

RESEARCH ARTICLE

Estimation of topographic modifications in mining extraction areas of the Mezquital Valley, Mexico, using remote sensing methods

Estimación de modificaciones topográficas en zonas de extracción minera del Valle del Mezquital, México, mediante métodos de teledetección

 Edison Manuel Chavez Lancheros*,  Alexis Ordaz Hernández,  Raquel Hinojosa Reyes

Facultad de Geografía, Universidad Autónoma del Estado de México, 50090 Toluca, México

Corresponding author: echavezl002@alumno.uaemex.mx (Edisson Manuel Chávez Lancheros)

Key point:

Topographic changes caused by mining activity can be quantified in terms of area, slope, and volume.

Digital elevation models allow for the analysis of changes in relief over the years based on the differences between them.

Remote sensing and the data available from SPOT sensors are the necessary tools and inputs for conducting this research.

ABSTRACT

The research aims to quantify the topographic changes that occurred in the Mezquital Valley, Mexico, due to open-pit mining activity during the period 2003–2016. The extraction of carbonate rocks and other stone materials has caused significant transformations in the relief and landscape. The method is based on the use of remote sensing techniques and the generation of Digital Terrain Models (DTMs) from stereoscopic images of the Earth Observation System (SPOT). The results estimate extraction volumes exceeding 146 million m³ for the 24 identified mines during the studied period. Additionally, significant changes in the landscape were identified, with a noticeable impact on morphometry, including a sustained increase in slope angles.

Keywords: Mining; Topographic; Remote sensing; Volumes; Slopes.

Article History:

Received: 04/10/2024

Accepted: 19/05/2025

Published: 06/03/2026

Puntos clave:

Los cambios topográficos causados por la acción minera pueden cuantificarse en términos de superficie, pendiente y volumen.

Los modelos digitales de elevación permiten analizar los cambios en el relieve a lo largo de los años, a partir de las diferencias entre ellos.

La percepción remota y la información disponible de los sensores SPOT son las herramientas e insumos necesarios para desarrollar esta investigación.

RESUMEN

La investigación tiene como objetivo cuantificar los cambios topográficos ocurridos en el Valle del Mezquital, México a causa de la actividad minera a cielo abierto en el periodo 2003-2016. La actividad de extracción de rocas carbonáticas y otros materiales pétreos ha provocado transformaciones significativas en el relieve y paisaje. El método se fundamenta en el uso de técnicas de teledetección y generación de Modelos Digitales de Terreno (MDT) a partir de imágenes estereoscópicas del Sistema para la Observación de la Tierra (SPOT). Los resultados estiman, para las 24 minas identificadas, volúmenes de extracción que superan los 146 millones de m³ para el periodo estudiado. Además, se identifican cambios significativos en el paisaje con incidencia evidente en la morfometría con un incremento sostenido en los ángulos de la pendiente.

Palabras clave: Minería; Topografía; Teledetección; Volúmenes; Pendientes.

Historial del artículo:

Recibido: 04/10/2024

Aceptado: 19/05/2025

Publicado: 06/03/2026

Citation / Cómo citar este artículo: Chavez Lancheros, E.M., Ordaz Hernández, A., Hinojosa Reyes, R. (2025). Estimation of topographic modifications in mining extraction areas of the Mezquital Valley, Mexico, using remote sensing methods. Boletín Geológico y Minero, 136(3), 004.

1. Introducción

El continente americano, atendiendo a su contexto geológico, constituye una reserva importante de minerales que desde tiempos prehispánicos han sido aprovechados para la construcción de ciudades y en épocas más recientes, para configurar la dinámica económica de los países de la región (Rodríguez & López, 2018). En su evolución histórica las materias primas no metálicas, principalmente la roca para piedra de construcción y fabricación de cemento, tienen una demanda creciente. En el ámbito nacional minero mexicano estas representan el 79% de la producción nacional de materiales no metálicos, impulsadas principalmente por el desarrollo de infraestructura (SGM, 2023).

En México, se identifican 874 zonas mineras distribuidas en 1883,20 km². Estas incluyen minería de carbón (10%), metálica (42%), no metálica (4%), salina (30%) y exploración metálica (14%) (Llano & Flores, 2023). Las rocas carbonáticas se emplazan en una superficie estimada de 491974 km² en todo el país, de los cuales 283 km² se ubican en el Estado de México y 6273 km² en el Estado de Hidalgo (Álvarez & Estrada, 2024). Precisamente, en los límites de las dos entidades mencionadas se emplaza el Valle del Mezquital; que destaca por la explotación de las rocas carbonáticas para la fabricación de cemento, concreto y otros derivados (Carrasco, 2022).

Particularmente en el Valle del Mezquital, se identifican 24 zonas mineras para la extracción de minerales no metálicos que abarcan 1559,42 hectáreas. Donde, la producción de cal se generalizó a partir de la época prehispánica, básicamente como material para la construcción y desde entonces, en esta región la explotación de las rocas carbonáticas ha sido la fuente de materia prima (Palma, 2009). A principios del siglo XX se inició la producción y comercialización estatal de cemento y cal iniciando el fenómeno de centralización de la extracción (Carrasco *et al.*, 2017).

La minería a cielo abierto genera cambios significativos en la morfología del paisaje, afectando la altitud, pendiente, depresiones, estabilidad de taludes y pérdida de suelos (Ruz, 2020) (Figura 1). Además, es un reflejo de la generación de impactos ambientales con énfasis en la disminución de vegetación y la migración de fauna (Castro & Guío, 2004).



Figura 1. Cambios morfológicos generados por la actividad minera. Foto de la izquierda representa un socavón de aproximadamente 30m de profundidad en la cantera Caleras Beltrán, y foto de la derecha, cortes verticales aplicados al cerro Blanco (Municipio de Atotonilco, Hidalgo). Fuente: Foto tomada en campo el 25 de noviembre de 2023.

Figure 1. Morphological Changes Generated by Mining Activity. The photo on the left shows a pit approximately 30 meters deep in the Caleras Beltrán quarry, while the photo on the right depicts vertical cuts applied to Cerro Blanco (Atotonilco Municipality, Hidalgo). Source: Photo taken in the field on November 25, 2023.

En relación con la problemática descrita, la presente investigación tiene como objetivo realizar un análisis multitemporal de las zonas mineras del Valle del Mezquital (Figura 2). Se pretende, describir los principales cambios en la morfología de la región, a partir de variables topográficas como el volumen de material extraído y los cambios de pendientes en el periodo 2003-2016.

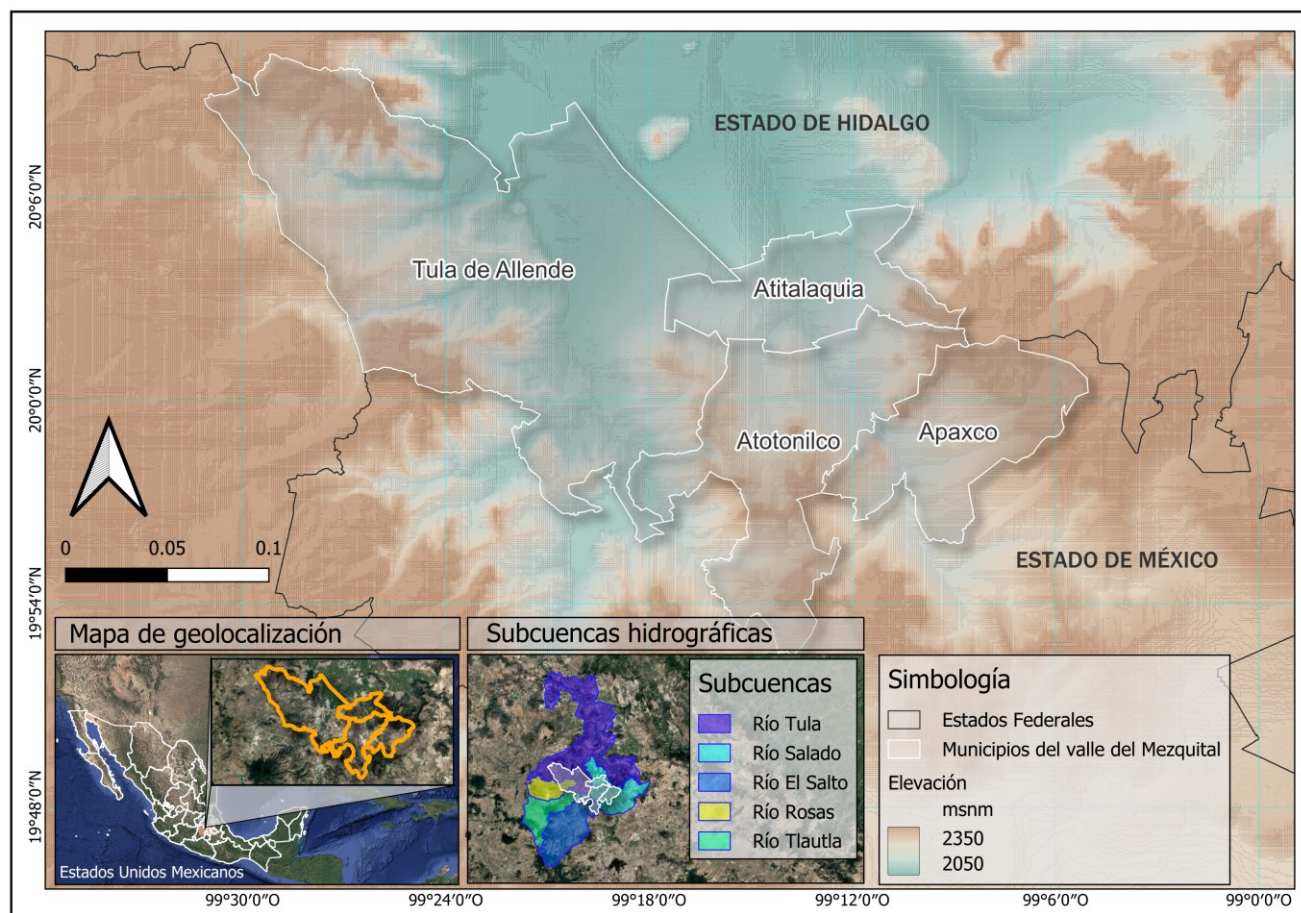


Figura 2. Mapa de localización geográfica del Valle del Mezquital. Fuente: Elaboración propia con base en datos del INEGI (2022) e imágenes satelitales del USGS.

Figure 2. Geographical location map of the Mezquital Valley. Source: Own elaboration based on data from INEGI (2022) and satellite images from USGS.

Para alcanzar el objetivo, se aplican técnicas de generación de MDT a partir de imágenes estereoscópicas SPOT, junto con su validación estadística como parámetro de calidad y la creación de superficies TIN. Se debe destacar que, los MDT son ampliamente utilizados con propósitos similares en distintas partes del mundo (Emel *et al.*, 2014, Henselowsky *et al.*, 2021, Martín-Velázquez *et al.*, 2022).

La Figura 3 representa el procedimiento seguido en esta investigación, mismo que, puede ser replicado en investigaciones enfocadas a representar y analizar las modificaciones en el relieve de áreas afectadas por actividades mineras, contribuyendo a su gestión y evaluación. El procedimiento se aplica a 24 polígonos mineros identificados en la región. En consecuencia, la presente investigación pretende revelar los cambios morfométricos inducidos por las explotaciones mineras a cielo abierto existentes en el periodo señalado. El resultado sentará las bases para la justificación y en su caso, la aplicación de un futuro proyecto de restauración geomorfológica.

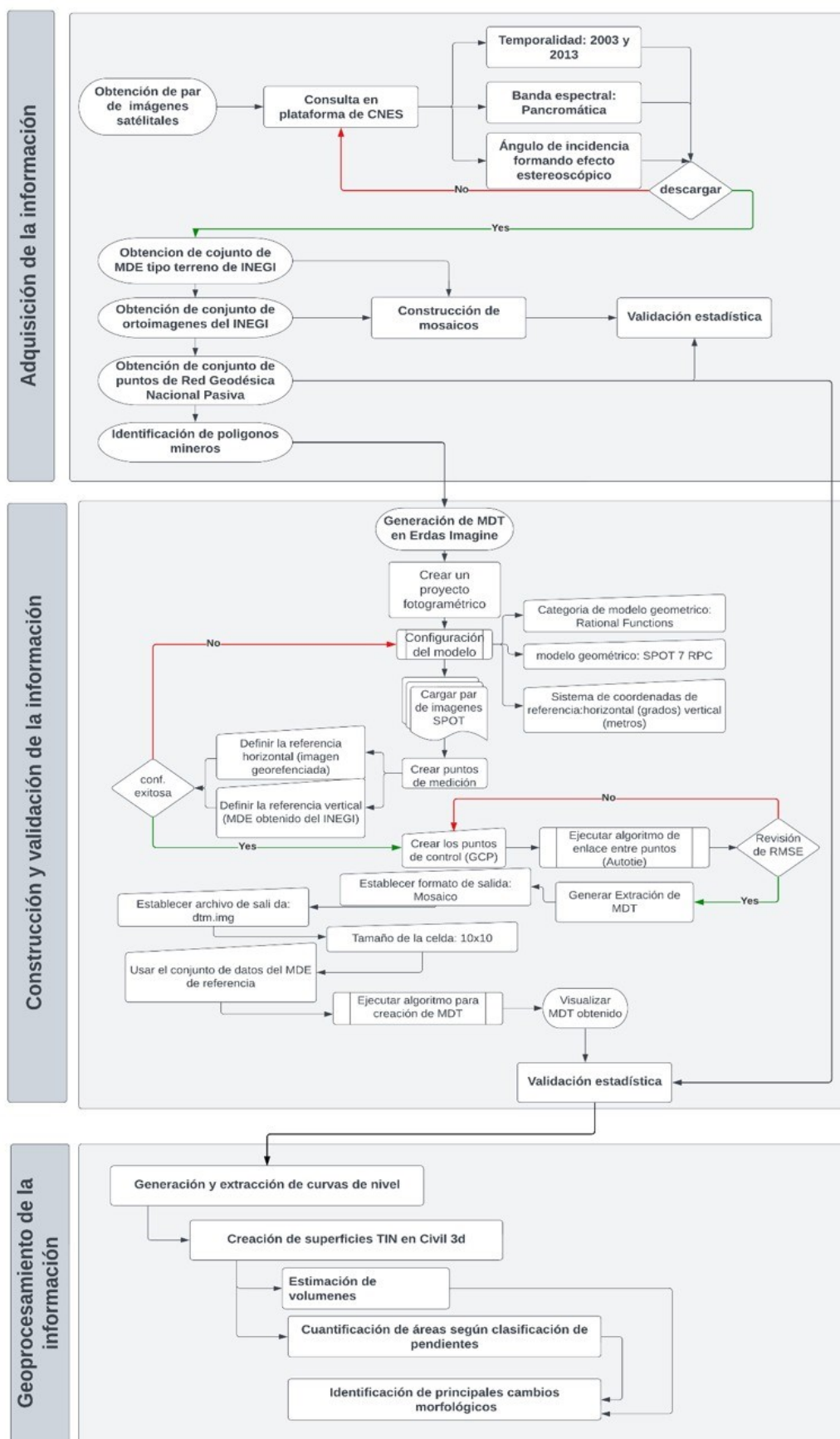


Figura 3. Procedimiento para revelar los cambios morfológicos del terreno por extracción minera.

Figure 3. Procedure for revealing morphological changes of the terrain due to mining extraction.

2. Área de estudio

En la nación mexicana, al suroeste del estado de Hidalgo y al norte del estado de México, se localiza el Valle del Mezquital, sobre la cuenca del Río Moctezuma, principalmente sobre las subcuencas del Río Tula y el Río Salado y, en menor medida, sobre las subcuencas de los ríos El Salto, Rosas y Tlautla. Geológicamente se caracteriza por constituir importantes afloramientos de rocas sedimentarias, donde las rocas carbonáticas más representativas se localizan dentro de las jurisdicciones de los municipios de Tula de Allende, Atitalaquia, Atotonilco de Tula y Apaxco (Barba & Frunz, 1999) (Figura 2).

Del mismo modo, dicha región se halla también en la subprovincia de llanuras y sierras de los Estados de Querétaro e Hidalgo, en el eje Neovolcánico y se caracteriza por presentar cerros de composición carbonatada en forma de lomas alargadas con pendientes suaves orientadas de norte a sur (Granados, 2016).

La influencia económica de esta región (Estados de Hidalgo y México) radica en su aportación del 16.2% del volumen de producción nacional de rocas carbonáticas (Granados, 2016). Destacando la producción de las plantas de Cemex, Cementos Fortaleza, Caleras Bertrán, Promotora de Inversiones Summa y Trituradora y procesadora de materiales Santa Anita, que tienen grandes instalaciones en Tula de Allende y Atotonilco de Tula (Caballero, 2023).

3. Materiales y Métodos

De acuerdo con el objetivo enunciado, la investigación se enfoca a cuantificar los cambios morfológicos por extracción minera en el Valle del Mezquital. El periodo analizado mostrará un escenario comparativo entre los años 2003, 2013 y 2016. La elección de los años 2003 y 2013 responde a la disponibilidad de imágenes SPOT pancromáticas que cumplieron con los parámetros de calidad (temporalidad, resolución espacial y ángulo de incidencia) actualmente disponibles en SWH (2024). Mientras que, la elección del año 2016 responde a la última actualización del modelo digital de elevación (MDE) tipo terreno generado por el Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI, 2016). Las imágenes SPOT más recientes no son de acceso público, esta es la causa del cierre del análisis al año 2016, sin embargo, se considera que, la aportación metodológica y la tendencia del comportamiento de los cambios morfométricos para el área analizada son un resultado muy valioso en el manejo ambiental de la zona. Además, se establece una línea base de comparación para estudios posteriores, en un área degradada y de prioridad en la agenda nacional mexicana (Carrasco *et al.*, 2017).

3.1. Procedimiento

El procedimiento general para el análisis se divide en tres etapas: (1) adquisición, (2) construcción y validación, y (3) geoprocesamiento de la información, las cuales se muestran en la Figura 3.

3.1.1. Adquisición de la información

La etapa de adquisición de la información está configurada por la obtención de pares de imágenes estereoscópicas (Tabla 1) del sensor SPOT 5, del Centro Nacional de Estudios Espaciales (CNES) del gobierno francés, estas debieron cumplir con los siguientes parámetros:

- Temporalidad: En el ámbito de la minería, las fases de explotación pueden extenderse entre 5 y 30 años, dependiendo de los permisos otorgados. No obstante, la magnitud de los cambios morfológicos en el relieve está directamente relacionada con la duración del periodo analizado: a mayor diferencia temporal, más evidentes son las transformaciones observadas. Por esta razón, la temporalidad del proyecto se delimitó al análisis entre los años 2003 y 2016.
- Banda espectral: La banda pancromática del sensor SPOT 5 tiene la particularidad que su resolución espacial es de 5,0 m, lo que mejora considerablemente la calidad del producto final.

- **Ángulo de incidencia:** Cumple una función importante para la generación del efecto estereoscópico, debido a que, en el caso de los sensores SPOT, pueden ser dirigidos hasta los 27° a izquierda o derecha de la trayectoria orbital y durante una misma franja de terreno (USAID, 1993).

La Tabla 1 describe los principales parámetros de las imágenes SPOT obtenidas.

Tabla 1. Resumen de metadatos de cada una de las imágenes obtenidas del SWH – CNES.

Table 1. Summary of Metadata for Each of the Images Obtained from SWH – CNES.

Parámetros	Par 1		Par 2	
ID escena	5 588310 03/03/16 17:21:01 1 S	5 588-310 03/03/16 17:22:32 2 S	5 588-310 13/07/01 16:46:55 1 A	5 588-310 13/05/04 17:04:53 1 A
Fecha	2003-03-16 17:21:01.5	2003-03-16 17:22:32.6	2013-07-01 16:46:55.2	2013-05-04 17:04:53.4
Instrumento	HRS 1	HRS 2	HRG 1	HRG 1
Nivel de preprocesamiento	1A	1A	1A	1 ^a
Indicador de banda espectral	Pancromática	Pancromática	Pancromática	Pancromática
No. Bandas espectrales	1	1	1	1
Ángulo de orientación	12.600744°	13.163654 °	12.118838 °	13.683241°
Ángulo de incidencia	Derecha 22.915355°	Izquierda 22.539183 °	Derecha 14.707067 °	Izquierda 15.600215 °
Centro de localización de la escena				
Latitud	N20° 0' 56"	N20° 0' 56"	N20° 0' 57"	N20° 0' 57"
Longitud	W99° 16' 26"	W99° 16' 57"	W99° 17' 36"	W99° 16' 47"
Número de píxel	12000	12000	6001	6001
Número de línea	12000	12000	6001	6001

El mosaico que reúne todos los MDE tipo terreno, cumple la función de referencia vertical al momento de asignar el valor de altura de cada uno de los puntos de control, y como modelo de comparación al año 2016. Para este último (año 2016), se toman como referencia los datos de relieve continental del INEGI que permite modelar espacios geográficos de la corteza terrestre en su parte superficial para conocer aspectos de alturas, pendientes, desniveles, entre otras. En esa dirección, el continuo de MDE de tipo terreno con resolución de 5,0 m en formato cartográfico 1:10000, es un conjunto de celdas, que proporcionan elevaciones del país, bajo un marco de referencia vertical y horizontal específico (ITRF08 época 2010,0). El formato de archivos descargados corresponde al tipo "Bil", que es un formato de archivo ráster binario para fotografías aéreas, imágenes satelitales y datos espectrales (INEGI, 2022). El mosaico construido se conformó por un total de 278 MDT disponibles a escala 1:10000 con el objetivo de que este tuviese una cobertura total de todos los pares de imágenes satelitales descargadas (Figura 4).

Una vez construido el mosaico del MDT, fue necesario validar estadísticamente la calidad del producto para tener certeza de los valores de altura que se asignaría a cada punto de control.

La Norma Técnica para la generación de MDE con fines Geográficos, especifica en su artículo 16 que, para conocer la exactitud vertical de un MDE se debe realizar un análisis estadístico conforme a los términos establecidos en la Norma Técnica de Estándares de Exactitud Posicional emitida por el Sistema Nacional de Información Estadística y Geográfica (SNIEG), en la que se define la Exactitud de Posición Vertical (EPV), en el intervalo de confianza del 95%. Además, la fuente independiente de mayor exactitud deberá adquirirse separadamente de los datos empleados para la generación de los MDE (SNIEG, 2014). En consecuencia, los datos que mayor nivel de exactitud presentan, en este caso provienen de la Red Geodésica Nacional Pasiva (RGNP), constituida por un conjunto de vértices geodésicos materializados y distribuidos en todo el territorio nacional. Las coordenadas de dichos puntos son generadas a partir de levantamientos geodésicos a través del Sistema Global de Navegación por Satélite (GNSS), donde les fue asignado valores de posición referidas al elipsoide GRS80 (SNIEG, 2010).

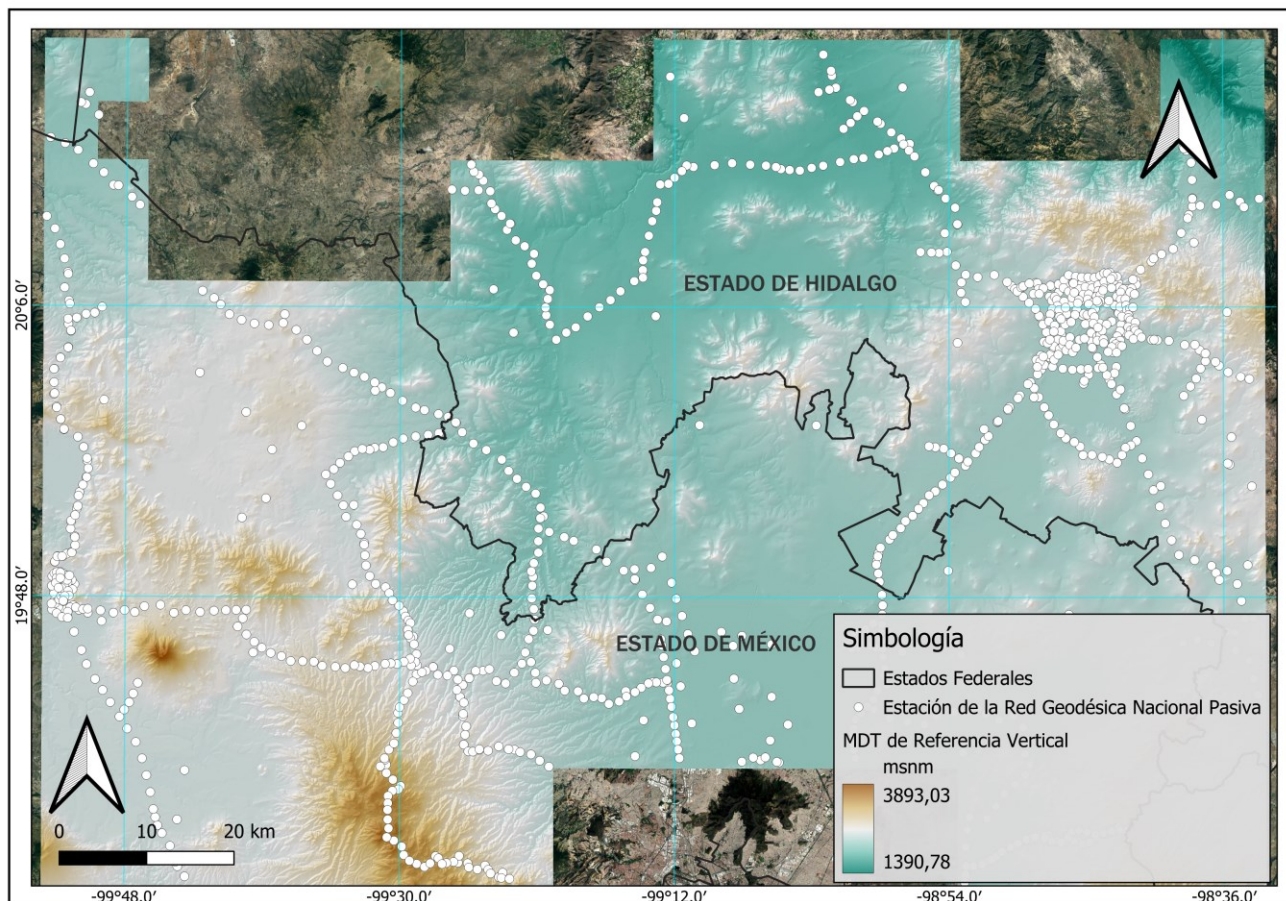


Figura 4. Puntos de la RGNP sobre el MDT de referencia. Fuente: Elaboración propia con base en información del INEGI.

Figure 4. RGNP points over the reference DEM. Source: Own elaboration based on information from INEGI.

A partir de lo anterior, se seleccionaron los puntos que se interceptaban con el MDT para poder extraer el valor de altura del archivo ráster en cada punto de la RGNP identificados en los estados de México e Hidalgo, para posteriormente calcular la EPV (Figura 4).

Siguiendo el proceso metodológico para el cálculo de la exactitud posicional, se procedió a calcular la diferencia de altura entre los valores reales de cada punto de la RGNP y los valores extraídos del MDT de referencia. La Tabla 2 muestra un resumen de 10 puntos de un total de 1620.

Tabla 2. Ejemplo del cálculo de diferencia de alturas para 10 puntos. Fuente: Elaboración propia con base en información del INEGI (RGNP y valores extraídos del MDT).

Table 2. Example of height difference calculation for 10 points. Source: Own elaboration based on information from INEGI (RGNP and values extracted from the DEM).

Altura punto de RGNP	Marco Ho	Altura extraída de MDT	Diferencia de altura
2846,866	ITRF08	2841,74	5,126
2251,157	ITRF08	2246,57	4,587
2755,766	ITRF08	2751,36	4,406
2289,191	ITRF08	2285,35	3,841
2571,468	ITRF08	2568,07	3,398
2255,161	ITRF08	2251,79	3,371
2281,858	ITRF08	2278,62	3,238
2238,526	ITRF08	2235,29	3,236
2245,625	ITRF08	2249,22	3,595
2251,254	ITRF08	2254,89	3,636

La Tabla 3, muestra el resultado de la estadística descriptiva; donde la EPV arrojó un valor de 4,08 m (aplicando la ecuación 1), mismo que se considera de buena exactitud, de acuerdo con los lineamientos del SNIEG (2014). La norma considera, que la exactitud vertical del MDE dependerá de las características del terreno, así como de las metodologías e insumos empleadas para su obtención.

Tabla 3. Estadística descriptiva de la diferencia de alturas entre puntos.

Table 3. Descriptive statistics of height differences between points.

$$EPV = 1,96 * \delta \quad (\text{ecuación 1})$$

δ : corresponde a la desviación estándar

Estadística descriptiva	
Media	-5,080
Error típico	0,051
Mediana	-5,361
Moda	-5,953
Desviación estándar	2,086
Varianza de la muestra	4,352
Curtosis	6,511
Coefficiente de asimetría	1,8108
Rango	19,683
Mínimo	-9,851
Máximo	9,832
Suma	-8231,19
Cuenta	1620
Nivel de confianza (95.0%)	0,101
EPV	4,089

De esta forma, se verificó, que el MDT es válido como referencia vertical para la posterior asignación de altura de los puntos de control terrestre. Asimismo, este procedimiento de validación estadística se realizó para cada uno de los MDT generados correspondientes a los años 2003 y 2013 como mecanismos de evaluación de calidad.

Otra información necesaria, consiste en el conjunto de ortoimágenes que cumplen el papel de referencia horizontal, es decir las coordenadas (X, Y) que se le asignó a cada uno de los puntos de control terrestre (GCP, por sus siglas en inglés). Una ortoimagen, es una construcción fotográfica de un lugar, libre de errores, deformaciones y con la misma validez de un plano cartográfico. Las ortoimágenes son captadas por sensores remotos tanto de fotografías aéreas como de imágenes de satélite y constituyen un elemento básico para el análisis del territorio (INEGI, 2022). De esta manera, se necesitó de 84 ortoimágenes a escala 1:20000 para cubrir toda la extensión de las imágenes satelitales obtenidas.

El reconocimiento de cada una de las minas de la región se realizó mediante un proceso de restitución fotogramétrica utilizando imágenes satelitales Sentinel-2. Durante este proceso, se delimitaron 24 polígonos sobre las zonas mineras más extensas identificadas en la imagen. Además, se realizó un acercamiento con la comunidad local, cuyo conocimiento permitió complementar la información con atributos clave para cada polígono, como el nombre de la mina, la concesión minera a la que pertenece y el material extraído. Este enfoque permitió incorporar información sobre características del terreno y usos del suelo que no están documentados en fuentes oficiales.

3.1.2. Construcción y validación de la información

Para la construcción y validación de información, se emplearon herramientas especializadas como Erdas Imagine y QGIS, integrando teledetección y Sistemas de Información Geográfica (SIG) para generar cartografía a partir del tratamiento de imágenes en el módulo de fotogrametría. En Erdas Imagine, se utilizó el modelo geométrico orbital pushbroom para imágenes SPOT 5, corrigiendo distorsiones geométricas y transformando las coordenadas al sistema de referencia terrestre, asegurando una georreferenciación precisa (Geospatial-Insight, 2022). Además, se localizaron puntos de control terrestre (GCP) mediante identificación en ortoimágenes de referencia y asignando coordenadas geográficas (latitud, longitud, altura), según los siguientes lineamientos:

- El mínimo de puntos de control para garantizar un Error Medio Cuadrático (EMC) bajo es de 30, que deben estar distribuidos homogéneamente en toda la imagen satelital, formando un triángulo entre el punto anterior y el siguiente. Además, se verificó que, los puntos de control adquirieran las coordenadas y altura de referencia (Blas, 2013). Con el propósito de alcanzar mayor precisión se adoptaron un total de 50 GCP distribuidos en el área de trabajo.
- Cada punto de control se localizó sobre intersecciones viales o áreas de cultivos, bajo la premisa de que estos son los que menos cambian en el territorio con el transcurso de los años.

Una vez localizados los puntos de control y corregidas las distorsiones geométricas, se procede a la ortorectificación, que es el proceso de corregir geométricamente las imágenes satelitales, garantizando que cada píxel adopte las coordenadas de latitud y longitud correctas. Esto implica transformar el sistema de proyección central original a uno ortogonal, utilizando una transformación polinomial de segundo grado basada en puntos de control comunes entre las imágenes y una ortoimagen de referencia. (Ambrosio *et al.*, 2002).

Para evaluar la precisión de la ortorectificación, se emplea el EMC que permite validar estadísticamente la posición de cada uno de los puntos de control, respecto de la ortoimagen y las imágenes satelitales. Según la propuesta metodológica de ortorectificación de imágenes SPOT 5 para la generación de productos al alcance del INEGI, el EMC máximo permitido es equivalente a 2 píxeles, que para el caso de SPOT 5, es de 10,0 m (Blas, 2013). En esa dirección, el EMC obtenido para el proceso de ortorectificación del par de imágenes del año 2003 y 2013, fue de 0,0519 y 0,0564 píxeles respectivamente.

Una vez triangulada la red de puntos de control, el siguiente paso consistió en generar cada uno de los MDT desde la interfaz DTM Extraction de ERDAS Imagen, donde se especifica el formato de salida, el tamaño de la celda de 10,0 x10,0 metros y una precisión de 2,0 m (Figura 5).

En la etapa de geoprocesamiento de la información, las curvas de nivel son esenciales en la representación de superficies, estas permiten visualizar de manera simultánea las áreas planas y empinadas, así como crestas y valles (ESRI, 2022). De esta forma, se obtienen los archivos ráster de cada uno de los MDT generados y geoprocesados en SIG; y se crearon curvas de nivel cada 1,0 m para analizar cambios entre superficies que facilitaron la extracción de datos en las zonas mineras estudiadas.

Posteriormente, se generaron las superficies de cada una de las minas identificadas por cada año de análisis (2003, 2013 y 2016) empleando el programa Civil 3D de Autodesk; dichas superficies se sustentan en la generación de una red irregular de triángulos (TIN, por sus siglas en inglés). La red mencionada, consistió en un modelado digital de alta precisión, que representa la morfología del terreno y permite efectuar cálculos de área planimétrica, área de superficie y volúmenes (ESRI, 2021).

Las superficies generadas de manera individual, para cada una de las minas en sus diferentes temporalidades, permitió analizar los cambios de pendientes de acuerdo con los ajustes propuestos por Bolaños *et al.* (2016) (Tabla 4).

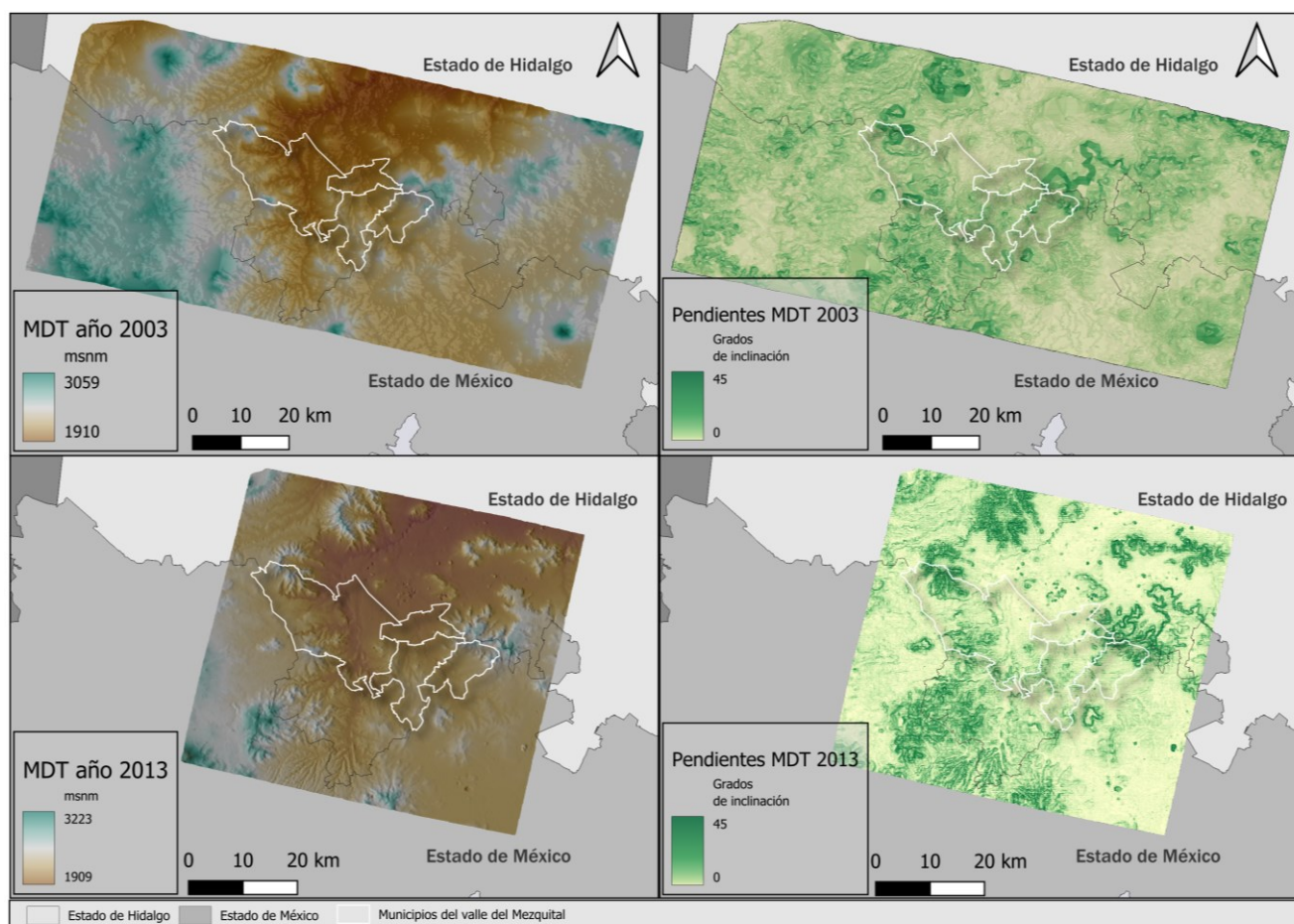


Figura 5. MDT. Las imágenes de la fila superior representan el MDT y el mapa de pendientes del año 2003 y fila inferior representa el MDT y el mapa de pendientes del año 2013.

Figure 5. DEM. The images in the top row represent the DEM and the slope map for the year 2003, while the bottom row represents the DEM and the slope map for the year 2013.

Tabla 4. Clasificación de pendientes del terreno. Fuente: Modificado de Bolaños *et al.* (2016).

Table 4. Terrain slope classification. Source: Modified from Bolaños *et al.* (2016).

CATEGORÍA	Pendiente
Suave	0° - 2,25°
Moderada	2,25° - 9°
Fuerte	9° - 18°
Muy fuerte	>18°

Para estimar de manera cuantitativa los volúmenes, se utilizó el método de volúmenes compuesto a partir de la generación de una superficie de volumen TIN, que es un compuesto de puntos en una superficie base (2003) y una de comparación (2013). El resultado proporciona una diferencia exacta en valores Z entre las superficies analizadas (base y de comparación); para finalmente estimar los volúmenes de corte, terraplén y volumen neto (Autodesk, 2013).

4. Resultados

De acuerdo con el objetivo de esta investigación y la metodología descrita, se identificaron 24 zonas mineras representativas para el Valle del Mezquital. Estas áreas, seleccionadas por superar las 4,0 hectáreas de roca expuesta se adecuan a la resolución espacial de los productos generados (10,0 m).

En este contexto, las zonas más intervenidas, que también presentan mayor potencial técnico-económico, destacan por su extensión y son las más idóneas para su análisis mediante técnicas de teledetección.

El área total de las zonas de explotación minera es de 1559,42 ha (15,59 km²), equivalente a 4,5 veces el tamaño de Central Park (New York, NY, USA). Estas se encuentran distribuidas en los municipios de Atotonilco de tula y Tula de Allende en el estado de Hidalgo y en el municipio de Apaxco, perteneciente al Estado de México (Figura 6). Asimismo, la Tabla 5 muestra el resumen de la información topográfica esencial por cada mina, que incluye, el área, perímetro y profundidad máxima identificada. En esta última se evidencia que, con el paso de los años la profundidad de las excavaciones se incrementó.

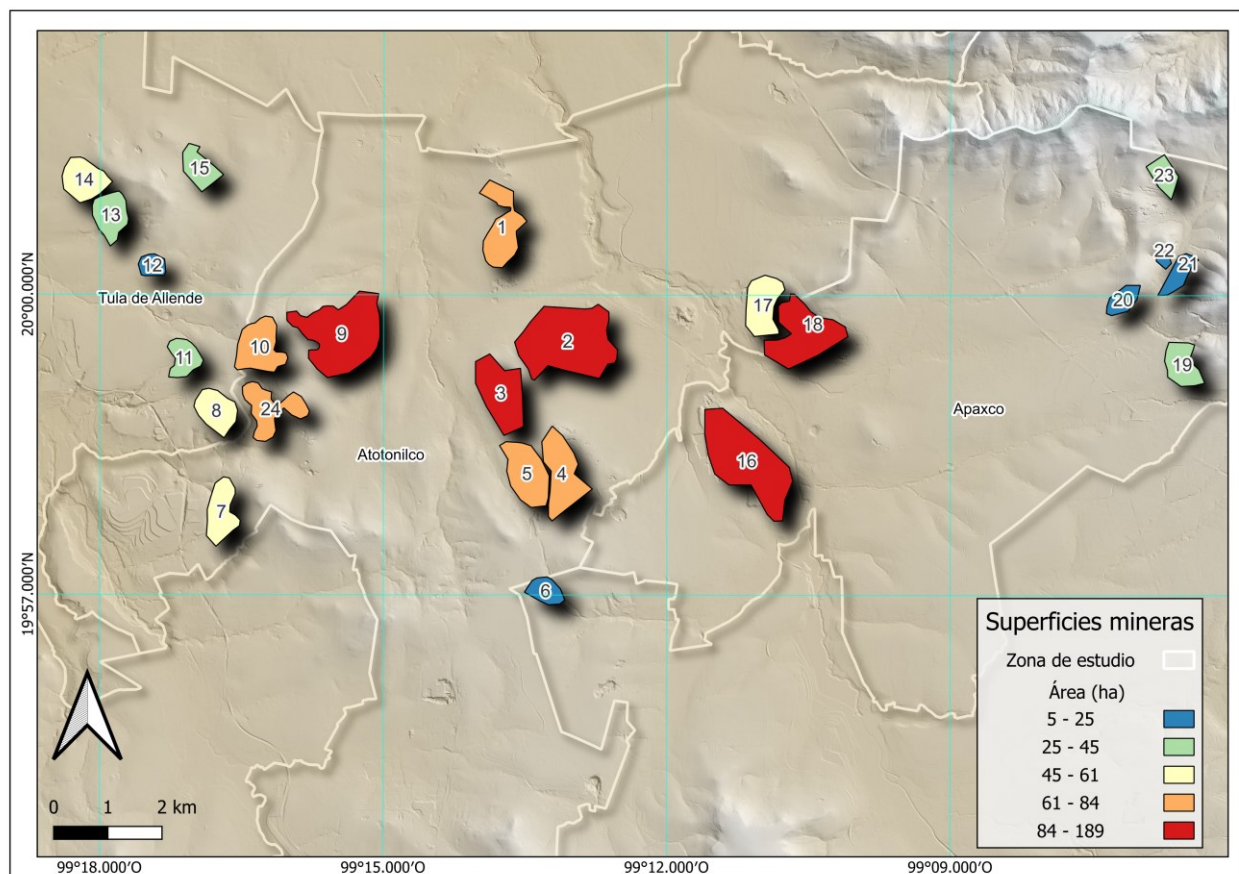


Figura 6. Mapa de distribución de las superficies mineras estudiadas.

Figure 6. Map of the distribution of the studied mining areas.

La distribución minera en la región responde espacialmente a los afloramientos de rocas carbonáticas, que han sido extraídas para piedra de construcción desde tiempos prehispánicos. En las últimas décadas, el uso de bancos de materiales pétreos o rocas carbonáticas ha crecido, especialmente para la producción de cemento, que es el segundo producto más consumido por la humanidad, solo superado por el agua (Martín-Duque, 2024). Bajo esta premisa, los resultados obtenidos muestran que los volúmenes de materiales extraídos superan los 146 millones de m³. Las minas de mayor volumen de extracción entre los años 2003-2016 han sido las minas 16, 2, 9, 3 y 5 (Figura 6), que superaron los 10 millones de m³, reflejando una clara relación proporcional con las superficies de las minas. A su vez, el municipio de Atotonilco de Tula representó el 55% de la extracción total cuantificada, seguido de Apaxco con el 26% y de Tula de Allende con el 19%, la cantidad de minas identificadas en estos municipios fue de 10, 8 y 6 respectivamente.

Tabla 5. Información topográfica de zonas mineras.**Table 5.** Topographic information of mining areas.

MINA	Área (Ha)	Perímetro (km)	Profundidad máxima (m)		
			2003	2013	2016
1	71,23	4,74	60	69	75
2	189,15	5,74	103	130	130
3	88,05	3,98	102	110	121
4	80,86	4,33	62	63	65
5	73,29	3,45	72	83	86
6	24,79	1,93	49	60	58
7	50,55	3,16	65	69	97
8	46,39	2,59	88	89	95
9	165,29	5,95	139	150	159
10	67,22	3,47	58	68	86
11	32,30	2,36	34	47	50
12	16,92	1,54	34	39	54
13	44,97	2,64	88	118	135
14	50,83	2,69	84	132	151
15	35,26	2,54	52	59	75
16	174,21	5,91	88	94	109
17	59,21	3,24	121	184	188
18	109,59	4,96	222	238	251
19	41,33	2,71	116	149	154
20	22,09	1,89	111	167	169
21	24,75	2,30	58	151	160
22	4,75	0,87	57	75	82
23	25,57	2,11	111	130	141
24	60,82	4,50	104	104	121
Total	1559,42				

La Tabla 6 muestra los resultados particulares por cada mina y su representatividad respecto al volumen total extraído.

La pendiente del terreno es otra de las variables topográficas que permiten identificar los cambios en la morfología del relieve. El análisis de las 24 minas, indica la disminución progresiva de las áreas con pendientes suaves ($0^\circ - 2,25^\circ$) y moderadas ($2,25^\circ - 9^\circ$), éstas se redujeron en 92 ha y 295 ha respectivamente (entre el año 2003 y 2016). En sentido contrario, las pendientes fuertes ($9^\circ - 18^\circ$) experimentaron un aumento en 100 ha en igual periodo.

Otros análisis realizados, revelaron incrementos en 94 ha para polígonos con pendientes muy fuertes (mayores a 18°) (entre los años 2003 y 2013. Esta última tendencia se sostuvo entre los años 2013 al 2016, donde el incremento fue de 174 ha, reflejando una clara intensificación de los procesos de extracción en la región (Figura 7 y Tabla 7).

Tabla 6. Volumen de extracción por mina medido en m³.**Table 6.** Extraction volume per mine measured in m³.

Mina	Municipio	Periodo		Total	Representatividad (% Extracción)
		2003 - 2013	2013 - 2016		
1	Atotonilco de Tula	3176144,06	5139271,40	8315415,46	5,69
2	Atotonilco de Tula	8368457,34	4817601,81	13186059,15	9,02
3	Atotonilco de Tula	6688189,40	4429919,59	11118108,99	7,60
4	Atotonilco de Tula	1738299,82	2152592,02	3890891,84	2,66
5	Atotonilco de Tula	2769643,86	7906149	10675792,86	7,30
6	Atotonilco de Tula	1331470,68	952252,77	2283723,45	1,56
7	Atotonilco de Tula	2278176,19	3434307,39	5712483,58	3,91
8	Tula de Allende	4208852,07	3843427,29	8052279,36	5,51
9	Atotonilco de Tula	7552279,50	5388412,48	12940691,98	8,85
10	Atotonilco de Tula	1548532,01	4572816,23	6121348,24	4,19
11	Tula de Allende	1023951,17	71670,82	1095621,99	0,75
12	Tula de Allende	102755,94	659113,12	761869,06	0,52
13	Tula de Allende	4333531,21	2602157,10	6935688,31	4,74
14	Tula de Allende	3044783,33	2449217,07	5494000,40	3,76
15	Tula de Allende	1085049,65	4197989,77	5283039,42	3,61
16	Apaxco	10288070,92	7838566,82	18126637,74	12,40
17	Apaxco	2767121,47	2281639,06	5048760,53	3,45
18	Apaxco	5205622,64	1870690,93	7076313,57	4,84
19	Apaxco	1185357,60	1382481,45	2567839,05	1,76
20	Apaxco	1680944,79	599916,75	2280861,54	1,56
21	Apaxco	46687,39	1106155,03	1152842,42	0,79
22	Apaxco	61742,16	58310,64	120052,80	0,08
23	Apaxco	930160,72	555831,19	1485991,91	1,02
24	Atotonilco de Tula	4661290,47	1822607,49	6483897,96	4,43
Total		76077114. 39	70133097. 22	146210211. 61	100

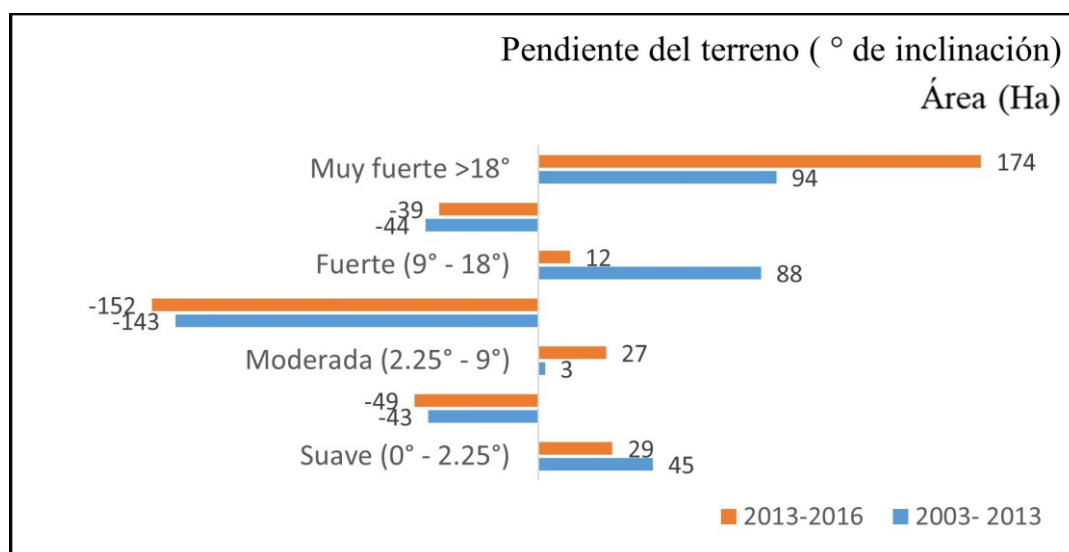
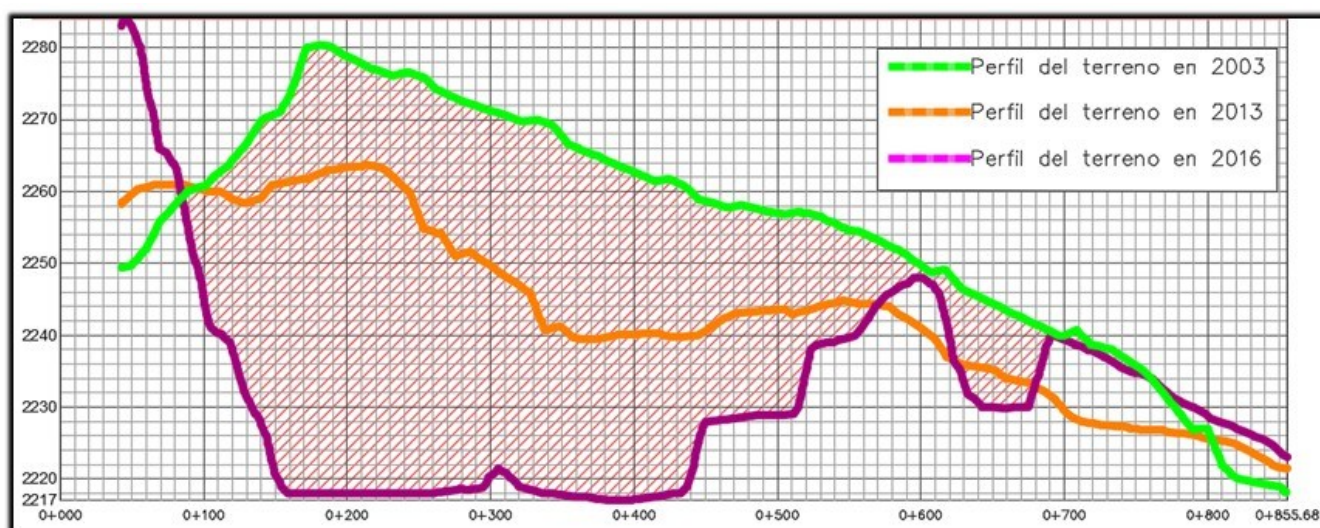
**Figura 7.** Relación de pérdidas y ganancias de áreas según la pendiente.**Figure 7.** Relationship of area losses and gains based on slope.

Tabla 7. Porcentaje de cambios de la pendiente de la región minera.**Table 7.** Percentage of slope changes in the mining region.

Periodo	2003- 2013		2013-2016	
	Aumento (%)	Disminución (%)	Aumento (%)	Disminución (%)
Suave (0° - $2,25^{\circ}$)	2,9	-2,8	1,9	-3,1
Moderada ($2,25^{\circ}$ - 9°)	0,2	-9,1	1,7	-9,7
Fuerte (9° - 18°)	5,6	-2,9	0,8	-2,5
Muy fuerte $>18^{\circ}$	6,0	0,0	11,2	0,0

Con el propósito de visibilizar la intensificación de los procesos de extracción en la región, se puede tomar como ejemplo la mina No. 8 ubicada en el municipio Tula de Allende. En la mina No. 8, se revela un tránsito acelerado hacia los ángulos de pendientes muy fuertes, acompañados de socavones y terrazas asociados a la actividad extractiva (Figura 8). Asimismo, las figuras 9 y 10 representan las modificaciones de las pendientes en las 24 minas estudiadas, a partir de una relación de pérdidas y ganancias de áreas categorizadas según el grado de inclinación del terreno.

**Figura 8.** Modificación del relieve como resultado de la extracción de rocas carbonáticas en la mina 8 ubicada el municipio Tula de Allende.**Figure 8.** Modification of the terrain as a result of carbonate rock extraction at Mine 8, located in the municipality of Tula de Allende.

5. Discusión

A partir de los resultados obtenidos, surgen reflexiones en el ámbito ambiental, económico y metodológico. Las actividades extractivas, especialmente la explotación de rocas carbonáticas como la caliza, han generado un impacto negativo tanto en el medio ambiente como en el paisaje de los municipios estudiados. Además, su influencia en la dinámica económica ha provocado un descontento social, propiciado por la ausencia de políticas de recuperación y compensación que mitiguen los efectos sobre el entorno y la población. Esta problemática ha impulsado un campo de estudio interdisciplinario donde diversos investigadores buscan alternativas para reducir sus impactos y promover soluciones sostenibles.

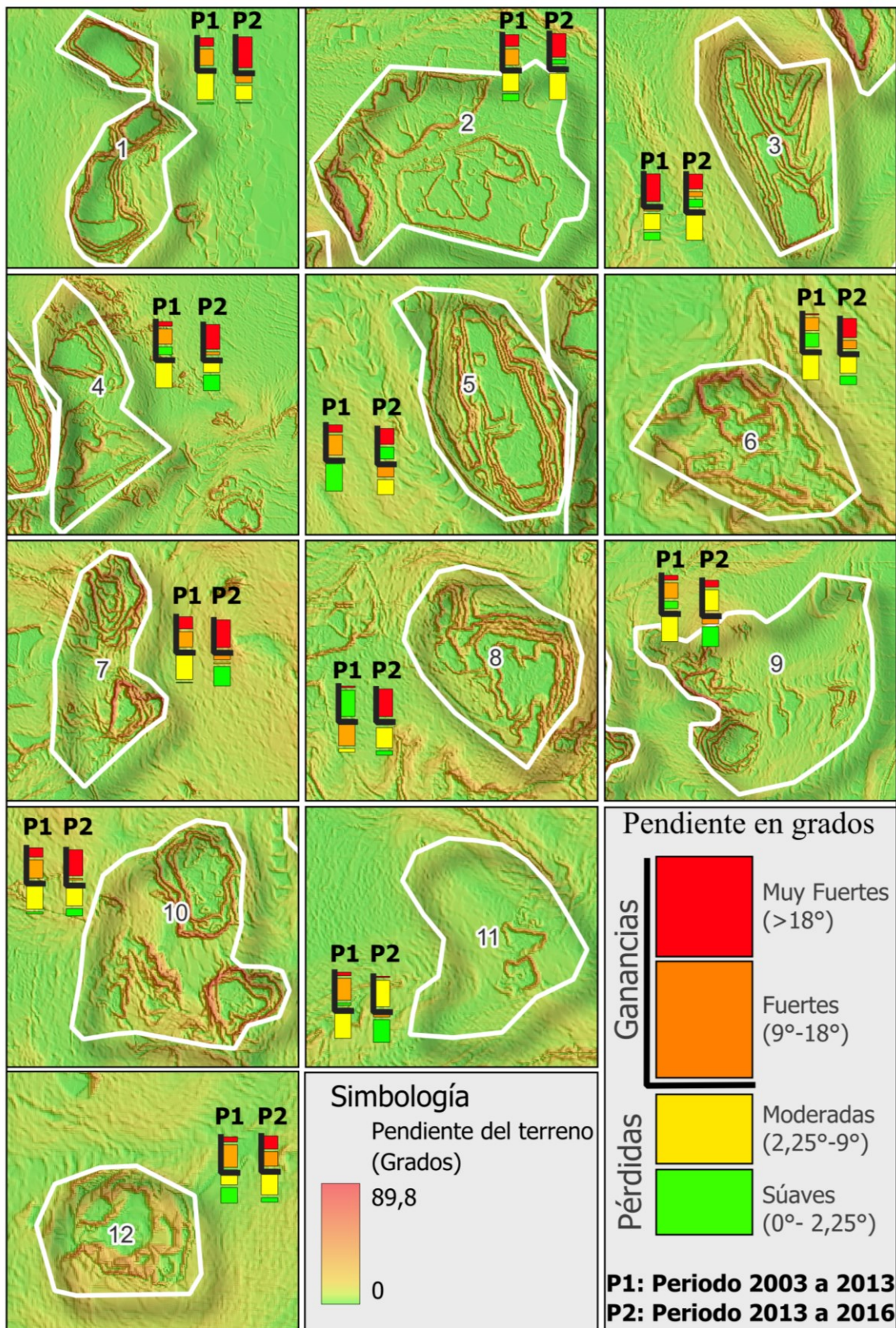


Figura 9. Diagramas de pérdidas y ganancias de superficies, categorizadas según la inclinación del terreno y periodo de estudio para las minas de la 1 a la 12.

Figure 9. Diagram of surface gains and losses, categorized by terrain slope and study period for mines 1 to 12.

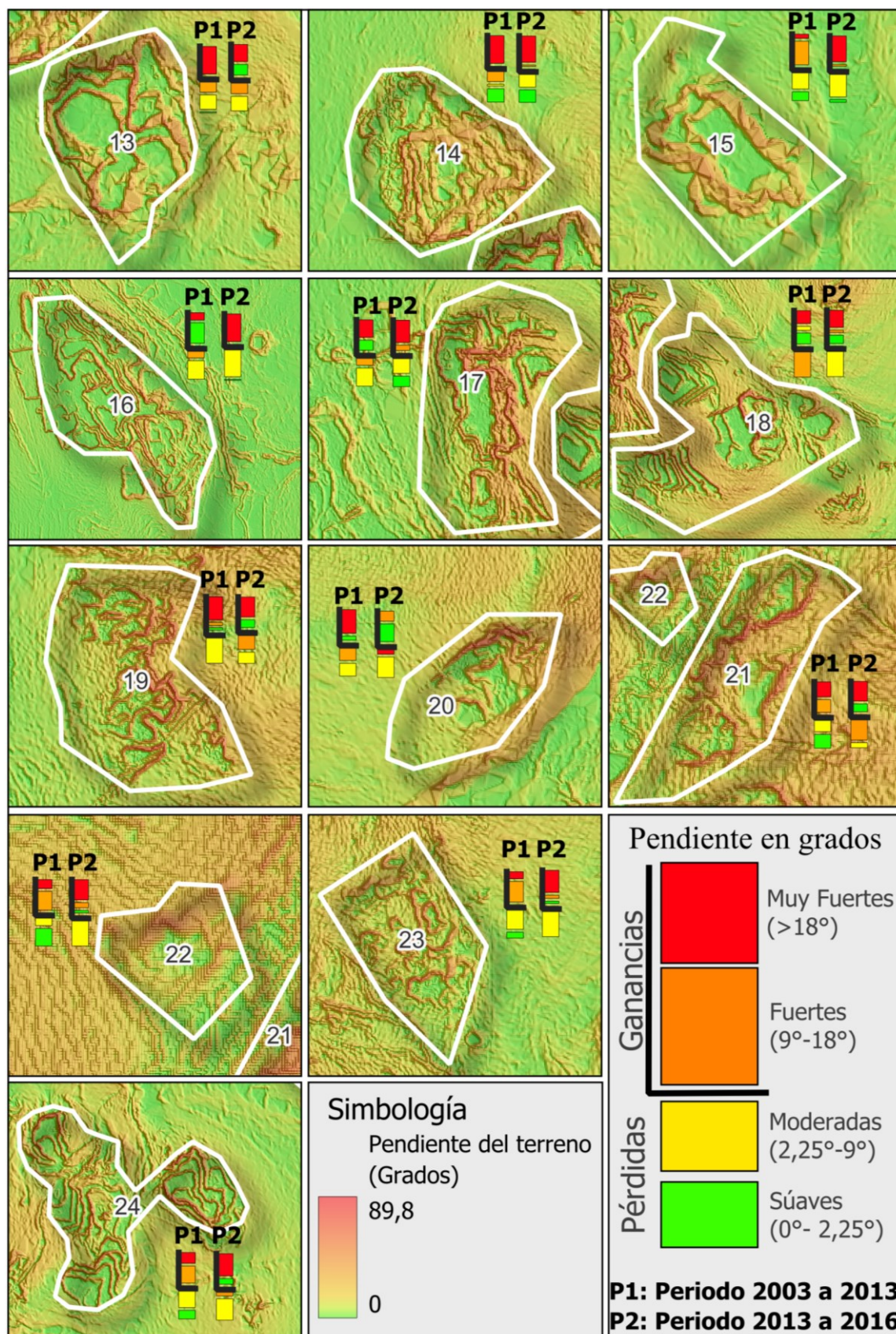


Figura 10. Diagramas de pérdidas y ganancias de superficies, categorizadas según la inclinación del terreno y periodo de estudio para las minas de la 13 a la 24.

Figure 10. Diagram of surface gains and losses, categorized by terrain slope and study period for mines 13 to 24.

Los efectos más notorios de la actividad minera se reflejan en la destrucción del paisaje, tanto en su apariencia visual como en su funcionalidad ecológica. La alteración de la morfología del terreno es evidente en minas con cierres mineros sin medidas de mitigación, recuperación o restauración, imposibilitando la integración del área afectada con el entorno. Por ejemplo, la Figura 11, muestra espacios fuertemente intervenidos, con taludes pronunciados y superficies expuestas sin signos de regeneración natural, reforzando la desconexión con el paisaje circundante. Estas transformaciones generan un contraste abrupto con el entorno natural y desencadenan impactos ambientales de gran alcance.



Figura 11. Escena de la cantera “El Progreso” (Mina No.1) en estado de abandono y con poca integración paisajística, localizada en el municipio de Atotonilco de Tula, Hidalgo.

Figure 11. Scene of the “El Progreso” (Mine No.1) quarry in a state of abandonment and with little landscape integration, located in the municipality of Atotonilco de Tula, Hidalgo.

Desde la perspectiva de funcionalidad ecológica, la cantidad y extensión de las canteras intensifican los impactos ambientales, especialmente aquellos relacionados con la erosión de origen antrópico, fluvial y eólico. La presencia de laderas con pendientes pronunciadas y el alto régimen de precipitaciones, aceleran los procesos erosivos naturales, propiciando la destrucción del suelo kárstico y afectando el flujo y la infiltración del agua. Esto, a su vez, compromete la calidad del recurso hídrico y repercute en la biodiversidad de las especies que dependen de él (Langer, 2001).

En la mina No. 1 (Figura 11), por ejemplo, el abandono de una parte de la cantera dejó taludes con inclinaciones superiores a los 18° , lo que confirma lo postulado por Jiménez *et al.* (2006). Estos autores señalan que, a mayor inclinación de las laderas, mayores son los cambios morfológicos causados por la erosión, aumentando el riesgo de remoción en masa, como vuelcos y caídas de material.

Asimismo, Ruz (2020) señala que los cambios en la morfología del terreno se manifiestan también a nivel topográfico, con la expansión de superficies de explotación, lo que promueve la pérdida de suelo y coberturas vegetales. Esto, a su vez, desencadena otros impactos como la migración de fauna y la redistribución de los cursos fluviales naturales.

Considerando la roca caliza como el material más representativo de la región (Barba & Frunz, 1999) y el más extraído en las 24 minas analizadas en este trabajo, donde, a excepción de las minas No. 2 y 14 todas se encuentran activas, es pertinente incluir el matiz económico. Según el Anuario Estadístico de la Minería Mexicana, publicado por el Servicio Geológico Minero para el año 2016 (SGM, 2017), la producción nacional de caliza se estimó en cifras cercanas a los 362 millones de toneladas, con un valor equivalente a los 29076 millones de pesos mexicanos. Por lo tanto, el valor unitario de una tonelada de caliza se valoró en \$80,388 pesos mexicanos. Tomando como referencia las cifras enunciadas, se construye la Tabla 8, misma que refleja una aproximación a la influencia económica de cada mina.

Tabla 8. Influencia económica de la producción anual por mina y su valor económico equivalente para el año 2016.**Table 8.** Economic influence of annual production per mine and its equivalent economic value for the year 2016.

MINA	Municipio	Tasa Extracción (Ton/año)	Valor de producción (Pesos/año)
1	Atotonilco de Tula	1701461,93	136775420,37
2	Atotonilco de Tula	2698070,56	216889798,47
3	Atotonilco de Tula	2274936,15	182875292,06
4	Atotonilco de Tula	796136,33	63999011,19
5	Atotonilco de Tula	2184431,46	175599891,95
6	Atotonilco de Tula	467284,95	37563635,44
7	Atotonilco de Tula	1168862,02	93961311,59
8	Tula de Allende	1647620,24	132447248,09
9	Atotonilco de Tula	2647864,67	212853896,96
10	Atotonilco de Tula	1252522,02	100686487,98
11	Tula de Allende	224181,11	18021247,28
12	Tula de Allende	155890,13	12531539,94
13	Tula de Allende	1419148,53	114081092,97
14	Tula de Allende	1124157	90367609,15
15	Tula de Allende	1080991,14	86897635
16	Apaxco	3708988,95	298154494,96
17	Apaxco	1033054,08	83044118,14
18	Apaxco	1447922,62	116394155,88
19	Apaxco	525419,37	42236887,29
20	Apaxco	466699,36	37516561,55
21	Apaxco	235889,30	18962432,77
22	Apaxco	24564,65	1974678,51
23	Apaxco	304056,81	24442214,48
24	Atotonilco de Tula	1326705,27	106649856,93
Total		29916858,68	2404926518,97

Los valores de producción anual generados por la actividad minera en la región (Tabla 8) son significativamente altos. Los datos evidencian dos aspectos clave: por un lado, el descontento social, fundamentado en la desproporción entre las altas ganancias de las empresas privadas y la escasa inversión en recuperación ambiental y compensación a las comunidades (Carrasco *et al.*, 2017); y por otro, la viabilidad económica de financiar proyectos de restauración ambiental.

En este contexto, se hace un llamado a las autoridades ambientales y jurídicas en los niveles federal, estatal y municipal para que implementen políticas que obliguen a los concesionarios mineros a asumir la responsabilidad de recuperar los espacios degradados y garantizar su adecuada integración al entorno. Esta medida contribuiría a mitigar los impactos negativos de la minería, y fortalecería el cumplimiento de los estándares internacionales de desarrollo sostenible (Hernández & Virgüez, 2023).

Desde la óptica metodológica, esta investigación se sustenta en la creación de MDT históricos, a partir de información disponible por el CNES y de otros insumos cartográficos del INEGI. A partir de ello, es importante destacar las bondades y debilidades identificadas.

En este estudio, se logró construir los MDT que representan la morfología del área de estudio en los años 2003 y 2013, alcanzando niveles aceptables de precisión, pese a las restricciones tecnológicas y económicas asociadas al acceso y la calidad de los datos disponibles. Actualmente, tecnologías como Lidar y Radar permiten obtener modelos de mayor detalle, pero su elevado costo representa una limitante. No obstante, en contextos donde la seguridad pública es un factor crítico, el uso de estas tecnologías es viable y permiten reducir costos, optimizar tiempos y minimizar los riesgos asociados al trabajo de campo.

6. Conclusiones

La investigación realizada demuestra importantes cambios morfológicos en la zona minera del Valle del Mezquital de México, indicando un paisaje degradado. Este trabajo ha permitido constatar que, entre el año 2003 y 2016, se extrajeron un total de 146210211,61 m³ de carbonatos, cifra que arroja un estimado de 30 millones de t/año. Según los valores de producción por tonelada de material reportados por el SGM (2017), los ingresos económicos se aproximan a los 2405 millones de pesos mexicanos anuales. Las cifras mencionadas pueden aumentar considerablemente su valor cuando la materia prima es transformada en productos para la construcción, como el cemento, la cal, o piedra de diferentes granulometrías.

La evaluación cuantitativa de variables topográficas como la pendiente y el volumen de extracción, ofrecen una visión clara sobre el impacto de la actividad minera en la región. Entre 2003-2013, el 11,9% de las áreas con pendientes suaves y moderadas disminuyeron, mientras que las áreas con pendientes fuertes y muy fuertes aumentaron en un 11,6%. Asimismo, durante el periodo 2013-2016, las pendientes suaves y moderadas presentaron una disminución del 12,9% y un aumento del 12% hacia las fuertes y muy fuertes. Estos datos sugieren que las superficies mineras son ahora más vulnerables físicamente.

El procedimiento diseñado en esta investigación demuestra bajo nivel de incertidumbre y cumple con los estándares nacionales establecidos (Blas, 2013; SNIEG, 2014). La secuencia metodológica descrita y aplicada, se puede replicar en otras zonas mineras de México con el propósito de revelar y cuantificar cambios morfológicos debidos a la extracción de materias primas. Los resultados obtenidos sugieren la necesidad de intervención de las autoridades ambientales instando a los concesionarios a dedicar parte de sus beneficios a implementar planes de restauración y recuperación de minas en proceso de cierre o abandono.

Authorship contribution statement

Edisson Manuel Chavez Lancheros: Conceptualization, Formal analysis, Investigation, Methodology, Writing (Original draft).

Alexis Ordaz Hernández: Conceptualization, Formal analysis, Investigation, Methodology, Writing (Original draft).

Raquel Hinojosa Reyes: Conceptualization, Formal analysis, Investigation, Methodology, Writing (Original draft).

Referencias

- Álvarez, O., & Estrada, H. (2024). Distribución geográfica y características del medio físico natural de los ambientes kársticos de México. *Acta Universitaria*, 34, 1-26. <https://doi.org/10.15174/au.2024.3840>
- Ambrosio, G., Gonzáles, J., & Arevalo, V. (2002). Corrección radiométrica y geométrica de imágenes para la detección de cambios en una serie temporal. Málaga, España. <http://mapir.isa.uma.es/varevalo/drafts/ambrosio2002crg.pdf>
- Autodesk (2013). Manual del usuario de Autocad Civil 3D. Volumen compuestos. <http://docs.autodesk.com/CIV3D/2013/ESP/index.html?url=filesCUG/GUID-613669C5-DEBB-4FF3-8E8E-F8B23DACE627.htm,topicNumber=CUGd30e124939>
- Barba, L.A., & Frunz, J.L.C. (1999). Estudios energéticos de la producción de cal en tiempos Teotihuacanos y sus implicaciones. *Latin American Antiquity*, 10(2), 168-179. <https://doi.org/10.2307/972201>
- Blas, J. (2013). Metodología de Ortorectificación de imágenes satelitales SPOT 5 para la generación de información geográfica de alcance nacional en el INEGI. Universidad Nacional Autónoma de México. <https://repositorio.unam.mx/contenidos/136922>

- Bolaños, M., Paz, F., Cruz, C., Argumedo, J., Romero, V., & De la Cruz, J. (2016). Mapa de erosión de los suelos de México y posibles implicaciones en el almacenamiento de carbono orgánico del suelo. *Terra Latinoamericana*, 34(3), 271-288. https://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S0187-57792016000300271&script=sci_arttext
- Caballero, D. (2023). Las transformaciones del paisaje cultural en Atotonilco de Tula, Hidalgo, México. Universidad de Alicante. Grupo Interdisciplinario de Estudios Críticos y de América Latina (GIECRYAL). *GeoGraphos*, 14(2), 217-251. <https://doi.org/10.14198/GEOGRA2023.14.160>
- Carrasco, B. (2022). Evaluación de riesgo para la salud humana por agentes tóxicos de origen antrópico. [Informe interno]. Facultad de Geografía. Universidad Autónoma del Estado de México. Toluca, México.
- Carrasco, B., Martínez, E., & Villar, C. (2017). Movimientos sociales en oposición a las industrias cementeras en México. En Carrasco, B. (Eds). *Respuestas Comunitarias ante Conflictos Territoriales, Casos de estudio México y Latinoamérica* (pp 45-63). Universidad Autónoma del Estado de México. <http://hdl.handle.net/20.500.11799/65696>
- Castro, S. & Guío, O. (2004). Estudio de impacto ambiental para la explotación de roca caliza a cielo abierto y producción de cal en la vereda Las Caleras en el municipio de Nobsa Boyacá. Universidad de La Salle. Bogotá, Colombia. https://ciencia.lasalle.edu.co/ing_ambiental_sanitaria/1532
- Emel, J., Plisinski, J., & Rogan, J. (2014). Monitoring geomorphic and hydrologic change at mine sites using satellite imagery: The Geita Gold Mine in Tanzania. *Applied Geography*, 54, 243-249. <https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2014.07.9>
- ESRI (2021). Fundamentals of TIN surfaces. ArcGIS Desktop. <https://desktop.arcgis.com/es/arcmap/latest/manage-data/tin/fundamentals-of-tin-surfaces.htm>
- ESRI (2022). Fundamentals of orthorectifying a raster dataset. ArcGIS Desktop. <https://desktop.arcgis.com/es/arcmap/10.3/manage-data/raster-and-images/fundamentals-of-orthorectifying-a-raster-dataset.htm>
- Geospatial-Insight (2022). Release guide: ERDAS IMAGINE 2022. https://geospatial-insight.com/wp-content/uploads/2021/12/Release_Guide_ERDAS_IMAGINE_2022.pdf
- Granados, N. (2016). Cartografía y evaluación geológica del yacimiento de caliza “El Xirgo”; Municipio de Tula de Allende, Hidalgo. Instituto Politécnico Nacional. Ciudad de México. <https://tesis.ipn.mx/bitstream/handle/123456789/25665/Cartograf%C3%ADa%20y%20evaluaci%C3%B3n%20geol%C3%B3gica%20del%20yacimiento%20de%20caliza%20El%20Xirgo%3B%20Municipio%20de%20Tula%20de%20Allende%2C%20Hidalgo.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Henselowsky, F., Rölkens, J., Kelterbaum, D. & Bubbenzer, O. (2021). Anthropogenic relief changes in a long-lasting lignite mining area ('Ville', Germany) derived from historic maps and digital elevation models. *Earth Surface Processes and Landforms*, 46(9), 1725-1738. <https://doi.org/10.1002/esp.5103>
- Hernández, A. & Virgúez, E. (2023). El control interno en las empresas mineras. Repositorio Institucional Universidad Piloto de Colombia. <http://repository.unipiloto.edu.co/handle/20.500.12277/12780>
- INEGI (2016). Relieve continental [Data set]. Instituto Nacional de Estadística y Geografía. <https://www.inegi.org.mx/temas/relieve/continental/>
- INEGI (2019). Marco de Referencia ITRF en México y su Relación con WGS84 y NAD27. Instituto Nacional de Estadística y Geografía. México. <https://en.www.inegi.org.mx/contenidos/temas/gnss/doc/702825109226.pdf>
- INEGI (2022). Ortoimágenes [Data set]. Instituto Nacional de Estadística y Geografía. <https://www.inegi.org.mx/temas/imagenes/ortoimagenes/>
- INEGI (2024). Directorio Estadístico Nacional de Unidades Económicas [Data set]. Instituto Nacional de Estadística y Geografía. <https://www.inegi.org.mx/app/mapa/denue/default.aspx>
- Jiménez, C., Huante, P., & Rincón, E. (2006). Restauración de minas superficiales en México. Instituto de Ecología UNAM. SEMARNAT, Subsecretaría de Gestión para la Protección Ambiental, Dirección General de Impacto y Riesgo Ambiental. México. en: <https://biblioteca.semarnat.gob.mx/janium/Documentos/Ciga/Libros2011/CG006488.pdf>

- Langer, W. (2001). Potential Environmental Impacts of Quarrying Stone in Karst - A Literature Review. USGS Open-File Report. Estados Unidos. <https://pubs.usgs.gov/of/2001/ofr-01-0484/ofr-01-0484so.pdf>
- Llano, M. & Flores, C. (2023). Las minas en el territorio mexicano un análisis del número, ubicación y condiciones ambientales. <https://cartocritica.org.mx/2023/la-minas-de-mexico-y-su-gestion-ambiental/>
- Martín-Velázquez, S., Rodríguez-Santalla, I., Ropero-Szymańska, N., Gomez-Ortiz, D., Martín-Crespo, T., & de Ignacio-San José, C. (2022). Geomorphological mapping and erosion of abandoned tailings in the hiendelaencina Mining District (Spain) from Aerial Imagery and LiDAR Data. *Remote Sensing*, 14(18), 4617. <https://doi.org/10.3390/rs14184617>
- Martín-Duque, J.F. (2024). Curso de Restauración geomorfológica [Curso]. Facultad de Ciencias Geológicas. Universidad Complutense de Madrid. España.
- Palma, (2009). Historia de la producción de cal en el norte de la cuenca de México. Universidad Autónoma del Estado de México. <https://www.redalyc.org/pdf/104/10412057002.pdf>
- Rodríguez, J., & López, M. (2018). Minería en México: ¿Vale la pena?. *Entretextos*, 10(28), 1-9. <https://revistasacademicas.iberoleon.mx/index.php/entretextos/article/view/302/224>
- Ruz, F.A.C. (2020). Saskab, grava y piedra: implicaciones socioambientales de la recuperación de minas de caliza en Yucatán. Universidad de Sherbrooke & Colegio de la Frontera Sur. México. <http://ecosur.repositorioinstitucional.mx/jspui/handle/1017/2152>
- SGM (2017). Anuario Estadístico de la Minería Mexicana año 2016. Servicio Geológico Minero. Subsecretaría de Minería. Publicación No. 46. https://www.sgm.gob.mx/productos/pdf/Anuario_2016_Edicion_2017.pdf
- SGM (2023). Anuario Estadístico de la Minería Mexicana año 2022. Servicio Geológico Minero. https://www.sgm.gob.mx/productos/pdf/Anuario_2022_Edicion_2023.pdf
- SNIEG (2010). Norma Técnica de Estándares de Exactitud Posicional. https://www.inegi.org.mx/contenidos/temas/rgnp_integrada/doc/Norma_Tecnica_de_Estandares_de_Exactitud_Posicional.pdf
- SNIEG (2014). Norma Técnica para la Generación de Modelos Digitales de Elevación. https://snieg.mx/DocumentacionPortal/Normatividad/vigente/NT_Generacion_Modelos_Digitales_geograficos.pdf
- SWH (2024). Spot World Heritage Data Center [Dataset]. <https://acortar.link/yskM45>
- USAID, (1993). Manual Sobre el Manejo de Peligros Naturales en la Planificación para el Desarrollo Regional Integrado. <https://www.oas.org/DSD/publications/Unit/oea65s/begin.htm#Contents>