García, 2010), la Mina Santiago (El Portón o El Clarín) (Farfán, 2019), La Peregrina, San Francisco (Cuatro Ases o La Chistorra) (Nieto, 1997) y Pájaro Verde (Mussali, 2008; Martínez, 2008; Garrido-Hoyos y Romero-Velázquez, 2016).

Las presas de jales son Huautla I, II y III (Salinas y García, 2010) que, en la literatura, corresponden a El Portón (Huautla II y III); el depósito de jales más antiguo es Tlalchichilpa (De la Cruz, 2018; Esteves, 2018; Téllez y Sánchez, 2018; Valenzuela, 2020; Galván, 2020; Maldonado 2020; López, 2021). Huautla II y III, localmente se denominan Los Molinos, y Huautla I es Las Presas. La zona de estudio tuvo una superficie de 2028.71ha (Figuras 1 y 2).

La reconstrucción histórica de la minería se presenta en el Cuadro 1. Esta actividad tuvo momentos de cierre y reactivación. La minería fue considerada mediana por su comunicación entre minas; una planta de beneficio que obtenía un concentrado para la fundición; aproximadamente 300 empleados (Torres, comunicación personal,

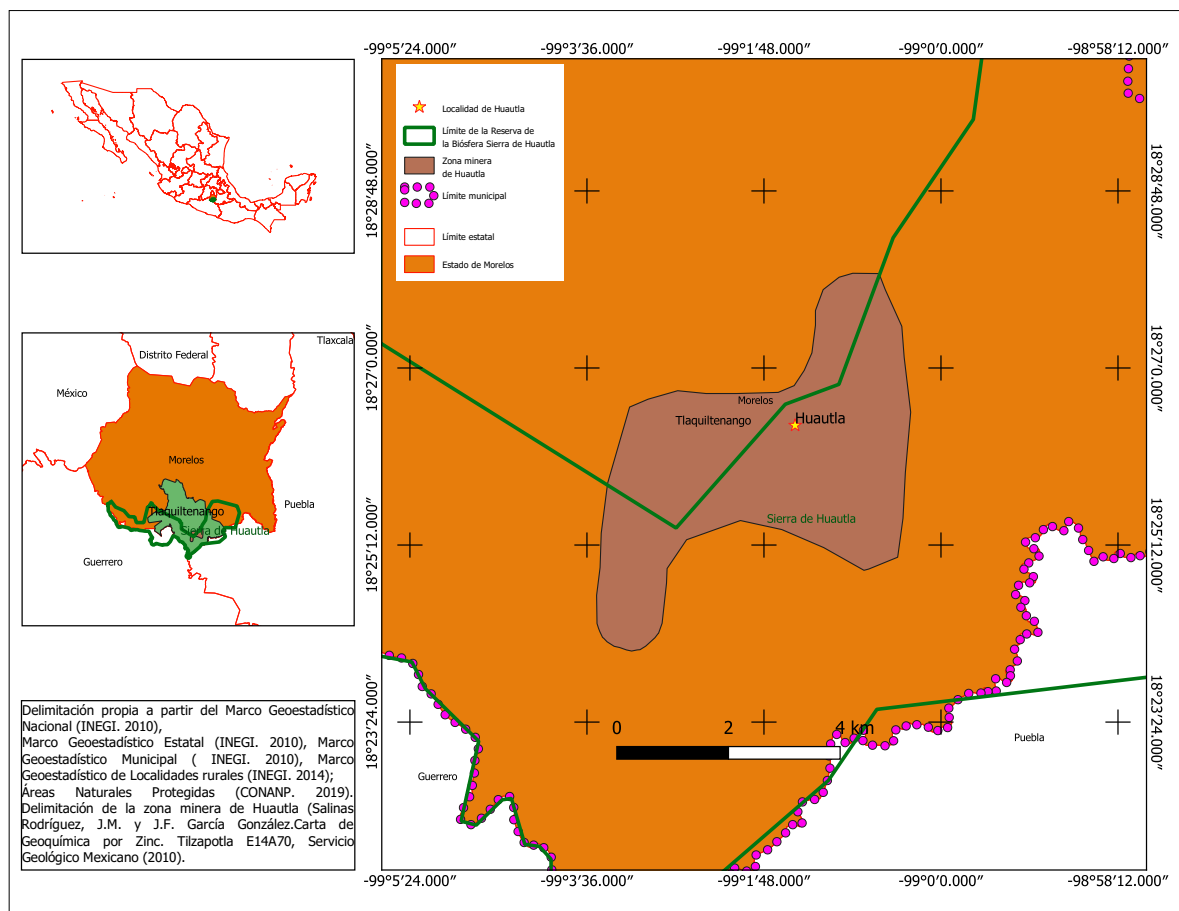


Figura 1. Ubicación de la zona de estudio.



1990, como se citó en Valle, 1991; Morán, Alcocer y Palacios, comunicación personal, 2022); producía entre 500 y 600 g/t de plata mediante el sistema de flotación (Valle, 1991; Palacios, comunicación personal, 2022), luego, 450g/t (Mac Gregor, 1992; Nieto, 1997). La planta de beneficio procesaba hasta 300 t diarias de rocas (Valle, 1991). Otros minerales obtenidos eran cuarzo amatista, plomo (Pb), Zinc (Zn) y trazas de oro (Au) (Nieto, 1997). A principios de los años 1990, el descenso en el precio mundial de la plata y la mala administración, provocaron la quiebra de la empresa (A. Palacios, M. Alcocer, comunicación personal, 2022).

### Descripción y análisis de imágenes

La fotointerpretación permitió reconocer eventos en la zona. También se identificó infraestructu-

ra de beneficio de minerales en Los Molinos y construcciones en la exHacienda Tlalchichilpa, así como tolvas en mina San Francisco cerca de la Peregrina (Figura 3a-c). La cobertura vegetal escasa o nula en sitios afectados por la minería, especialmente en jales y, en lluvias, la vegetación sólo se incrementa en zonas conservadas. En los depósitos más antiguos, Tlalchichilpa y en Huautla (depósito presentado por el comisario ejidal), la vegetación impidió reconocerlos. Se detectaron cambios en el recubrimiento vegetal, en la estructura de las presas de jales (Los Molinos y Las Presas) y el sitio de beneficio de minerales (Los Molinos).

Los jales presentaron cambios considerables a través del tiempo. En la imagen de 1970, una presa en los Molinos (Huautla I) se encuentran comple-

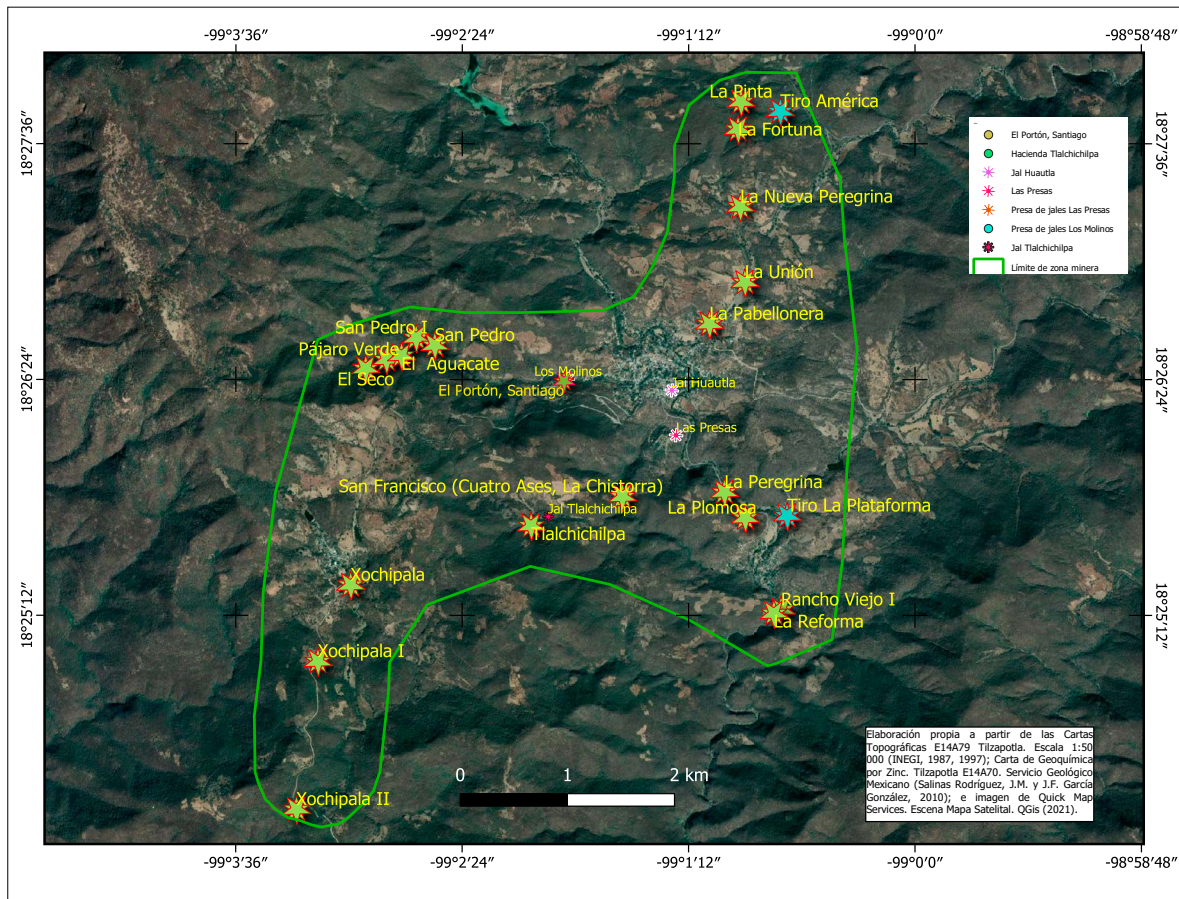


Figura 2. Jales y minas reportados en la literatura en la zona de Huautla, Morelos con la delimitación de la zona de estudio.

Cuadro 1. Reconstrucción histórica de la actividad minera.



Nota: aunque incluye la dinámica de las minas principales y de los sitios de beneficio, la información consultada no describe la formación de presas y depósitos de jales. Fuente: Valle, 1991; Mac Gregor 1992; Nieto, 1997; Sánchez, 2002.

tamente formadas y la presa izquierda (Huautla II) está rota en la parte central con los jales esparcidos sobre el río y hay materiales de reserva (Figura 4); en Las Presas se inicia la formación de la presa de jales (Figura 4a). Los depósitos Huautla y Tlalchichilpa no se aprecian en las imágenes. En 1995, la presa de jales Las Presas está completamente formada (Fi-

gura 5b); Los Molinos presentan un recubrimiento vegetal, desapareciendo los materiales de reserva cercanos. En 2021 se observó erosión intensa y vegetación escasa sobre ambas presas (Figura 6, 7, 8). Al comparar imágenes recientes de Google Earth, la vegetación sobre los jales es escasa en época de lluvias y secas (Figura 8).



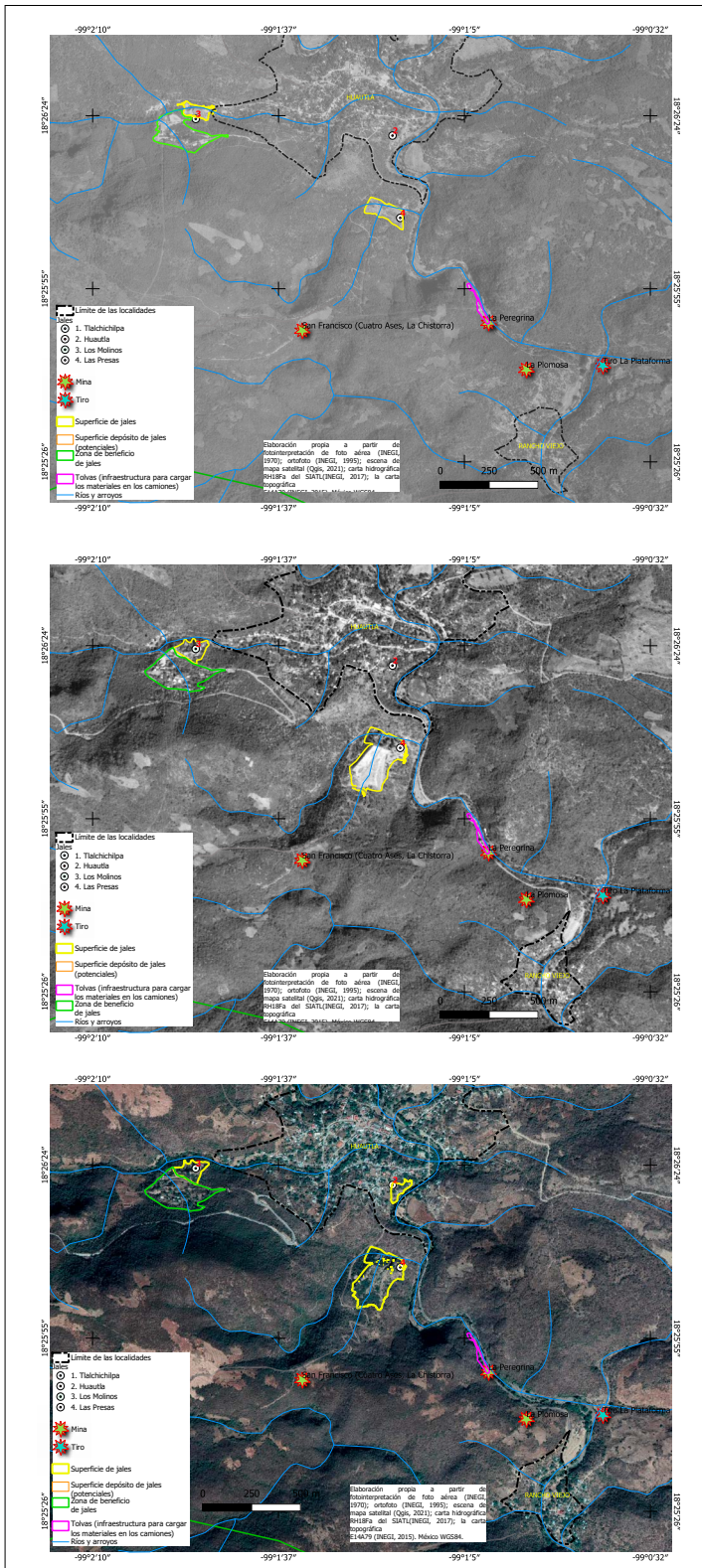
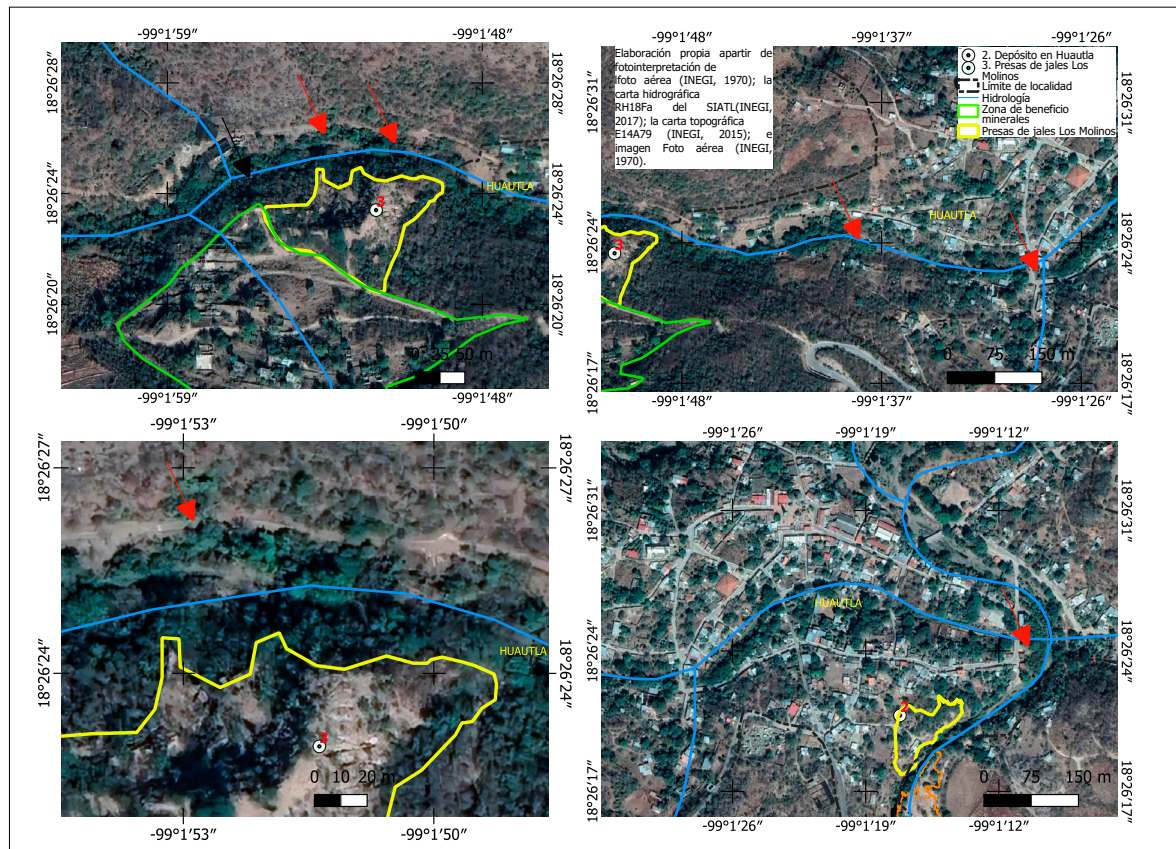


Figura 3. Localización de los jales respecto a las zonas de beneficio de minerales.

Nota: la zona más antigua (Tlalchichilpa) en la parte inferior izquierda y la más reciente (Los Molinos) en la parte superior izquierda. Obsérvese la proximidad de jales, minas y zonas de beneficio respecto a los arroyos y ríos. a. Imagen de 1970; b. imagen de 1995; c. imagen de 2021.



Nota: la línea azul de la capa hidrológica no empata con la foto aérea, utilícese sólo como referencia del cauce. Fuente: INEGI (1970).

Figura 4. Imágenes de 1970 de la zona de beneficio Los Molinos, la rotura de la presa de jales y el arrastre de materiales. a. Zona de beneficio de minerales (flechas rojas para presas de jales y flecha negra para materiales de reserva); b. presa de jales rota y dispersión de jales (flecha roja); c. arrastre de jales por el río (flechas rojas); d. arrastre de los jales al río principal, la flecha roja indica la combinación de ambos ríos cambiando la tonalidad.

La clasificación no supervisada (CNS) solo pudo aplicarse a la ortofoto (1995) (Figura 9) y la escena del mapa satelital (2021) (Figuras 10). En la ortofoto, el programa asignó la clase 11 a área sin vegetación (jales, minas, carreteras, brechas y construcciones). En el mapa satelital la clase 2 fue asignada a jales, sitios en la población de Huautla, tierras de cultivo, construcciones, terracería y carreteras; las clases 8-10 para la vegetación sobre los jales en Las Presas, Los Molinos y Huautla, en Tlatchichilpa no se presentó esta relación (Figura 10). La clasificación no supervisada agrupó a los jales con otros elementos perturbados y sin vegetación en las imágenes.

El OBIA realizó una clasificación pobre de los elementos en la fotografía aérea (Figura 11). OBIA solo asignó correctamente las clases desplazamiento de jales y suelo desnudo a las presas de jales, algunos sitios con suelo expuesto sobre el cauce del río desde Los Molinos hasta la mina Peregrina, áreas sin vegetación o con vegetación muy escasa, cultivos y pastizales. La clase suelo desnudo se asignó a sitios sin vegetación, como construcciones, carreteras o caminos de terracería. Vegetación asociada al jal fue asignada incorrectamente a zonas con vegetación escasa sin jales. El OBIA clasificó adecuadamente algunos elementos dentro de la foto aérea, incluidos los jales,



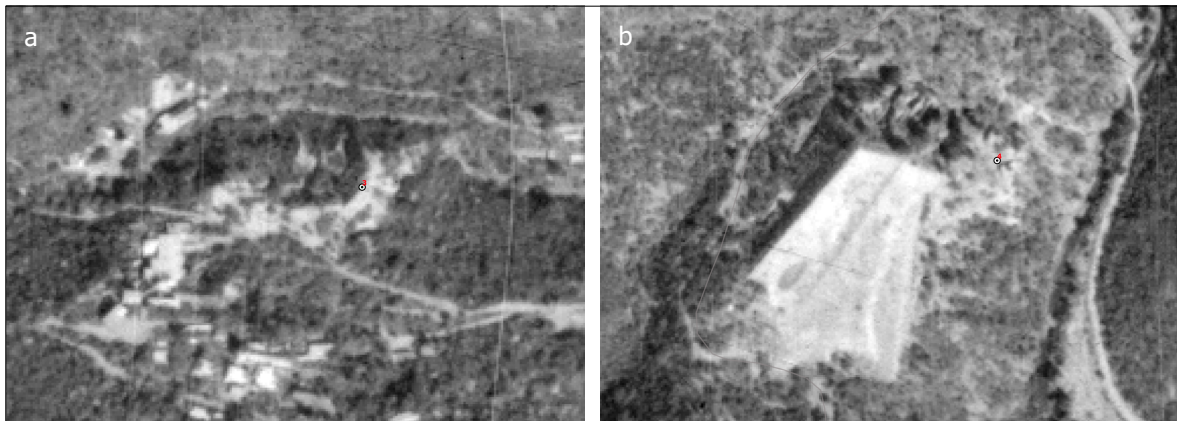


Figura 5. Presas de jales en 1995. a. Los Molinos; b. Las Presas. Obsérvese que las presas de Los Molinos están recubiertas de vegetación. Fuente: INEGI (1995).

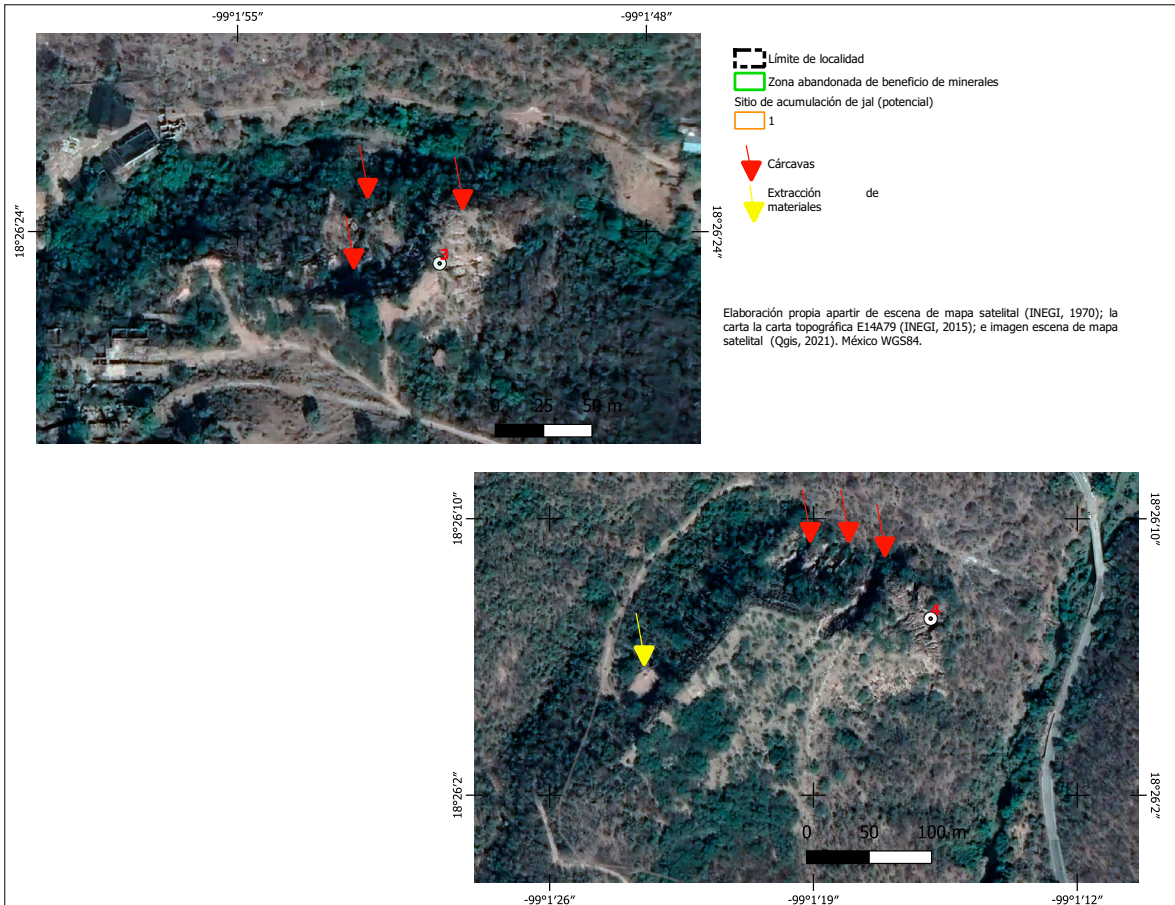


Figura 6. Formación de cárcavas en presas de jales (flechas rojas) y escasa vegetación. a. Los Molinos; b. Las Presas con extracción de jales (flecha amarilla). Fuente: Qgis (2021).





Figura 7. Evidencias de erosión de las presas de jales. a. Cárcavas inmensas; b. exhumación de raíces. Fotos: Roberto Márquez Huitzil, 2021.

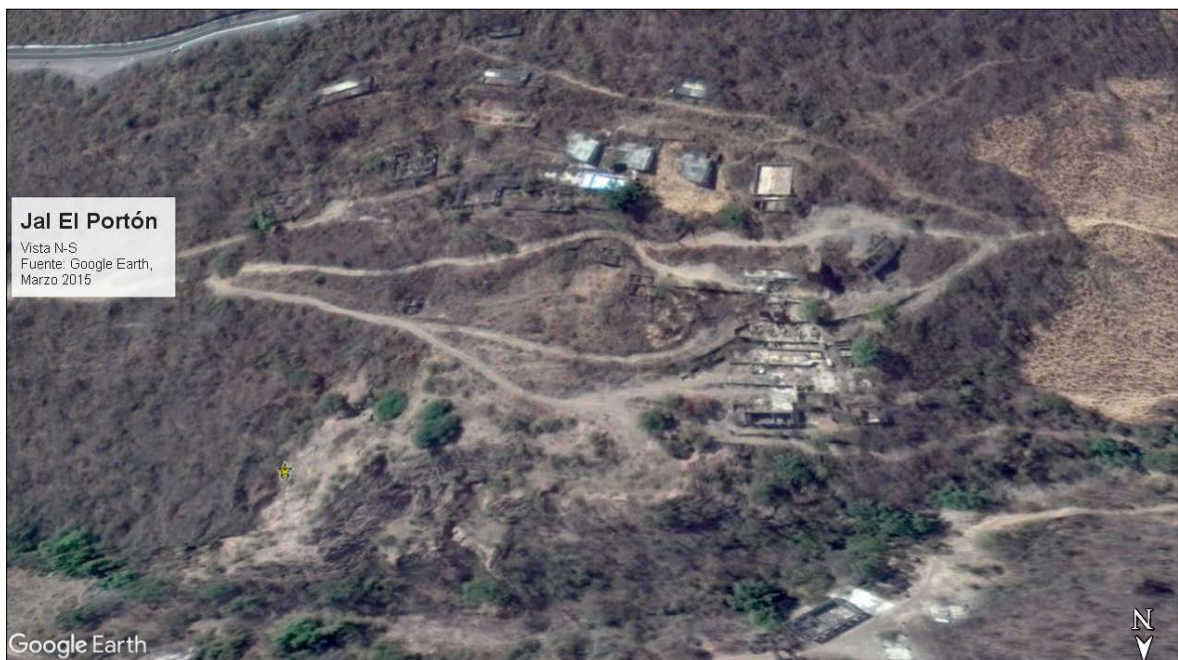


Figura 8. Zona de beneficio de minerales y presas de jales en Los Molinos, a. Época de lluvias; b. Época de secas. Obsérvese que los sitios desprovistos de vegetación en la parte inferior del cerro corresponden a los jales. Fuente: Google Earth (2021).



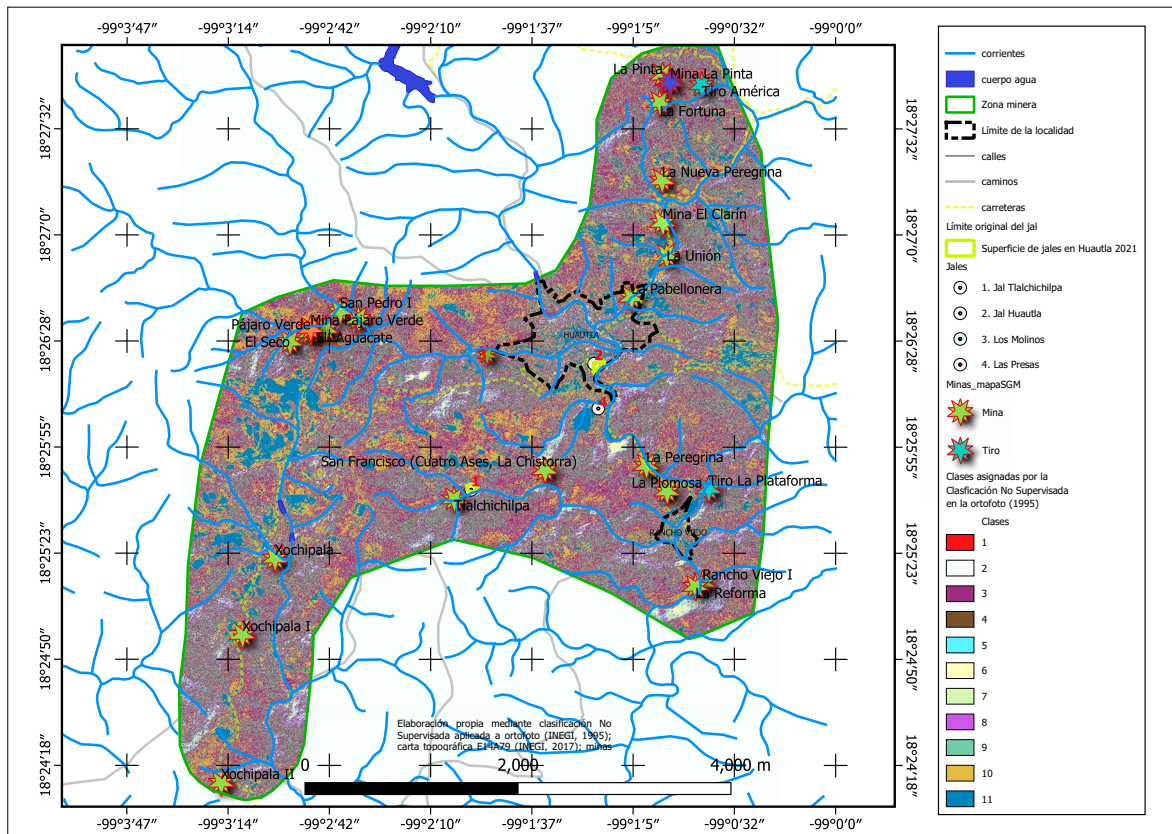


Figura 9. Clasificación no supervisada (CNS) de la ortofoto (INEGI,1995). Los números en la leyenda corresponden a las clases asignadas automáticamente por el análisis tomando como base las características de cada pixel en la imagen.

pero la clasificación del resto de los elementos fue confusa.

En la ortofoto (1995), el OBIA realizó una mejor clasificación, asignando siete de once clases (Figura 12). La clase selva baja caducifolia se asignó a la parte noroeste, la porción sur de la imagen y la periferia de Huautla, sin diferenciar los elementos que la forman. La clase vegetación asociada al jal fue asignada a los jales en Los Molinos y Las Presas, a las minas La Pabellonera y Tiro América, las minas restantes fueron clasificadas como selva baja caducifolia. La categoría suelo desnudo se asignó adecuadamente en la imagen.

El OBIA asignó ocho de las once clases en la escena del mapa satelital, pero de manera más adecuada (Figuras 13). A los jales sin cobertura vegetal, el OBIA les asignó la clase materiales den-

tro de la presa de jal en Las Presas y Los Molinos. Vegetación secundaria de selva baja caducifolia se asignó a la vegetación sobre las presas de jales en Las Presas y en Los Molinos, así como vegetación asociada al jal aunque también a algunas áreas fuera de los jales. Alrededor de las presas de jales se asignaron las clases selva baja caducifolia, selva baja caducifolia densa y vegetación secundaria de selva baja caducifolia. En parte de la población de Huautla se asignó materiales dentro de la presa de jal, selva baja caducifolia y vegetación asociada al jal. las clases vegetación asociada al jal, selva baja caducifolia y selva baja caducifolia densa fueron asignadas a las minas La Unión, La Fortuna (Tiro América), Peregrina (La Plomosa); el resto de las minas no presentaron esta relación. El OBIA clasificó de manera más adecuada los elementos

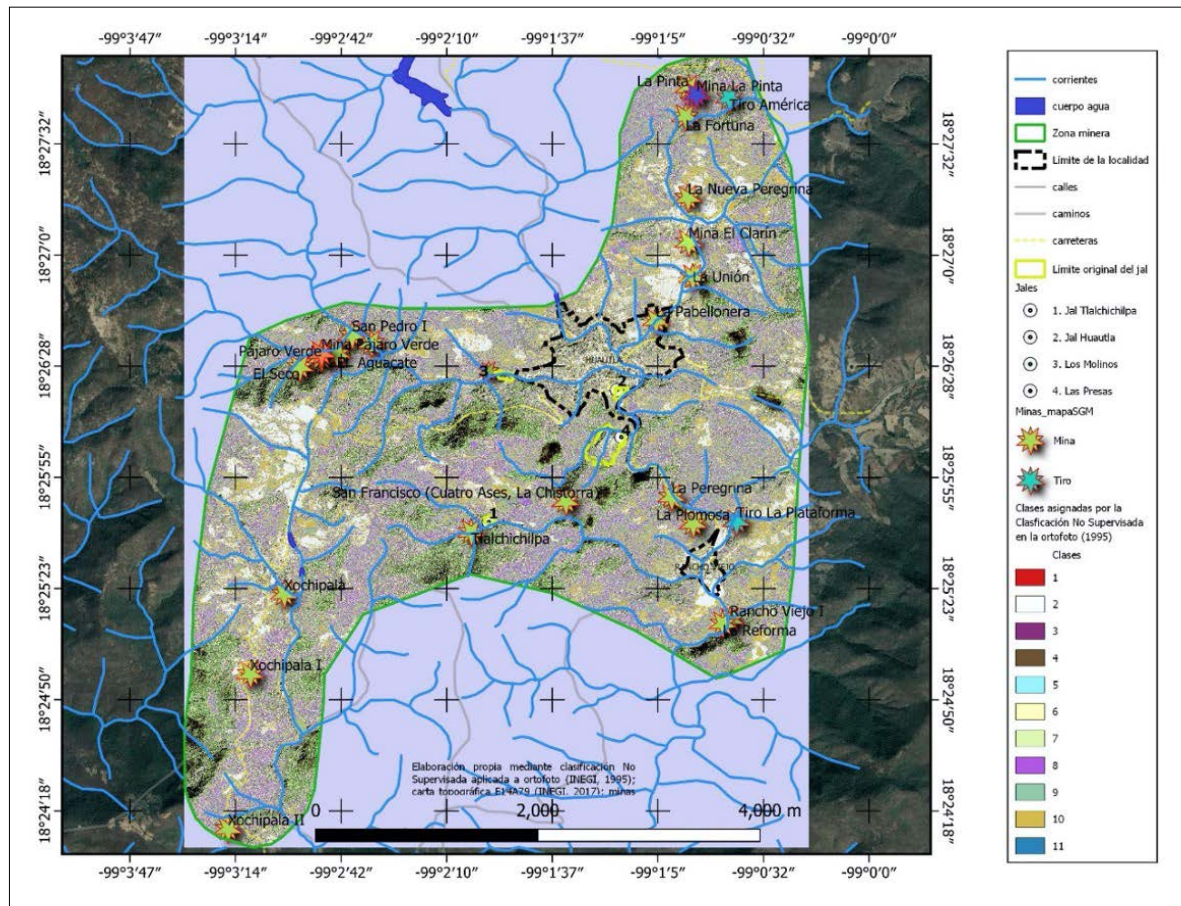


Figura 10. Clasificación no supervisada (CNS) de la escena del mapa satelital (Qgis, 2021). Los números en la leyenda corresponden a las clases asignadas automáticamente por el análisis tomando como base las características de cada pixel en la imagen.

en la escena del mapa satelital, principalmente los jales.

Al realizar la segmentación en el OBIA se identificaron 294 polígonos como jales potenciales de las imágenes de 1970 y 1995. La fotointerpretación permitió descartar 198 polígonos con características distintas a los jales conocidos a través del tiempo (Tabla 2). Los jales conocidos presentaron en común al menos las clases materiales dentro de la presa de jales, vegetación asociada al jal, vegetación secundaria de selva baja caducifolia y selva baja caducifolia, por lo que eliminamos los jales potenciales sin estas clases.

El valor de similitud se obtuvo para 24 jales potenciales restantes (11 identificados en la fo-

tografía aérea y 13 en la ortofoto). Los valores de similitud máximos se presentaron entre las minas, minas con jales conocidos y potenciales, pero no entre jales conocidos y potenciales. El valor entre jales en Huautla y Las Presas fue de 0.67, entre Huautla y Los Molinos de 0.88, entre los jales de Molinos y Las Presas de 0.85 (Tabla 2). Los jales en Huautla presentaron mayor similitud (1) con nueve minas, Las Presas con las minas Peregrina, Xochipala y Santiago (1); Los Molinos (0.83) con las minas Xochipala, Santiago y Peregrina. El número de jales potenciales se redujo al comparar los Valores de Similitud con jales y minas. Los jales potenciales presentaron mayor similitud con al menos uno de los jales conocidos o con una mina.



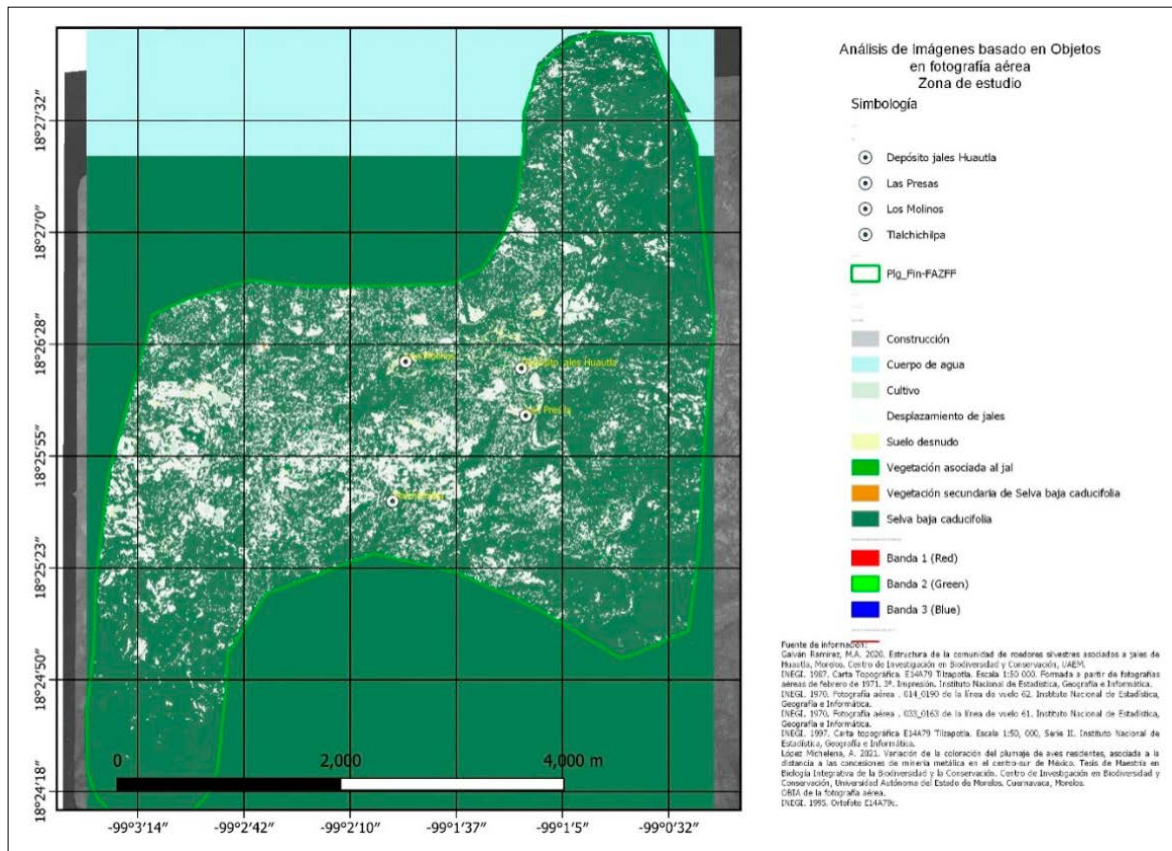


Figura 11. OBIA de la escena de la foto aérea para la zona de estudio. Fuente: INEGI (1970).

Los jales en Huautla presentaron máxima similitud con los jales potenciales 4 y 8 de la foto aérea y, 12, 26 y 36 de la ortofoto; Los Molinos presentó similitud con el jal potencial 70 de la ortofoto; Las Presas tuvo máxima similitud con los jales 1, 9 y 16 de la foto aérea.

### Consulta con habitantes, representantes ejidales y verificación de campo

En los recorridos de campo se verificaron los jales conocidos, y se encontró un depósito de jales en Huautla que no había sido previamente reportado. Dicho jal fue identificado en las clasificaciones de imágenes y presentado por las autoridades ejidales. También se verificaron jales potenciales en zona de depositación en los ríos. Los jales en Tlalchichilpa fueron verificados, aunque eran desconocidos para las autoridades ejidales.

## DISCUSIÓN

El uso de distintas fuentes de información resultó trascendente para la presente investigación. La integración de distintas fuentes clarificó el entendimiento de la dinámica minera y sus impactos en la zona (Cuadro 1). Distintas fuentes de información permiten identificar los cambios a través del tiempo, complementándose entre sí (Erice, 2010; SEMARNAT, 2013).

Compilación de información georreferenciada

Algunas investigaciones, narraciones históricas, tesis, reportes técnicos, entre otros, mencionan la localización y georreferencia de minas, jales e infraestructura, mencionan su origen y describen su dinámica a través del tiempo (Valle, 1991; Nieto, 1997; Esteller, 2015; Barats *et al.*, 2016). Otra parte de la literatura se enfocó a los impactos ambien-

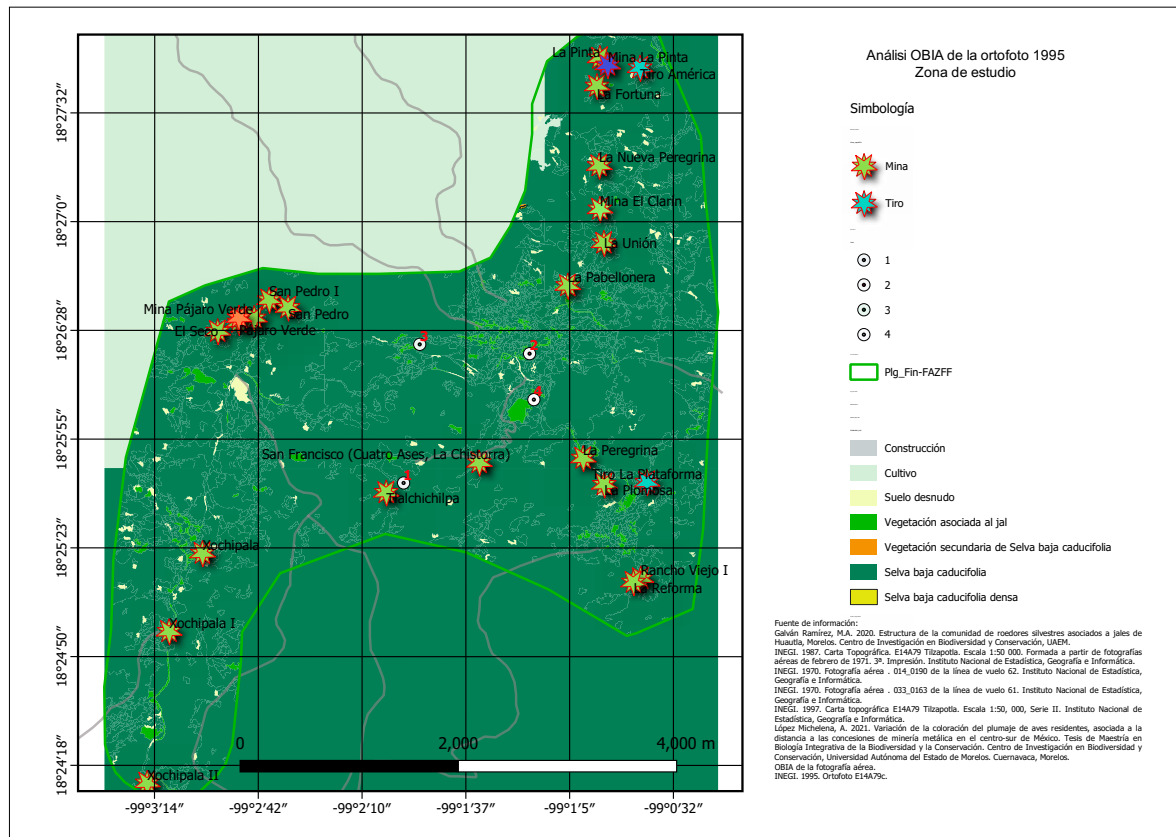


Figura 12. OBIA de la escena de la ortofoto para la zona de estudio. Fuente: INEGI (1995).

tales y ecológicos generados por los jales mineros (Tovar-Sánchez, 2012; De la Cruz, 2018; Esteves, 2018; Farfán, 2019; Galván, 2020) (Cuadro 1). La información documental es un punto de partida para cuantificar los impactos mineros y planificar su mitigación (Kussmaul, 1989; Márquez-Huitzil, 2005). Dependiendo del tipo de documento consultado es la perspectiva que nos ofrece acerca de esta actividad.

### Descripción y análisis de imágenes

El reconocimiento visual permitió detectar objetos, características o fenómenos sin estar físicamente en el sitio (Dwivedi, 2019). Este análisis también puede permitir la identificación de eventos pasados no documentados, como el derrame de la presa de jales y su dispersión a través de los cuerpos de agua o los cambios y afectaciones a las presas de jales por el paso del tiempo, pudiendo inferir el

arrastre de miles de toneladas de jales. Los jales depositados al aire libre y no encontrarse estabilizados son arrastrados hacia los cauces (Ramos-Arroyo y Siebe-Grabach, 2006; Rivera, 2009). En Huautla, ocurre con los jales depositados al borde del Arroyo Chico, unido a los arroyos Juchitlán, Salitre y Atlipa, para formar el Arroyo Grande que desemboca al río Amacuzac (Santoyo *et al.*, 2020) (Figura 14). Existen antecedentes en el país sobre derrames de presas de jales como el Herrero de la Bufa, Durango o Buenavista del cobre, Sonora (Aparicio y Hernández, 2017; Luque *et al.*, 2019). La fotointerpretación también permitió observar cambios en los materiales de reserva y la morfología de las presas de jales en Los Molinos, entre 1970 y 1995. El uso de imágenes históricas de Google Earth también permitió identificar la ausencia de cambios en la vegetación asociada a los jales, entre estaciones y entre años, en una zona caracterizada





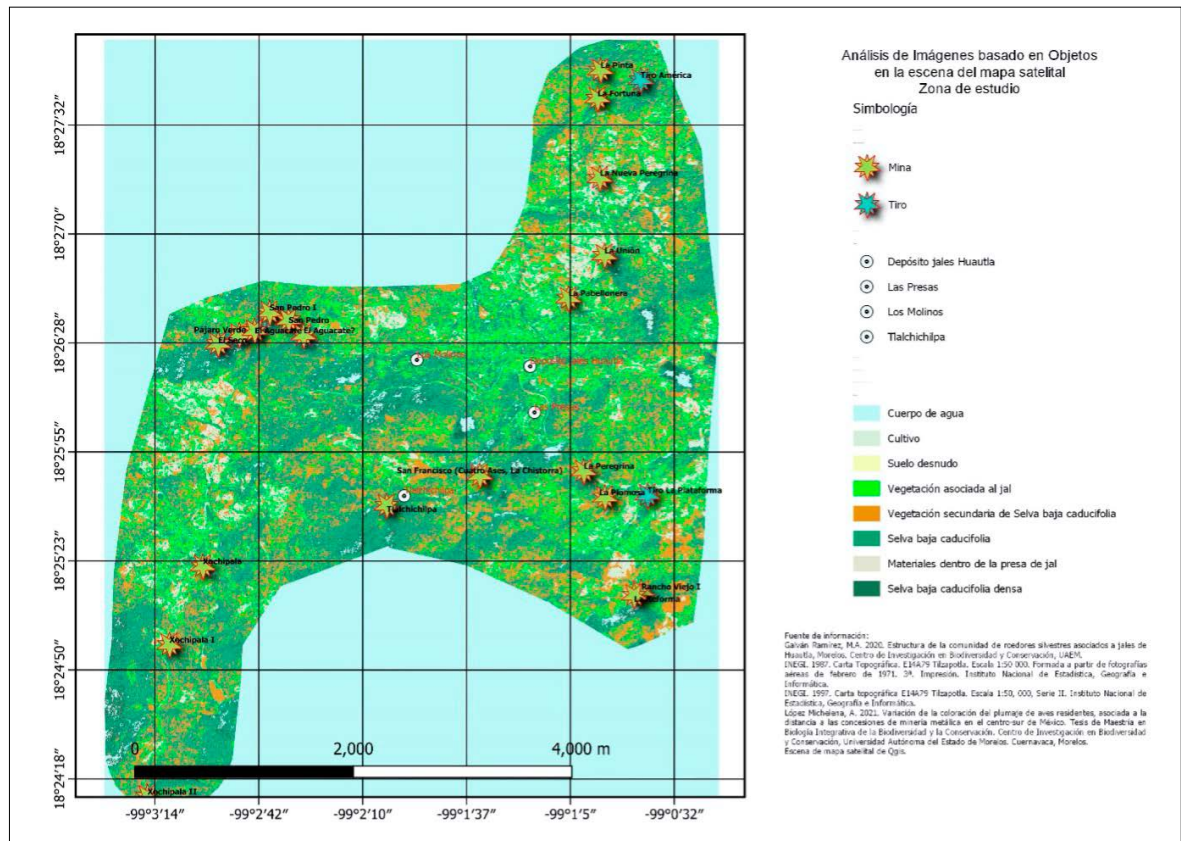


Figura 13. OBIA de la escena del mapa satelital para la zona de estudio.

por cambios contrastantes en la vegetación de selva estacional. La fotointerpretación de imágenes ayuda a caracterizar y valorar áreas afectadas por las actividades humanas, sus relaciones y patrones espaciales (Manzanares, 2005; Charou *et al.*, 2010; ELAW, 2010; Posada *et al.*, 2012; Salazar, 2016).

Las clasificaciones de imágenes por píxeles o por objetos complementan el conocimiento de los procesos y características relacionadas con la minería. La clasificación de las ortofotos y mapas satelitales permitió obtener resultados satisfactorios, a pesar de no contar con las características de las imágenes de satélite o de las imágenes VANT (Vuelos Aéreos No Tripulados) utilizadas comúnmente para estos análisis (De Luca *et al.*, 2019, Hinojosa *et al.*, 2021, Dervisoglu *et al.*, 2020). Las técnicas simples e intuitivas aplicadas directamente a una gran base de datos de píxeles como las imágenes de percepción

remota pueden ser limitadas al no lograr agrupar datos de muy alta dimensión (Olaode *et al.*, 2014). Sin embargo, en imágenes de satélite como Sentinel o Landsat de resolución de 10 o 15m no se aprecian adecuadamente los jales de esta zona. La clasificación de distintos tipos de imágenes permitió resaltar características de la vegetación asociada a los jales y otros sitios desnudos, como la ausencia de una sucesión vegetal. Las imágenes de percepción remota utilizadas en este estudio, su accesibilidad, secuencia temporal y alta resolución, permitieron generar un método accesible que brindara un panorama de la minería durante e inmediatamente al término de las actividades mineras, extrapolable a otros estudios. Entendiendo que, a pesar de que la resolución, la precisión al clasificarlas varía dependiendo del tipo de la imagen y el método de clasificación utilizado.

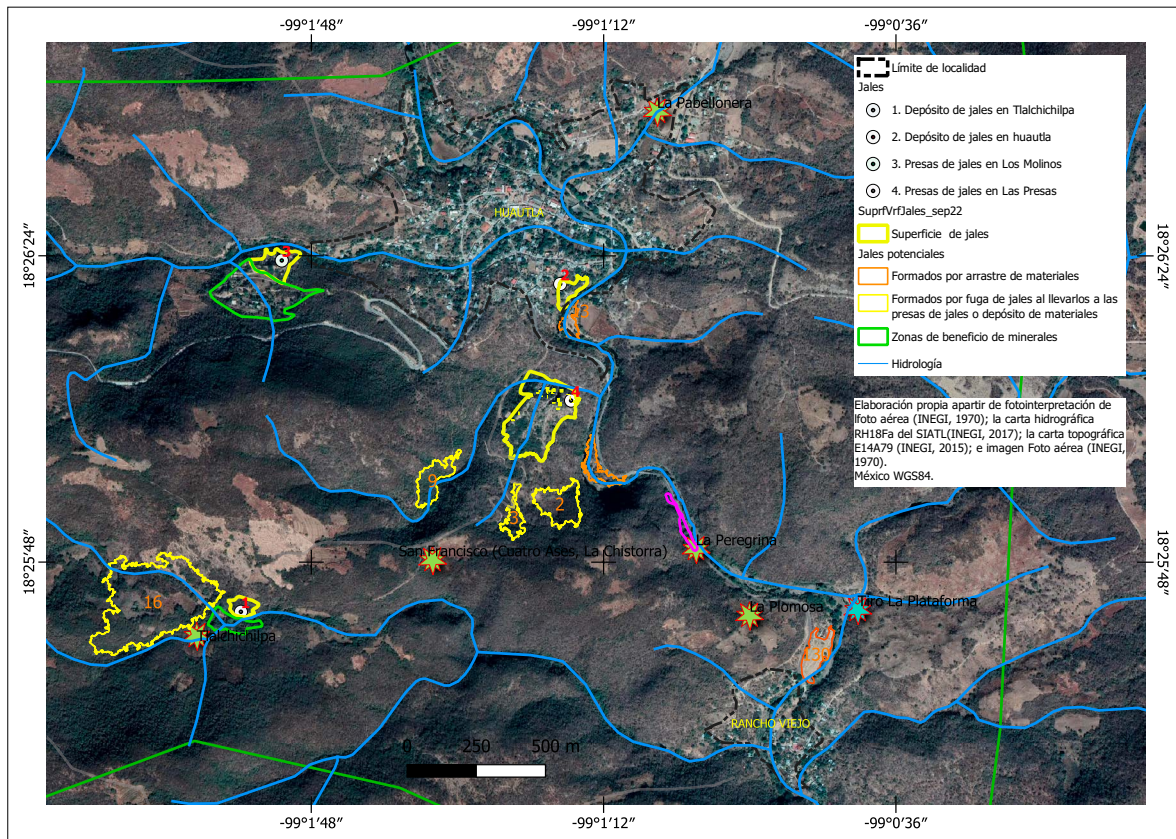


Figura 14. Distribución de los jales, jales potenciales formados por el arrastre de suelo, respecto a los ríos y arroyos en la zona, así como su distancia respecto a los asentamientos humanos en Huautla y Rancho viejo.

Lo que parecerían imprecisiones en la clasificación de imágenes al agrupar elementos como los jales y los suelos desnudo en la misma categoría, pudo explicarse con las otras fuentes de información. Entender los procesos a nivel de paisaje, la revisión documental y la comunicación con los pobladores permitió encontrar otras respuestas. Algunas explicaciones son el transporte de materiales desde las minas hacia la zona de beneficio de minerales durante la explotación minera, la manipulación fuera de algunas minas, el arrastre de los por erosión desde las zonas de depósito o las presas (Nieto, 1997; Aguirre-Salgado *et al.*, 2017), ya que se trata de tecnosuelos (Rossiter, 2007) o la conducción de los jales en forma de lodos por tuberías con fugas desde Los Molinos hacia Las Presas (P. Abarca, R. Palacios, comunicación personal, 2021);

o bien el uso local de jales para el relleno de cárcavas, el mantenimiento y nivelación de carreteras (Kiere, comunicación personal, 2021), el uso en la construcción de viviendas o el asentamiento de viviendas o las evidencias de extracción de toneladas de jales, observados durante los recorridos de campo y la fotointerpretación (Figuras 5b, 15). Pudieron observarse la zona de beneficio de minerales y las presas de jales en Los Molinos a menos de 500 m de la población de Huautla, además que los jales y las minas asentados en la vecindad de ríos que pasan a través de las poblaciones de Huautla y Rancho Viejo (Figura 14). Un uso normalizado de jales en las actividades humanas tiene un efecto en su salud por las sustancias tóxicas que contienen (Cervantes-Ramírez *et al.*, 2018). Estos aspectos explican que los impactos sociales y ecológicos de la en la zona.



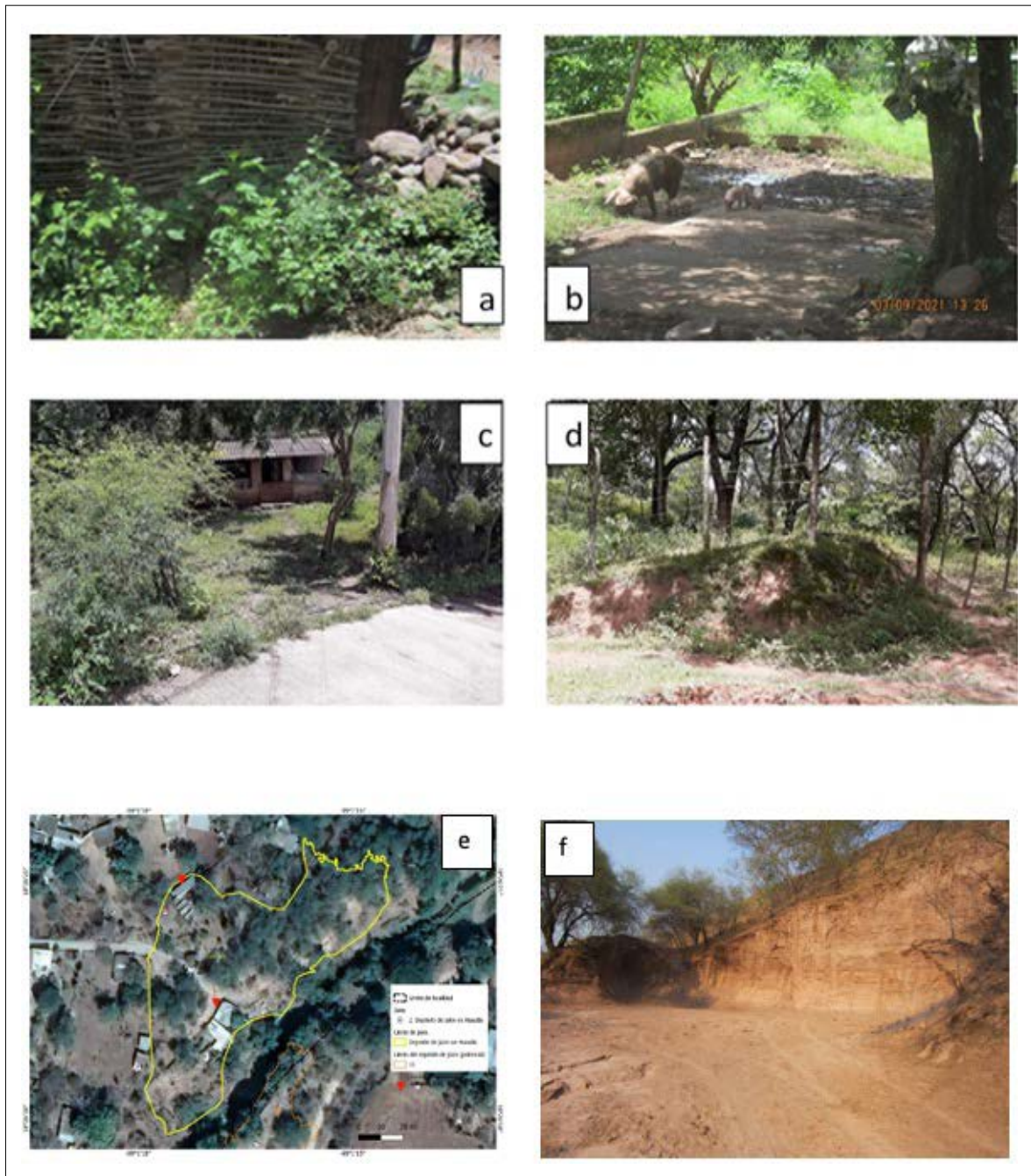


Figura 15. Usos de jales en la zona. a. Materiales para relleno de muros; b. Pastoreo sobre jales; c. Construcción sobre jales; d. Jales remanentes; e. Vivienda construida sobre el depósito de jales en Huautla (línea amarilla señala límite del jal, flechas rojas señalan viviendas); f. Extracción de jales en Las Presas, sitio señalado en la Figura 5b. Foto: Roberto Márquez Huitzil, 2017.

Las otras fuentes de información permitieron encontrar diferentes explicaciones a la clasificación de las imágenes de percepción remota. Los jales potenciales presentaron valores altos de similitud con las minas y los jales conocidos. La similitud podría explicarse por la dinámica de la actividad minera en la zona, aplicada anteriormente. Considerando la distribución de las minas y el movimiento de materiales es posible que a su alrededor se depositaran materiales producto de la apertura de minas o del transporte de materiales. Las actividades mineras en combinación con los procesos naturales como la erosión y la depositación en los ríos, podría explicar la similitud entre minas, jales conocidos y jales potenciales.

### **Consulta con habitantes, representantes ejidales y verificación de campo**

Los representantes ejidales, algunos investigadores y habitantes, así como los recorridos de campo, generaron información importante para este estudio. Información importante como la determinación de la fecha de término de la actividad minera entre 1993 y 1995 que se concentró en el área de Los Molinos, la mina San Joaquín y El Portón (Nieto, 1997; Velasco *et al.*, 2004; P. Abarca, A. Palacios, comunicación personal, 2021; M. Alcocer, K. Morán, A. Palacios, 2022) (Figura 3); la confirmación del rompimiento de la presa de jales del lado oeste en los Molinos, entre 1968 y 1969, observada previamente en la foto aérea de 1970 (J. Palacios, comunicación personal, 2021; A. Palacios, comunicación personal, 2022) (Figuras 4). Confirmación del uso de los jales para nivelación, arreglo de caminos o cárcavas en los terrenos, la construcción de viviendas o para la introducción de tubería de agua potable y para detectar su extracción y uso (L. Kiere, comunicación personal, 2017; A. Palacios, F. Cruz, M Domínguez, comunicación personal, 2022) (Figura 5 y 15f). Algunas investigaciones resaltan la importancia de tener datos de percepción remota como contrapeso a la percepción local (y viceversa), por tanto, estos datos deben considerarse simultáneamente (Twongyirwe *et al.*, 2017). La comunicación personal enriqueció y dio mayor certidumbre a los resultados por su conocimiento y vivencia de los pobladores res-

pecto a las actividades mineras y al uso actual de jales y minas.

Las verificaciones en campo permitieron corroborar características particulares asociadas a los jales, en general y, en particular, entre estaciones del año; así como cambios a través del tiempo. Durante los recorridos de campo observamos lo siguiente: 1) características y cambios en los depósitos de jales (Figura 6); 2) verificamos depósitos de jales conocidos y potenciales; 3) evidencias de erosión y depositación de materiales (Figura 6, 7 y 14), y 4) cambios en la vegetación a lo largo del tiempo y entre estaciones de lluvias y secas, comparándolas entre áreas (Figura 8).

Del mismo modo, podemos apreciar que los costos de numerosos efectos negativos dejados por la minería no son cubiertos por las empresas, derivando en afectaciones al ambiente y a la sociedad cuya mitigación es transferida a la sociedad (Russi y Martínez-Alier, 2002). Incluso, como en este caso, las empresas pueden desaparecer abruptamente de un sitio sin cumplir ni con los compromisos laborales ni con responsabilidad socioambiental.

## **CONCLUSIONES**

El uso de distintas fuentes de información resulta indispensable para tener un panorama completo de una actividad compleja como la minería. Pues no solo permite identificar y describir con mayor precisión los jales y las minas, sino conocer la dinámica de la actividad minera que los generó y los efectos en la sociedad y los ecosistemas. La recopilación de información documental y cartográfica permitió ubicar los jales y obtener una perspectiva histórica de la minería. El reconocimiento visual es indispensable para describir los impactos a través del tiempo y proponer soluciones para reducir los riesgos y prevenir nuevos eventos que amenacen a la sociedad y al ambiente. El uso de otro tipo de imágenes obtenidas por percepción remota, su accesibilidad, secuencia temporal y alta resolución y su análisis con métodos automatizados y semi-automatizados ofrece un panorama durante la explotación minera hasta su término, así como los cambios hasta la actualidad. La precisión al clasificar las imágenes

varía dependiendo de su tipo y el método de clasificación utilizado. Aunque en algunos casos la clasificación parecería catalogar inadecuadamente algunos elementos, como la presencia de materiales en la zona urbanizada y en las carreteras, recurrir a otras fuentes de información como la documental, la consulta a los pobladores o los recorridos de campo, permitirían confirmar o refutar los resultados de las clasificaciones. La información documental se complementa con la de percepción remota y las comunicaciones personales con los habitantes, así como con los recorridos de campo.

Un análisis a través del tiempo permite entender y predecir los cambios de los residuos mineros y sus impactos a otras escalas para prevenir, evitar o mitigar sus efectos. Esta información permite entender tanto la dinámica de estos sitios durante el período activo de la minería, así como una vez terminada dicha actividad. Esta combinación de fuentes de información permite obtener una interpretación completa de la zona y encontrar explicaciones sobre la historia de los procesos que deseamos entender.

## AGRADECIMIENTOS

RMH agradece al CONACyT RMH por la beca de doctorado número 778992. Al Doctorado en Ciencias Naturales de la Universidad Autónoma del Estado de Morelos (UAEM) y a la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM) por facilitar gran parte de la literatura para este trabajo.

## REFERENCIAS

Aguirre-Salado, C. A., Miranda-Aragón, L., Pompa-García, M., Reyes-Hernández, H., Soubervielle-Montalvo, C., Flores-Cano, J. A. y Méndez-Cortés, H. (2017). Improving Identification of Areas for Ecological Restoration for Conservation by Integrating USLE and MCDA in a GIS-Environment: A Pilot Study in a Priority Region Northern Mexico. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 6(262), 1-17. <https://doi.org/10.3390/ijgi6090262>

Aparicio, A.T. y Hernández Canales, P.J. (2017). Gestión de riesgos y desastres socioambientales. El caso de la mina Buenavista del Cobre de Cananea. *Investigaciones Geográficas*, 93, 1- 14. <https://doi.org/10.14350/riig.54770>

ASGMI. (2010). *Pasivos Ambientales Mineros. Manual para el Inventario de Minas Abandonadas o Paralizadas*. Venezuela. Asociación de Servicios de Geología y Minería Iberoamericanos. XVI Asamblea General Ordinaria. Barquisimeto, Venezuela, 2010. Disponible en [https://asgmi.org/wp-content/uploads/2018/05/Manual\\_Inventario\\_PAM\\_Completo.pdf](https://asgmi.org/wp-content/uploads/2018/05/Manual_Inventario_PAM_Completo.pdf)

Barats, A., Orani, A.M., Renac, C., Goudour, J. P., Durrieu, G., Saint-Martin, H., Esteller, M. V. y Garrido-Hoyos, S. E. (2016). Behaviour and mobility of arsenic in a Mexican hydrosystem impacted by past mining activities. *Arsenic Research and Global Sustainability*, 191-192. <https://doi.org/10.1201/b20466-93>

CartoMinMex. (2022). Cartografía minera. Herramienta web para el Sector minero y Público en General. Dirección General de Minas. <https://portalags1.economia.gob.mx/arcgis/apps/webappviewer/index.html?id=1f22ba130b0e40d888bfc3b7fb5d3b1b>

Cervantes-Ramírez, L.T., Ramírez-López, M., Patricia Mussali-Galante, M. L. Ortiz-Hernández, Sánchez-Salinas, E. y Tovar-Sánchez, E. (2018). Heavy metal biomagnification and genotoxic damage in two trophic levels exposed to mine tailings: a network theory approach. *Revista Chilena de Historia Natural*, 91. <https://revchilhistnat.biomedcentral.com/articles/10.1186/s40693-018-0076-7>. <https://doi.org/10.1186/s40693-018-0076-7>

Charou, E., Stefouli, M., Dimitrakopoulos, D., Vasiliou, E. y Mavrantza, O. D. (2010). Using Remote Sensing to Assess Impact of Mining Activities on Land and Water Resources. *Mine Water and the Environment*, 29, 45-52. <https://doi.org/10.1007/s10230-010-0098-0>

Dávila Luna, J., Díaz Caravantes, R. E., Navarro Navarro, L.A. y Romeo Méndez, E. (2018). Las presas de jales en el noroeste del estado de Sonora: una aproximación geográfica mediante percepción remota. *Investigaciones Geográficas*, 97, 1-18. <https://doi.org/10.14350/riig.59624>

De la Cruz Guarneros, N. (2018). *Efecto de la bioacumulación de metales en la población de Liomys irroratus (Gray 1868) que habita los jales de Huautla, Morelos: un enfoque multibiomarcadores*. Tesis de maestría. Centro de Investigación en Biotecnología, Universidad Autónoma del Estado de Morelos. Disponible en <http://riia.uaem.mx/xmlui/handle/20.500.12055/476>

De Luca, G., Silva, J., Cerasoli, S., Araújo, J., Campos, J., Di Fazio, S. y Modica, G. (2019). Object-Based Land Cover Classification of Cork Oak Woodlands using UAV Imagery and Orfeo ToolBox. *Remote Sensing*, 11, 1238. <https://doi.org/10.3390/rs11101238>



- Dervisoglu, A., Bilgilioglu, B. B. y Yagmur, N. (2020). Comparison of Pixel-Based and Object-Based Classification Methods in Determination of Wetland Coastline. *International Journal of Environment and Geoinformatics*, 7(2), 213-220. <https://doi.org/10.30897/ijgeo.713307>
- Díaz González, F. A., Quintero Torres, S. V., Triana Correa, J. S. y Morón Hernández, D.C. (2014). *Aproximación a los sistemas de Percepción Remota en satélites pequeños*. Escuela de Ingeniería, Universidad Sergio Arboleda. Bogotá, Colombia. Disponible en <https://bit.ly/3G4whBC>
- Dwivedi, R. S. (2019). *Geospatial Technologies for Land Degradation Assessment and Management*. Massachusetts, E.U.A.: CRC Press, Taylor & Francis Group. <https://doi.org/10.1201/9781315152325>
- ELAW (Environmental Law Alliance Worldwide). (2010). *Guía Para Evaluar EIAs de Proyectos Mineros*. Alianza Mundial de Derecho Ambiental (ELAW). Oregon, EUA. Disponible en <https://bit.ly/2YU3482>
- Eric Gómez, M. X. (2010). *Percepciones, valoraciones e intereses de distintos actores y organizaciones sociales de Mendoza (Gran Mendoza y Malargüe), Argentina, en torno a las temáticas ambientales*. Tesis doctoral. Universidad de Girona. Girona, España. Disponible en <https://bit.ly/3TsGVF>
- Esteller, M. V., Domínguez-Mariani, E., Garrido, S. E. y Avilés, M. (2015). Groundwater pollution by arsenic and other toxic elements in an abandoned silver mine, Mexico. *Environmental Earth Science*, 74(4), 2893-2906. <https://doi.org/10.1007/s12665-015-4315-9>
- Esteves Aguilar, J. (2018). *Evaluación del daño genético y la inestabilidad en el desarrollo del cráneo en la especie centinela Peromyscus melanophrys que habita en zonas mineras*. Centro de Investigación en Biotecnología, Universidad Autónoma del Estado de Morelos. Disponible en <http://riaa.uaem.mx/xmlui/handle/20.500.12055/564>
- Farfán Estrada, E. (2019). *Evaluación del estado de conservación de las poblaciones de murciélagos insectívoros de 4 refugios cavernícolas de la Reserva de la Biosfera Sierra de Huautla, México*. Tesis de Maestría. Biología Integrativa de la Biodiversidad y la Conservación. Centro de Investigación en Biodiversidad y Conservación, Universidad Autónoma del Estado de Morelos. Cuernavaca, Morelos. Disponible en <http://riaa.uaem.mx/xmlui/handle/20.500.12055/538>
- Galván Ramírez, M. A. (2020). *Estructura de la comunidad de roedores silvestres asociados a jales de Huautla, Morelos*. Tesis de Maestría. Centro de Investigación en Biodiversidad y Conservación, UAEM. Disponible en <http://riaa.uaem.mx/handle/20.500.12055/1269>
- Garrido-Hoyos, S. y L. Romero-Velázquez. (2016). Synthesis of Minerals with Iron Oxide and Hydroxide Contents as a Sorption Medium to Remove Arsenic from Water for Human Consumption. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 13,69,1-9. <https://doi.org/10.3390/ijerph13010069>
- Hinojosa Espinoza, S. I., Gallardo-Salazar, J. L., Hinojosa-Espinoza, F. J. C. y Meléndez-Soto, A. (2021). Evaluación de parámetros de segmentación en OBIA para la clasificación de coberturas del suelo a partir de imágenes vant. *Revista de teledetección*, 58, 89-103, <https://doi.org/10.4995/raet.2021.14782>
- INEGI. (1970). Fotografía aérea 014\_0190 de la línea de vuelo 62. Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática. Para adquisición: <https://www.inegi.org.mx/app/geo2/siiv/>
- INEGI. (1970). Fotografía aérea 033\_0163 de la línea de vuelo 61. Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática. Para adquisición: <https://www.inegi.org.mx/app/geo2/siiv/>
- INEGI. (1987). Conjunto de datos vectoriales topográficos. Carta E14A79 Tilzapotla, 1:50 000. Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática.
- INEGI. (1995). Ortofoto E14A79C. Fotografías aéreas, 1:75 000. Disponible en <https://www.inegi.org.mx/temas/imagenes/ortoimagenes/#Descargas>
- INEGI. (1997). Conjunto de datos vectoriales de información topográfica E14A79 Tilzapotla, Serie II, 1:50 000. Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática. Disponible en <https://www.inegi.org.mx/programas/topografia/50000/#Descargas>
- INEGI. (2009). Conjunto de datos vectoriales de vegetación y uso del suelo E14A79 Tilzapotla, Serie III 1:50 000. Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática.
- INEGI. (2015). Conjunto de datos vectoriales de información topográfica E14A79 Tilzapotla, Serie IV, 1:50 000. Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática.
- Jongman, R. H. G., Ter Braak, C. J. F. y Van Tongeren, O. F. R. (1997). *Data analysis in community and landscape ecology*. Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511525575>
- Kiere, L. M., Osorio-Beristain, M., Sorani, V. Prieto-Torres, D. A., Navarro-Sigüenza, A. G. y Sánchez-González, L. A. (2021). Do metal mines and their runoff affect plumage color? Streak-backed Orioles in Mexico show unexpected patterns. *Ornithological Applications*, 123, 1–18. <https://doi.org/10.1093/ornithapp/duab023>
- Kussmaul, S. (1989). La minería en Costa Rica y sus efectos en el ambiente. En D. Zamora (Editor), *El impacto ambiental por la actividad minera en Costa Rica*. EUNA. Heredia, Costa Rica.
- López Michelena, A. (2021). *Variación de la coloración del plumaje de aves residentes, asociada a la distancia a*

- las concesiones de minería metálica en el centro-sur de México. Tesis de Maestría. Biología Integrativa de la Biodiversidad y la Conservación, Centro de Investigación en Biodiversidad y Conservación, Universidad Autónoma del Estado de Morelos. Cuernavaca, Morelos. Disponible en <http://riia.uaem.mx/xmlui/handle/20.500.12055/1571>
- Luque Agraz, D., Murphy, A.D., Jones, E., C Martínez-Yrizar, A., Búrquez Montijo, A., Manrique Gallardo, T. y Esquer Armienta, D. (2019). *Río Sonora: el derrame de la Mina Buenavista del Cobre-Cananea, 2014*. Centro de Investigación en Alimentación y Desarrollo, A.C. Disponible en <https://bit.ly/3UIKvfm>
- Mac Gregor Arroyo, F. (1992). *Ampliación de las operaciones mineras en mina Santiago, Distrito minero de Huautla*. Tesis de Ingeniería de Minas y metalurgista. Facultad de Ingeniería, UNAM. Disponible en <http://132.248.9.195/pmig2016/0175522/Index.html>
- Maldonado, J. N. (2020). *Conducta de exploración en Icterus pustulatus expuestos a un gradiente de concentración de contaminantes de los desechos mineros en Huautla, Morelos*. Tesis de Biología. Facultad de Ciencias Biológicas, Universidad Autónoma del Estado de Morelos. Cuernavaca, Morelos.
- Manzanares Acuña, E., Vega Carrillo, H. R., Escobar León, M. C., Letechipía de León, C., Guzmán Enríquez, L. J., Hernández Dávila, V. M. y Salas Luévano, M. A. (2005). Evaluación de Riesgos ambientales por plomo en la población de Vetagrande, Zacatecas. Reporte Final: UaEN/RI-02-PbVG/INE-02/03081204. Universidad Autónoma de Zacatecas. Disponible en [http://www2.inecc.gob.mx/descargas/sqre/inf\\_vetagrande\\_final\\_1004\\_e\\_ine\\_final.pdf](http://www2.inecc.gob.mx/descargas/sqre/inf_vetagrande_final_1004_e_ine_final.pdf)
- Márquez-Huitzil, R. (2005). *Planificación para la restauración asociada con el aprovechamiento de los recursos naturales*. En O. Sánchez, E. Peters, R. Márquez-Huitzil, E. Vega, G. Portales, M. Valdez y D. Azuara (Eds.), *Temas sobre restauración ecológica*. Diplomado en restauración ecológica. SEMARNAT-INE- U.S. Fish & Wildlife Service- Unidos para la Conservación, A.C. Disponible en [https://www.researchgate.net/publication/291425685\\_Temas\\_sobre\\_Restauracion\\_Ecologica](https://www.researchgate.net/publication/291425685_Temas_sobre_Restauracion_Ecologica)
- Martínez Pacheco, M. L. (2008). *Evaluación de los efectos genotóxicos de metales presentes en el agua de bebida de la población de Huautla, Morelos*. Tesis de Biología. Facultad de Ciencias, UNAM. Disponible en [https://tesiunam.dgb.unam.mx/F?func=find-b-0&local\\_base=TES01](https://tesiunam.dgb.unam.mx/F?func=find-b-0&local_base=TES01)
- Mussali, P. (2008). *Estudio sobre la inducción de daño al ADN en sangre periférica de individuos expuestos a metales en el agua de bebida en la población de Huautla, Morelos*. Tesis de Maestría. Ciencias Biológicas (Biología experimental). Facultad de Medicina, UNAM. Disponible en: [https://tesiunam.dgb.unam.mx/F?func=find-b-0&local\\_base=TES01](https://tesiunam.dgb.unam.mx/F?func=find-b-0&local_base=TES01)
- Nieto Ávila, J. L. (1997). *Proyecto para la ampliación de la mina Cuatro Ases en la Unidad Huautla, de la compañía Rosario México, Huautla, Morelos*. Tesis de Ingeniería de Minas y metalurgista. Facultad de Ingeniería, UNAM. Disponible en: [https://tesiunam.dgb.unam.mx/F?func=find-b-0&local\\_base=TES01](https://tesiunam.dgb.unam.mx/F?func=find-b-0&local_base=TES01)
- Olaode, A., Naghdy, G. y Todd, C. (2014). Unsupervised Classification of Images: A Review. *International Journal of Image Processing (IJIP)*, 8(5), 325-342.
- Pérez Jiménez, S. (2014). *Territorialidades contenciosas en México: El caso de la minería*. Tesis de Maestría. Posgrado en Geografía, Centro de Investigación en Geografía Ambiental, Facultad de Filosofía y Letras, UNAM. Disponible en [https://comisiones.ipgh.org/CARTOGRAFIA/Premio/Tesis\\_2015/Tesis\\_Sol\\_Perez.pdf](https://comisiones.ipgh.org/CARTOGRAFIA/Premio/Tesis_2015/Tesis_Sol_Perez.pdf)
- POEREM. (2013). *Programa de Ordenamiento Ecológico Regional del Estado de Morelos*. Programa de Ordenamiento Ecológico Regional del Estado de Morelos, Memoria técnica. SEMARNAT- Poder ejecutivo de Morelos-Universidad Autónoma del Estado de Morelos. Disponible en [http://obum.zmcuernavaca.morelos.gob.mx/metadata/morelos/poerem/doc/POEREM\\_PROPUESTA.pdf](http://obum.zmcuernavaca.morelos.gob.mx/metadata/morelos/poerem/doc/POEREM_PROPUESTA.pdf)
- Posada, E., Ramírez Daza, H. M. y Espejo Delgado, N. C. (2012). *Manual de prácticas de percepción remota con el programa ERDAS IMAGINE 2011*. Centro de Investigación y Desarrollo en Información Geográfica, CIAF. Bogotá DC, Colombia. Disponible en [https://www.un-spider.org/sites/default/files/ManualERDAS\\_web.pdf](https://www.un-spider.org/sites/default/files/ManualERDAS_web.pdf)
- Qgis. (2021). Escena del mapa Satelital. Quick Map Services. Quantum Gis. Software libre. Disponible en <https://qgis.org/es/site/>
- Ramos-Arroyo, Y. R. y Siebe-Grabach, C. D.. (2006). Estrategia para identificar jales con potencial de riesgo ambiental en un distrito minero: estudio de caso en el Distrito de Guanajuato, México. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 23, 1, 54-74. Disponible en <http://www.rmccg.unam.mx/index.php/rmccg/issue/view/46>
- Reyes Mariano, J. M. (2014). *Propiedades mecánicas de jales para diseño de presas*. Tesis de Maestría en Ingeniería (Geotecnia). Facultad de Ingeniería, Benemérita Universidad Autónoma de Puebla. Puebla, México. Disponible en <https://repositorioinstitucional.buap.mx/handle/20.500.12371/6626?show=full>
- Rivera Castelo, J. A. (2009). *Diseño geotécnico para estabilización del depósito de jales mineros (Presa I), en Nacozari de García, Sonora, México*. Tesis de Ingeniería Geológica. División de Ciencias Exactas

- y Naturales, Universidad de Sonora. Disponible en <http://148.225.114.121/handle/unison/381>
- Rossiter, D.G. (2007). Classification of Urban and Industrial Soils in the World Reference Base for Soil Resources. *Journal of Soils and Sediments*, 7(2), 96-100. <https://doi.org/10.1065/jss2007.02.208>
- Russi, D. y Martínez-Alier, J. (2002). Los pasivos ambientales. *Iconos. Revista de Ciencias Sociales*, 15, 123-131. <https://doi.org/10.17141/iconos.15.2003.1282>
- Salazar Arrieta, S. (2016). *Detección de áreas vulnerables al medio físico en la cuenca del río San Pedro-Mezquitil*. Tesis de Maestría. Ciencias en Gestión Ambiental, Centro Interdisciplinario de Investigación para el Desarrollo Integrado Regional, Unidad Durango, Instituto Politécnico Nacional. Durango, México. Disponible en <https://repositoriodigital.ipn.mx/handle/123456789/23382>
- Salinas Rodríguez, J. M. y García González, J. F. (2010). Carta de Geoquímica por Zinc. Tilzapotla E14A70. Servicio Geológico Mexicano. Disponible en [https://mapserver.sgm.gob.mx/Cartas\\_Online/metadatos\\_geol/89\\_GL\\_ciudad\\_de\\_mexico.html](https://mapserver.sgm.gob.mx/Cartas_Online/metadatos_geol/89_GL_ciudad_de_mexico.html)
- Sánchez-Núñez, J. M., Macías, J. L. Corona-Chávez, P., Martínez-Medina, M., Garduño-Monroy, V. H., Capra, L., García-Tenorio, F. y Cisneros-Máximo, G. (2015). Rompimiento y desborde de presas de jales: el caso de estudio de Tlalpujahua (27 de mayo de 1937). *Ciencia Nicolaita*, 56, 95-199.
- Sánchez Santiró, E. (2002). Plata y privilegios: el real de minas de Huautla, 1709-1821. *Estudios de Historia Novohispana*, 26, 85-123. Disponible en <https://repositorio.unam.mx/contenidos/31245>
- Santoyo Martínez, M. (2020). *Estudio ecotoxicológico sobre la bioacumulación de metales pesados en dos especies vegetales asociadas a los jales de Huautla, Morelos*. Tesis de Doctorado. Ciencias Naturales, Facultad de Ciencias Biológicas, Universidad Autónoma del Estado de Morelos. Cuernavaca, Morelos. Disponible en <http://riaa.uaem.mx/xmlui/handle/20.500.12055/1270>
- SEMARNAT. 2004. NOM-141-SEMARNAT-2003, Que establece el procedimiento para caracterizar los jales, así como las especificaciones y criterios para la caracterización y preparación del sitio, proyecto, construcción, operación y postoperación de presas de jales. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. Diario Oficial de la Federación. 13 de septiembre de 2004. [http://dof.gob.mx/nota\\_detalle.php?codigo=661988&fecha=13/09/2004](http://dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=661988&fecha=13/09/2004)
- SEMARNAT. 2013. Norma Oficial Mexicana NOM-141-SEMARNAT-2003, Que establece el procedimiento para caracterizar los jales, así como las especificaciones y criterios para la caracterización y preparación del sitio, proyecto, construcción, operación y postoperación de presas de jales. México: SEGOB. Diario Oficial de la Federación (DOF) del 13 de septiembre de 2013. Disponible en: <http://www.ordenjuridico.gob.mx/Federal/PE/APF/APC/SEMARNAT/Normas/Oficiales/NOM-141-SEMARNAT-2003.pdf>
- Sipriano Morales, J.A. (2016). *Impactos de la Minería Canadiense en México: Los Casos de Peñasquito en Zacatecas y Los Filos en Guerrero (2005-2013)*. Tesis de licenciatura. Colegio de Estudios Latinoamericanos, Facultad de Filosofía y Letras, Universidad Nacional Autónoma de México. Disponible en: [https://tesiunam.dgb.unam.mx/F?func=find-b-0&local\\_base=TES01](https://tesiunam.dgb.unam.mx/F?func=find-b-0&local_base=TES01)
- Téllez Ramírez, I. y M.T. Sánchez-Salazar. (2018). La expansión territorial de la minería mexicana durante el periodo 2000-2017. Una lectura desde el caso del estado de Morelos. *Investigaciones Geográficas* 96, 1-18. Disponible en [https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0188-46112018000200011](https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0188-46112018000200011)
- Tovar-Sánchez, E., L.T. Cervantes, C. Martínez, E. Rojas, M. Valverde, M.L. Ortiz-Hernández y P. Musali-Galante. (2012). Comparison of two wild rodent species as sentinels of environmental contamination by mine tailings. *Environmental Science Pollution Research*, 19, 1677-1686. <http://dx.doi.org/10.1007/s11356-011-0680-4>
- Twongyirwe, R., M. Bithell, K. Richards, y G. Rees. (2017). Do livelihood typologies influence local perceptions of forest cover change? Evidence from a tropical forested and non-forested rural landscape in western Uganda. *Journal of Rural Studies* 50, 12-29. <https://doi.org/10.1016/j.jrurstud.2016.12.009>
- Valenzuela, C. (2020). *Hematocrito, morfología variante de eritrocitos y presencia de hemoparásitos en Icterus pustulatus y Molothrus aeneus: parámetros basales y relación con la proximidad de desechos mineros en Huautla, Morelos*. Tesis de Biología. Facultad de Ciencias Biológicas, Universidad Autónoma del Estado de Morelos.
- Valle Mejía, C.R. (1991). *Repercusiones en el Espacio Geográfico de la Actividad Minera en Huautla, Morelos, en el Decenio 1980-1989*. Tesis de Licenciatura en Geografía. Colegio de Geografía, Facultad de Filosofía y Letras, UNAM. Disponible en [https://ru.dgb.unam.mx/handle/DGB\\_UNAM/TES01000168332](https://ru.dgb.unam.mx/handle/DGB_UNAM/TES01000168332)
- Velasco Trejo, J.A., D. A. de la Rosa Pérez, G. Solórzano Ochoa y T. L. Volke Sepúlveda. (2004). *Primer Informe del Proyecto: Evaluación de tecnologías de remediación para suelos contaminados con metales*. Dirección General del Centro Nacional de Investigación y Capacitación Ambiental. Dirección de Investigación en Residuos y Proyectos Regionales. INE, SEMARNAT.