

Evaluación de la estabilidad de taludes en cárcavas, Huasca de Ocampo, Hidalgo, México

Evaluation of slope stability in gullies from Huasca de Ocampo, Hidalgo, Mexico

Jazmín María de los Dolores Hernández Sánchez¹, Demetrio S. Fernández Reynoso^{1‡},
Mario R. Martínez Menez^{1†}, Benjamín Figueroa Sandoval²,
Erasmus Rubio Granados¹ y José Luis García Rodríguez³

¹ Postgrado de Hidrociencias, Colegio de Postgraduados Campus Montecillo. Carretera México-Texcoco km 36.5, Montecillo. 56230 Texcoco, Estado de México, México.

[‡] Autor para correspondencia (demetrio@colpos.mx)

² Postgrado de Innovación en Manejo de Recursos Naturales, Colegio de Postgraduados Campus San Luis Potosí. Calle de Iturbide 73, San Agustín. 78622 Salinas de Hidalgo, S.L.P., México.

³ Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Montes, Forestal y del Medio Natural, Universidad Politécnica de Madrid. Avenida de las Moreras, s/n, edificio de Montes. 28040 Madrid, España.

RESUMEN

En el ejido de Santo Domingo, Huasca de Ocampo, Hidalgo, los cambios de uso de suelo, las condiciones topográficas y geomorfológicas, y el incremento de los escurrimientos propician la formación de cárcavas sobre los terrenos agrícolas, provocando la pérdida de fertilidad del suelo y reducción de la superficie agrícola. El objetivo de esta investigación, fue identificar las principales características topográficas y propiedades físico-mecánicas del suelo que inciden en el avance lateral de las cárcavas (AV), mediante análisis de componentes principales (ACP) y regresión lineal múltiple (RLM). El AV varió de 0.04 a 0.17 m año⁻¹, con una media de 0.092 m año⁻¹. Las variables de mayor peso en el ACP, fueron: altura, pendiente, orientación, curvatura vertical y horizontal, pendiente transversal del terreno, espesor de la cresta, densidad aparente (0-5 y de 5-10 cm), resistencia a la penetración (2.5, 5 y 10 cm), conductividad hidráulica, índice de contracción, índice de plasticidad, partículas de 0.25, 0.15 y 0.075 mm, cohesión y factor de erodabilidad. El modelo de regresión lineal obtenido, tuvo un ajuste de 84.02%, utilizando cuatro variables (partículas de 0.15 y 0.075 mm, pendiente del talud y espesor de la cresta). El AV está influenciado por la presencia de limos y arcillas en el regolito y en la superficie del

suelo (cresta), que, al ser susceptibles ante procesos de humedecimiento y secado, propician la formación de grietas y la disgregación del material que compone a la cresta y el talud, disminuyendo su resistencia a la erosión y causando erosión remontante e inestabilidad en los taludes de las cárcavas.

Palabras clave: *análisis de componentes principales, avance lateral de cárcavas, erosión en cárcavas, regresión lineal múltiple.*

SUMMARY

In Santo Domingo, Huasca de Ocampo, Hidalgo, changes in the use of soil, the topographic and geomorphological conditions and the increase of runoffs, promote the formation of gullies in agricultural areas, causing the loss of soil fertility and a reduction of agricultural land. The objective of our research was to identify the main topographic features and physical/mechanical properties of the soil that cause a sidewall retreat of gullies (AV); determination was performed through principal component analysis (PCA) and multiple linear regression (MLR). The AV varied from 0.04 to 0.17 m yr⁻¹ with a mean value of 0.092 m yr⁻¹. The most important variables in the PCA were: height, slope, orientation, vertical and horizontal curvature,

Cita recomendada:

Hernández Sánchez, J. M. D., D. S. Fernández Reynoso, M. R. Martínez Menez[†], B. Figueroa Sandoval, E. Rubio Granados y J. L. García Rodríguez. 2019. Evaluación de la estabilidad de taludes en cárcavas, Huasca de Ocampo, Hidalgo, México. *Terra Latinoamericana* 37: 303-313. DOI: <https://doi.org/10.28940/terra.v37i3.468>

Recibido: 18 de noviembre de 2018.

Aceptado: 08 de abril de 2019.

Publicado en *Terra Latinoamericana* 37: 303-313.

transversal slope, ridge thickness, bulk density (0 to 5 and 5 to 10 cm), penetration resistance (2.5, 5 and 10 cm), hydraulic conductivity, shrinkage index, plasticity index, 0.25, 0.15 and 0.075 mm particles, cohesion and soil erodibility factor. The best linear regression explanatory model presented a fit value of 84.02% using four variables (particles of 0.15 and 0.075 mm, slope and ridge thickness). The AV is influenced by the presence of silt and clay in the regolith and soil surface (ridge), which are vulnerable to wetting and drying processes that boost the formation of cracks and disaggregation of the components of ridge and slope, reducing the soil's resistance to erosion and causing headward erosion and instability in the gully slopes.

Index words: *gully erosion, multiple linear regression, principal component analysis, sidewall retreat.*

INTRODUCCIÓN

La conservación del suelo es esencial para la seguridad alimentaria y un futuro sostenible. Sin embargo, cerca de 33% de los suelos a nivel mundial presentan degradación de moderada a grave, siendo la erosión hídrica una de las principales causas. En México este tipo de erosión ocupa 66% de la superficie nacional (INEGI, 2015) y 1.97% de esta superficie, es producto de la acción del flujo concentrado que causa incisión y socavamiento sobre la superficie del suelo, formando canales de 0.5 a 30 m (Soil Science Society of America, 2001 citado por Rahmati *et al.*, 2017).

El desarrollo y crecimiento de cárcavas sobre el terreno, depende de la combinación de diversos factores, como: precipitación, topografía, patrón de drenaje, litología, características del suelo, uso y manejo del mismo (Poesen *et al.*, 2003; Conoscenti *et al.*, 2014; Rahmati *et al.*, 2017). Comúnmente, el crecimiento lateral de las cárcavas se ha estimado como un incremento de su área o longitud a través del tiempo, mediante clavos de erosión, fotografías aéreas, imágenes LIDAR y reconstrucción de fotografías – 3D (Castillo y Gómez, 2016; Rahmati *et al.*, 2017), con especial atención en la cabecera de la cárcava. Sin embargo, la erosión en los taludes de cárcavas es la fuente principal de sedimento durante la etapa final del desarrollo de la cárcava (Qin *et al.*, 2018) y el proceso principal de su evolución (Chaplot *et al.*, 2011).

En el estado de Hidalgo (México), se reportaron afectaciones por cárcavas en 1.44% de su superficie

(INEGI, 2014), particularmente en el ejido de Santo Domingo (Huasca de Ocampo), donde la erosión en cárcavas ha provocado la pérdida de fertilidad del suelo y reducido la superficie agrícola. Ante esta problemática, la presente investigación tuvo como objetivo evaluar las características topográficas y propiedades físico-mecánicas en taludes de cárcavas para identificar los principales factores que inciden en su estabilidad, mediante análisis de componentes principales, y generar un modelo de regresión lineal múltiple que permita predecir su avance lateral.

MATERIALES Y MÉTODOS

Área de estudio. Comprende dos cárcavas ubicadas en una cuenca al sur del municipio de Huasca de Ocampo, pertenecientes al ejido de Santo Domingo (Figura 1). La cárcava 1 se localiza en las coordenadas geográficas 20° 09' 30.16" y 20° 09' 26.07" N; 98° 29' 09.96" y 98° 29' 19.99" O, y la cárcava 2 en las coordenadas 20° 08' 55.57" y 20° 8' 53.26" N; 98° 29' 32.31" y 98° 29' 32.95" O. Las cárcavas presentaron taludes con horizonte A visible y presas de control de azolves, que han favorecido la estabilización del lecho. El área de estudio se encuentra a 2360 m de altitud, presenta un clima templado sub-húmedo, con precipitación media anual de 862 mm y temperatura promedio de 17 °C. El suelo dominante es vertisol crómico, asociado a agricultura de temporal, bosque de encino y vegetación secundaria arbustiva de bosque de encino.

Levantamiento topográfico. Se realizó un levantamiento topográfico con la estación total SOKIA SET 630RK3 de 20 secciones trasversales. La información se procesó con QGIS, y se obtuvieron las covariables mostradas en la Figura 2, así como la pendiente longitudinal y transversal del terreno a la altura de la cresta, la curvatura vertical (CV) y horizontal (CH), y orientación de los taludes.

Determinación de propiedades físico-mecánicas. Se realizó un muestreo de suelo en 30 sitios sobre los taludes de las secciones trasversales. La densidad aparente (ρ_a) se determinó con el método del cilindro de volumen conocido de 0-5 y 5-10 cm. La resistencia a la penetración (RP) se obtuvo con un penetrómetro de ultrasonido (FIELDSCOUT SC 900, SPECTRUM) a 2.5, 5 y 10 cm de profundidad. La textura se obtuvo con el método de Bouyoucos modificado (previa separación de arenas); la erodabilidad (K) se calculó de acuerdo a

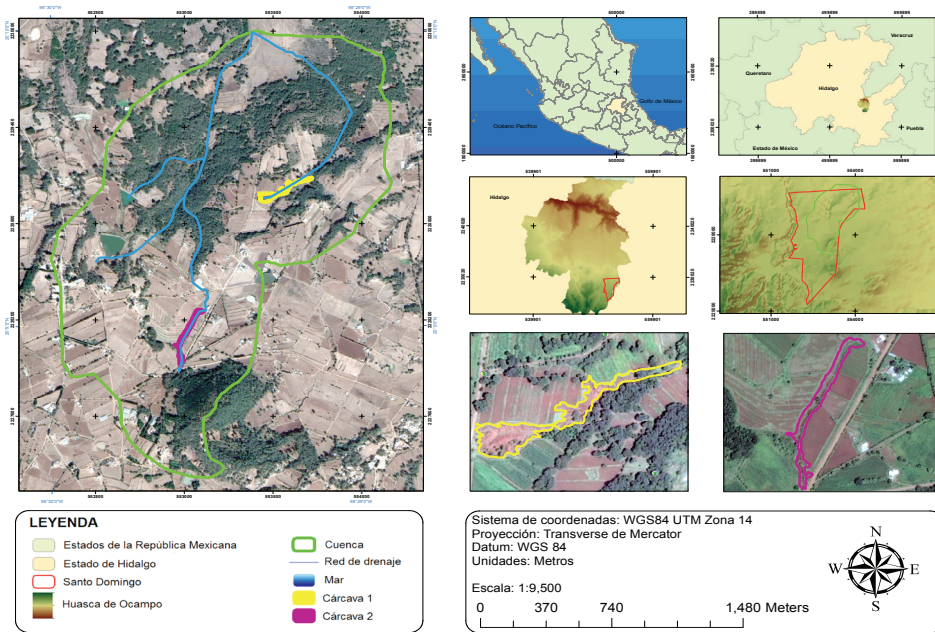


Figura 1. Localización del área de estudio.
Figure 1. Location of the study area.

la ecuación de Wischmeier y Smith (1978); los límites de Atterberg: límite líquido (LL), plástico (LP) e índice de plasticidad (IP) con la copa de Casagrande (ASTM 4318, 2005) y el índice de contracción (IC) de acuerdo al manual de la SRH (1962), modificando el uso de Hg por parafina. La distribución del tamaño de partículas (DTP), se realizó con seis tamices con aberturas de 2.0, 1.0, 0.6, 0.25, 0.15 y 0.075 mm, la conductividad hidráulica (Ks) se estimó con el permeámetro de carga constante (Klute y Dirksen, 1986) en muestras

inalteradas y la cohesión mediante un ensayo de compresión simple no drenado (ASTM 2166, 2000).

Estimación de la velocidad de avance lateral. El avance lateral (AV) se obtuvo en $m\ a\ \text{año}^{-1}$, con la comparación de una ortofoto de 1995 (INEGI, 1995) y el levantamiento topográfico realizado en el año 2017.

Análisis estadístico. Se utilizó un ACP para identificar las variables de mayor importancia en el avance lateral de las cárcavas (AV), seleccionando los componentes (CP) con valores propios >1 (Kaiser, 1960) y en cada componente las tres variables con los mayores vectores propios. Posteriormente, a través de RLM, se determinó una ecuación de predicción para el AV, utilizando como variables independientes aquellas seleccionadas en cada CP. La RLM utilizó un método escalonado, y en el modelo obtenido se evaluaron los siguientes criterios: a) factor de inflación de varianza (VIF), para descartar la multicolinealidad, $VIF >2$ (Lin, 2008); b) valor de S, para evaluar qué tan bien el modelo describe a la variable dependiente; c) valor de R^2 ; d) valor de R^2 pronóstico, para determinar la predicción en nuevas observaciones; e) valor $P \leq \alpha$ de las variables seleccionadas en el modelo, f) valor $P \leq \alpha$ de la regresión y g) PBIAS (porcentaje de sesgo) de acuerdo a Moriasi *et al.*, 2007. El valor de α fue de 0.10. El análisis estadístico se realizó con los softwares R Studio y Minitab Inc.

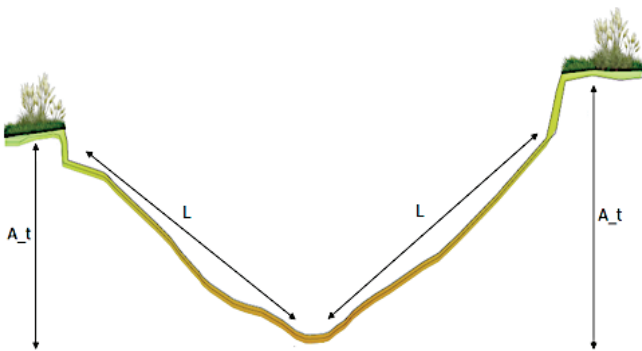


Figura 2. Variables determinadas en sección transversal, longitud (L) y altura del talud (A_t).
Figure 2. Variables determined in cross section, length (L) and height of the slope (A_t).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los terrenos adyacentes a las secciones transversales tuvieron una pendiente longitudinal desde 3.62 a 6.8%, y una pendiente transversal promedio de 2.45%, consideradas suaves, con un potencial débil a la presencia de erosión y de tipo laminar (Ferrando, 1993). La altura y longitud de los taludes varió de 2.78 a 5.23 m, con una media de 3.88 m y de 4.62 a 10.41 m, con una media de 7.27 m (Figura 3a). La media del ángulo de la pendiente de los taludes fue de 26.13° con variaciones de 15 a 40° (Figura 3b) que, desde el punto de vista geomorfológico, se consideraron moderadas o moderadamente escarpadas (Ferrando, 1993).

El espesor promedio de la cresta fue de 42.20 cm, variando de 30 a 62 cm (Figura 4), ubicándose en los horizontes húmico de textura franco migajonosa y de textura franco arcillosa, con presencia de caras de deslizamiento (HA- HBSs del suelo), siendo la porción del terreno aledaño que forma parte de la sección transversal de la cárcava y donde se inicia el talud de la cárcava. En esta zona del terreno se presentan grietas producto de los procesos de humedecimiento y secado del suelo, que provocan su desprendimiento en forma de bloques que caen sobre la pendiente de los taludes.

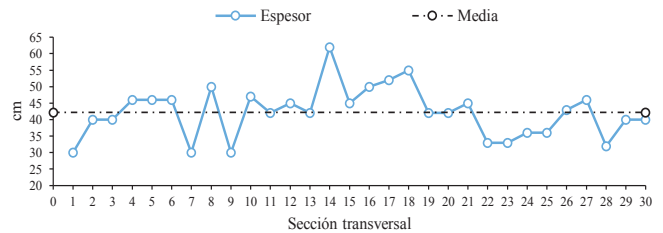


Figura 4. Espesor de la cresta en secciones transversales.
Figure 4. Thickness of the ridge in cross sections.

La curvatura vertical de los taludes fue convexa (valor negativo) en 46.67%, indicando que el flujo desacelerará, 46.67% fue cóncava (valor positivo), lo que aumenta la velocidad del flujo y riesgo de erosión y 6.67% restante fue lineal (valor de 0) (Figura 5a), sin presentar cambios en las condiciones de erosión o deposición (Toledo, 2017). En la curvatura horizontal 50% fue cóncava, y el flujo se concentrará sobre la ladera, incrementando el desarrollo de la cárcava (valor negativo), 43.33% fue convexa (valor positivo), por lo que el flujo se dispersará y no presentará riesgo sobre el talud y el resto fue lineal (valor de 0), donde el flujo se conducirá sobre el talud de forma paralela (Figura 5b). Todos los taludes tuvieron como común denominador

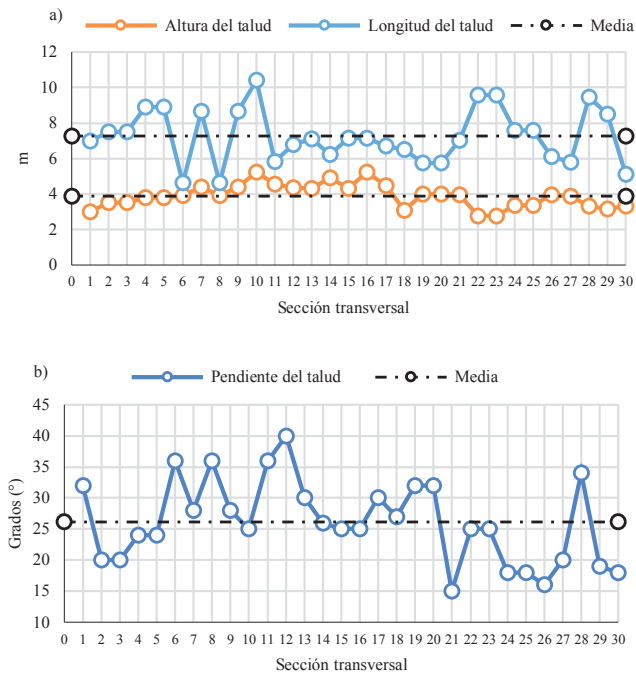


Figura 3. Altura, longitud (a) y pendiente de taludes (b).
Figure 3. Height, length (a) and slope gradient (b).

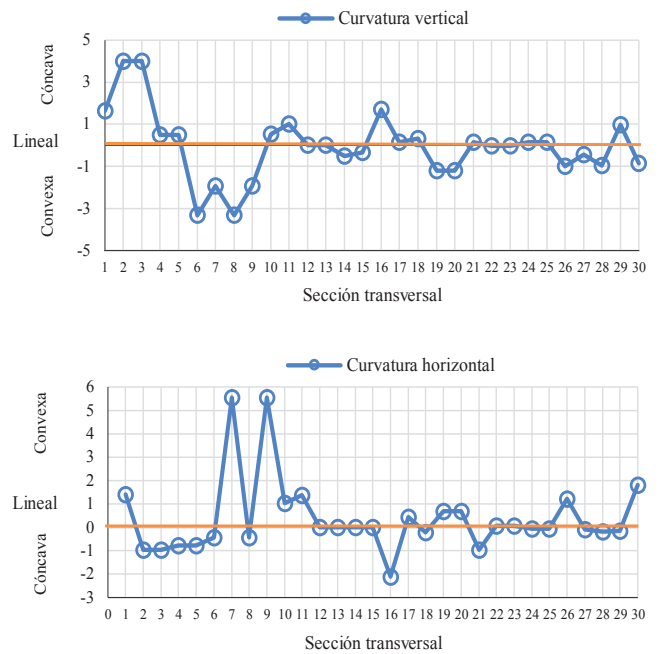


Figura 5. Curvatura vertical (a) y horizontal (b) sobre taludes.
Figure 5. Vertical (a) and horizontal (b) curves on slopes.

la orientación norte, correspondiendo 66.67% una orientación noreste, 23.33% norte y 10% noroeste. De forma general, los taludes con orientaciones al norte suelen recibir menor luz y, por consiguiente, tener mayores contenidos de humedad con respecto a la orientación sur (Nadal *et al.*, 2007).

Clasificación mecánica del regolito. En términos de la carta de plasticidad y la clasificación del Sistema Unificado de Clasificación de Suelos, los valores medios de límite líquido (LL) e índice de plasticidad (IP), indicaron que el regolito se comporta como un limo inorgánico con ligera plasticidad (ML), pero próximo al límite de las arcillas minerales de plasticidad media (Figura 6).

Los limos inorgánicos con ligera plasticidad son inestables por su propia naturaleza, particularmente cuando aumenta la humedad, con tendencia a fluir cuando hay saturación, difíciles de compactar, muy susceptibles a erosionarse y sujetos a tubificación. Asimismo, se caracterizan por tener regular resistencia al corte en estado compacto y de saturación, nula

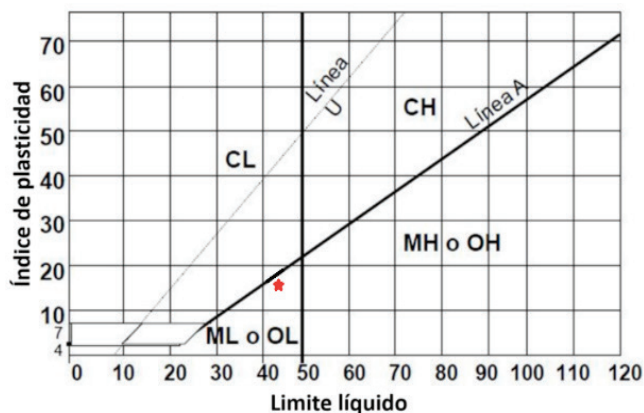


Figura 6. Límite líquido (LL) e índice de plasticidad (IP) del regolito, representados sobre la carta de plasticidad de Casagrande. Arcillas inorgánicas de plasticidad baja a media (CL), arcillas inorgánicas de alta plasticidad (CH), limos inorgánicos de ligera plasticidad (ML), limos orgánicos o arcillas limosas orgánicas de baja plasticidad (OL), Limos inorgánicos (MH), arcillas orgánicas de plasticidad media a alta o limos orgánicos (OH).

Figure 6. Liquid limit (LL) and plasticity index (IP) of the regolith based on Casagrande plasticity chart. Inorganic clays with low to medium plasticity (CL), high plasticity inorganic clays (CH), light plasticity inorganic silts (ML), organic silts or low plasticity organic silty clays (OL), inorganic silts (MH), organic clays of medium to high plasticity or organic silts (OH).

a ligera resistencia a la disgregación y riesgo medio a deslizamientos (Lambe y Whitman, 1974).

Descripción de propiedades físico-mecánicas del regolito. De acuerdo al contenido medio de arenas, limos y arcillas, el regolito presentó una textura arcillosa. La distribución del tamaño de partículas (Figura 7), muestra que el regolito presentó mayor porcentaje de microagregados (<0.25 mm) con respecto a macroagregados (0.25 a > 2 mm); representando una degradación de la estabilidad estructural del suelo y una mayor susceptibilidad a los procesos erosivos (Volverás y Amézquita, 2009).

La media de la densidad aparente (ρ_a) de 0-5 cm, fue de 1.06, variando de 0.72 a 1.52 gr cm^{-3} , y de 5 a 10 cm de 0.73 a 1.59 gr cm^{-3} con una media de 1.11 gr cm^{-3} , observando un aumento de la ρ_a con la profundidad. La resistencia a la penetración (RP) (Figura 8a, b), tuvo un comportamiento similar a la ρ_a , con valores promedio a los 2.5, 5 y 10 cm de 603.97, 972.31 y 1682.32 kPa, respectivamente. Las variaciones a los 2.5 cm fueron de 140 a 1544 kPa, a los 5 cm de 103.21 a 1404 kPa y los 10 cm de 412.78 a 3195 kPa. De forma general, a menores valores de ρ_a , RP y compactación, mayor espacio poroso, capacidad de almacenamiento de agua, y viceversa.

Los valores medios en el índice de plasticidad (IP) (13.90%) y límite líquido (LL) (42.81%), clasificaron a su vez al regolito como mediano y altamente plástico (Figura 9a), con un potencial medio a alto de hinchamiento (Murthy, 2002; Muñoz, 2018¹). El índice de contracción (IC), representó el cambio de volumen del regolito ante procesos de humedecimiento y secado, con un valor medio de 31.57% y variaciones de 27.13% a 38.84% (Figura 9b).

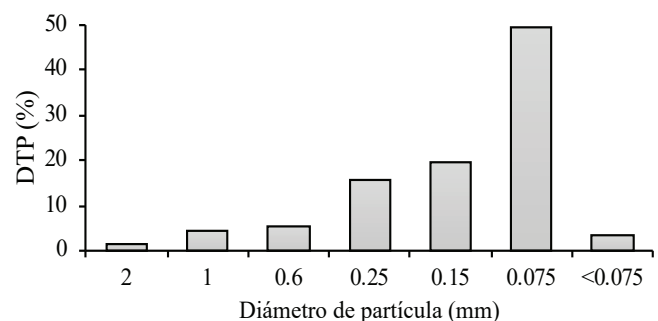


Figura 7. Porcentaje de la distribución de tamaño de partículas (DTP).

Figure 7. Percentage of particle size distribution (DTP).

¹ Muñoz-Avedaño, L. Y. 2018. Análisis de la capacidad de soporte (CBR) de suelos limo arenosos estabilizados con silicato de sodio, adicionado en un 70% de la humedad óptima de compactación. Tesis de Licenciatura. Facultad Tecnológica – Ingeniería Civil. Bogotá, Colombia.

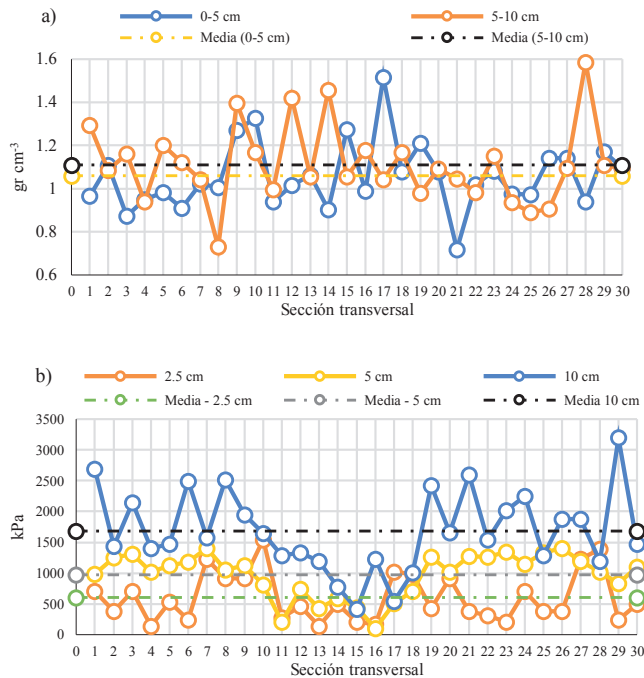


Figura 8. Densidad aparente (a) y resistencia a la penetración (b) sobre taludes.
Figure 8. Apparent density (a) and resistance to penetration (b) on slopes.

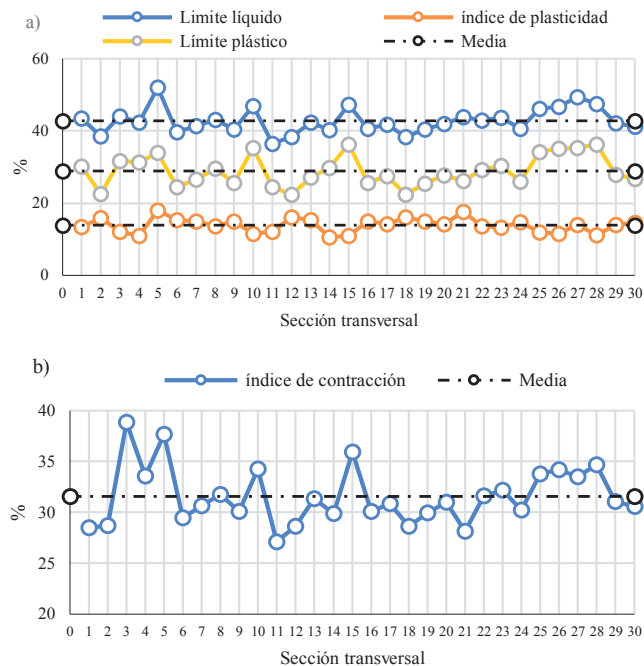


Figura 9. Límites de Atterberg (a) e índice de contracción (b) sobre taludes.
Figure 9. Atterberg limits (a) and contraction index (b) on slopes.

La conductividad hidráulica (K_s) fue moderada con una media de 7.95 y variaciones de 1 a $16\ cm\ h^{-1}$ (Figura 10). Aunque se esperaría una K_s lenta ($1-2\ cm\ h^{-1}$) debido a la textura del regolito, los valores de K_s se favorecieron por la presencia de grietas a lo largo del perfil, causando un incremento en el movimiento del agua y altas tasas de infiltración.

La erodabilidad del suelo (Factor K) tuvo un valor promedio de $0.024\ Mg\ ha^{-1}\ año^{-1} / MJ\ h^{-1}\ mm\ h^{-1}$ y variaciones de 0.018 a $0.034\ Mg\ ha^{-1}\ año^{-1} / MJ\ ha^{-1}\ mm\ h^{-1}$ (Figura 11a), lo que indica una resistencia media del regolito a la erosión (Figuroa *et al.*, 1991). La cohesión (Figura 11b) tuvo una media de $3.07\ Mg\ m^{-2}$ y variaciones de 0.64 a $5.38\ Mg\ m^{-2}$, clasificando al regolito como cohesivo rígido (GEO5, 2018), donde la aireación es escasa y las raíces penetran con mucha dificultad y suelen crecer a través de las grietas; caracterizándose por retener gran cantidad de agua y drenaje escaso (Murthy, 2002).

Estimación de la velocidad del avance lateral. El mayor avance lateral (Figura 12) se tuvo en los sitios muestreados sobre los taludes 1, 2 y 3, con valor de $0.17\ m\ año^{-1}$, considerando que los sitios 2 y 3 pertenecen a la misma sección transversal. El avance en estos sitios, se asoció al tipo de la curvatura vertical que favoreció la aceleración del flujo, el arrastre de partículas y el riesgo de erosión sobre el talud, así como la curvatura horizontal para los sitios 2 y 3, que, al ser de tipo cóncava, también aumentó el desarrollo de la cárcava. El porcentaje de limos para los sitios 1 y 2, fue alto con 39% y 35% , incrementando la erodabilidad del suelo. Mientras que, el sitio 3 tuvo uno de los valores más bajos de cohesión ($1.66\ Mg\ m^{-2}$). Los tres sitios reportan valores mínimos en el porcentaje de partículas con diámetros de 0.015 y $0.075\ mm$.

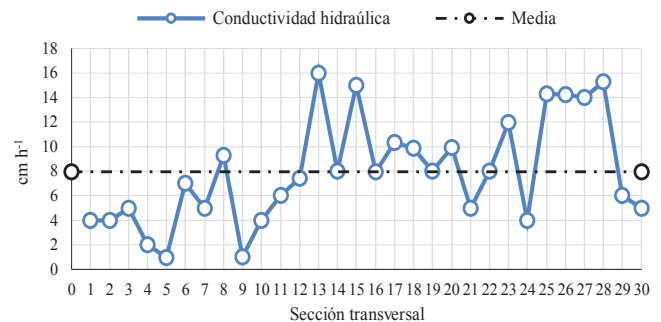


Figura 10. Conductividad hidráulica sobre taludes.
Figure 10. Hydraulic conductivity on slopes.

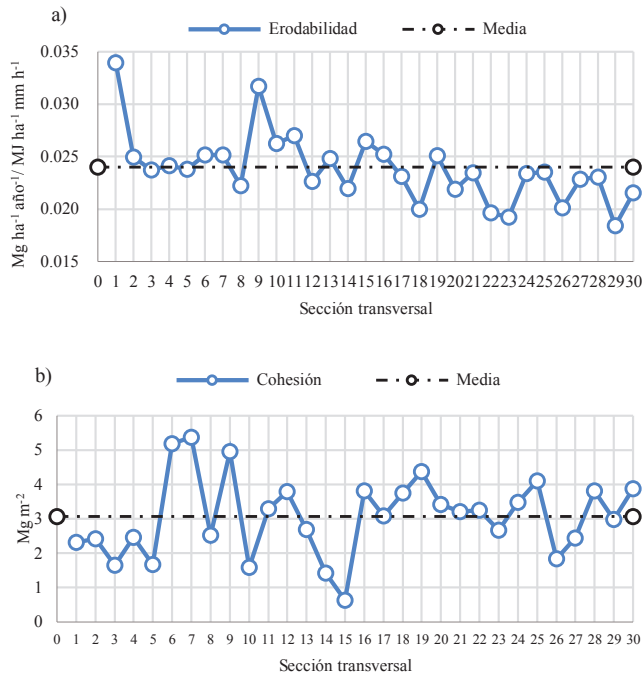


Figura 11. Erodabilidad (a) y cohesión (b) sobre taludes.
Figure 11. Erodability (a) and cohesion (b) on slopes.

El menor avance lateral se tuvo en los sitios de muestreo 7 y 9 (0.04 m año^{-1}), correspondiendo a la misma sección transversal, donde la curvatura vertical y horizontal disminuyeron la aceleración del flujo y su dispersión sobre el talud. Ambos sitios de muestreo, observaron los valores más altos en el porcentaje de partículas con diámetros de 0.015 y 0.075 mm , y valores bajos en el espesor de la cresta y la conductividad hidráulica. Ahora bien, al considerar el mayor avance lateral (0.17 m año^{-1}) para una proyección a 50 y 100 años, se tiene que, estos taludes presentarán un avance lateral de 8.5 y 17 m, respectivamente, lo que implica una gran pérdida en la superficie agrícola en un futuro.

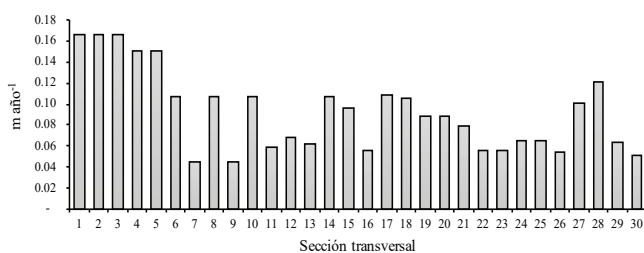


Figura 12. Avance lateral (1995- 2017) sobre taludes.
Figure 12. Lateral progress (1995- 2017) on slopes.

En general, en el área de estudio, el comportamiento del flujo de escurrimiento se ve influenciado por el tipo de curvatura en el talud, favoreciendo o no su aceleración y con ello la erosión. Asimismo, el material fino (limos y arcillas) que compone al suelo tiene un comportamiento inestable al formar grietas, que causan el desprendimiento del suelo en forma de bloques y que caen sobre el talud. Este material, ante procesos de humedecimiento y secado, se disgrega fácilmente y cuando ocurre un evento de lluvia es transportado, favoreciendo el crecimiento lateral de las cárcavas.

La presencia de grietas favorece la disgregación, disminuye la cohesión y la resistencia al esfuerzo de corte (Bradford y Piest, 1980), y cuando estas se llenan de agua, la presión de poros aumenta, provocando el estallamiento al interior del suelo y por consiguiente la falla y la caída del material (Collison, 2001; Martínez-Casanovas *et al.*, 2004). Asimismo, la nula o escasa cobertura vegetal en los taludes de las cárcavas, favorece el crecimiento lateral e inestabilidad de los taludes, al no haber una relación entre las raíces y las partículas, que mejore la cohesión y la resistencia del suelo.

Esta información sugiere que el control de cárcavas, no solo consiste en construir presas de control de azolves, sino que, se debe propiciar la revegetación natural sobre los taludes como ha sido recomendado por Heede (1976) y Bastola *et al.* (2018), así como algunas técnicas que favorezcan la cementación de las partículas del suelo, a fin de disminuir la energía de impacto del escurrimiento, mejorar las fuerzas cohesivas y la resistencia al esfuerzo de corte. Complementariamente, se debe considerar el cabeceo de las cárcavas, la construcción de canales de desviación del flujo superficial, la revegetación o la construcción de sistemas de terrazas en los terrenos aledaños de las cárcavas.

Análisis de componentes principales. Previo al ACP, se realizó la selección específica de covariables a fin de evitar información redundante y que de acuerdo a Ferrero *et al.* (2002), cuando algunas covariables no aportan información adicional, o es recogida por otra covariable, es posible eliminarlas sin afectar significativamente los resultados. El resultado del ACP, fue la selección de ocho componentes, con auto valores de 3.47 a 1.07 y contribución total de 76.40% de la variación total (Cuadro 1).

Los vectores propios obtenidos para cada CP y las covariables seleccionadas se muestran en el Cuadro 2.

Cuadro 1. Matriz de auto valores para los componentes principales seleccionados.
Table 1. Eigenvalues matrix for the selected main components.

Componente principal	1	2	3	4	5	6	7	8
Total	3.47	2.66	2.46	2.06	1.69	1.44	1.19	1.07
% de variación total	0.165	0.127	0.117	0.098	0.08	0.068	0.057	0.051
Porcentaje acumulado	16.50	29.20	40.90	50.70	58.80	65.60	71.30	76.40

El CP1 y el CP2, concentraron información de la distribución de partículas del regolito; el CP3 y CP6, representaron las características topográficas del talud y espesor de la cresta; el CP4 y CP7, mostraron información de la resistencia del regolito a la compactación y penetración; el CP5, reflejó información sobre la consistencia y la conductividad hidráulica del regolito y el CP8 mostró información sobre la consistencia y resistencia del regolito a la erosión.

Regresión lineal múltiple para pendiente del talud.

Las covariables seleccionadas de cada CP se utilizaron para generar un modelo de regresión múltiple para predecir el avance lateral (Cuadro 3). El mejor modelo obtuvo ajuste de 84.02% y R² para la predicción de nuevas observaciones de 76.99%, expresándose de la siguiente forma:

$$AV = 0.2795 - 0.0102 * G0.15 - 0.001617 * G0.075 + 0.000999 * M_talud + 0.001622 * Espesor$$

Cuadro 2. Matriz de vectores propios para cada componente principal.
Table 2. Eigenvectors matrix for each main component.

Covariables	CP1	CP2	CP3	CP4	CP5	CP6	CP7	CP8
Altura del talud	0.18	0.20	0.00	0.39	-0.21	0.23	-0.26	0.13
Pendiente del talud	0.17	0.23	-0.37	0.16	0.06	-0.04	0.31	-0.13
Curvatura vertical	0.07	-0.01	0.53	-0.12	-0.17	-0.05	-0.01	-0.04
Curvatura horizontal	-0.01	-0.2	-0.34	0.31	0.08	-0.31	-0.13	-0.17
Orientación	-0.31	-0.13	0.03	-0.08	-0.02	0.34	0.12	-0.36
Espesor de la cresta	0.05	0.30	0.02	-0.03	-0.19	0.59	-0.13	0.08
Pendiente longitudinal del terreno	0.41	-0.26	0.01	0.20	-0.04	-0.03	-0.11	0.04
Pendiente transversal del terreno	0.17	0.14	-0.47	-0.11	0.02	0.31	-0.10	-0.01
Densidad aparente (0-5 cm)	-0.17	0.00	0.06	0.26	0.20	0.00	-0.55	0.13
Densidad aparente (5-10 cm)	0.05	0.06	0.17	0.25	-0.23	0.09	0.36	0.07
Resistencia a la penetración (2.5 cm)	0.00	-0.24	-0.03	0.38	-0.09	0.05	0.08	0.20
Resistencia a la penetración (5 cm)	0.00	-0.48	-0.13	-0.20	0.07	0.15	-0.04	0.22
Resistencia a la penetración (10 cm)	0.09	-0.27	-0.26	-0.32	-0.06	0.20	-0.17	-0.19
Conductividad hidráulica	-0.28	0.19	-0.08	0.11	0.34	0.08	0.36	-0.03
Índice de contracción	0.12	-0.06	0.09	0.14	0.51	0.28	0.16	0.33
Partículas de 0.25 mm	0.25	0.38	0.00	-0.24	0.10	-0.23	-0.18	-0.13
Partículas de 0.15 mm	-0.34	0.30	-0.14	0.04	-0.18	-0.14	-0.18	0.15
Partículas de 0.075 mm	-0.42	-0.02	-0.14	0.18	-0.08	0.00	-0.08	-0.09
Índice de plasticidad	0.17	0.12	-0.21	-0.22	-0.07	-0.21	0.17	0.49
Cohesión	-0.15	-0.14	-0.18	-0.03	-0.56	-0.05	0.18	0.22
Erodabilidad (Factor K)	0.33	-0.02	-0.01	0.25	-0.15	0.02	0.11	-0.45

Cuadro 3. Regresión lineal múltiple para pendiente del talud.
Table 3. Multiple linear regression for slope gradient.

	VIF	S	MSE	Rango de valores	
				Máximo	Mínimo
Regresión		0.0164922	0.000272		
Intercepción*					
G0.15*	1.47			23.3	12.2
G0.075*	1.37			61.1	34.5
M_talud*	1.11			40	15
Espesor*	1.08			62	30

* = $P < 0.005$; VIF = factor de inflación de varianza; S = raíz cuadrada del MSE; MSE = cuadrado medio del error. El rango de valores indica el máximo y mínimo para los cuales se obtuvo el modelo.

* = $P < 0.005$; VIF = variance inflation factor; S = square root of MSE; MSE = error mean square. The range of values indicates the maximum and minimum for which the model was obtained.

donde:

AV = avance lateral (m año⁻¹);

G0.15 y G0.075 = partículas de 0.15 y 0.075 mm, respectivamente (%);

M_talud = pendiente del talud (°);

Espesor = espesor de la cresta (cm).

De acuerdo al modelo de regresión, el avance lateral, disminuirá 0.0102 unidades por cada incremento en el tamaño de partícula de 0.15 mm, y 0.001617 con partículas de 0.075 mm, y aumentará 0.000999 y 0.001622 por cada unidad de incremento en la pendiente del talud y espesor de la cresta.

Finalmente, la Figura 13 muestra los valores observados del avance lateral y la predicción de los mismos. En esta se observa que los puntos por encima de la línea son sobrestimados por el modelo, mientras que los puntos por debajo son subestimados. De acuerdo al PBIAS (porcentaje de sesgo), el modelo obtenido tiende a sobrestimar 0.07%.

CONCLUSIONES

- El espesor de la cresta es una covariable importante, ya que, con el proceso de humedecimiento y secado del suelo, se forma bloques que por efecto del peso y la gravedad caen sobre los taludes causando su avance lateral.

- El análisis de componentes principales y regresión lineal múltiple, permitió identificar que el espesor de

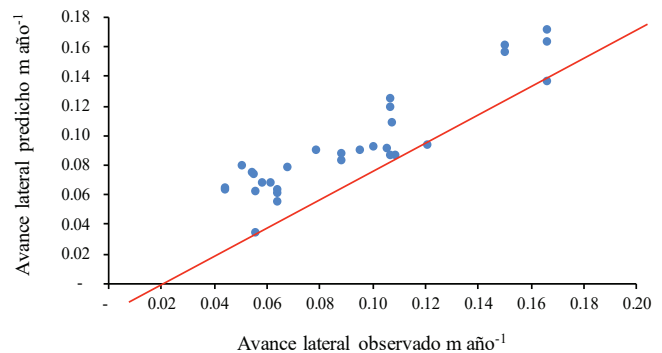


Figura 13. Valores originales contra valores predichos para el avance lateral del talud.

Figure 13. Original values vs predicted values for the lateral progress of the slope.

la cresta y el ángulo de la pendiente del talud, influyen en forma creciente en el avance lateral de las cárcavas, y las partículas de 0.15 y 0.075 mm de diámetro, en forma decreciente.

- Con el establecimiento de presas de control de azolves en las cárcavas bajo estudio se logró disminuir el crecimiento del lecho, pero no el avance lateral de las cárcavas.

LITERATURA CITADA

ASTM 4318-05. 2005. Standard test methods for liquid limit, plastic limit, and plasticity index of soils. United States. http://www.academia.edu/27874630/Standard_Test_Methods_for_Liquid_Limit_Plastic_Limit_and_Plasticity_Index_of_Soils_1 (Consulta: junio 5, 2016).

- ASTM 2166-00. 2000. Standard test method for unconfined compressive strength of cohesive Soil. United States. https://kashanu.ac.ir/Files/D%202166%20%E2%80%93%2000%20%20_RDIXNJY_.pdf (Consulta: diciembre 11, 2017).
- Bradford, J. M. and R. F. Piess. 1980. Erosional development of valley-bottom gullies in the upper Midwestern. United States. pp. 75-101. *In*: D. R. Coates and J. D. Vitak (eds.). *Thresholds in geomorphology*. Allen and Unwin. London.
- Bastola, S., Y. G. Dialynas, R. L. Bras, L. V. Noto, and E. Istanbuloglu. 2018. The role of vegetation on gully erosion stabilization at a severely degraded landscape: A case study from Calhoun Experimental Critical Zone Observatory. *Geomorphology* 308: 25-39. doi: 10.1016/j.geomorph.2017.12.032.
- Castillo, C. and J. A. Gómez. 2016. A century of gully erosion research: Urgency, complexity and study approaches. *Earth Science Reviews* 160: 300-319. doi: 10.1016/j.earscirev.2016.07.009.
- Chaplot, V., J. Brown, P. Dlamini, T. Eustice, J. Janeau, G. Jewitt, S. Lorentz, L. Martin, C. Nontokozo-Mchunu, E. Oakes, P. Podwojewski, S. Revil, C. Rumpel, and N. Zondi. 2011. Rainfall simulation to identify the storm-scale mechanisms of gully bank retreat. *Agric. Water Manage.* 98: 1704-1710. doi: 10.1016/j.agwat.2010.05.016.
- Collison, A. J. C. 2001. The cycle of instability: stress release and fissure flow as controls on gully head retreat. *Hydrol. Process.* 15: 3-12. doi: 10.1002/hyp.150.
- Conoscenti, C., S. Angileri, C. Cappadonia, E. Rotigliano, V. Agnesi, and M. Maerker. 2014. Gully erosion susceptibility assessment by means of GIS-based logistic regression: A case of Sicily (Italy). *Geomorphology* 204: 399-411. doi: 10.1016/j.geomorph.2013.08.021.
- Ferrando, F. J. 1993. Clasificación hidrodinámica de Chile. *Cuadernos Invest. Geográf.* 18: 57-74. doi: 10.18172/cig.1003.
- Ferrero, S. B., M. G. Palacio y O. R. Campanella. 2002. Análisis de componentes principales en teledetección. Consideraciones estadísticas para optimizar su interpretación. *Rev. Teledetección* 17: 43-54.
- Figuroa-Sandoval, B., A. Amante, H. G. Cortes, J. Pimentel, E. S. Osuna, J. M. Rodríguez y J. F. Morales. 1991. Manual de producción de pérdidas de suelo por erosión. Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos. Colegio de Postgraduados. México.
- GEO5 Software Geotécnico. 2018. Fine, Civil Engineering Software. <https://www.finesoftware.es/software-geotecnico/> (Consulta: octubre 9, 2018).
- Heede, B. H. 1976. Gully development and control: The Status of Our Knowledge. USDA Forest Service. Research Paper RM-169. U. S. Department of Agriculture. Fort Collins, CO, USA.
- INEGI (Instituto Nacional de Estadística y Geografía). 1995. Ortofotografía digital. Instituto Nacional de Estadística y Geografía. Aguascalientes, Ags., México.
- INEGI (Instituto Nacional de Estadística y Geografía). 2014. Erosión de suelos en México. Boletín de prensa Núm. 295/14 2014. Aguascalientes, Ags., México.
- INEGI (Instituto Nacional de Estadística y Geografía). 2015. Estadísticas a propósito del día mundial del suelo (5 de diciembre): datos nacionales. Aguascalientes, Ags., México.
- Kaiser, H. F. 1960. The application of electronic computers to factor-analysis. *Educ. Psychol. Meas.* 20: 141-151. doi: <https://doi.org/10.1177/001316446002000116>.
- Klute, A. and C. Dirksen. 1986. Hydraulic conductivity and diffusivity: Laboratory methods. pp. 687-734. *In*: A. Klute (ed.). *Methods of soil analysis. Part 1. Physical and mineralogy methods*. Agronomy monograph no. 9. ASA-SSSA. Madison, WI, USA.
- Lambe, T. W. y R. V. Whitman. 1974. *Mecánica de suelos*. Ed. Limusa. México. ISBN: 968-18-1894-6.
- Lin, F. J. 2008. Solving multicollinearity in the process of fitting regression model using the nested estimate procedure. *Qual. Quant.* 42: 417-426. doi: <https://doi.org/10.1007/s11135-006-9055-1>.
- Martínez-Casasnovas, J. A., M. C. Ramos y J. Poesen. 2004. Assessment of sidewall erosion in large gullies using multi-temporal DEMs and logistic regression analysis. *Geomorphology* 58: 305-321. doi: <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2003.08.005>.
- Moriasi, D. N., J. G. Arnold, M. W. van Liew, R. L. Bingner, R. D. Harmel, and T. L. Veith. 2007. Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. *Transactions of the ASABE* 50: 885-900. doi: 10.13031/2013.23153.
- Murthy, V. N. S. 2002. *Geotechnical engineering: Principles and practices of soil mechanics and foundation engineering*. CRC Press. New York, NY, USA. ISBN-13: 978-0824708733.
- Nadal-Romero, E., D. Regúes, C. Martí-Bono, and P. Serrano-Muela. 2007. Badland dynamics in the Central Pyrenees: temporal and spatial patterns of weathering processes. *Earth Surf. Proc. Landfor.* 32: 888-904. doi: <https://doi.org/10.1002/esp.1458>.
- Poesen, J., J. Nachtergaele, G. Verstraeten, and C. Valentin. 2003. Gully erosion and environmental change: importance and research needs. *Catena* 50: 91-133. doi: [https://doi.org/10.1016/S0341-8162\(02\)00143-1](https://doi.org/10.1016/S0341-8162(02)00143-1).
- Qin, C., F. Zheng, R. R. Wells, X. Xu, B. Wang, and K. Zhong. 2018. A laboratory study of channel sidewall expansion in upland concentrated flows. *Soil Tillage Res.* 178: 22-31. doi: <https://doi.org/10.1016/j.still.2017.12.008>.
- Rahmati, O., N. Tahmasebipour, A. Haghizadeh, H. R. Pourghasemi, and B. Feizizadeh. 2017. Evaluating the influence of geo-environmental factors on gully erosion in a semi-arid region of Iran: An integrated framework. *Sci. Total Environ.* 579: 913-927. doi: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.10.176>.
- SRH (Secretaría de Recursos Hidráulicos). 1962. Instructivo para ensaye de suelos. Dirección de Estudios y Proyectos. Departamento de Ingeniería Experimental. Secretaría de Recursos Hidráulicos. México, D. F.
- 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>.

Volverás M., B. y E. Amézquita C. 2009. Estabilidad estructural del suelo bajo diferentes sistemas y tiempo de uso en laderas andinas de Nariño, Colombia. *Acta Agron.* 58: 35-39. doi: 10.15446/acag.

Wischmeier, W. H. and D. D. Smith. 1978. Predicting rainfall erosion losses: a guide to conservation planning. *Agriculture handbook 537*. United States Department of Agriculture (USDA), Agricultural Research Service. Washington, DC, USA.