

RESEARCH ARTICLE

Territorial imbalances associated with mining activity in Calimaya, State of Mexico

Desajustes territoriales asociados a la actividad minera en Calimaya, Estado de México

Eduardo Alberto Valencia García¹, Alexis Ordaz Hernández¹, José Emilio Baró Suárez¹, Brisa Violeta Carrasco Gallegos¹

¹ Facultad de Geografía, Paseo Universidad, Cd. Universitaria, CP 50110, Toluca de Lerdo, Méx. Universidad Autónoma del Estado de México. evalenciag476@alumno.uaemex.mx, aordazh@uaemex.mx, jebaros@uaemex.mx, bvcarrascog@uaemex.mx

Corresponding author: aordazh@uaemex.mx (Alexis Ordaz Hernández)

Key points

The current situation of impacts due to mining activity in the municipality of Calimaya is analyzed

For the analysis of territorial imbalances related to mining activity, field reconnaissance and remote sensing techniques were used

Results: inventory of active/inactive sinkholes, track of open-pit mining, proposal for rehabilitation in abandoned mining sinkholes

Keywords: Calimaya; Territorial imbalances; Mining; Environmental issues; Remote sensing.

ABSTRACT

Mining is an industrial activity which greatest impact on the ecosystem usually occurs at the end of the exploitation stage, if the mining project has not included a final stage of restoration of the work, it is important to give the affected space proper follow-up. This work focuses on diagnosing the territorial imbalances associated with the mining activity in Calimaya, an area exposed to open pit mining for approximately 30 years. The methodology considers social, legal, cultural, physical and economic aspects, in order to understand the dynamics of the factors present in the study area. General mining cartographic data for the Calimaya area in the State of Mexico, reference images and the application of remote sensing techniques were used for the diagnosis. In the geographic space studied, the main environmental problems were revealed, derived from the uncontrolled open-pit mining activity of stone products. Likewise, actions to mitigate the negative effects derived from this activity are proposed in the research.

Article History:

Received: 08/05/2021
Accepted: 04/05/2022

Puntos clave

Se analiza la situación actual de los impactos por actividad minera en el municipio de Calimaya

Para el análisis de los desajustes territoriales asociados a la actividad minera se usó reconocimiento de campo y teledetección

Resultados: inventario de socavones activos/inactivos, seguimiento de minería a cielo abierto, propuestas de rehabilitación en socavones

Palabras clave: Calimaya; Desajuste territorial; Minería; Problemáticas ambientales; Teledetección.

RESUMEN

La minería es una actividad industrial cuyo mayor impacto en el ecosistema se suele producir al finalizar la etapa de explotación, si en el proyecto minero no se ha incluido una última etapa de restauración de las labores, por lo tanto, es importante darle al espacio afectado un adecuado seguimiento. Este trabajo se enfoca en diagnosticar los desajustes territoriales asociados a la actividad minera en Calimaya (Estado de México), una zona expuesta a trabajos mineros a cielo abierto desde hace aproximadamente 30 años. La metodología, considera aspectos sociales, legales, culturales, físicos y económicos, con el fin de entender la dinámica de los condicionantes presentes en la zona de estudio. Para el diagnóstico realizado se emplearon datos cartográficos de minería general para la zona de Calimaya en el Estado de México, imágenes satelitales de referencia y la aplicación de técnicas de teledetección. En el espacio geográfico estudiado se revelaron las principales problemáticas ambientales, derivadas de la actividad minera de extracción a cielo abierto de productos pétreos. Así mismo, se proponen acciones que permitirán mitigar los efectos negativos que de esta actividad se derivaron.

Historial del artículo:

Recibido: 08/05/2021
Aceptado: 04/05/2022

1. Introducción

La comprensión de los desajustes territoriales producidos por la actividad minera es un problema complejo, que debe ser abordado con un enfoque multidisciplinar. Desde la visión latinoamericana y, en específico, desde el ámbito mexicano, se reconocen confrontaciones de las diferentes perspectivas teóricas y epistémicas. Las principales disyuntivas surgen cuando se intenta encontrar el justo equilibrio entre el desarrollo, progreso, democracia, justicia y, en particular, de la sustentabilidad (Fuente and Barkin, 2013).

El presente artículo se enfoca en la minería a cielo abierto y, en particular, en la extracción de materiales para la construcción o áridos, como también son identificados (Hernández-Jatib and Guilarte-Cutiño, 2018). Las condiciones climáticas, geológicas y geomorfológicas del Valle de Toluca y, en particular, de Calimaya, han permitido la acumulación de arenas, gravas y tepetate. Las arenas y gravas, son materiales muy conocidos (Hernández-Gutiérrez *et al.*, 2015). El tepetate, típico de las formaciones volcánicas mexicanas, presenta densidades entre 1.7 y 1.9 g/cm³ y porosidades entre el 13 y 24%. En Gama-Castro *et al.* (2007), se realiza una amplia discusión sobre el origen y propiedades del tepetate, donde lo definen como un horizonte de suelo endurecido cuyo material parental está constituido por materiales piroclásticos.

La minería trae beneficios económicos a corto plazo para la población, sin embargo, la insuficiente planificación para la recuperación ambiental de

los espacios afectados conlleva a una serie de problemas sociales y ambientales en el espacio de estudio. Los efectos irreversibles ocasionados en los diferentes escenarios geográficos latinoamericanos, indican la falta de preocupación que se tiene hacia el ecosistema y por el entorno en que viven los pobladores de las zonas mineras.

La minería a cielo abierto para la extracción de materiales para la construcción es la principal actividad minera desarrollada en el municipio de Calimaya desde el año 1995. Los problemas acumulados más frecuentes son: taludes pronunciados, deterioro o pérdida de capa de suelo fértil, utilización de espacios mineros como vertederos de basura, contaminación de aguas superficiales y subterráneas, emisión atmosférica de partículas suspendidas y emisión de ruido (Figura 1), la detección temprana de estos fenómenos a través de técnicas de teledetección pueden servir para que las autoridades municipales de Calimaya generen propuestas de mitigación tales como la revegetación, la extracción de elementos antrópicos inestables como escombreras, la protección y manejo de la vegetación remanente por el proceso de sucesión ecológica (Montes de Oca and Ulloa, 2013).

Los efectos de una práctica minera inadecuada en Calimaya, se agudizan con el emplazamiento de construcciones en los bordes de los taludes o mediante excavaciones mineras en las cercanías de las construcciones. Ambas situaciones modifican las componentes tensionales, provocando bulbos de presiones que conducen a

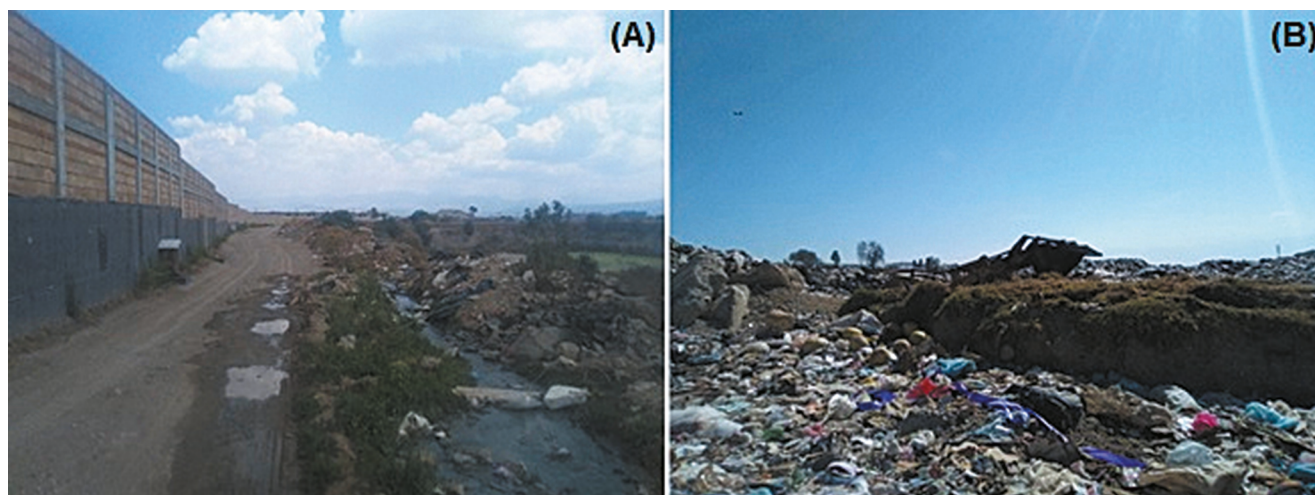


Figura 1. Problemas frecuentes provocados por la actividad minera en Calimaya. A: edificaciones cercanas a la minería a cielo abierto. B: Mina abandonada siendo utilizada como basurero.

Figure 1. Frequent problems caused by mining activity in Calimaya. A: buildings near open pit mining. B: Abandoned mine being used as a garbage dump.

importantes desestabilizaciones en los taludes e instantáneamente sobre los edificios adyacentes.

Tomando como punto de partida la problemática descrita, este artículo se planteó como objetivo diagnosticar los desajustes territoriales asociados a la actividad minera descontrolada en Calimaya, Estado de México. El diagnóstico irá acompañado de una consistente caracterización física del entorno degradado, con la finalidad de crear una plataforma robusta con vistas a los futuros planes de rehabilitación.

2. Área de estudio

El término Calimaya es de origen náhuatl y significa “lugar en donde se construyen casas” (Arriaga and Benhumea, 2020). El municipio se localiza en la porción central del territorio del Estado de México y forma parte de la Zona Metropolitana del Valle de Toluca. Geográficamente se localiza entre las coordenadas 19° 07' 02" y 19° 13' 25" latitud norte, y 99° 32' 10" y 99° 44' 02" longitud oeste. El territorio presenta altitudes que oscilan entre los

2500 y 4200 m snm. El municipio de Calimaya tiene una superficie de 104.98 km² y representa el 0.45% del territorio del Estado de México (Gobierno Municipal de Calimaya, 2019) (Figura 2).

El municipio de Calimaya se encuentra dentro del sistema montañoso Nevado de Toluca, emplazado en la Faja Volcánica Transmexicana (FVTM). La FVTM es un arco volcánico formado sobre el margen sudoccidental de la Placa de Norteamérica como resultado de la subducción de las Placas Rivera y Cocos a lo largo de la trinchera de Acapulco (Ferrari, 2000). En este contexto geotectónico regional, en el sector centro-este de la FVTM, se ubica el caso de estudio abordado en esta investigación. Vázquez and Heine (2002) y Aceves *et al.* (2006), reconstruyen la evolución geológica del Nevado de Toluca en 5 etapas: (1) formación del primer edificio volcánico, aproximadamente hace un millón de años; (2) colapsos laterales al sur y sureste del edificio volcánico, evento enmarcado en unos 100 000 años; (3) aproximadamente entre 60.000 años y 36 000 años atrás; momento caracterizado por

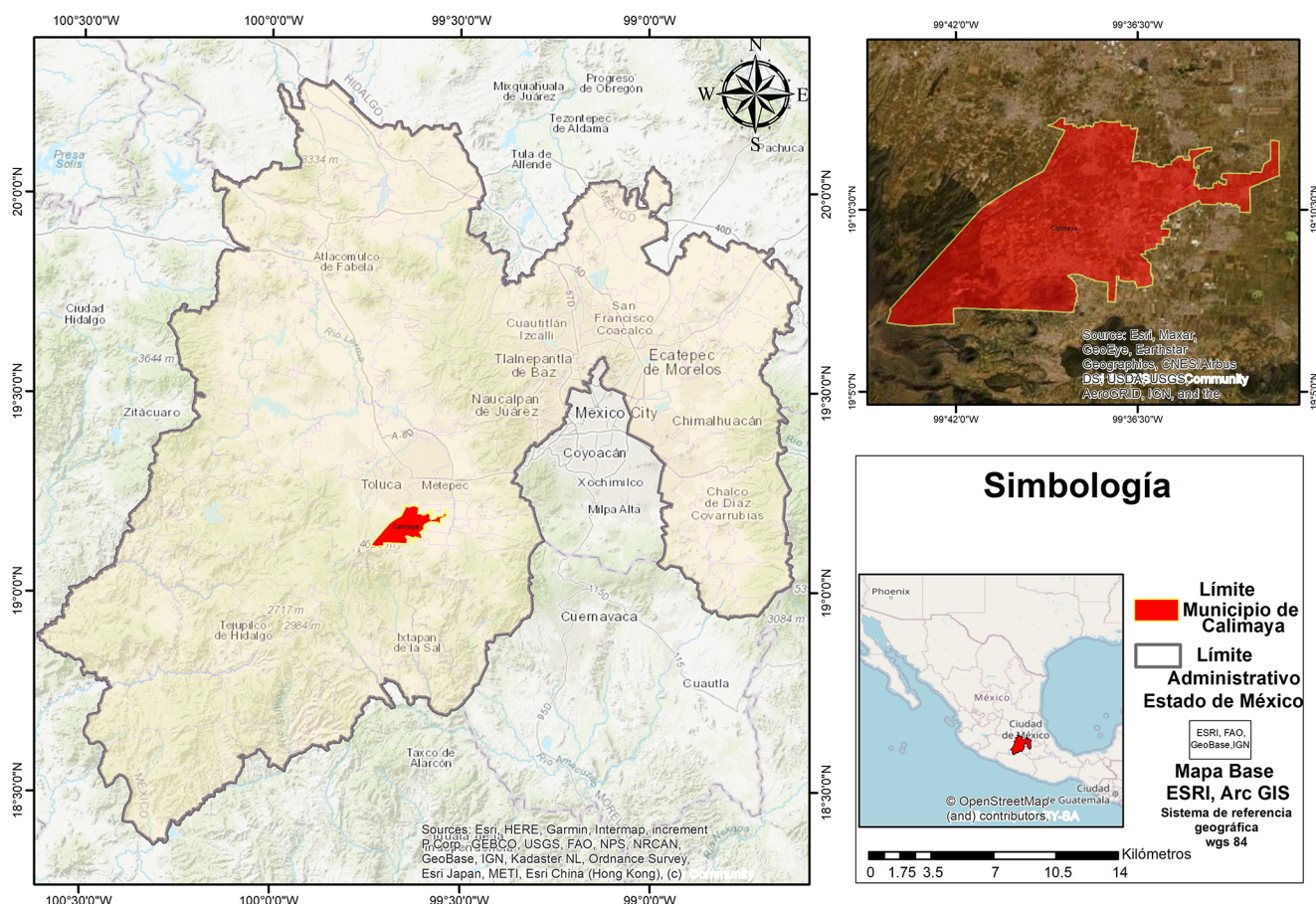


Figura 2. Ubicación del municipio de Calimaya, área de estudio.

Figure 2. Location of the municipality of Calimaya, study area.

actividad volcánica intensa, acompañada por avalanchas piroclásticas y flujos de cenizas; (4) erupción pliniana, enmarcada entre 43 000 y 21 500 años atrás, donde se formaron depósitos de pómez vesicular; (5) posteriormente, hace 15 000 años ocurre una erupción volcánica caracterizada por depósitos de cenizas, y finalmente (hace 2000 años), ocurre otra erupción denominada “Pómez blanca”. Según Espinosa-Rodríguez *et al.* (2014), la edad del último evento volcánico, ha sido replanteada en diversos estudios, sin embargo, los datos más recientes aportados por Arce *et al.* (2013), indican a una edad de aproximadamente de 10.500 años atrás.

Las condiciones geomorfológicas del territorio municipal de Calimaya están estrechamente asociadas con la Faja Volcánica Transmexicana. Debido a este origen, el municipio presenta amplia heterogeneidad topográfica caracterizada por la presencia de montañas, depresiones y planicies.

Los elementos climáticos en el territorio tienen relación con las condiciones geográficas, topográficas y geomorfológicas del mismo. El clima predominante es C (W) que, de acuerdo con el sistema de clasificación climática de Köppen, se describe como templado subhúmedo con lluvias en verano. La temperatura media anual oscila entre 12 °C y 18 °C, la temperatura promedio del mes más frío es de 3°C y la mayor temperatura va desde los 27°C hasta los 35 °C. Los elementos hidrológicos más importantes son los arroyos Las Cruces, Los Temascales, Las Palmas, Ojo de Agua, Zacango y escurrimientos que incrementan su caudal durante la temporada de lluvias, como es el caso del Río Grande.

Por su parte, las actividades económicas en el municipio se han diversificado, mostrando un incremento en los sectores secundarios y terciarios. En cuanto a orden de importancia, los sectores económicos más importantes son: las actividades comerciales (50.1%), servicios (20.7%), manufactura (14.8%) y extracción de materiales para la construcción (14.4%). Siendo este último la principal preocupación del entorno estudiado y causante de los desajustes territoriales, provocando cambios importantes en los procesos de cambio de uso del suelo en el municipio, especialmente desde el año 2010 (Gobierno Municipal de Calimaya, 2019).

Como se puede deducir, las características geológicas del subsuelo del municipio, permiten la explotación de materias primas. De estos recursos se obtiene grava, arena, tepojal (piedra

pómez), los cuales son comercializados en los municipios que conforman la Zona Metropolitana del Valle de Toluca, y que son utilizados como materia prima para la ejecución de construcciones particulares.

Existe una apreciación general de que la actividad minera de extracción, procesamiento y transporte de materiales, desarrollada en el municipio de Calimaya, no cumple con los criterios establecidos en materia de prevención y mitigación de impactos ambientales (Dirección de Ecología, 2018). Situación aprovechada por las concesionarias mineras para no ejecutar acciones de rehabilitación o restauración ambiental en los socavones, que causan una afectación visual al entorno paisajístico del municipio analizado (Tabla 1).

3. Análisis legislativo

La minería para materiales de construcción, es considerada como una de las funciones de mayor importancia en el ámbito económico en Calimaya, a partir de la derrama económica local e industrial que produce, y la generación de empleos locales.

La falta de un marco legal regulatorio en materia de manejo de predios destinados para la minería es una de las principales causas generadoras de problemáticas ecológicas, sociales y económicas en México. La necesidad de una ley que norme y regule esta actividad a nivel estatal no ha podido ser resuelta de manera eficaz, dado que este tipo de material extraído son sustancias “exceptuadas” de la federación, por lo que el control de las mismas corresponde directamente al Estado (Secretaría de Economía, 2014).

La ley minera define como sustancias exceptuadas a todas aquellas que no presenten un valor económico importante o bien sean productos resultantes de la descomposición que solo puedan utilizarse para la fabricación de materiales de construcción o se destinen a este fin.

Valencia (2017), determina que se han presentado algunas iniciativas de elementos regulatorios por parte de diversos organismos gubernamentales y no gubernamentales, que pretenden legislar la explotación de esta actividad. Sin embargo, no abordan la etapa final de la extracción, la etapa de abandono.

En el año de 1992, la Secretaría de Desarrollo Económico, en coordinación con la Secretaría de Ecología y la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, diseñaron acciones conjuntas que permitirían un desarrollo ecológico sustentable

Desajuste	Causa	Instrumento de intervención que puede contribuir a minimizar el impacto
Cambio en la morfología del terreno.	La presencia de bancos de materiales y caminos de acceso no regulados. Minería a cielo abierto.	Plan de desarrollo urbano, licencia de uso de suelo, licencia de apertura y construcción.
Presencia no regulada de socavones mineros.	La inspección ambiental no se ejecuta de la manera correcta. Al no existir una inspección, no hay monitoreo para la apertura, operatividad o gestión de los socavones. Así mismo, muy poco o nulo seguimiento en las licencias de uso de suelo dentro de las áreas mineras.	Plan de desarrollo urbano, licencia de uso de suelo, Ley Minera, Reglamento de la Ley Minera, Reglamento de la Ley General del Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente (LGEEPA) en materia de Impacto Ambiental.
Utilización de espacios mineros abandonados como vertederos de basura.	La falta de seguimiento por parte de las autoridades de Medio Ambiente, así como de los municipios que albergan las antiguas canteras ocasionan el uso ilegal o irregular, para disponer de los socavones como áreas de disposición inadecuada de residuos sólidos urbanos.	Reglamento de la LGEEPA en Materia de Autorregulación y Auditorías Ambientales.
Pérdida de tierras para el cultivo y afectación al suelo fértil.	Las operaciones mineras diariamente modifican el paisaje circundante mediante la remoción de materiales, donde la capa conocida como suelo es la principal afectada.	Ley General de Desarrollo Forestal Sustentable y la Ley y Reglamento de Desarrollo Rural Sustentable.
Contaminación de aguas superficiales y subterráneas, emisión atmosférica de partículas suspendidas, así como la emisión de ruido.	Material particulado transportado por el viento, como resultado de excavaciones, voladuras, transporte de materiales, erosión eólica (más frecuente en tajos abiertos).	Reglamento de la LGEEPA en Materia de Prevención y Control de Contaminación de la Atmósfera.

Tabla 1. Desajustes territoriales, causas y posible instrumento legal a aplicar.**Table 1.** Territorial imbalances, causes and possible legal instrument to apply.

en línea con la normativa ecológica municipal, estatal y federal, con el objetivo de fomentar la industria minera bajo técnicas apropiadas de operación, ejecución y cierre. Para ello se propuso, en el año 1995, a través de la Dirección General de la Industria Minera, la elaboración de un proyecto de “Ley Minera para la explotación de sustancias minerales no concesibles por el Gobierno Federal en el Estado de México”. Este proyecto fue enviado a la entonces Dirección de Desarrollo Urbano para su alineación con el reglamento de la Ley de Asentamientos Humanos para el Estado de México, sin embargo, no prosperó.

Actualmente, el marco legal regulatorio para la extracción y beneficio de los minerales no metálicos, se encuentran en:

- Ley de Protección al Ambiente para el Desarrollo Sustentable del Estado de México.
- Ley General de Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente.

La Ley de Protección al Ambiente para el Desarrollo Sustentable del Estado de México (de carácter estatal), fue propuesta en 1997 y aprobada en el año 2001. Se establecen las bases para la preservación, recuperación o restauración del equilibrio ecológico. Se regulan las actividades relacionadas con la explotación de los recursos minerales del subsuelo y la prevención y control de la contaminación generada por el polvo y smog, que se producen por el paso de vehículos, motores usados para la carga y transporte del material extraído.

También aborda aspectos relacionados con la concesión de permisos, licencias para la explotación y aprovechamiento de los recursos minerales, etc.

Por su parte, la Ley General de Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente (de carácter federal), establece que, para prevenir y controlar la contaminación generada por el aprovechamiento de todos los productos o sustancias “exceptua-

das” a la federación (caso particular de la minería no metálica), se deben seguir las disposiciones plasmadas en la Ley Minera.

La Ley Minera, también de carácter federal, es reglamentaria del artículo 27 constitucional. En ella se plasman los elementos necesarios para la exploración, explotación, y beneficio de los minerales o sustancias que en vetas, mantos, masas o yacimientos constituyan depósitos de utilidad pública y, por lo tanto, serán preferentes sobre cualquier otro uso o aprovechamiento del terreno.

En orden jerárquico, las normas que regulan concretamente aspectos ambientales de la minería son las NOM-120 SEMARNAT 2011 y SEMARNAT 2003. La primera establece las especificaciones de protección ambiental para las actividades de exploración minera directa y, la segunda, sugiere los criterios para caracterizar los jales y las especificaciones para las etapas de preparación, construcción, operación y post operación de las mismas. Sin embargo, no existen las normas relativas a la modificación topográfica que resulta de la extracción, ni para las etapas de explotación y post operativa en las que cabría esperar la restauración/rehabilitación de los sitios afectados.

Finalmente, existe el Reglamento en materia de evaluación de impacto ambiental (REIA), que regula las obras de explotación de los minerales y las sustancias de competencia federal. Sin embargo, en las manifestaciones de impacto ambiental no se solicitan expresamente medidas que permitan la mitigación de los impactos al entorno, generalmente se le confiere un carácter discrecional, es decir queda a juicio del evaluador.

Las carencias legales identificadas para la restauración de minas en México, indican la necesidad de modificar los artículos 108 y 109 de la Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente. Sería importante que estos artículos aborden la restauración como parte de su contenido, anulando así acciones de discrecionalidad.

4. Materiales y métodos

El objetivo de este trabajo consiste en diagnosticar los posibles desajustes territoriales en el municipio de Calimaya asociados a la actividad minera descontrolada. La metodología, que para tal efecto se presenta, se sustenta en los enfoques geográficos, urbanísticos y de sustentabilidad. La aplicación metodológica propuesta, debe condu-

cir a la obtención de resultados que ofrezcan consistencia y rigor científico a los futuros planes de rehabilitación.

Los principales métodos implícitos en las dos etapas de la metodología son: el método geográfico (Gutiérrez, 2013), el método analítico jerárquico (AHP) (Saaty, 1977), así como el análisis multicriterio-multiobjetivo. Todos se apoyan en el trabajo de campo y en el empleo de las geotecnologías (SIG, GPS y análisis de imágenes de satélite).

4.1. Primera etapa metodológica

En esta etapa, se determinan los objetivos a través un programa de necesidades y diagramación, determinadas por los usos y funciones basadas en las actividades urbanas, recreativas y de esparcimiento en general (caracterización general del espacio de trabajo).

La descripción o caracterización del área de estudio se concibió mediante la investigación de gabinete, donde se documentó la información geográfica referente a elementos físicos, sociales y económicos. Por ejemplo, los elementos físicos referentes a la localización, clima, hidrografía, edafología, geología, flora y fauna se fundamentaron en los trabajos de Juan Pérez *et al.* (2015), la Dirección de Ecología (2018) y de Valencia (2017). Mientras que los elementos referentes a demografía, economía, infraestructura, cultura y administración política, se soportaron sobre datos del Instituto Nacional de Estadística y Geografía del año 2020 e información derivada del Plan de Desarrollo Municipal Calimaya del 2018 (Gobierno Municipal de Calimaya, 2019) (Figura 3 y Tabla 2).

4.2. Segunda etapa metodológica

Para esta etapa de la investigación se obtuvo el catálogo de problemáticas ambientales y el inventario de socavones o minas del perímetro de estudio. Para lograrlo, se realizó el análisis retrospectivo del marco teórico relacionado con el análisis de las potencialidades ambientales, sociales y económicas, con énfasis en espacios degradados, la sustentabilidad y resiliencia del sitio.

Las principales técnicas empleadas en esta etapa, se fundamentan en la inspección visual de las áreas degradadas por la actividad extractiva, el posicionamiento geográfico con el apoyo de tecnología GPS y de los SIG (teledetección). Se potencia el uso de imágenes satelitales de sen-

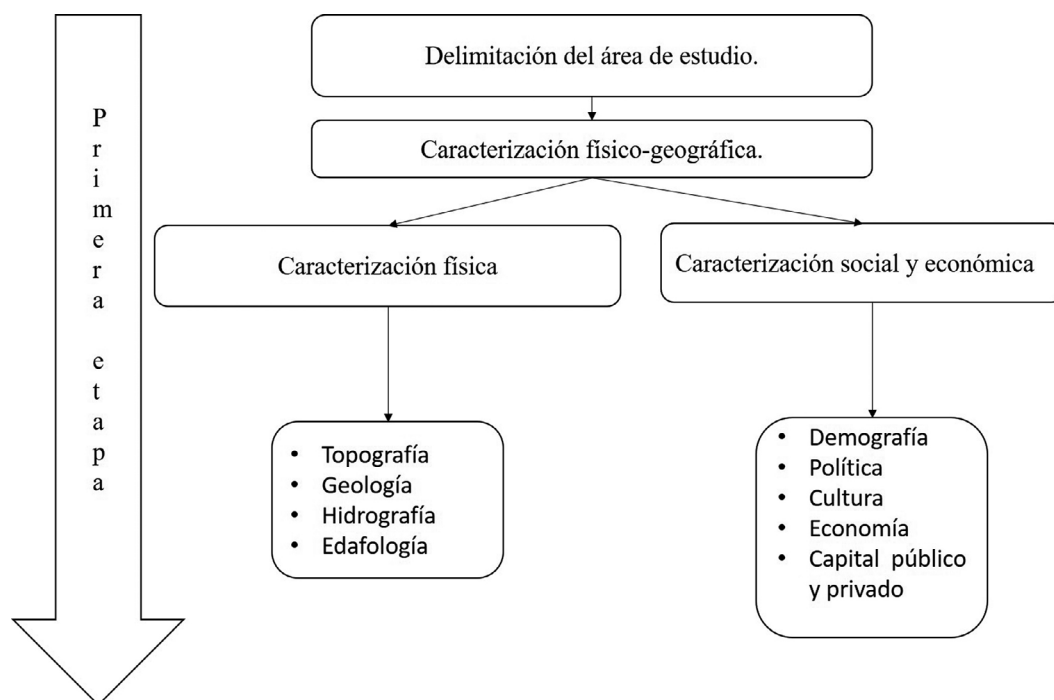


Figura 3. Diagrama de flujo de integración de los principales elementos físicos, ambientales, económicos y sociales mediante el método geográfico.

Figure 3. Flow diagram of integration of the main physical, environmental, economic and social elements by means of the geographical method.

Selección de variables	Categorías
Elementos físicos	✓ Localización y delimitación del área de estudio ✓ Clima y temperatura ✓ Hidrología ✓ Edafología ✓ Flora ✓ Fauna ✓ Geología y pendientes
Elementos socio-económicos	✓ Demografía ✓ Economía ✓ Infraestructura ✓ Cultura

Tabla 2. Variables de integración para la primera etapa metodológica.

Table 2. Integration variables for the first methodological stage.

sores remotos, para la detección de zonas mineras a cielo abierto, implementando elementos que permiten la interpretación visual de imágenes, comparación de índices espectrales, clasificación de imágenes orientada a objetos. Posteriormente, se validan los resultados obtenidos a través de visitas en campo.

Un apartado importante en la interpretación de una imagen satelital, es la propiedad pictoricomorfológica, que constituye un proceso de interpretación visual de imágenes de sensores remotos. Dentro de ella se consideran como características

o propiedades pictoricomorfológicas a los elementos de identificación de objetos, coberturas, o alguna alteración al sitio de estudio (Melo and Camacho, 2005). Así mismo, son conocidos como descriptores morfológicos los criterios de interpretación visual o foto elementos (Lira, 2010, Chuvieco, 2010 y Gao, 2009). Entre las propiedades pictoricomorfológicas se consideran fundamentales el análisis de la forma, tamaño, tono/color, textura, posición geográfica y patrón espacial, las cuales son usadas de forma integral en las clasificaciones visuales complejas. Una de las principales ventajas

del análisis visual sobre el digital es su capacidad para incorporar a la interpretación de la imagen criterios complejos. El brillo y el color serían los componentes más elementales, pues caracterizan espectralmente una cobertura, y la forma, tamaño y textura, representan características de las propiedades espaciales de los objetos. Las sombras, el contexto y asociación, tienen que ver con la relación de los objetos circundantes, así como la ubicación topográfica y geográfica de los objetos. Finalmente, la dimensión temporal hace referencia a la evolución estacional de las coberturas.

El inventario de minas, activas e inactivas, se dividieron en sitios con activos ambientales y zonas desprovistas de activos. Con esa información

se elaboró la base de datos que incluye: localización, tipo, categoría, coordenada central, nivel de vegetación, profundidad y vías de acceso, entre otros (Figura 4 y Tabla 3).

4.3. Planeamiento y ejecución

En este proceso de análisis se realizaron las actividades anteriormente mostradas (Figura 4 y Tabla 3), con el propósito de dar inicio a la investigación, definiéndose la zona de estudio, los requerimientos tecnológicos y la adquisición de imágenes e información complementaria.

Un aspecto relevante en la investigación fue la adecuada selección del área de estudio, donde

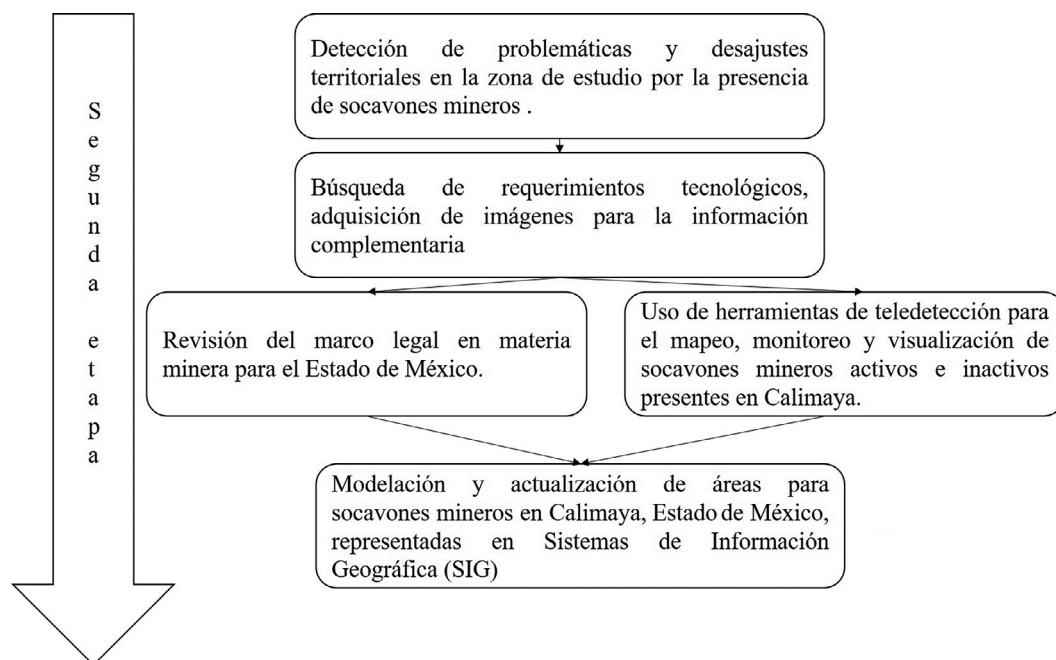


Figura 4. Diagrama de flujo para la segunda etapa metodológica. Se establecen como prioridades la obtención del catálogo de problemáticas ambientales y el inventario de socavones o minas del perímetro de estudio.

Figure 4. Flow diagram for the second methodological stage. Obtaining the catalog of environmental problems and the inventory of sinkholes or mines of the study perimeter are established as priorities.

Selección de variables	Categorías
Sistemas complejos	✓ Entorno físico ✓ Identidad cultural ✓ Desarrollo social ✓ Educación ✓ Economía local
Nivel de Resiliencia	✓ Sitios con activos ambientales ✓ Zonas sin activos ambientales

Tabla 3. Variables de integración para la segunda etapa metodológica.

Table 3. Integration variables for the second methodological stage.

debía ser evidente la presencia de actividad minera. Esta fue definida a partir de la disponibilidad de información de imágenes satelitales, junto con el reconocimiento previo de la zona a través de información satelital de alta resolución, la cual evidenció la presencia de dichas actividades mineras en Calimaya.

En el desarrollo de la presente investigación se estableció como zona de estudio el área que abarca el municipio de Calimaya, Estado de México, reconocido por contar con actividades de explotación minera a cielo abierto. Partiendo de la definición de la zona de estudio, fueron identificados los requerimientos de información temática, tanto de tipo vectorial, como de imágenes satelitales, seguido de la consulta de información de mayor detalle y disponible a través de trabajos previos realizados, investigaciones, información de campo generada por institutos de investigación o entidades territoriales anteriormente citados.

4.4. Interpretación visual de zonas mineras

Uno de los aspectos de mayor calidad técnica que requirió la presente investigación, fue la identificación y posterior delimitación de zonas con actividad minera. Este aspecto se logró a través de la interpretación visual. En las zonas identificadas se concentró la aplicación y desarrollo de los demás procesos secuenciales planteados, tales como la ejecución de índices espectrales, y la revisión de la información de pixel.

Entre las múltiples combinaciones que se han aplicado en la interpretación visual de imágenes de sensores remotos para lograr una mejor discriminación de las coberturas de la tierra, se encuentran las combinaciones que integran una banda del espectro visible, otra del infrarrojo cercano y finalmente una del infrarrojo medio (Chuvieco, 2010) lo que significa una combinación de RGB 5/6/4 para el sensor Landsat 8, mientras que la misma combinación en Sentinel 2A constituye la combinación 8/11/4. Igualmente se propuso la combinación de dos bandas del visible con una del infrarrojo, conocidas como infrarrojo color, correspondiente a la combinación RGB 5/4/3 en Landsat 8, y Sentinel 2A 8/4/3. Dichas relaciones entre longitudes de onda fueron empleadas como referencia en los diferentes sensores para la identificación y caracterización de las propiedades pictoricomorfológicas descritas y la posterior interpretación visual de zonas mineras a cielo abierto (Castellanos, 2016). Desarrollando una investiga-

ción más profunda, se encontró que el uso de imágenes Sentinel 2A tienen un mejor resultado para detectar elementos geológicos como las arenas o gravas, en sitios desprovistos de vegetación con una combinación de bandas 12/4/2 (Global Monitoring for Environment and Security, 2020).

La metodología para realizar la interpretación visual consideró como insumo principal una imagen Sentinel 2A con fecha de 2020/01/22 y con resolución espacial de hasta 10 m. Además, se empleó un archivo shapefile que contiene información poligonal de zonas mineras en Calimaya (Estado de México) con una proyección Universal Transversal de Mercator zona 14 norte para México previamente tratada. Se ejecutaron aspectos en procesamiento digital de imágenes y se compararon con la plataforma de Google Earth para la comparación entre datos. Para ello, una vez obtenidos los insumos, se procedió a desarrollar fases para la interpretación visual de imágenes de sensores remotos, que corresponden a lectura de la imagen, análisis de la imagen y su clasificación, tal y como muestra el siguiente esquema metodológico (Figura 5).

4.5. Aplicación de índices espectrales

Los índices espectrales y técnicas de fusión de imágenes son considerados algoritmos, donde se aplican combinaciones y operaciones aritméticas entre valores de reflectancia de las coberturas en dos o más longitudes de onda. En el caso de imágenes satelitales, se suele optar por incorporar imágenes de mayor resolución o de otros sensores siendo su utilidad la de acentuar una propiedad particular, como es el caso de la presente investigación donde la elección de imágenes Sentinel 2A, y su posterior combinación 12/4/2 servirá para la detección de zonas mineras a cielo abierto.

En la Tabla 4 se relacionan los índices y técnicas de fusión de imágenes, definidos a partir de revisión de literatura previa, donde fueron diseñados y/o aplicados comúnmente para la detección y análisis de zonas erosionadas, y detección de minerales, tipos de suelo o rocas (Drury, 1987).

En este caso, se concibe como índices espectrales, a las operaciones aritméticas entre bandas con el objetivo de enfatizar alguna variable de interés, como vegetación, agua, minerales etc. De acuerdo a Chuvieco (2010), estos índices son utilizados ampliamente en dos situaciones: i) para mejorar la discriminación entre dos cubiertas con

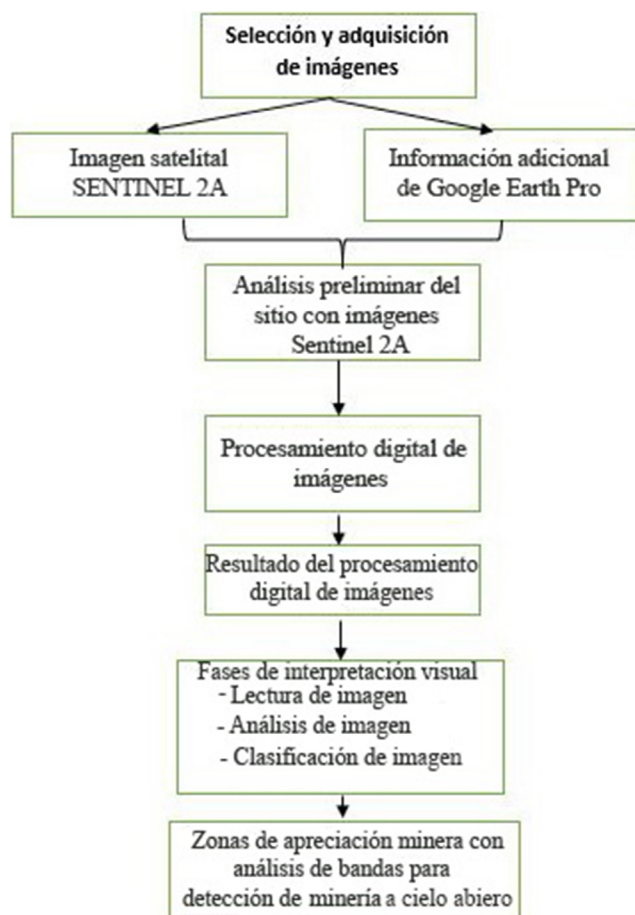


Figura 5. Esquema metodológico para la interpretación visual de imágenes de sensores remotos. Fuente: Elaboración propia basado en Castellanos (2016).

Figure 5. Methodological scheme for the visual interpretation of images from remote sensors. Source: Own elaboration based on Castellano (2016).

comportamiento reflectivo muy distinto en esas dos bandas, por ejemplo, para realzar suelos y vegetación en el visible e infrarrojo cercano y, ii) para reducir el efecto del relieve en la caracterización espectral de distintas cubiertas.

En el presente estudio se seguirán las propuestas de Kruse *et al.* (1993), en las que, a partir de imágenes Landsat TM (Thematic Mapper) sobre el desierto de Mohave California, pudieron generar índices específicos para la detección de elementos presentes en la geología, tales como el CLAY_MINERALS, que es usado para detectar rocas alteradas hidrotérmicamente con alto contenido de arcillas micas y rocas sulfatadas. Esto es posible gracias a la combinación de las bandas (SWIR1/SWIR2), o el FERROUS_MINERALS (SWIR1/NIR) para aislar coberturas vegetales de rocas desnudas, y el IRON_OXIDE (RED/BLUE) para aquellos materiales con importante presencia de limonita (Tabla 5).

Analizando la información recopilada en la tabla 5, se procedió a utilizar la combinación de bandas para la geología SENTINEL 2A (12/4/2), que toma como referencia elementos de interpretación visual propuestos por la plataforma de Sentinel hub COPERNICUS (Global Monitoring for Environment and Security, 2020). La imagen se obtuvo en el año 2019 y permitió revelar datos geológicos de especial importancia como los afloramientos de arenas y gravas. Con el software SNAP, consistente en una herramienta para el procesamiento y análisis de observación de la Tierra desarrollado por la Agencia Espacial Europea, se corrigieron los parámetros de la imagen satelital elegida para el análisis del caso de estudio. Los parámetros corregidos fueron: composición de bandas, resolución visual de la imagen de entrada y configuración de pixel. Sumado a esto, se insertó un archivo en formato shapefile (.SHP), que contenía información vectorial de minas activas e inactivas evaluadas en el periodo 2016 a 2017, con la finalidad de detectar un posible cambio con respecto a los usos de los espacios mineros para el año 2020 y así entender, proponer o identificar acciones que permitan mitigar o controlar los efectos negativos que han ocasionado desajustes territoriales en Calimaya, Estado de México (Figura 6).

Bajo un análisis particular de la zona de estudio se creó la composición de las bandas 12/4/2 de la imagen Sentinel 2A, que se utilizó para detectar el avance o disminución de zonas de extracción y así, posteriormente, proponer acciones que minimicen el impacto negativo de la actividad minera en la zona (Figura 7).

Con el fin de dar respuestas a interrogantes previos sobre el posible crecimiento de zonas de extracción, se superpusieron, a la imagen de salida, los polígonos muestreados en el año 2016 (Figura 8). En color cian se representa el avance de la minería entre julio de 2016 y febrero de 2020. Esto se logró creando una composición de bandas 12/4/2, es decir, las bandas del infrarrojo medio+rojo+azul, indicando una alteración y a su vez un incremento de áreas mineras. Con ello fue posible ejecutar un inventario de socavones mineros.

Para el empleo de las técnicas descritas, se consideró la diversidad física, económica y social del caso de estudio, así como las características y dinámica de la población. Estas especificidades, fueron sugeridas por García (2006), y deben ser integradas mediante un análisis complejo.

Nombre	Abreviación	Ecuación	Fuente
Clay_minerals	CM	SWIR1/SWIR2	(Drury, 1987)
Ferrous_minerals	FM	SWIR1/NIR	(Drury, 1987)
Iron_Oxide (Ferric Minerals)	IO	RED/BLUE	(Drury, 1987)
Transformed normalized difference vegetation index	TNDVI	$\text{SQRT}((\text{NIR}-\text{RED}/\text{NIR}+\text{RED}) + 0,5)$	(Rouse <i>et al.</i> , 1973) and (Sebem, 2005)
Normalized difference vegetation index	NDVI	$\text{NIR}-\text{RED}/\text{NIR}+\text{RED}$	(Kriegler <i>et al.</i> , 1969) y (Rouse <i>et al.</i> , 1973)
Difference vegetation index	DVI	$\text{NIR}-\text{RED}$	(Tucker, 1979)
Simple ratio	SR IR/R	NIR/RED	(Tucker, 1979)
SQRT Simple ratio	SQRT SR IR/R	$\text{SQRT}(\text{NIR}/\text{RED})$	(Sebem, 2005)
Principal_components	CP	Función ERDAS IMAGE	(López and Altamirano, 2008)
Fusión brovey	BROVEY	$\text{Band_out}=\text{BAND} / [(\text{BLUE}+\text{GREEN}+\text{RED}) * \text{PAN}]$. FUNSIÓN ERDAS IMAGE	(Gharbia <i>et al.</i> , 2014)
Fusión wavelet	WAVELET	Función ERDAS IMAGEN	(Nuñez <i>et al.</i> , 1999)

NIR = Infrarrojo cercano, RED = Rojo, SWIR = Infrarrojo medio, BLUE = Azul, GREEN = Verde, PAN = Pancromática, BAND = Band sensor, SQRT = Raíz Cuadrada.

Tabla 4. Índices generales para fusión de imágenes y técnicas espectrales. Modificado de Sebem (2005).

Table 4. General indices for image fusion and spectral techniques. Modified from Sebem (2005).

Nombre	Abreviación	Ecuación	Fuente
Clay_Minerals	CM	SWIR1 / SWIR2	(Drury, 1987)
Ferrous_Minerals	FM	SWIR1 / NIR	(Drury, 1987)
Iron_Oxide (Ferric Minerals)	IO	RED / BLUE	(Drury, 1987)
Transformed Normalized Difference Vegetation Index	TNDVI	$\text{SQRT} ((\text{NIR} - \text{RED} / \text{NIR} + \text{RED}) + 0,5)$	(Rouse <i>et al.</i> , 1973)
Normalized Difference Vegetation Index	NDVI	$\text{NIR} - \text{RED} / \text{NIR} + \text{RED}$	(Rouse <i>et al.</i> , 1973)
Difference Vegetation Index	DVI	$\text{NIR} - \text{RED}$	(Tucker, 1979)
Simple Ratio	SR IR/R	NIR / RED	(Tucker, 1979)
Sqrt Simple Ratio	SQRT SR IR/R	$\text{SQRT} (\text{NIR} / \text{RED})$	(Sebem, 2005)
Geology	GEOLOGY	$\text{SWIR2}+\text{RED}+\text{BLUE}$ 12/4/2	(Global Monitoring for Environment and Security, 2020)

Tabla 5. Índices espectrales y combinaciones de bandas utilizados para detectar elementos alterados por efecto de la minería en Calimaya. Tomado de Sebem (2005).

Table 5. Spectral indices and band combinations used to detect elements altered by the effect of mining in Calimaya. Taken from Sebem (2005).

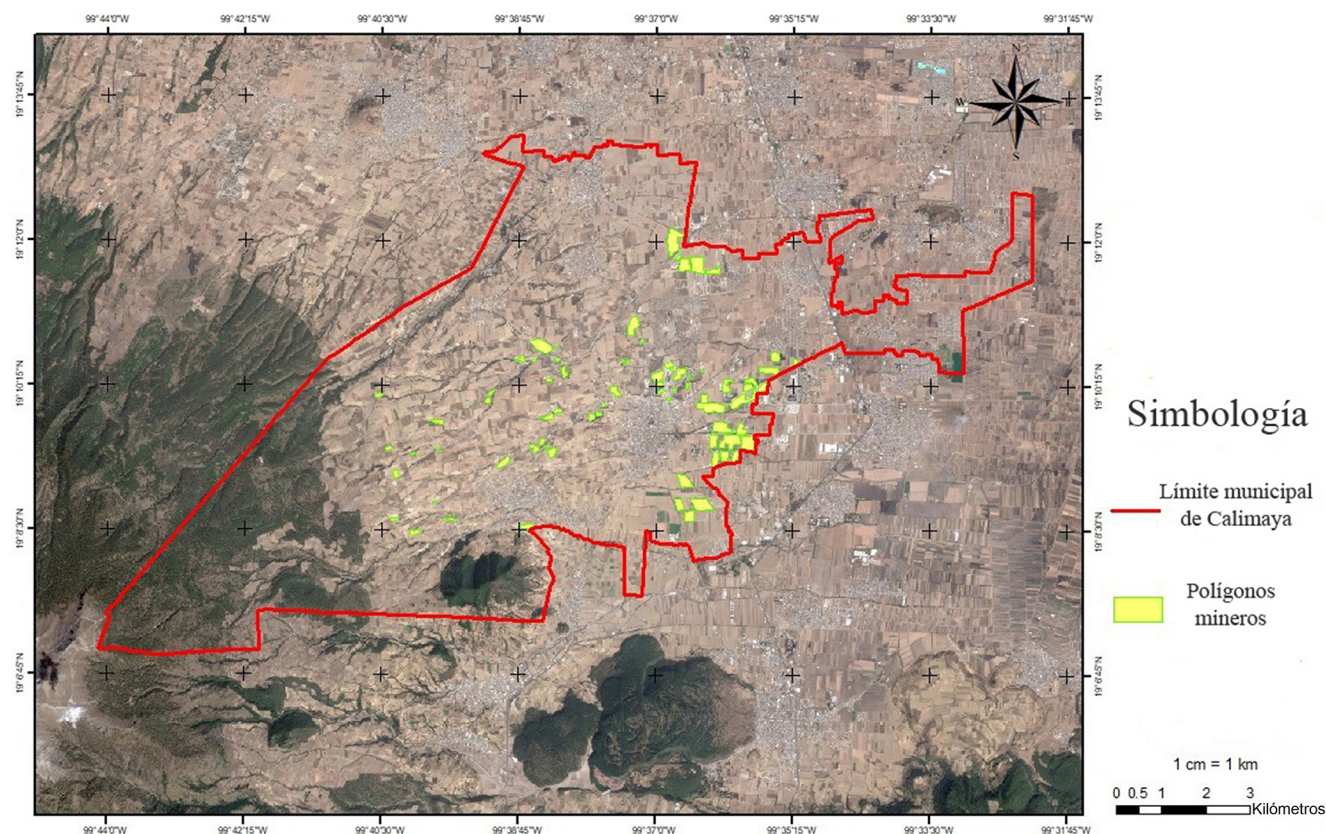


Figura 6. Representación de socavones mineros activos e inactivos en Calimaya, Estado de México. Imagen satelital Sentinel 2A, con fecha 2020/01/22, composición RGB (4,3,2). Incluye información en formato .shp donde se representa la zona de muestreo y polígonos de sitios de extracción existentes para el año 2017, la información correspondiente a los polígonos vectoriales en formato .shp ha sido obtenida de Valencia (2017).

Figure 6. Representation of active and inactive mining pits in Calimaya, State of Mexico. Sentinel 2A satellite image, dated 2020/01/22, RGB composition (4,3,2). It includes information in .shp format where the sampling area and polygons of existing extraction sites for the year 2017 are represented, the information corresponding to vector polygons in .shp format has been obtained from Valencia (2017).

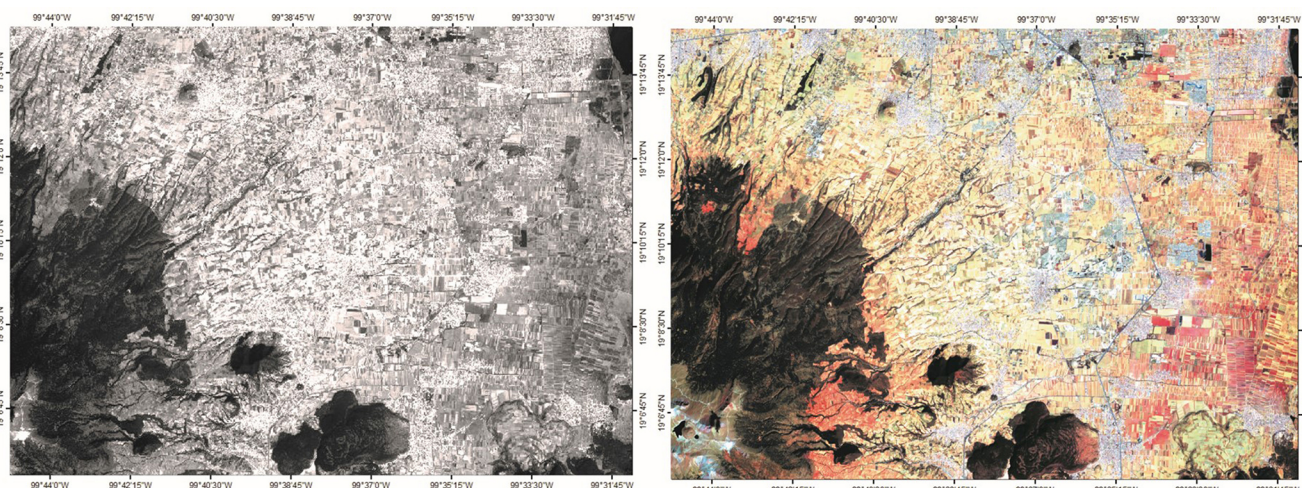


Figura 7. A la izquierda se presenta la imagen Sentinel 2A que muestra una vista previa general del territorio sin composición de bandas para detección de socavones, y a la derecha se presenta la imagen resultante de la composición de bandas (12/4/2) donde se aprecian los cambios en el suelo por la presencia de actividad minera en Calimaya, Estado de México.

Figure 7. On the left is the Sentinel 2A image showing a general preview of the territory without band composition for mining cavity, and on the right the resulting image of the band composition (12/4/2) is presented where changes in the soil are appreciated due to the presence of mining activity in Calimaya, State of Mexico.

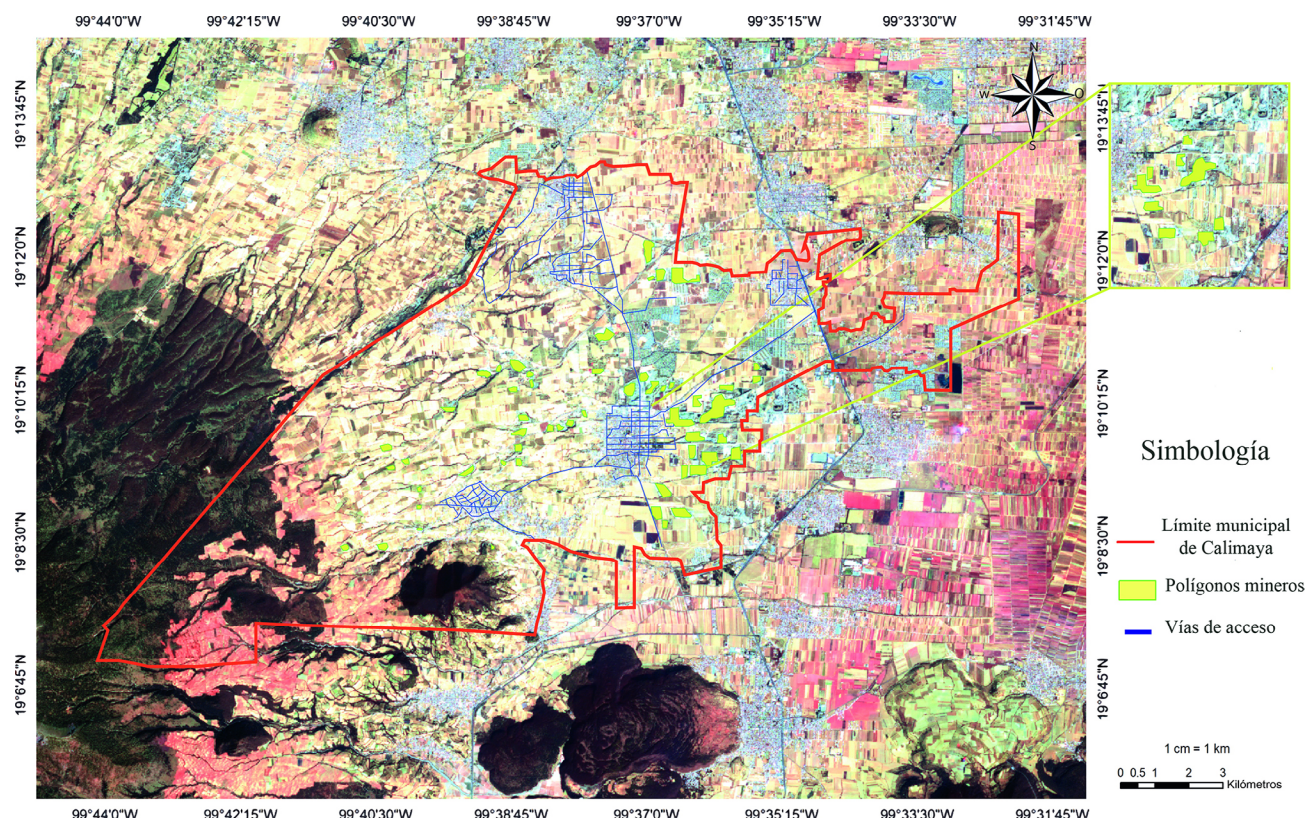


Figura 8. Contexto de la minería en Calimaya 2017-2020.

Figure 8. Context of mining in Calimaya 2017-2020.

4.6. Caracterización de las áreas degradadas por la actividad minera

Las afectaciones derivadas del incremento de sitios para la extracción minera en Calimaya se pueden resumir en el conjunto de problemas (directos e indirectos) con impacto en la población y su calidad de vida. Por ejemplo: deforestación masiva, desertificación y agotamiento de fuentes de agua; destrucción del hábitat natural de especies animales y plantas endémicas; contaminación de los suelos por la pérdida de propiedades químicas y físicas; pérdida de estructura edáfica por compactación, mezcla de horizontes y disposición de partículas; variaciones del perfil y trazado de la corriente fluvial, que derivan en sobresaturación de agua e inundaciones; inestabilidad del suelo, lo que provoca riesgo de colapsos o subsidencias a las poblaciones cercanas.

5. Resultados y discusión

5.1. Inventario de socavones o minas del perímetro de estudio

El proceso de obtención del inventario de socavones, tanto activos como inactivos, indicó el

predominio de canteras o minas a cielo abierto. Los materiales obtenidos en canteras son los áridos, y las rocas ornamentales, generalmente utilizadas para la industria de la construcción. Se comprobó que respondían a un esquema de explotación mediante bancos y bermas. La secuencia de explotación que se propone en el área de estudio es la siguiente: 1) retirada de la cubierta vegetal; 2) arranque del recubrimiento; 3) explotación de la capa y 4) restauración y/o rehabilitación.

En total se inventariaron 76 socavones (entre activos e inactivos) en el año de 2020. En la Tabla 6 se representan únicamente los datos de los sitios que actualmente están abandonados o en su etapa final de explotación mientras que, en el caso de los que se encuentran activos o en una etapa de inspección, se optó por mantenerlos como datos adicionales de la investigación. Hay que resaltar que el archivo en formato shapefile del año 2017 contiene información de 63 socavones registrados mientras que, para el año 2020, ya se contaba con 13 socavones activos más, es decir, en el periodo que comprende de 2017 a 2020 (3 años), se incrementó la actividad de extracción minera cerca de un 8% con respecto al 2017. La información se pudo validar en campo

Nombre de Mina	Coordenada Norte	Coordenada Este	Estatus	Material Extraído	Dimensión Aproximada en m ²	Poblado de Ubicación
1. Sin Nombre	19°12'12.73"	99°35'27.72"	Abandonada	Arena	7,656.70	San Andrés Ocotlán
2. Sin Nombre	19°10'33.72	99°35'10.62	Etapas final	Arena y Grava	22,678.2	Calimaya de Díaz Gonzáles
3. Sin Nombre	19°12'3.79	99°36'9.09	Abandonada	Tepojal	34,114.64	Santa María Nativitas
4. Sin Nombre	19°10'25.12	99°36'46.16	Abandonada	Arena y Grava	610,657	Zaragoza de Guadalupe
5. Sin Nombre	19° 9'53.78	99°38'22.27	Abandonada	Tepojal	127,984.52	Zaragoza de Guadalupe
6. Sin Nombre	19° 8'44.87	99°35'54.0	Etapas final	Arenas, Gravas y triturado	34,909.04	San Isidro Calimaya

Tabla 6. Inventario de socavones mineros abandonados o en su etapa final de explotación. Calimaya, Estado de México.

Table 6. Inventory of abandoned mining cavity or in their final stage of exploitation. Calimaya, State of Mexico.

mediante técnicas de observación directa, levantamiento de datos (GPS) y entrevistas con personas encargadas de estas áreas (Figura 9). En la Figura 10 se muestra la secuencia de cambios morfológicos en el terreno de una mina abandonada en el año 2020, como ejemplo de las posibles consecuencias, de un mal manejo en la fase posterior a la explotación minera.

Hacia el año 1960 comienza una crisis en el campo, originada por diferentes circunstancias. Como la migración, el derecho a la propiedad ejidal y la creación de corredores industriales ubicados en Toluca, capital del Estado de México, por lo que las poblaciones cercanas, entre ellas la de Calimaya, abandonan las tierras en busca de una mejora económica. Pero con el surgimiento de la renta de tierras a particulares a finales de la década del año 1994, se inicia la explotación minera no regulada para la extracción de materiales pétreos, con la finalidad de crear conjuntos habitacionales que redundasen en una prosperidad económica para el municipio, aunque algunos de estos sitios resultaron en zonas abandonadas.

De los 76 socavones inventariados, solo 6 se encuentran en una etapa totalmente de abandono como lo muestra la Tabla 6, a modo de ejemplo, en la Tabla 7 se encuentran 10 de los 70 activos. Por su parte, el gráfico de la Figura 11, pone en perspectiva la situación en los últimos 20 años para el municipio. El gráfico indica, que existen en el año 2020, 6 socavones en condición de

abandono, esta información indica la prioridad de trabajo a corto plazo.

5.2. Propuesta de plan de rehabilitación en zonas afectadas por minería

Calimaya se ha convertido en un municipio con un alto índice de urbanización, con alta demanda de zonas para fines habitacionales, por lo que los usos del suelo se han visto modificados drásticamente. Derivado de ello, se han podido identificar líneas de acción que servirán como preámbulo para la toma de decisiones en las propuestas de rehabilitación, en este caso se consideraron las sugerencias de Torres-Batista *et al.* (2019). Se proponen tres alternativas: (a) parque sustentable, (b) uso agrícola y (c) uso deportivo (Valencia, 2017). Las principales características de cada alternativa se describen a continuación.

(a) Parque sustentable. Los principales ejes son:

- Establecer objetivos en base a las demandas de los habitantes de la población cercana a la mina.
- Proponer el uso y funciones del parque, para suministrar espacios con intenciones de recreación pasiva y activa en las áreas disponibles.
- Integrar elementos socio-culturales como actividades a desarrollar en este espacio, para estimular el encuentro y

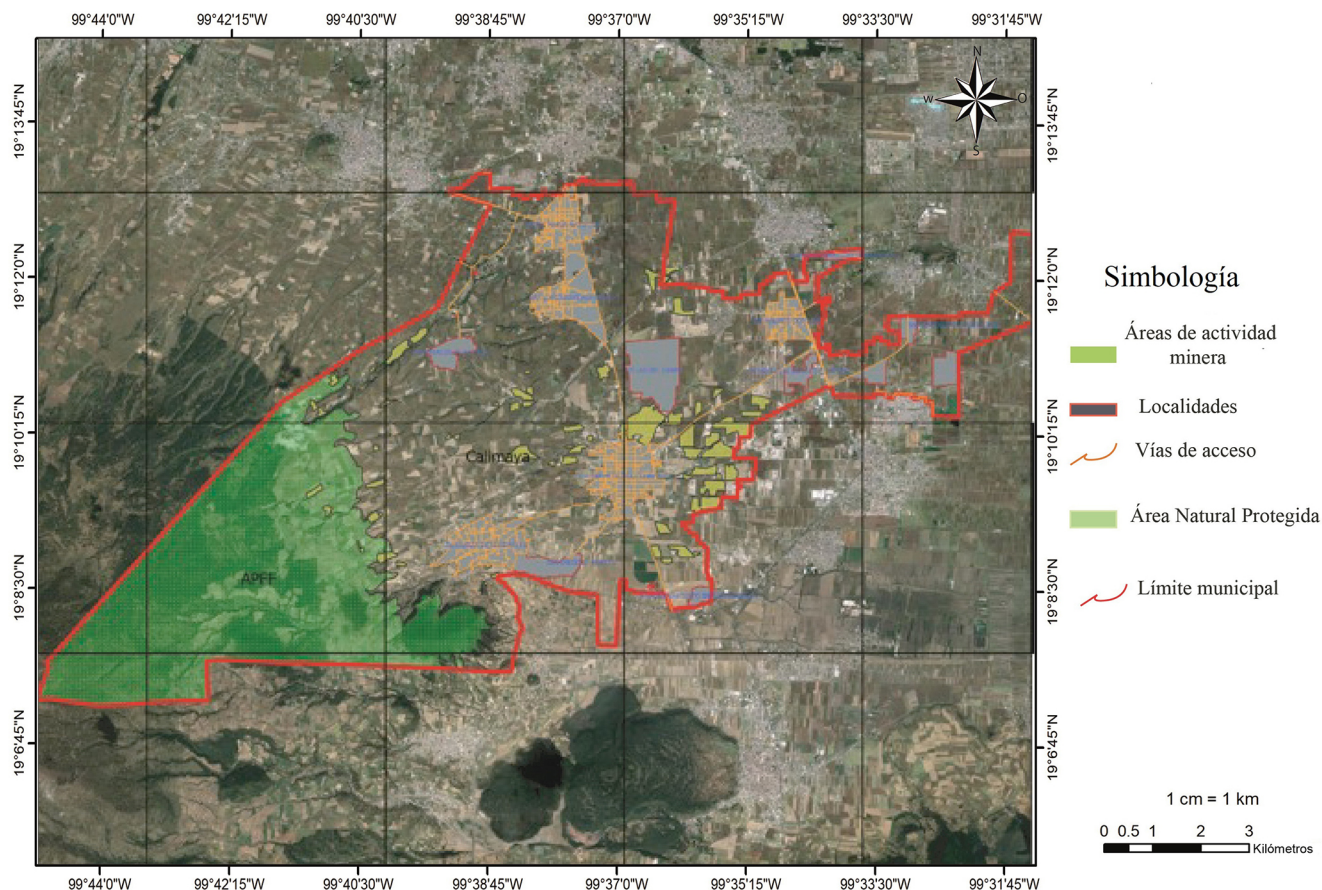


Figura 9. Contexto de la minería en Calimaya 2017-2020.

Figure 9. Context of mining in Calimaya 2017-2020.



Figura 10. Ejemplo de análisis de cambios en la morfología del terreno en un socavón minero, municipio de Calimaya de izquierda a derecha: mina activa año 2006, mina en etapa de cierre año 2016 y mina abandonada en el año 2020.

Figure 10. Example of analysis of changes in the morphology of the terrain in a mining cavity, municipality of Calimaya from left to right: active mine in 2006, mine in closing stage in 2016 and abandoned mine in 2020.

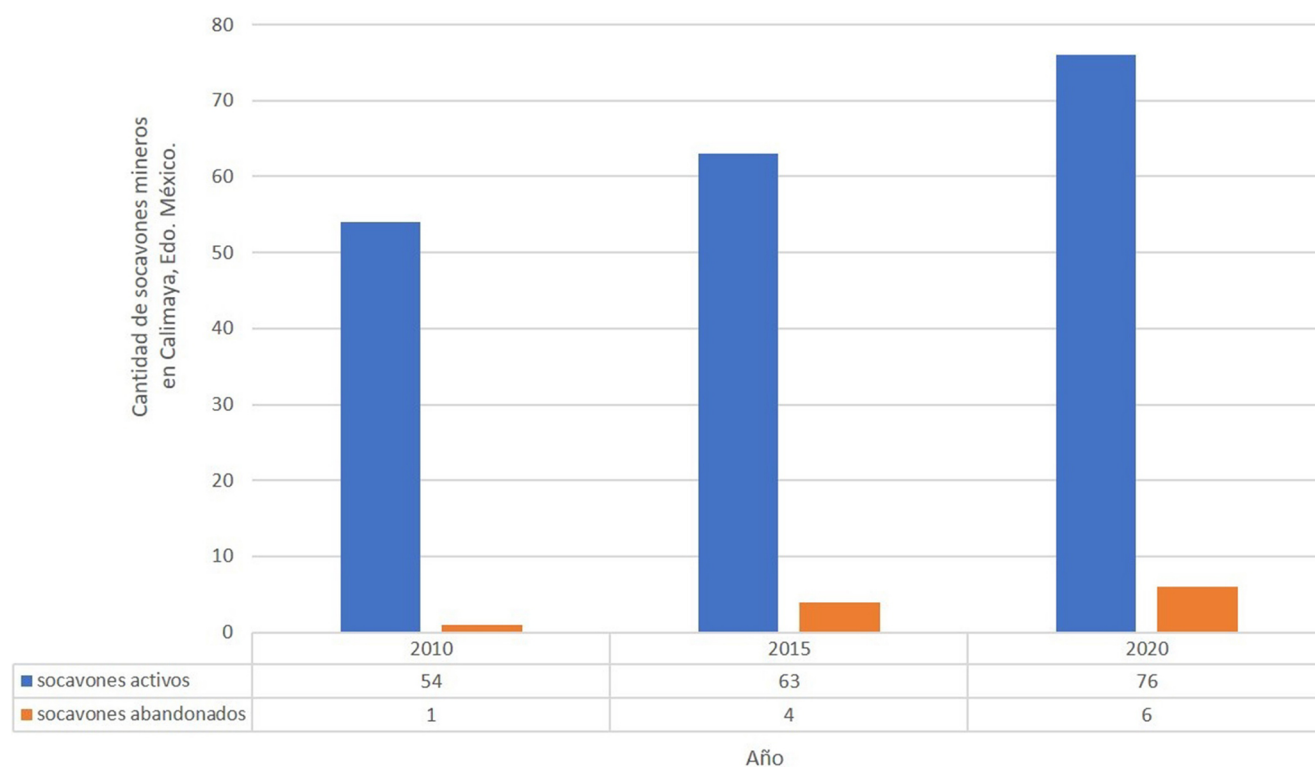
comunicación directa entre los vecinos del sitio.

- Función estética: este espacio abierto será parte de la configuración del paisaje urbano y determinará el grado de amenidad del municipio. Disfrutar del ambiente urbano radicarán en el gusto y deseo de permanecer en dicho espacio. Se propone proyectar un sitio agradable para pro-

porcionar puntos de observación de las diferentes perspectivas urbanas, así como embellecimiento paisajista.

- Función ambiental y paisajística: es la parte fundamental del estudio, y consistirá en proponer el mejor uso desde el punto de vista de la ingeniería ambiental, la geografía y el urbanismo, como líneas de base para la mitigación de los impac-

Mineral extraído	Nombre de la mina	Actividad	Ubicación	Coordenada Este	Coordenada Norte
Arena, Grava	Ocho y medio	Extracción, clasificación y venta	Camino a San Marcos S/N, Calimaya	434600	2119350
Arena, Grava	Pedreira la Joya	Extracción, clasificación y venta	0.5 km al N29° de la cabecera municipal	435254	2119571
Arena, Grava	La ladera	Extracción, clasificación y venta	La Ladera, Pueblo San Marcos De La Cruz	430741	2121881
Arena, Grava	La palma	Clasificación y venta	Paraje las Palmas, San Andrés Ocotlán	437358	2119942
Arena, Grava	Procesadora Santa María	Clasificación y venta	Ojo de agua, Calimaya	428842	2120445
Arena, Grava	San Miguel, la estación	Clasificación y venta	Calle castillo, Calimaya.	430379	2121652
Arena, Grava, Tepojal	Las Canoas	Clasificación y venta	Cerro de las canoas, Calimaya	428357	2120281
Arena, Grava	Procesadora, San Gabriel	Clasificación y venta	Paraje La Vía, Municipio de Calimaya	436485	2119018
Arena, Grava	Agregados Calimaya	Clasificación y venta	San Andrés Ocotlán	438340	2120348
Arena, Grava	Mina Barranquillas	Clasificación y venta	Paraje (las palmas) Barranquilla	436886	2118185

Tabla 7. Inventario de socavones mineros activos. Calimaya, Estado de México.**Table 7.** Inventory of active mining cavity. Calimaya, State of Mexico.**Figura 11.** Socavones activos y abandonados en los últimos 20 años. Calimaya, Estado de México.**Figure 11.** Active and abandoned mining cavities in the last 20 years. Calimaya, State of Mexico.

tos negativos de la minería que ha propiciado desajustes territoriales en la zona de Calimaya, México.

(b) Uso agrícola. Las principales actuaciones son:

- Salvaguardar la capa fértil del suelo sobre el que se desarrolla la explotación, con el fin de colocarla posteriormente en las terrazas agrícolas que se construirán y, de esta forma, conservar los nutrientes propios del suelo.
- Suavizar las pendientes de los tajos hasta alcanzar los 20° a través de la realización del movimiento de derrumbes de los materiales de las partes altas y la acumulación de materiales en el pie de suelo provenientes de otras partes del predio. Con esto se pretende disminuir la pendiente de los tajos y amortiguar la erosión, además de servir de base para la construcción de las terrazas y establecer zanjas de infiltración para la retención tecnificada del agua de lluvia, que será utilizada para el riego de los cultivos en temporadas de estiaje.
- Mejorar los componentes de suelo para la siembra agrícola, hortícola y frutícola. Una vez realizadas las dos actividades anteriores, se procederá a brindar nutrientes al suelo recién recuperado, con abonos locales elaborados partir del excremento de animales como vacas o cerdos, con el fin de asegurar la supervivencia de las especies que se pretenden cultivar. Una vez alcanzados los 20°, se implementará el sistema de terrazas con trazos transversales de base angosta para retener suelo y prevenir su erosión.

(c) Características generales para el uso deportivo: construcción de canchas polideportivas (fútbol, basquetbol, voleibol, atletismo):

- Suavizar las pendientes de los taludes hasta los 20° como máximo, realizando derrumbes de los materiales de la parte alta del terreno.
- Acumular materiales procedentes de otras explotaciones u obras cercanas en pie de suelo (minería de transferencia o

relleno de socavones), con el propósito de homogenizar y nivelar tanto las vías de acceso al predio como la base donde se estará construyendo la propuesta de cancha deportiva.

- Realizar rampas en la zona de taludes con el fin de que puedan ser utilizados como acceso a las áreas deportivas.
- Realizar una nivelación general en la parte interior del área, de modo que presente un paisaje o relieve homogéneo.
- Construir un drenaje sanitario y canales de desagüe para evitar inundaciones.

5.3. Impedimentos de carácter general para la consecución de los objetivos

- (a) De propiedad: Las actividades relacionadas con los usos posteriores al cierre de la mina se encuentran estrictamente ligados a los intereses del propietario final de la misma. Por ejemplo, en el caso de una mina que se encontrase inundada con agua de buena calidad, que sea un beneficio para la población cercana, el municipio tiene la obligación de generar todas las facilidades para conservar la mina con el estatus de “activa” para posteriormente hacer uso de ese recurso. Por lo tanto, es importante contar con el apoyo del propietario del sitio (Dirección de Ecología, 2018).
- (b) De cierre: Existen sitios administrativamente cerrados y/o abandonados. En ambos casos, la responsabilidad legal de las labores puede ser estatal, municipal, empresarial o mixta para las acciones de remediación del sitio.
- (c) Ambientales: En zonas mineras abandonadas, donde comúnmente se extrajo material pétreo, es indispensable determinar un uso posterior a las operaciones mineras, proponiendo un programa de rehabilitación de minas con el objetivo de lograr la sostenibilidad y supervivencia de los ecosistemas (Macancela, 2014).

6. Conclusiones

Las características geológicas de Calimaya permiten la actividad minera, específicamente de materiales destinados para la construcción (arena, grava, tepojal y tepetate), un motor económi-

co importante para la economía local. Sin embargo, si no existe un plan de ordenación minera se origina un gran costo ambiental, que repercute en la calidad de vida de la comunidad.

Existe un vacío legal en materia de minería y restauración ambiental, por lo que los empresarios mineros no están obligados a restaurar las explotaciones al finalizar el ciclo productivo de modo que, la falta regulatoria y de monitoreo provoca que la actividad minera se vaya expandiendo, y con ello se generan alteraciones significativas en las condiciones atmosféricas y de paisaje del municipio.

Las técnicas de teledetección aplicadas al estudio del impacto territorial de la minería a cielo abierto, muestran una gran utilidad principalmente para el análisis del sitio y la actualización y monitoreo constante. Permiten identificar cambios en el terreno a través de la descripción de las propiedades pictoricomorfológicas en la imagen, como es el caso del presente estudio, donde, mediante el uso de imágenes satelitales Sentinel 2A, se mostró un avance en la superficie ocupada por la extracción minera, que pudo ser corroborado con técnicas de inspección visual en el campo, permitiendo así, realizar un inventario actualizado.

El inventario de socavones mineros del municipio de Calimaya, generado en este trabajo, ayudará a las autoridades a monitorear y proponer acciones de remediación una vez acabado el proceso de extracción. El inventario permite identificar sitios donde se presentan desajustes territoriales y, de esta forma, facilita la concientización y el desarrollo de acciones de interacción entre el usuario y la población cercana.

Se demuestra el deterioro del entorno ambiental, ocurrido por la presencia de socavones a cielo abierto abandonados, y se proponen acciones para mitigar los efectos negativos que la explotación irracional de recursos pétreos ha provocado en las comunidades del municipio de Calimaya.

Los espacios degradados se encuentran sobre áreas suburbanas, con cercanía a comunidades y cuentan con líneas de conexión. Si se rehabilitaran, se facilitaría el desarrollo de actividades recreativas y deportivas, especialmente para la población joven del sitio, desarrollando una empatía con el entorno.

Agradecimientos

Los autores agradecen al Centro Nacional de Ciencia y Tecnología CONACyT y a la Facultad

de Geografía de la Universidad Autónoma del Estado de México, por su apoyo a los trabajos de campo y procesamiento de la información, durante el presente proyecto.

Referencias

- Aceves, F., López, J., and Martin del Pozzo, A. (2006). Determinación de peligros volcánicos aplicando técnicas de evaluación multicriterio y Sistemas de información geográfica en el área del Nevado de Toluca. *Revista Mexica de Ciencias geológicas*, 23(2), 113-124.
- Arce, J., Gardner, J., and Macías, J. (2013). Pre-eruptive conditions of dacitic magma erupted during the 21.7 ka Plinian event at Nevado de Toluca volcano, Central Mexico. *Journal of vulcanology and geothermal research*, 249, 49-65.
- Arriaga, A., and Benhumea, B. (2020). Panorámica histórica del municipio de Calimaya. *Calimaya, Estado de México*, 05-270 pp.
- Castellanos, H. (2016). Diseño metodológico para clasificar zonas mineras a cielo abierto a través del procesamiento digital de imágenes de sensores remotos, aplicado en el nor-orienté del departamento de Antioquia. Informe inédito. Universidad Nacional de Colombia, Colombia, 224 págs.
- Chuvieco, E. (2010). Teledetección ambiental, nueva edición actualizada Ariel Ciencia. Madrid, 594 pp.
- Dirección de Ecología (2018). Información sobre la situación ecológica en Calimaya 2018. IPOMEX H. Ayuntamiento de Toluca, México pp. 18-25.
- Drury, S. (1987). Image Interpretation in Geology. London. *International Journal of Remote Sensing*, 8(9), 1399-1400.
- Espinosa, L. M., Balderas, M. A., and Cabadas, H. V. (2014). Caracterización Geomorfológica del Área Natural Protegida Nevado de Toluca: Complejo de Volcanes Nevado de Toluca y San Antonio. *Revista Ciencia UAT, Segunda Edición Especial Reservas Naturales Vol. 9 no. 1*, Universidad Autónoma de Tamaulipas, 06-14 pp.
- Ferrari, L. (2000). Avances en el conocimiento de la Faja Volcánica Transmexicana durante la última década. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*. Instituto de Geología, UNAM, Apdo. Postal 70-296, Cd. Universitaria, 04510 México D.F. V 53, n. 1, (2000), 84-92.
- Fuente, M. E., and Barkin, D. (2013). Mining as a development factor in the Sierra Juárez in Oaxaca: An ethical evaluation. *Revista Problemas del Desarrollo*, 44 (172), 123-144.
- Gama-Castro, J., Solleiro Rebolledo, E., Flores Román, D., Sedov, S., Cabadas Báez, H., and Díaz Ortega, J. (2007). Los tepetates y su dinámica sobre la degradación y el riesgo ambiental: el caso

- del Glacis de Buenavista, Morelos. México. Sociedad Geológica Mexicana, 59, (1), 133-145.
- Gao, J. (2009). *Digital Analysis of Remotely Sensed Imagery*. McGraw-Hill Education; 1^{er} edición. Nueva Zelanda, 689 pp.
- García, R. (2006). *Sistemas Complejos (conceptos, método y fundamentación epistemológica de investigación interdisciplinaria)*. Editorial Gedisa, S.A., Barcelona, 200 pp.
- Gharbia, R., El Baz, A. H., Hassanien, A. E., and Tolba, M. F. (2014). Remote Sensing Image Fusion Approach Based on Brovey and Wavelets Transforms. In: P. Kömer, A. Abraham, and V. Snášel (eds.), *Proceedings of the Fifth International Conference on Innovations in Bio-Inspired Computing and Applications IBICA 2014*. Advances in Intelligent Systems and Computing, 303 pp.
- Global Monitoring for Environment and Security, Sentinel hub (2020). Consultado el 03/03/2020 en: <https://apps.sentinel-hub.com/sentinel-playground/>
- Gobierno Municipal de Calimaya (2019). Plan de desarrollo municipal. Calimaya, Edo. México: 2019-2021. Informe inédito. Gobierno de Calimaya, Estado de México pp. 06-305.
- Gutiérrez, J. G. (2013). *La investigación geográfica. Fundamentos, métodos e instrumentos*. Dunken, Buenos Aires 152 pp.
- Hernández-Jatib, N., and Guilarte-Cutiño, I. (2018). Diagnóstico del desempeño de la cantera de áridos La Inagua, Cuba, utilizando una matriz de evaluación. *Ciencia UAT*, 13(1), 6-18.
- Hernández Gutiérrez, L. E., Santamarta Cereza, J. C., and González-Gallego, J. (2015). *Ingeniería geológica en terrenos volcánicos*. Ilustre Colegio Oficial de Geólogos, Madrid, España, 405 pp.
- IGCEM (2014). Datos generales del municipio de Calimaya 2010-2014. Instituto de Información e Investigación Geográfica, Estadística y Catastral del Estado de México, México, pp. 15-30.
- Juan Pérez, J. I., Magallanes, M., Juárez, R., Ramírez, A., and Gutiérrez Cedillo, J. (2015). Responsabilidad e impacto ambiental en un territorio del altiplano mexicano. *Análisis ambiental, sociodemográfico y económico*. Investigaciones socioambientales, educativas y humanísticas para el medio rural Toluca, México, 347 pp.
- Kriegler, F. J., Malila, W. A., Nalepka, R. F., and Richardson, W. (1969). Preprocessing transformations and their effect on multispectral recognition. *Proceedings of the 6th International Symposium on Remote Sensing of Environment*. Ann Arbor, MI: University of Michigan, 97-131 pp.
- Kruse, A., Lefkoff, B., Boardman, J., Heidebrecht, B., Shapiro, A., Barloon, P. J., and Goetz, H. (1993). The Spectral Image Processing System (SIPS) Interactive Visualization and Analysis of Imaging Spectrometer Data, Center for the Study of Earth from Space (CSES), Cooperative Institute for Research in Environmental Sciences (CIRES), University of Colorado, Boulder. *Remote Sens. Environ.*, 44, 145-163.
- Lira, J. (2010). Tratamiento digital de imágenes multi-espectrales. Universidad Nacional Autónoma de México, (2) 597 pp.
- López, E. D., and Altamirano, L. (2008). "A method based on tree-structured Marko random field and a texture energy function for classification of remote sensing images," 5th International Conference on Electrical Engineering, Computing Science and Automatic Control, 540-544
- Macancela, N. A. (2014). Propuesta metodológica de recuperación de espacios mineros para el desarrollo de comunidades. Santa Elena, Ecuador: Centro de Investigación y Proyectos Aplicados a las Ciencias de la Tierra (CIPAT), 25 pp.
- Melo, L., and Camacho, M. (2005). Interpretación visual de imágenes de sensores remotos y su aplicación en levantamientos de cobertura y uso de la tierra. Instituto Geográfico Agustín Codazzi, 156 pp.
- Montes de Oca, A., and Ulloa, M. (2013). Recuperación de áreas dañadas por la minería en la cantera los Guaos, Santiago de Cuba. *Revista Luna Azul*, 37, 74-88.
- Núñez, J., Otazu, X., Fors, O., Prades, A., Pala, V., and Arbiol, R. (1999). Multiresolution-Based Image fusion whit Additive Wavelet Descomposition. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 37(3), 1204-1211.
- Rouse, J., Haas, R., Schell, J., and Deering, D. (1973). Monitoring vegetation systems in the Great. Third ERTS-1, Goddard Space Flight Center, 1, 309-317.
- Saaty, T. L. (1977). A scaling method for priorities in hierarchical structures. *Journal of Mathematical Psychology*, 15(3), 234-281.
- Sebem, E. (2005). Aportaciones de la teledetección en el desarrollo de un sistema metodológico para la evaluación de los efectos de cambio climático sobre la producción de las explotaciones agrarias. Escuela Técnica Superior de Ingeniería Agronómica, Madrid, 384 pp.
- Secretaría de Economía (2014). Ley Minera. Diario Oficial de la Federación, México, 34 pp.
- Servicio Geológico Mexicano (2020). Panorama Minero del Estado de México 2020. Dirección de Operación Geológica Estado de México: Subsecretaría de Minería. 4 pp. + 47 pp.
- Torres, Y., Rodríguez, R. G., and Reynaldo, C. L. (2019). Propuesta de un procedimiento para la rehabilitación minera en explotaciones a cielo abierto. *Minería y Geología*, 35(1), 1-20.
- Tucker, C. J. (1979). Red and photographic infrared linear combinations monitoring vegetation. *Journal of Remote Sensing Environment*, 8(2), 127-150.

Valencia, E. A. (2017). Propuesta de Rehabilitación Ambiental con enfoques de Sustentabilidad y Resiliencia en Calimaya, Estado de México. Toluca: Universidad Autónoma del Estado de México, 260 pp.

Vázquez, S. L., and Heine, K. (2002). Late Quaternary glaciation of México. En J. Ehlers, P. L. Gibbard

(Eds.) Quaternary Glaciations - Extent and Chronology. Volume 2, Part III: South America, Asia, Africa, Australia, Antartica, Amsterdam, Netherlands: Elsevier. 233-242 pp.