

Identificación de covariables ambientales que influyen en la formación de cárcavas en la Mixteca Oaxaqueña

Identification of environmental covariates that influence the formation of gullies in the Mixteca of Oaxaca

María Lorenza Toledo Medrano¹, Demetrio S. Fernández Reynoso^{2‡},
Mario R. Martínez Menez², Erasmo Rubio Granados² y José Luis García Rodríguez³

¹ Posgrado de Hidrociencias, ² Programa de Edafología, Colegio de Postgraduados. Carretera México-Texcoco km 36.5. 56230 Montecillo, Texcoco, Edo. de México, México.

[‡] Autor responsable (demetrio@colpos.mx)

³ Universidad Politécnica de Madrid, Unidad de Hidráulica e Hidrología. Avenida de las Moreras, SN, edificio de Montes. 28040 Madrid, España.

RESUMEN

La Mixteca Oaxaqueña es una región afectada por cárcavas, siendo los detonantes la interacción de variables geológicas, topográficas y antropogénicas; estas últimas por uso irracional de los recursos naturales, con mayor relevancia desde la conquista a la actualidad. La presente investigación busca identificar las covariables ambientales que favorecen la formación de cárcavas en la Mixteca Oaxaqueña, a través de cartografía en escalas inferiores a 1:50 000 y análisis multivariado de los principales factores que, según la literatura, influyen en este tipo de erosión. Las covariables preseleccionadas fueron sometidas a un análisis estadístico para discriminar aquellas con altas correlaciones entre sí, de este proceso resultaron seleccionadas: distancia a fallas y picos, pendiente del terreno, curvatura vertical, curvatura horizontal, índice de posición topográfica, longitud de la pendiente, índice topográfico de humedad, densidad de población y densidad de vegetación (DV). Sobre estas covariables se realizó una clasificación supervisada, por el método de máxima verosimilitud, sobre seis componentes principales que condensaban, según el análisis de componentes principales (ACP), el 96.7% de la información contenida en estas diez covariables. De la clasificación se obtuvieron las probabilidades de susceptibilidad a la formación de cárcavas y para validar la presencia de cárcavas se verificaron, en Google Earth, aquellos píxeles con probabilidad

superior al 50%. La confiabilidad del mapa resultante, en función de ausencia y presencia de cárcavas, fue de 96.2%; para un buffer de 50 m resultó de 83.4%, para uno de 100 m fue 81.7% y para uno de 150 m alcanzó 77.9%. Se concluye que las covariables con mayor influencia en la formación de cárcavas, para el área de estudio y por orden de importancia, son: distancia a fallas y picos, índice topográfico de humedad, densidad de vegetación, pendiente del terreno y densidad de población.

Palabras clave: máxima verosimilitud, análisis multivariado, puntos de supervisión, modelos de elevación.

SUMMARY

The Mixteca Oaxaqueña is a region affected by gullies, which trigger the interaction of geological, topographic and anthropogenic covariates. The latter is the result of irrational use of natural resources, which has had greater relevance since the Conquest. The present research seeks to identify the environmental covariates that favor gully formation in the Mixteca region of the Mexican state of Oaxaca, using cartography at scales lower than 1:50 000 and multivariate analysis of the main factors that, according to the literature, influence this type of erosion. The preselected covariates were subjected to statistical analysis to discriminate those that correlated highly with each

Cita recomendada:

Toledo Medrano, M. L., D. S. Fernández Reynoso, M. R. Martínez Menez, E. Rubio Granados y J. L. García Rodríguez. 2018. Identificación de covariables ambientales que influyen en la formación de cárcavas en la Mixteca Oaxaqueña. *Terra Latinoamericana* 36: 323-335.
DOI: <https://doi.org/10.28940/terra.v36i4.329>

Recibido: noviembre de 2017. Aceptado: julio de 2018.
Publicado en *Terra Latinoamericana* 36: 323-335.

other. From this process we selected the following for analysis: distance to faults, distance to peaks, terrain slope, vertical curvature, horizontal curvature, topographic position index, slope length, topographic index of moisture, population density and vegetation density. Supervised classification was applied to these covariates by the method of maximum likelihood, on six main components that, according to the principal component analysis (PCA), condensed 96.7% of the information contained in these ten covariables. The probabilities of gully susceptibility were obtained from the classification, and gully presence was verified in Google Earth for those pixels with probability higher than 50%. The reliability of the resulting map, based on absence and presence of gullies, was 96.2%, for a buffer of 50 m reliability was 83.4%, for a radius of 100 m it was 81.7%, and for one of 150 m it reached 77.9%. From this work, it was concluded that covariates with greater influence on gully formation, for the study area and in order of importance are distance to faults, distance to peaks, topographic moisture index, vegetation density, slope of the terrain and population density.

Index words: *maximum likelihood, multivariate analysis, monitoring points, elevation models.*

INTRODUCCIÓN

La erosión es un problema de degradación del suelo que implica impactos ambientales, económicos y sociales. Las cárcavas son formas de erosión avanzada, donde las partículas de suelo desprendidas afectan la calidad del agua, sedimentan cauces y colmatan embalses aguas abajo (Pathak *et al.*, 2005).

Las cárcavas son estrechas incisiones que se forman cuando se concentra el escurrimiento en dirección de la pendiente del terreno y generalmente transportan agua durante y después de un evento de lluvia (Poesen, 1993; Poesen *et al.*, 2003). Las cárcavas se clasifican en efímeras y permanentes, las primeras son aquellas que se borran con el laboreo agrícola mientras que las segundas son difíciles de eliminar con implementos agrícolas.

Las covariables que intervienen en la formación cárcavas, se dividen en dos tipos: covariables antrópicas y físicas. Entre las covariables antrópicas destaca el sobrepastoreo, producto de una elevada carga animal en los ecosistemas (Nyssen *et al.*, 2002); la agricultura sin control de escurrimientos y su expansión en pendientes

pronunciadas; y la deforestación por su impacto en la disminución de la cubierta vegetal (Nyssen *et al.*, 2002; Pathak *et al.*, 2005). De acuerdo con Moore *et al.* (1991), Poesen *et al.* (2003) y Valcárcel *et al.* (2003), entre las covariables físicas que influyen en la erosión en cárcavas, se tienen las geológicas, climáticas, edáficas, topográficas, hidrológicas, de uso de suelo, vegetación y manejo de los terrenos. Para las covariables geológicas destaca el material parental (Moore *et al.*, 1991); entre climáticas están aquellas ligadas a la distribución, intensidad y magnitud de los eventos extremos de lluvia (Poesen y Hooke, 1997; Nyssen *et al.*, 2002); en las edáficas, las relacionadas con la distribución espacial de las propiedades del suelo (Lal, 1992; Bull y Kirkby, 1997); topográficas, aquellas vinculadas con la velocidad y concentración del escurrimiento como la forma del terreno, el índice topográfico de humedad y de posición topográfica, la longitud y grado de la pendiente (Kreznor *et al.*, 1989; Zinck y Valenzuela, 1990; Moore *et al.*, 1991; Verstappen y Van Zuidam, 1991; Stolt *et al.*, 1993; Pathak *et al.*, 2005); y las hidrológicas, que dependen del tamaño y forma de la cuenca (Meijerink, 1988; Bocco, 1991).

Entre las herramientas y procedimientos que se disponen para la detección de cárcavas están los medios ópticos, a través de sensores remotos, y los métodos de clasificación digital, a través de sistemas de información geográfica (SIG) y el uso de técnicas de análisis multicriterio. Los sensores remotos son considerados como una herramienta de bajo costo para coleccionar datos de uso de suelo, densidad de vegetación e identificar áreas con problemas de erosión (Chuvieco, 2002; Bagyaraj *et al.*, 2013). Por otra parte, los SIG son una herramienta que facilita el análisis multicriterio (Basildo-Martín y López, 1998) de diversas capas de información ambiental (covariables) para un tema geográfico de interés. Este análisis, a partir de una mezcla lineal de probabilidades ponderadas, permite identificar, según la aptitud de cada cobertura temática, la interdependencia entre estas covariables (Bagyaraj *et al.*, 2013). Los análisis multicriterio, por ejemplo, son aplicables para analizar las covariables que influyen en la erosión (Tamene *et al.*, 2006).

La clasificación supervisada es una técnica usada en investigaciones ambientales para agrupar información (píxeles) proveniente de diversas fuentes; por ejemplo, en estudios de usos de suelo y vegetación, sitios con riesgo a deslizamientos, áreas con problemas

de erosión hídrica, determinación de potencial de recarga de acuíferos, entre otros. La clasificación supervisada de la imagen resultante del análisis de componentes principales, consiste en categorizar estadísticamente los datos de campo según las clases observadas en el área de estudio. El método parte de definir las categorías, observar la distribución de los sitios de muestreo y verificar los resultados (Chuvioco, 1990). Para clasificar la información, que describe un proceso, es necesario conocer el área de trabajo para definir correctamente los polígonos de entrenamiento y los valores estadísticos (media, rango, varianza, desviación estándar, covarianza, etc.) entre covariables.

De acuerdo con Guerrero-Arenas *et al.* (2010), los ecosistemas de la Mixteca alta sufrieron, desde el Pleistoceno tardío hasta el Holoceno, una serie de transformaciones geológicas y orográficas. Después de la conquista española, el área ha experimentado deforestación, sobrepastoreo con ganado caprino (Mendoza-García, 2002) y expansión de la frontera agrícola, lo que ha provocado amplias superficies de erosión en cárcavas. En vista del estado avanzado de erosión que experimentan los depósitos eólicos y aluviales, de origen volcánico, de la Mixteca, surgió la inquietud de determinar las covariables ambientales que influyen en la formación de cárcavas e identificar áreas susceptibles al avance de este tipo de degradación. El objetivo de la investigación fue identificar áreas susceptibles a la erosión por cárcavas, a través de clasificación supervisada de componentes principales, según las covariables ambientales con mayor influencia en su formación.

MATERIALES Y MÉTODOS

La zona de estudio se localiza al noroeste del estado de Oaxaca y cubre el 39.3% de la Mixteca Oaxaqueña, región conocida a nivel mundial por su importancia biológica y cultural. El área de trabajo abarca una superficie de 6167.5 km², se ubica en los distritos político-administrativos de Coixtlahuaca (24.28%), Juxtlahuaca (5.93%), Nochixtlán (20.29%), Teposcolula (19.53%) y Tlaxiaco (29.97%), específicamente entre las coordenadas geográficas 16° 55' 32.46" y 18° 7' 2.74" N y 97° 58' 13.35" y 97° 01' 7.42" O (Figura 1).

La zona de estudio se ubica en la provincia fisiográfica Sierra Madre del Sur (INEGI, 2010) cuyo origen es el choque de la placa tectónica de Cocos con la de Norte América, generando el levantamiento de la sierra y la gran complejidad geológica de sus subprovincias. Así, el área de análisis es cubierta por las subprovincias Mixteca Alta (68.53%), Sierras Centrales de Oaxaca (27.64%) y Cordillera Costera del Sur (3.83%).

De acuerdo con SGM (2000a y 2001), en orden cronológico, en el área de estudio las rocas más antiguas son del Precámbrico y cubren el 4.3% de la superficie. Durante el Paleozoico se originaron litologías de conglomerados poligénicos de lutita-areniscas, areniscas-lutitas y caliza-lutitas, que cubren el 0.6% del área de estudio. El 31.2% del área analizada es de origen mesozoico y se compone de materiales como caliza, calizas con dolomía, calizas-lutitas, margalimolita, lutita-caliza, arenisca-lutita, arenisca y toba

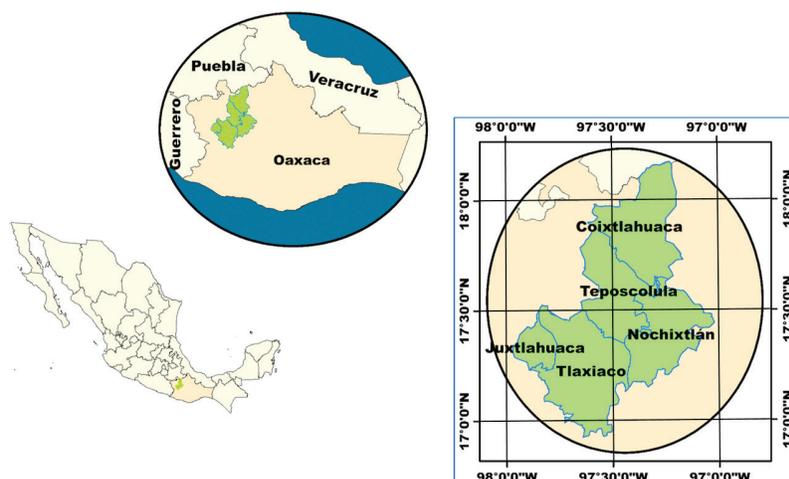


Figura 1. Ubicación geográfica del área de estudio.

andesítica. Durante el periodo reciente (era cenozoica), se formó el 63.8% de la litología del área de estudio, con materiales producto de erupciones volcánicas y arrastres aluviales proveniente de toba andesítica-andesita, toba andesítica-arenisca y conglomerados poligénico-arenisca. Estos materiales volcánicos se han acumulado en las partes bajas producto de la erosión producida en las partes más altas.

Según el SGM (2000b y 2001), en el área de estudio se presentan las siguientes formaciones estratigráficas: Tamazulapam (39.72%), Teposcolula (14.76%), Tlaxiaco (5.6%), Chimeco-Sabinal (4.36%), Tecocoyunca (2.18%), Tilaltongo (1.73%), Zapotitlán (0.44%), Matzitzí (0.35%), Ixtaltepec (0.21%), Huajuapam (0.12%), Tecomazuchitl (0.08%), Tiñú (0.03%), Yucunama (0.03%), Yododeñe (0.02%) y sin formación no identificada (30.37%). La parte norte del área de estudio que limita con las formaciones Teposcolula y Tamazulapam son depósitos que se acumularon en una cuenca sedimentaria formada al lado un anticlinal (Santamaría-Díaz *et al.*, 2008). La formación Tamazulapam, controlada principalmente por la falla del mismo nombre, es donde se alinea la mayor concentración de cárcavas del área de estudio.

El 74.1% del área de estudio presenta un clima templado con lluvias en verano y precipitaciones que varían de 506 a 1136 mm y temperaturas entre 8.1 y 18 °C; el 17.06% del área corresponde a un clima seco con precipitaciones de 316 a 651 mm y temperaturas entre 11.1 y 25.8 °C; y el 8.83% de la superficie analizada presenta un clima semicálido con precipitaciones de 640 a 1136 mm y temperaturas entre 18 y 19.6 °C (INEGI, 2008). Los suelos presentes en el área de trabajo, según la serie II del INEGI (2006), se agrupan en leptosoles (38.18%), luvisoles (25.13%), phaeozem (15.60%), regosoles (11.31%), vertisoles (5.44%), cambisoles (3.66%), gleysoles (0.42%), fluvisoles (0.11%) y el 0.15% es área urbana.

De acuerdo con uso de suelo y vegetación, realizado por WWF (2014), la zona de estudio cuenta con 15 tipos de cubiertas. Los pastizales ocupan el primer lugar (20.99%), con importantes áreas con problema de cárcavas. El segundo lugar corresponde al bosque de encino (19.11%), seguido por bosque de pino encino y encino pino (16.60%), uso agrícola (12.92%), matorral (12.12%), y otras cubiertas con una proporción menor al 10%.

La metodología (Figura 2) inició con una revisión bibliográfica y recopilación de información

para integrar el sistema de información geográfica, conformado por el modelo digital de elevaciones (INEGI, 2012), distribución de suelos (INEGI, 2006), geología (SGM, 2000a y 2001), clima (INEGI, 2008), fisiografía (INEGI, 2010), vegetación y uso de suelo (WWF, 2014), población (INEGI, 2014 y 2015), imágenes de satélite y recorridos de campo. La estación receptora del sistema ERMEX proporcionó tres imágenes del satélite Spot 7 (dos del 29 de enero del 2015 y una del 4 de noviembre de 2015) y tres del Spot 6 (del 16 de febrero de 2015). El recorrido de campo se realizó entre el 8 y el 10 de diciembre de 2015 del cual se identificaron 503 puntos de entrenamiento. Se utilizaron imágenes Google Earth Pro 6.0 para generar áreas de entrenamiento y verificar los resultados obtenidos, ya que la resolución de las imágenes Spot multiespectrales son de 6 m y de las primeras es de 1.2 m.

La identificación de covariables ambientales, que influyen en la formación de cárcavas, se realizó con base en la revisión bibliográfica y las correlaciones entre las covariables, de este modo, las covariables seleccionadas para el análisis fueron diez: 1) pendiente del terreno (PEN), acorde a Burrough y McDonnell (1998), se obtuvo con el comando *3D Analyst Tools>Raster Surface>Slope* de ArcGis 10; 2) curvatura perfil o vertical (CV) y 3) curvatura plana u horizontal (CH), según Moore *et al.* (1991), ambas se generaron con el comando *3D Analyst Tools>Raster Surface>Curvature* de ArcGis 10; 4) longitud de la pendiente (LP), de acuerdo con Moore *et al.* (1991), se calculó con el comando *Terrain Analysis >Hydrology>Slope Length* de Qgis 2.8.1; 5) índice de Posición topográfica (IPT), como indica Weiss (2001), se determinó con la extensión para ArcGis Land Facet Corridor Designer; 6) índice topográfico de humedad (ITH), se calculó en ArcGis 10, basado en lo propuesto por Beven y Kirkby (1979); 7) distancia a picos (DP), corresponde a la distancia euclidiana medida a partir de las crestas generadas con IPT y para su cálculo se usó la herramienta *Spatial Analyst Tools>Distance>Euclidean Distance* de ArcGis 10; 8) distancia a la falla Tamazulapam (DF), se obtuvo con la herramienta *Spatial Analyst Tools>Distance>Euclidean Distance*; 9) índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI), como indicador de la densidad de la cobertura vegetal, se obtuvo de imágenes Spot corregidas por radianza y reflectancia a través del software Qgis 2.8.1 con el método al tope de la atmósfera; y 10) densidad

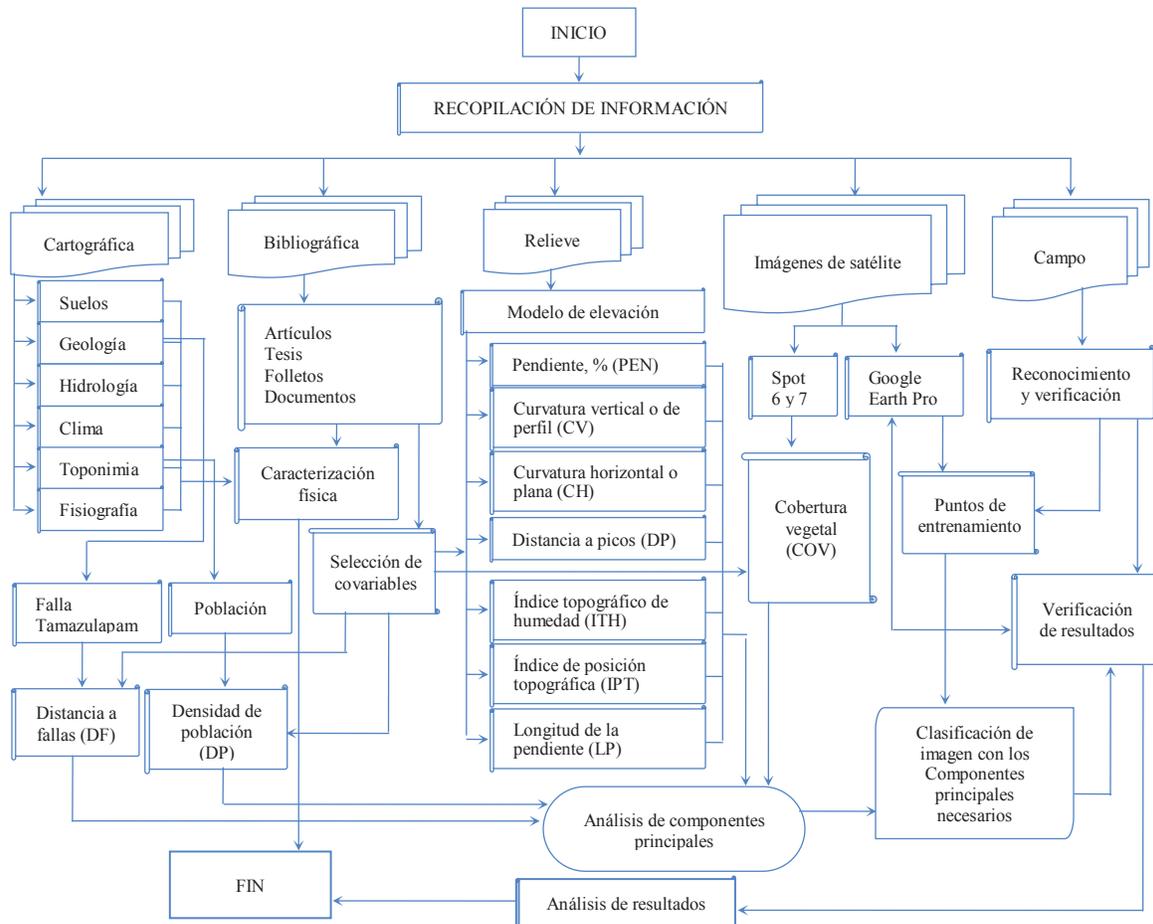


Figura 2. Diagrama metodológico para obtener las covariables que influyen en la formación de cárcavas.

de población (D), se calculó con base en el último censo de población de INEGI (2010) con los comandos *Spatial Analyst Tools>Density> Kernel Density* de Arc Gis 10.

Las covariables utilizadas fueron escaladas a valores de 0 a 256 con el propósito de homogenizar la información, y someterlas al análisis de componentes principales (ACP). Con gráfica de densidad se detectó que de las diez capas que representaban a las covariables (o los 10 componentes principales), con solo seis componentes principales se pudo explicar el proceso de formación de cárcavas, representando el 96.7% de la información. Estos seis componentes se usaron para identificar, con base en las áreas de entrenamiento y el método de máxima verosimilitud, la probabilidad de presencia de cárcavas en cada pixel del área de estudio. De acuerdo con lo que proponen Rossiter (2002), la validación de resultados se realizó

con 1.1 puntos de inspección por km². Con el comando *Data Management Tools>Feature class> Create Random Points*, de Arc Gis 10, se establecieron 289 puntos al azar y en cada uno de ellos se establecieron tres áreas concéntricas (con radios de 50, 100 y 150 m) para observar en cada círculo la proporción (el área que abarca) de cobertura de cárcavas (Figura 3).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Relación entre Covariables y la Presencia de Cárcavas

Con base en 502 áreas de entrenamiento empleadas en este trabajo, a continuación, se indica como ocurre la presencia de cárcavas según la magnitud de cada covariable ambiental analizada.

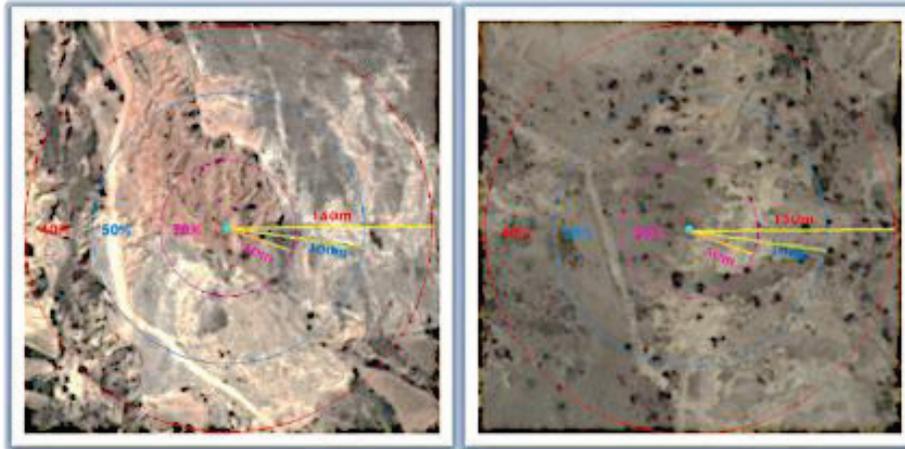


Figura 3. Áreas concéntricas para verificar la existencia de cárcavas.

Pendiente (PEN). Las cárcavas del área de estudio se presentan en pendientes entre 1 y 77%, pero concentrándose con mayor frecuencia en el rango 2.5 a 6.5% (29.16%) y en el intervalo 7.5 a 22.5% (51.57%). Las pendientes más bajas se asocian a atrincheramientos en las inmediaciones de valles intermontanos y las más altas a cárcavas ubicadas en lomeríos compuestos de materiales residuales. Para esta covariable, Palacio (1990) encontró que en el centro de México las cárcavas se desarrollan en pendientes de 0 a 18% y más usualmente entre 2 y 8%. Aun cuando en pendientes superiores existe mayor riesgo de erosión remontante, es menos común su presencia ya que generalmente estos terrenos son someros y cubiertos con vegetación.

Curvatura horizontal (CH). Las cárcavas en la zona se localizan principalmente entre -4.75 y 5.65 (adim.) y se concentran con mayor frecuencia en los rangos -1.75 y -0.45 (32.7%) y entre 0.05 y 1.75 (64.5%). En general, el rango negativo corresponde a flujos convergentes asociados a topografías cercanas a valles donde se generan corrientes con mayor acumulación de caudal y potencial erosivo, por otro lado, las curvaturas positivas se vinculan a flujos divergentes, como ocurre en topografías cónicas (volcánicas) con pendientes más pronunciadas.

Curvatura vertical o de perfil (CV). Las cárcavas en el área de estudio se presentan en curvaturas verticales entre -3.4 a 3.45; principalmente se concentran en el rango -0.75 a -0.05 (27.15%) y 0.05 a 1.05 (68.49%). El rango negativo indica que la velocidad de la corriente se incrementa conforme desciende, lo que genera flujos con mayor potencial para causar erosión en materiales

residuales consolidados en los lechos de las cárcavas. Por otra parte, los valores positivos se relacionan con cárcavas localizadas en zonas donde la sedimentación es el proceso dominante, es decir, estas se localizan en las inmediaciones de los valles aluviales.

Longitud de la pendiente (LP). En el área de estudio las cárcavas se presentan en laderas con longitudes entre 0 y 1300 m, pero principalmente se concentran en longitudes entre 10 y 30 m (22.18%) y en longitudes de 35 y 110 m (33.52%). En general se observa que el rango más bajo corresponde a áreas de depósitos aluviales, mientras las longitudes mayores a terrenos de ladera baja.

Índice de posición topográfica (IPT). Se encontró que la mayoría de las cárcavas se ubican en $IPT > 1$ y $IPT < 1$, es decir, en crestas (49.69%) y en valles intermontanos (42.22%), respectivamente. Esto indica que las cárcavas ocurren principalmente en laderas con presencia de materiales residuales de toba volcánica y en las inmediaciones de los valles intermontanos donde hay presencia de materiales aluviales y producción de escurrimientos.

Índice topográfico de humedad (ITH). se encontró que las cárcavas se distribuyen entre 0 y $14 \text{ m}^2 \text{ m}^{-1} \text{ }^\circ$; pero ocurren principalmente entre 0.0 y $2 \text{ m}^2 \text{ m}^{-1} \text{ }^\circ$ (42.43%), que se relacionan con acumulaciones medias de humedad, pendiente moderada y materiales residuales de toba volcánica; también estas ocurren entre 2 y $7 \text{ m}^2 \text{ m}^{-1} \text{ }^\circ$ (56.64%) que corresponden a áreas con las mayores acumulaciones de agua, pendientes bajas y materiales aluviales, características que se conjugan en las inmediaciones de los valles intermontanos.

Distancia a picos (DP). Las cárcavas del área de estudio se distribuyen a una distancia, a los picos topográficos más cercanos, de 0 y 1300 m, pero se concentran a distancias entre 100 y 400 m (46.91%) y entre 500 y 900 m (29.66%). Las cárcavas más cercanas a picos se registran en materiales volcánicos residuales, que circundan antiguas estructuras volcánicas, y las más alejadas a depósitos aluviales perimetrales a los valles intermontanos.

Distancia a fallas (DF). En la zona las cárcavas se ubican a una distancia entre 0 y 12 000 m de la falla Tamazulapam, pero la mayor frecuencia ocurre entre 0 y 4000 m (49.87%), seguido del rango 4000 y 10 000 m (45.87%). Así, las cárcavas más cercanas a la falla están asociadas a sitios con mayor actividad volcánica y las más alejadas a la formación de valles aluviales. En este sentido, Irigaray y Chacón (2002) mencionan que la distancia a fallas es una covariable que contribuye a la inestabilidad de las masas de suelo.

Densidad de vegetación (DV). Las cárcavas en el área de estudio presentan valores entre -0.54 y 0.29 concentrándose estas en el rango entre -0.16 y 0.2 (99.02%), es decir se localizan en suelos desnudos y vegetación baja (López-Pérez *et al.*, 2015). Esto concuerda con los resultados de Alatorre y Beguería (2009), que mencionan que las cárcavas se ubican principalmente en zonas marginales donde es difícil que se establezca la vegetación en pendientes superiores al 15%.

Densidad de población (D). en el área analizada se encontró que las cárcavas se ubican en sitios con densidades entre 0 a 170 hab km⁻², distribuidas principalmente en los rangos 5 a 30 hab km⁻² (60.91%) y de 30 a 70 hab km⁻² (31.40%). Las densidades bajas de población corresponden a cárcavas localizadas en sitios de difícil acceso y escaso potencial agrícola mientras que las cárcavas localizadas en lugares con densidades medias corresponden a entornos con mayor actividad agrícola, como ocurre en las inmediaciones de los valles aluviales.

En la zona de estudio se identificaron dos tipos de cárcavas, según su origen biofísico, las primeras localizadas en zonas cercanas a fallas geológicas con presencia de actividad volcánica. Sobre todo, este tipo de cárcavas se presentan al pie de las laderas que circundan antiguas estructuras volcánicas donde se presentan cauces divergentes, el agua alcanza velocidades críticas conforme desciende la estructura volcánica y ocurren cambios de uso de suelo; condiciones similares

a las encontradas por Bean *et al.* (2017) en las laderas compuestas por materiales volcánicos blandos. En estas cárcavas la acumulación y velocidad del flujo son suficientes para causar erosión en los materiales residuales de toba volcánica localizados en lechos y paredes de las cárcavas; materiales similares a los observados por Bocco *et al.*, 1991. (Dardis *et al.*, 1988; Bocco *et al.*, 1991; Oostwoud W. *et al.*, 1999; Prat *et al.*, 2003; Bean *et al.*, 2017).

El segundo tipo de cárcavas se observó en zonas donde la sedimentación ha sido el proceso dominante, es decir, en las inmediaciones de los valles aluviales intermontanos; similar a lo observado por Dardis *et al.* (1988) y Oostwoud Wijdenes *et al.* (1999) en el suroeste de España y Sudáfrica, respectivamente, donde encontraron este tipo de erosión en las colinas cercanas a los valles. En este segundo tipo de cárcavas, aunque la pendiente del terreno es menor que las anteriores, los escurrimientos deben su poder erosivo a una mayor concentración de los mismos, por la convergencia de los cauces y mayores superficies de sus microcuencas, que produce el atrincheramiento de los materiales aluviales depositados con anterioridad.

Covariables que Influyen en la Formación de Cárcavas

En la matriz de covarianzas, resultado del ACP para las diez covariables analizadas, se observó en la diagonal (Cuadro 1) que la distancia a la falla Tamazulapam tiene mayor variabilidad (55.8%), seguida de la distancia a picos (12.3%), índice topográfico de humedad (11.1%), densidad de vegetación (9.0%), pendiente (5.0%), índice de posición topográfica (2.8%), densidad de población (1.5%), longitud de la pendiente (1.3%), curvatura vertical (0.6%) y curvatura plana (0.5%). Esto implica que las covariables DF, DP, ITH, DV explican el 88.2% de la variabilidad de la información, es decir, son las que más aportarán a los resultados.

Al observar la matriz de correlaciones (Cuadro 2) destaca que la curvatura vertical y horizontal presentan alta correlación entre ellas (0.73) por lo que se puede prescindir de una de las dos sin alterar significativamente los resultados. Entre longitud de pendiente e índice topográfico de humedad se tiene una correlación intermedia (0.52), debido a que el índice de humedad considera la forma y longitud de la pendiente para modelar la distribución de la humedad en el terreno.

Cuadro 1. Matriz de covarianzas del análisis de componentes principales.

Covariable	CH	CV	D	DF	DP	ITH	LP	COV	PEN	ITP
CH (Adim.)	15.14	11.87	-0.01	0.00	-2.79	-23.19	-6.12	3.02	-5.24	12.52
CV (Adim.)	11.87	17.68	0.01	-0.38	-0.99	-26.81	-8.00	2.28	-1.48	8.96
D (hab km ²)	-0.01	0.01	42.86	15.45	-1.11	5.62	-1.34	2.51	-5.07	-0.37
DF (m)	0.00	-0.38	15.45	1590.44	-10.34	-17.74	1.70	44.64	27.83	0.60
DP (m)	-2.79	-0.99	-1.11	-10.34	349.72	32.37	14.53	-22.28	-13.56	-40.53
ITH (m ² m ⁻¹ °)	-23.19	-26.81	5.62	-17.74	32.37	317.26	56.79	-9.97	-20.56	-45.25
LP (m)	-6.12	-8.00	-1.34	1.70	14.53	56.79	37.04	-1.64	1.22	-14.97
COV	3.02	2.28	2.51	44.64	-22.28	-9.97	-1.64	256.60	-0.10	9.51
PEN (%)	-5.24	-1.48	-5.07	27.83	-13.56	-20.56	1.22	-0.10	143.48	-13.82
IPT (Adim.)	12.52	8.96	-0.37	0.60	-40.53	-45.25	-14.97	9.51	-13.82	79.31

CH = curvatura plana u horizontal; CV = curvatura perfil o vertical; D = densidad de población; DF = distancia a la falla Tamazulapam; DP = distancia a picos; ITH = índice topográfico de humedad; LP = longitud de la pendiente; COV = cobertura vegetal; PEN = pendiente; IPT = índice de posición topográfica.

Los vectores propios, generados por el ACP (Cuadro 3), mostró que en el componente uno (CP1) la covariable con mayor peso es la distancia a la falla de Tamazulapam, en los CP2 y CP3 distancia a picos y el índice topográfico de humedad, CP4 NDVI, CP5 pendiente, CP6 índice de posición topográfica, CP7 densidad de población, CP8 longitud de la pendiente, CP9 curvatura vertical, plana y longitud de la pendiente y en CP10 el mayor impacto lo tienen la curvatura plana y la curvatura

vertical. El análisis estadístico refleja que las variables ambientales detonantes de la formación de cárcavas son de tipo geológico, topográfico, de densidad de vegetación y antropogénico, de aquí que el área por naturaleza es frágil, al interaccionar con el incremento de población, la demanda de los recursos naturales se eleva lo que a su vez puede generar un mal manejo, traducéndose como una región condenada a presentar una alta degradación física, es decir erosión con cárcavas.

Cuadro 2. Matriz de correlaciones del análisis de componentes principales.

Covariable	CH	CV	D	DF	DP	ITH	LP	NDVI	COV	ITP
CH (Adim.)	1.0	0.73	0.00	0.00	-0.04	-0.33	-0.26	0.05	-0.11	0.36
CV (Adim.)	0.73	1.0	0.00	0.00	-0.01	-0.36	-0.31	0.03	-0.03	0.24
D (hab km ²)	0.00	0.00	1.0	0.06	-0.01	0.05	-0.03	0.02	-0.06	-0.01
DF (m)	0.00	0.00	0.06	1.0	-0.01	-0.02	0.01	0.07	0.06	0.00
DP (m)	-0.04	-0.01	-0.01	-0.01	1.0	0.10	0.13	-0.07	-0.06	-0.24
ITH (m ² m ⁻¹ °)	-0.33	-0.36	0.05	-0.02	0.10	1.0	0.52	-0.03	-0.10	-0.29
LP (m)	-0.26	-0.31	-0.03	0.01	0.13	0.52	1.0	-0.02	0.02	-0.28
COV	0.05	0.03	0.02	0.07	-0.07	-0.03	-0.02	1.0	0.00	0.07
PEN (%)	-0.11	-0.03	-0.06	0.06	-0.06	-0.10	0.02	0.00	1.0	-0.13
IPT (Adim.)	0.36	0.24	-0.01	0.00	-0.24	-0.29	-0.28	0.07	-0.13	1.00

CH = curvatura plana u horizontal; CV = curvatura perfil o vertical; D = densidad de población; DF = distancia a la falla Tamazulapam; DP = distancia a picos; ITH = índice topográfico de humedad; LP = longitud de la pendiente; COV = cobertura vegetal; PEN = pendiente; IPT = índice de posición topográfica.

Cuadro 3. Matriz de vectores propios del análisis de componentes principales.

Covariable	Componentes principales (CP)									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
CH (Adim.)	0.00	0.05	0.06	0.01	0.07	0.14	0.02	0.23	0.59	-0.75
CV (Adim.)	0.00	0.05	0.07	0.01	0.04	0.09	0.03	0.35	0.66	0.65
D (hab km ²)	0.01	-0.01	-0.02	0.01	0.05	-0.03	0.99	-0.13	0.03	0.00
DF (m)	1.00	-0.02	0.00	-0.03	0.02	0.00	-0.01	0.00	0.00	0.00
DP (m)	-0.01	-0.74	0.62	0.20	-0.01	0.12	0.01	0.00	-0.03	0.00
ITH (m ² m ⁻¹ °)	-0.01	-0.59	-0.75	0.02	-0.02	0.20	0.01	0.19	0.00	0.00
LP (m)	0.00	-0.13	-0.13	0.01	-0.06	-0.06	-0.13	-0.86	0.45	0.05
COV	0.03	0.17	-0.11	0.98	-0.04	-0.02	-0.01	0.00	-0.01	0.00
PEN (%)	0.02	0.07	0.04	-0.04	-0.96	0.24	0.06	0.03	0.01	-0.02
IPT (Adim.)	0.00	0.19	0.05	0.00	0.24	0.92	0.00	-0.18	-0.12	0.05

CH = curvatura plana u horizontal; CV = curvatura perfil o vertical; D = densidad de población; DF = distancia a la falla Tamazulapam; DP = distancia a picos; ITH = índice topográfico de humedad; LP = longitud de la pendiente; COV = cobertura vegetal; PEN = pendiente; IPT = índice de posición topográfica.

Los autovalores para cada componente principal, generados por el análisis, proporcionan el porcentaje de variación que explica cada uno de ellos. Estos valores son útiles para seleccionar el número de componentes principales con la mayor concentración de datos originales. La manera más común de seleccionar el número de componentes idóneos es a través de una gráfica de densidad donde se muestre el porcentaje acumulado de autovalores por componente principal (Figura 4). En este caso, para determinar la probabilidad de presencia de cárcavas, se seleccionaron los primeros seis componentes principales que explican el 96.7% de la información contenida en las diez covariables analizadas.

Con base en la matriz de valores propios y la densidad de datos, que aporta cada componente principal, se observó que los aspectos ambientales que dominaron cada componente fueron: CP1 tipo geológico, CP2 geohidrológico, CP3 hidrogeológico, CP4 cubierta vegetal, CP5 topográfico y CP6 topohidrológico.

En la zona de estudio la presencia de cárcavas se asocia principalmente a la distancia a una falla geológica de importancia regional, seguido de la distancia a conos volcánicos, la concentración de escurrimientos conforme a la ubicación topográfica sobre el cauce, la pendiente del lecho del cauce y la posición topográfica relativa de los sitios. Esta última asociada a cárcavas

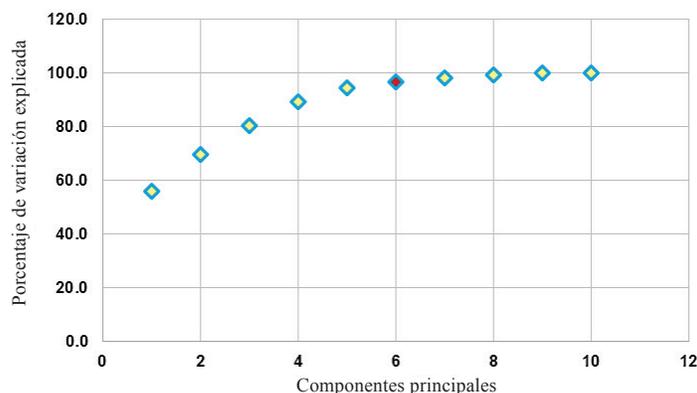


Figura 4. Gráfica de densidad de los componentes principales.

en terreno de pie de monte, sobre suelos residuales de toba volcánica, y a atrincheramientos localizados en las inmediaciones de los valles intermontanos, conformados por antiguos depósitos aluviales.

Probabilidad de Formación de Cárcavas en el Área de Estudio

Al clasificar la imagen multicapa, con los seis componentes principales seleccionados, se encontró que el 90.17% del área de estudio no presenta cárcavas, mientras que el 9.83% de la superficie total (606.54 km²) tiene una probabilidad de existencia de cárcavas mayor 0.5%. Asimismo, el 4.23% de la superficie (261.11 km²) tiene una probabilidad superior de 50% de que exista esta forma de erosión (Figura 5, Cuadro 4).

Al contabilizar la presencia o ausencia de cárcavas en 289 puntos de verificación, con una probabilidad de existencia superior al 50%, se encontraron cárcavas en 278 puntos, lo que produce una confiabilidad global del mapa generado de 96.2%. Al considerar el 20% de afectación en los buffer se identificaron 251 sitios con cárcavas y 38 sin ellas, por lo que la certeza de predicción disminuyó a 86.9%.

La Figura 6 ilustra el comportamiento con relación a la superficie porcentual que abarca cada uno de los buffer con respecto al número de estos con afectación, la tendencia es clara, entre mayor sea el radio de los buffer la predicción de sitios con cárcavas disminuye, tomando en cuenta un porcentaje de afectación de 30-40%, el buffer de 50 m predice una confiabilidad de 83.4%, el de 100 m de 81.7% y el de 150 m de 77.9%.

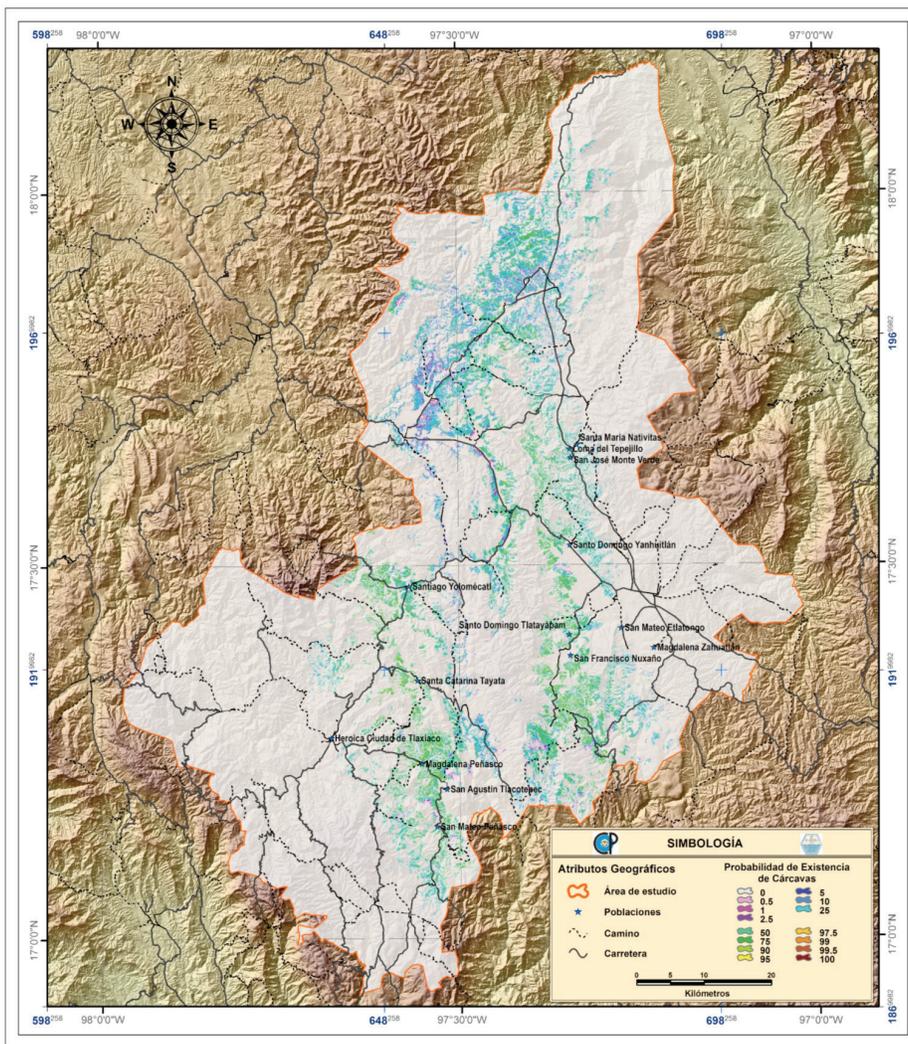


Figura 5. Distribución de las cárcavas en el área de estudio.

Cuadro 4. Probabilidad de existencia de cárcavas.

Probabilidad de existencia	Área	
	km ²	%
0	5560.92	90.17
0.5	5.68	0.09
1	5.07	0.08
2.5	18.75	0.30
5	39.16	0.64
10	90.01	1.46
25	186.76	3.03
50	146.95	2.38
75	75.70	1.23
90	27.56	0.45
95	6.40	0.10
97.5	2.60	0.04
99	1.23	0.02
99.5	0.35	0.01
100	0.32	0.01
Total general	6167.46	100.00

Al examinar el método empleado se dedujo que produce buenos resultados ya que conforme se reducía el radio de análisis, respecto a un punto con cárcavas observadas, se incrementaba la predicción de los resultados. En tanto que las covariables ambientales distancia a fallas, distancia a picos, índice topográfico de humedad, densidad de vegetación, pendiente

e índice de posición topográfica, son una alternativa para identificar las áreas susceptibles a la formación de cárcavas de forma precisa y rápida.

CONCLUSIONES

- En el área de estudio las cárcavas se presentan en suelos residuales de toba al pie de monte de antiguos aparatos volcánicos y en depósitos aluviales que circundan los valles intermontanos.
- A nivel regional la distancia a la falla de Tamazulapam y la presencia de aparatos volcánicos condicionaron la formación de cárcavas, seguido de factores geomorfológicos que controlan procesos de erosión y sedimentación, lo que se infirió a través del índice topográfico de humedad, pendiente del terreno, densidad de vegetación e índice de posición topográfica.
- Las covariables ambientales, distancia a fallas, distancia a picos, índice topográfico de humedad, densidad de vegetación, pendiente e índice de posición topográfica, son una alternativa para identificar las áreas susceptibles a la formación de cárcavas en sitios conformados por suelos residuales de origen volcánico y en depósitos aluviales localizados en la periferia de los valles intermontanos.
- El método de clasificación supervisada, usando ACP, permite identificar áreas con presencia de cárcavas con una precisión aceptable (96.2%) y es útil para determinar el potencial de un sitio para desarrollar este tipo de erosión.

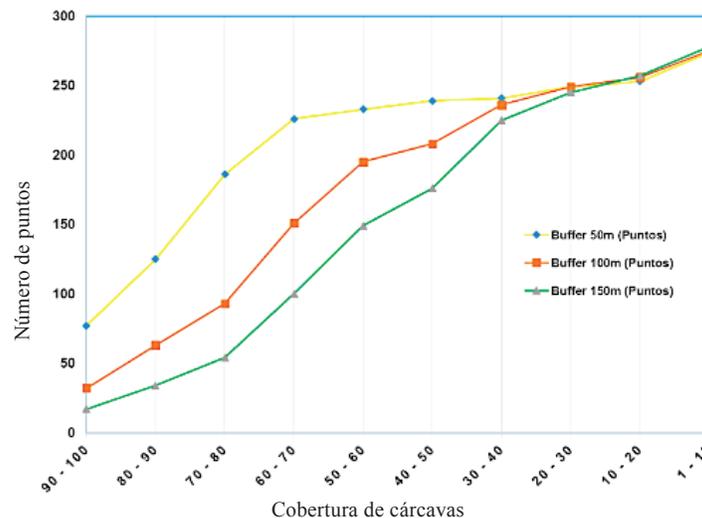


Figura 6. Porcentaje de cobertura de cárcavas en los puntos de verificación.

LITERATURA CITADA

- Alatorre, L. C. y S. Beguería. 2009. Identificación de zonas de erosión activa y áreas de riesgo mediante teledetección: un ejemplo en un paisaje de cárcavas sobre margas en el Pirineo central español. *Cuad. Invest. Geográf.* 35: 171-194.
- Bagyaraj, M., T. Ramkumar, S. Venkatramanan, and B. Gurugnanam. 2013. Application of remote sensing and GIS analysis for identifying groundwater potential zone in parts of Kodaikanal Taluk, South India. *Front. Earth Sci.* 7: 65-75. doi: 10.1007/s11707-012-0347-6.
- Basildo Martín, R. M. y P. López Nieva. 1998. Aproximación bibliográfica a los sistemas de información geográfica aplicados a la ordenación del territorio y los recursos naturales. *An. Geogr. Univ. Complutense* 18:319-335.
- Bean, T. A., P. D. Sumner, R. Boojhawon, V. Tatayah, A. K. Khadun, D. W. Hedding, S. D. D. V. Rughooputh, and W. Nel. 2017. Bedrock-incised gully erosion phenomena on Round Island, Mauritius. *Catena* 151: 107-117. doi: 10.1016/j.catena.2016.12.001.
- Beven, K. J. and M. J. Kirkby. 1979. A physically based, variable contributing area model of basin hydrology. *Hydrol. Sci. Bull.* 24: 43-69. doi: 10.1080/02626667909491834.
- Bocco, G. 1991. Gully erosion: Processes and models. *Prog. Phys. Geogr.* 15: 392-406. doi: 10.1177/030913339101500403.
- Bocco, G., J. L. Palacio y C. Valenzuela. 1991. Erosión en cárcavas en el Sistema Volcánico Transversal. Un modelo utilizando percepción remota, sistemas de información geográfica y análisis geomorfológico. *Bol. Inst. Geogr.* 22: 1-24.
- Bull, L. J. and M. J. Kirkby. 1997. Gully processes and modelling. *Prog. Phys. Geogr.* 21: 354-374.
- Burrough, P. A. and R. A. McDonell. 1998. Principles of geographical information systems. Oxford University Press. New York, NY, USA.
- Chuvieco, E. 1990. Fundamentos de teledetección espacial. Rialp. Madrid, España.
- Chuvieco, E. 2002. Teledetección ambiental. Ariel Ciencia. Barcelona, España.
- Dardis, G. F., H. R. Beckedahl, T. A. S. Bowyer-Bower, and P. M. Hanvey. 1988. Soil erosion forms in southern Africa. pp. 187-214. *In: G. F. Dardis and B. P. Moon (eds.). Geomorphological studies in southern Africa.* A. A. Balkema. Rotterdam, Netherlands.
- Guerrero-Arenas, R., E. Jiménez-Hidalgo y H. Santiago-Romero. 2010. La transformación de los ecosistemas de la Mixteca Alta oaxaqueña desde el Pleistoceno Tardío hasta el Holoceno. *Cienc. Mar* 14: 61-68.
- INEGI (Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática). 2006. Conjunto de datos vectorial Edafológico, escala 1: 250 000, Serie II. Edafología. Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática. Aguascalientes, Ags., México.
- INEGI (Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática). 2008. Conjunto de datos vectoriales escala 1:1 000 000, Unidades climáticas. Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática. Aguascalientes, Ags., México.
- INEGI (Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática). 2010. Censo de Población y Vivienda, 2010 (Informe nacional y estatales). Aguascalientes, Ags., México.
- INEGI (Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática). 2012. Continental - Continuo de elevaciones mexicano, CEM. Modelo digital de elevaciones escala 1:50 000. Versión 3.0. Instituto Nacional de Estadística, Geografía e informática. Aguascalientes, Ags., México.
- INEGI (Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática). 2014. Cartas topográficas (E14B85, E14B86, E14D15, E14D16, E14D25, E14D26, E14D34, E14D35 y E14D44). Instituto Nacional de Estadística, Geografía e informática. Aguascalientes, Ags., México.
- INEGI (Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática). 2015. Cartas topográficas (E14D24, E14D36, E14D45, E14D46, E14D54 Y E14D55). Instituto Nacional de Estadística, Geografía e informática. Aguascalientes, Ags., México.
- Irigaray, C. y J. Chacón. 2002. Métodos de análisis de la susceptibilidad a los movimientos de ladera mediante SIG. pp. 21-36. *In: F. J. Ayala Carcedo y J. Corominas (eds.). Mapas de susceptibilidad a los movimientos de ladera con la técnica SIG. Fundamentos y aplicaciones en España.* IGME. Madrid, España.
- Kreznor, W. R., K. R. Olson, W. L. Banwart, and D. L. Johnson. 1989. Soil, landscape, and erosion relationships in a Northwest Illinois watershed. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 53: 1763-1771.
- Lal, R. 1992. Restoring land degraded by gully erosion in the tropics. *Adv. Soil Sci. Soil Rest.* 17: 123-152.
- López-Pérez, A., M. R. Martínez-Menes y D. S. Fernández-Reynoso. 2015. Priorización de áreas de intervención mediante análisis morfométrico e índice de vegetación. *Tec. Cienc. Agua* 6: 121-137.
- Meijerink, A. M. J. 1988. Data acquisition and data capture through terrain mapping units. *ITC J.* 1: 23-44.
- Mendoza García, E. 2002. El ganado comunal en la Mixteca Alta: de la época colonial al siglo XX. El caso de Tepelmeme. *Hist. Mex.* 51: 749-785.
- Moore, I. D., R. B. Grayson, and A. R. Ladson. 1991. Digital terrain modelling: A review of hydrological, geomorphological, and biological applications. *Hydrol. Processes* 5: 3-30.
- Nyssen, J., J. Poesen, J. Moeyersons, E. Luyten, M. Veyret-Picot, J. Deckers, M. Haile, and G. Govers. 2002. Impact of road building on gully erosion risk: A case study from the Northern Ethiopian Highlands. *Earth Surf. Processes Landforms* 27: 1267-1283.
- Oostwoud Wijdenes, D. J., J. Poesen, L. Vandekerckhove, J. Nachtergaele, and J. De Baerdemaeker. 1999. Gully-head morphology and implications for gully development on abandoned fields in a semi-arid environment, Sierra de Gata, southeast Spain. *Earth Surf. Processes Landforms* 24: 585-603.
- Palacio Prieto, J. L. 1990. Determinación de áreas de erosión potencial en cárcavas: Un ejemplo en el centro de México. *Invest. Geogr.* 21: 45-55.
- Pathak, P., K. L. Sahrawat, T. J. Rego, and S. P. Wani. 2005. Measurable biophysical indicators for impact assessment: changes in soil quality. pp. 53-74. *In: Natural resource management in agriculture: methods for assessing economic and environmental impacts.* CAB International Publishing. Wallingford Oxfordshire, UK. ISBN 0-85199-828-3.

- Poesen, J., J. Nachtergaele, G. Verstraeten, and C. Valentin. 2003. Gully erosion and environmental change: Importance and research needs. *Catena* 50: 91-133.
- Poesen, J. 1993. Gully typology and gully control measures in the European loess belt. *Farm Land Eros. Temp. Plains Environ. Hills*. 221 -239.
- Poesen, J. 1993. Gully typology and gully control measures in the European loess belt. pp. 221-239. *In*: S. Wicherek (ed.). *Farm land erosion in temperate plains environment and hills*. Elsevier. Amsterdam, Netherlands.
- Poesen, J. and J. M. Hooke. 1997. Erosion, flooding and channel management in Mediterranean environments of southern Europe. *Progress Phys. Geogr.* 21:157-199. doi: 10.1177/030913339702100201
- Prat, C., V. M. Ordaz Ch. y J. A. Rugama. 2003. Impacto de la roturación y del manejo agronómico de un tepetate sobre su estructura. *Terra Latinoamericana* 21: 109-115.
- Rossiter, D. G. 2002. Metodologías para el levantamiento del recurso suelo. ITC. Cochabamba, Bolivia.
- Santamaría-Díaz, A., S. A. Alaniz-Álvarez y Á. F. Nieto-Samaniego. 2008. Deformaciones cenozoicas en la cobertura de la falla Caltepec en la región de Tamazulapam, sur de México. *Rev. Mex. Cienc. Geol.* 25: 494-516.
- SGM (Servicio Geológico Minero). 2000a. Cartas Geológico-Mineras y Geoquímicas E14-12 Zaachila, escala 1: 250 000. Servicio Geológico Minero, Pachuca, Hgo.
- SGM (Servicio Geológico Minero). 2000b. Cartas Geológico-Mineras y Geoquímicas E14-9 Oaxaca, escala 1: 250 000. Servicio Geológico Minero, Pachuca, Hgo.
- SGM (Servicio Geológico Minero). 2001. Cartas Geológico-Mineras y Geoquímicas E14-6 Orizaba, escala 1: 250 000. Servicio Geológico Minero, Pachuca, Hgo.
- Stolt, M. H., J. C. Baker, and T. W. Simpson. 1993. Soil – landscape relationships in Virginia: I. Soil variability and parent material uniformity. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 57: 414-421.
- Tamene, L., S. J. Park, R. Dikau, and P. L. G. Vlek. 2006. Analysis of factors determining sediment yield variability in the highlands of northern Ethiopia. *Geomorphology* 76: 76-91.
- Valcárcel, M., M. T. Taboada, A. Paz, and J. Dafonte. 2003. Ephemeral gully erosion in northwestern Spain. *Catena* 50: 199-216.
- Verstappen, H. T. and R. A. Van Zuidam. 1991. The ITC system of geomorphological mapping. ITC Publication 10.
- Weiss, A. D. 2001. Topographic position and landforms analysis. ESRI User Conference. San Diego, CA, USA.
- WWF (World Wildlife Fund). 2014. Tasa de transformación de la vegetación en el área de intervención del proyecto Mixteca. Oficina de la World Wildlife Fund en Oaxaca. Sitio web: <http://www.proyectomixteca.org.mx/servidor-cartografico/> (consulta: abril 21, 2016).
- Zinck, J. A. and C. R. Valenzuela. 1990. Soil geographic database: structure and application examples. *ITC J.* 3: 270-294.