

CARACTERÍSTICAS Y CONTROL DE CÁRCAVAS

Characteristics and Control of Gully Erosion

M. Bravo-Espinosa^{1‡}, M. E. Mendoza², L. Medina-Orozco³ y T. Sáenz-Reyes¹

RESUMEN

En este trabajo se propuso caracterizar las cárcavas profundas, determinar su impacto como fuentes de sedimento y degradación, y proponer medidas para su control. El estudio se realizó en la subcuenca de Cointzio, Michoacán, México. Se caracterizaron 16 cárcavas con pendientes que fluctuaron de 0.10 a 0.25 m m⁻¹ sobre Acrisoles con alto contenido de arcilla (> 60%). La longitud de las cárcavas osciló de 12.6 a 353.8 m; la profundidad se relacionó con el ancho superior y con la longitud de la cárcava. El ancho de las cárcavas y el avance remontante parecen estar relacionados con la formación de grietas en los bordes de la cabecera y taludes, y con flujos preferenciales que inducen la erosión tubular y el colapso de taludes y cabecera; la profundidad de las cárcavas se relaciona probablemente con el esfuerzo cortante de caudales generados en eventos extraordinarios de lluvia. La erosión en cárcavas es la principal fuente de sedimento y el mayor proceso de degradación del suelo en la subcuenca de Cointzio; el control de esta erosión debe privilegiar el uso de la vegetación nativa e introducida, bajo el concepto de cuenca y con el involucramiento de usuarios y las instituciones locales.

Palabras clave: *acrisoles, erosión, esmectita, pasto llorón.*

SUMMARY

The purpose of this study was to characterize deep gullies, to determine their impacts as a source of sediment and degradation, and to recommend measures for their control. The study was conducted in the Cointzio subwatershed, Michoacan. Sixteen gullies with slopes that varied from 0.10 to 0.25 m m⁻¹ were characterized. They developed on Acrisols with high clay content (> 60%). Gully length fluctuated from 12.6 to 353.8 m; their depth was related to width at lip and gully length. Growth of gully-head and gully width at lip could be related to the development of tension cracks on gully head and banks, and to preferential flows that promotes their collapse. Gully depth is probably due to the shear stress exerted by runoff discharges that occur during extraordinary rainfall events. Gully erosion is the main source of sediment and the most serious soil degradation process in the Cointzio subwatershed. Gully erosion control should privilege the use of native and exotic vegetation under the watershed management concept, and with the direct involvement of land owners and local institutions.

Index words: *acrisols, erosion, smectite clay, weeping love grass.*

INTRODUCCIÓN

Una cárcava es un canal natural o incisión causado por un flujo de agua concentrado, a través del cual fluye la escorrentía durante o inmediatamente después de un evento intenso de lluvia (SCSA, 1982). Las cárcavas se forman debido a las actividades antropogénicas y factores físicos como son el uso inapropiado del suelo y de la vegetación, sobrepastoreo, construcción de caminos, senderos creados por animales o vehículos, intensidad y cantidad de lluvia, topografía, tamaño y forma de la cuenca, longitud y gradiente de laderas, y características del suelo, entre otros (Bocco, 1991;

¹ Campo Experimental Uruapan-INIFAP. Av. Latinoamericana 1101, Col. Revolución. 60500 Uruapan, Michoacán, México.

[‡] Autor responsable (bravo.miguel@inifap.gob.mx)

² Centro de Investigaciones en Geografía Ambiental. UNAM-Campus Morelia. Antigua Carretera a Pátzcuaro 8701. Col. Exhacienda de San José de la Huerta. 58190 Morelia, Michoacán, México.

³ Facultad de Biología. UMSNH. Edificio R planta baja, Ciudad Universitaria. Morelia, Michoacán, México.

Strunk, 2005). Los procesos erosivos en cárcavas afectan negativamente su área cercana, reduciendo áreas agrícolas, de pastoreo y forestales, y dañando la infraestructura ubicada aguas abajo; contaminan cuerpos de agua superficiales y abaten el nivel freático de las corrientes (Valentin *et al.*, 2005; Martineli y Prado, 2007). La erosión en cárcavas ha sido ignorada porque es difícil de investigar y de predecir, también es escasa la información sobre la efectividad de técnicas para su control (Poesen *et al.*, 2003). En nuestro país predominan los estudios sobre diagnósticos, sin abordar técnicas para su control (López y Palacio, 1995; Bocco y García-Oliva, 1992; Palacio-Prieto y López-Blanco, 1994; Mendoza *et al.*, 2004). El presente estudio se realizó con el propósito de caracterizar las cárcavas permanentes, determinar su impacto como fuentes de sedimento y con base en la revisión de literatura proponer medidas para su control.

MATERIALES Y MÉTODOS

El estudio se realizó en la microcuenca de Atécuaro, perteneciente al sistema hidrológico de la subcuenca de Cointzio, Michoacán, en los 19° 33' 05" y 19° 37' 08" LN, y 101° 09' 00" y 101° 15' 07" LO. El sustrato del área está constituido por depósitos superficiales y andesitas que conforman lomeríos, colinas y piedemontes sobre los cuales se desarrollan Andosoles y Acrisoles, principalmente. La red hidrológica presenta un patrón dendrítico intermitente o efímero que se conectan a corrientes que alimentan la presa de Cointzio, la cual aporta el 30% del agua para el uso urbano de la ciudad de Morelia. La temperatura media anual es de 18 °C y la precipitación media anual de 900-1100 mm, concentrada en los meses de junio a septiembre. Los usos del suelo son el agrícola, pastoreo y forestal. Los cultivos que se practican son maíz, bajo temporal o humedad residual, y sólo de temporal, la asociación maíz-frijol y avena. El pastoreo se realiza en laderas con más de 10% de pendiente.

Para diferenciar una cárcava permanente de una efímera, se adoptó el criterio de que la primera debe alcanzar en su cabecera una profundidad de 0.8 m (Vanwalleghem *et al.*, 2005). En las cárcavas se midieron los atributos del cauce y de las áreas próximas a éste durante el último trimestre de 2006 y primer semestre de 2007. La ubicación y altitud de la cabecera se determinaron con un GPS y altímetro. Se registraron

la pendiente del área aguas arriba de la cabecera, así como la pendiente de la superficie del suelo de las franjas anexas y paralelas al cauce. Estas mediciones se realizaron con un clisímetro y una pistola Haga. La actividad en la cabecera se evaluó con los criterios propuestos por Oostwoud Wijdenes *et al.* (2000) y la profundidad, ancho y longitud con la metodología de Stocking y Murnaghan (2001). Estas variables se registraron cada 2 - 10 m, en puntos donde el cauce mostró cambios en su sección transversal, registrándose en cada segmento la pendiente del lecho. Se calcularon medidas descriptivas de los atributos y con el modelo de regresión simple se describieron relaciones entre variables. Para evaluar parcialmente la cantidad de sedimentos que salen de la cuenca, se analizaron los registros de sólidos totales determinados en la planta potabilizadora de Morelia, Michoacán, del periodo 1997 - 2002. Esta planta potabiliza el agua de la presa de Cointzio para el uso público de la ciudad.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Características y Relaciones Morfológicas

Los canales de las cárcavas tuvieron una longitud que osciló de 12.6 a 353.8 m. Todas las cárcavas se desarrollaron en laderas con pendiente promedio de 0.14 y 0.16 m m⁻¹, para la pendiente arriba de la cabecera y del área anexa a los taludes, respectivamente. Guanglu Li *et al* (2004) reportó un umbral crítico del gradiente de la pendiente de 0.14 m m⁻¹ para cárcavas profundas (> 2.0 m). El área promedio de drenaje de las cárcavas fue de 1.3 ha, con uso de pastoreo en las cuencas de aportación en 11 de ellas y en cinco con uso agrícola bajo el sistema de "año y vez".

Al relacionar el ancho superior (AS) con la profundidad de las cárcavas (P) se obtuvo la siguiente expresión: $P = 0.2375AS$, $R^2 = 0.53$, (Figura 1); esta relación indica que el ancho es 4 veces la profundidad. El Servicio de Conservación de Suelos de USA (USDA-SCS, 1966), recomendó la comparación del ancho superior contra la profundidad, como un método para predecir el ancho de una cárcava; el modelo que propuso para suelos cohesivos fue $P = 0.34 AS$. La profundidad también mostró una relación lineal con la longitud de la cárcava (LC); explícitamente: $P = 1.56 + 0.0054LC$, $R^2 = 0.55$, (Figura 1). El perfil de la longitud de la cárcava es un criterio para establecer la morfología de la cárcava

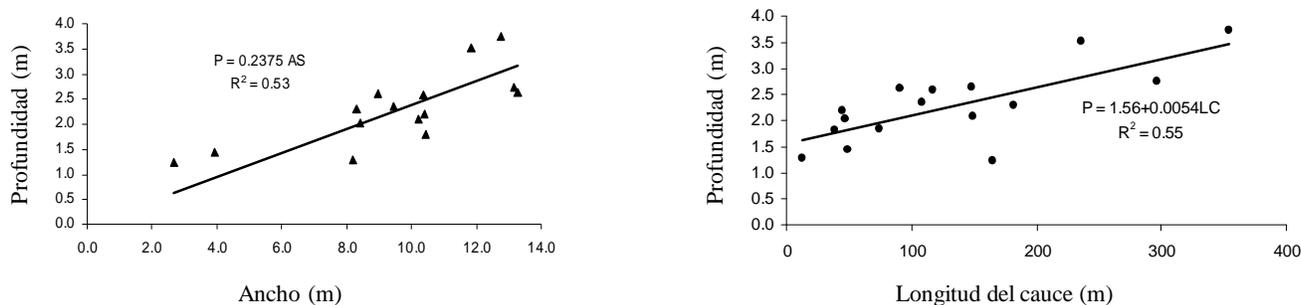


Figura 1. Relaciones entre ancho superior y profundidad, y entre longitud y profundidad de las cárcavas.

y el estado de su desarrollo (Stocking y Murnaghan, 2001).

De acuerdo con observaciones realizadas, el ancho y longitud de las cárcavas parecen estar relacionados con el agrietamiento de los suelos, los cuales presentan alto contenido de arcilla (60%), parte de la cual es del tipo esmectita; mientras que la profundidad parece depender del esfuerzo cortante de los volúmenes de agua que se transportan por la cárcava, durante eventos atípicos de lluvia, que en promedio son de 5 eventos por año. De acuerdo con Nyssen *et al.* (2004), los suelos ricos en esmectita, son muy sensibles a la erosión en cárcavas, incluso provocan el colapso de presas de control de azolves. En cinco de los 16 sitios se observaron de 6 a 12 grietas en la cabecera de las cárcavas, que se ubicaron en una banda de 0.65 m arriba de la cabecera con una profundidad > 0.4 m, estimándose que el avance remontante de la cabecera es de 0.22 m año^{-1} . En predios agrícolas de la zona, se registraron de 9 a 15 grietas por m^2 , con una profundidad media de 0.4 m, las cuales se desarrollan después de la temporada de lluvias. En el caso de las cárcavas, la existencia de estas grietas y el flujo preferencial inducen la erosión tubular y el colapso de taludes y cabecera, lo cual aumenta el ancho y eventualmente el avance remontante de la cárcava. En estudios de laboratorio, Wilson *et al.* (2007) reportaron tasas de flujo preferencial de 4 a 931 L día^{-1} en un talud de 0.5 m de ancho; la concentración de sedimentos que generó la erosión trasminar fluctuó de 0.4 a 660 g L^{-1} , lo que resultó en una socavación de 0.07 a 0.2 m del talud. Ionita (2006) ha reconocido que la dinámica de crecimiento lateral o remontante de las cárcavas ocurre por pulsaciones accionadas por eventos de lluvias con alta intensidad o de larga duración, que ocurren durante la estación húmeda; por ello, el aporte de sedimento de una cárcava es muy fluctuante.

Importancia de las Cárcavas como Fuentes de Sedimento

De acuerdo con estudios realizados en el área de estudio, la erosión en cárcavas es de $186.7 \text{ kg m}^{-1} \text{ año}^{-1}$, con un patrón de remoción de suelo mayor en la parte media de la cárcava (Bravo-Espinosa *et al.*, 2007). En terrenos agrícolas anexos a una cárcava en la subcuenca de Cointzio durante 2003 - 2006, se registraron pérdidas de suelo menores de $2 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ (Medina *et al.*, 2008); este volumen de suelo sería la contribución potencial de las áreas agrícolas a las cárcavas.

La carga de sólidos totales en las muestras de agua de la presa que aumentan durante la época de lluvias, registraron un promedio de 462 mg L^{-1} y un coeficiente de variación (CV) de 33.5% (Figura 2). En 2006 la planta trató un volumen promedio de agua de 680 L s^{-1} (CV = 7%). Considerando valores promedio de gasto y concentración de sólidos totales, la planta vertió un promedio de 27.1 Mg día^{-1} de sedimentos al río Chiquito en 2006, lo que equivale a 9907 Mg año^{-1} . Una parte de este volumen de sedimento muy probablemente provino de las cárcavas de la cuenca, porque el transporte de partículas de suelo es mayor cuando éstas se encuentran en el cauce. Estos datos sugieren que las cárcavas contribuyen de manera significativa a la degradación del suelo y a la producción de sedimento en la subcuenca de Cointzio.

Medidas para el Control de Cárcavas

Con base en diversos estudios que recomiendan el establecimiento de barreras biofísicas de control en las cárcavas y taludes (Pathak *et al.*, 2005; De Baets *et al.*, 2006), porque promueven la sedimentación y el crecimiento de la vegetación nativa, la cual crea nuevas

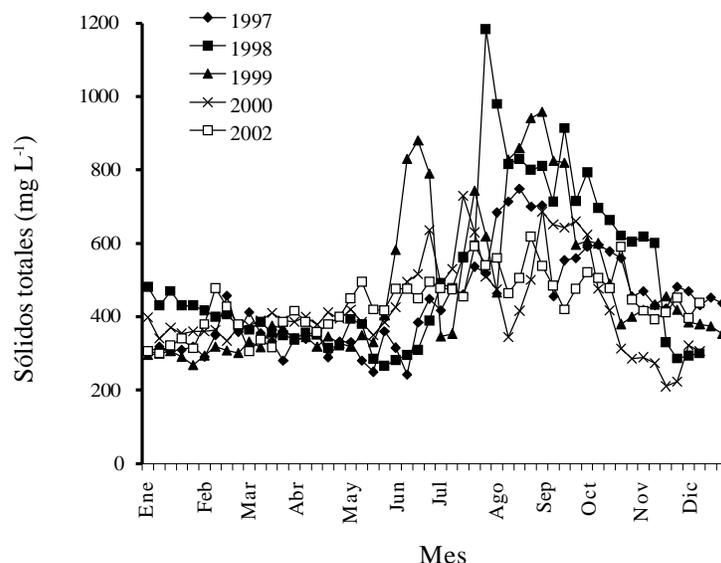
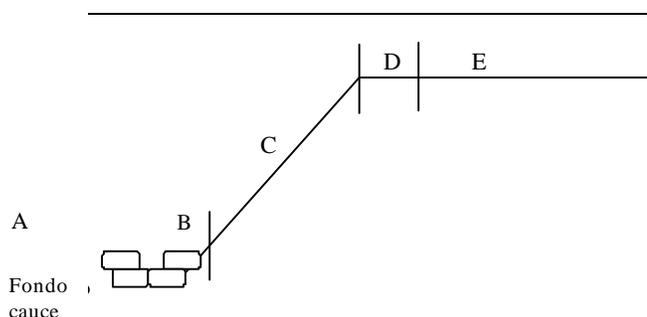


Figura 2. Concentración de sólidos totales en muestras de agua colectadas en la presa de Cointzio, Michoacán, previo al proceso de potabilización.

condiciones hidráulicas que modifican la capacidad de transporte en el cauce, siempre y cuando se acompañe con obras de desviación del caudal aguas arriba, Bravo-Espinosa *et al.* (2007) sugirieron un esquema



- Retención de azolves utilizando cercos vivos (maguey, tejocote) o represas de piedra acomodada, madera, costales rociados con esmalte blanco, etc.
- Establecimiento de *Dodonea viscosa*, *Pinus greggii*, *P. lawsonii*, *Fraxinus spp.*, *Eucalyptus spp.*, *Baccharis spp.* usando un espaciamiento entre plantas de 1 a 2 m dependiendo de la especie.
- Establecimiento de *Vicia villosa*, *Eragrostis curvula*, *Chloris gayana*. Se sugiere suavizar taludes o trasplantar *E. curvula* para formar miniterrazas.
- Vegatación nativa.
- Área de cultivo.

Figura 3. Perfil de la estabilización de un talud (Bravo-Espinosa *et al.*, 2007; modificado).

para estabilizar taludes y reducir la erosión en cárcavas en la microcuenca de Atécuaro (Figura 3). Este esquema se complementó incluyendo especies que mostraron buen desarrollo en taludes y fondos de las cárcavas estudiadas. También es importante considerar que las medidas de control con base en el uso de la vegetación, producen resultados mínimos porque las áreas acarreadas son intensamente pastoreadas. Para aumentar la efectividad se sugiere el cercado de estas áreas y el establecimiento de pastos, porque cuando la biomasa aérea desaparece por efecto de incendio o pastoreo, las raíces de los pastos son las únicas que ofrecen resistencia a la erosión. Finalmente, en áreas acarreadas donde el agrietamiento y la erosión tubular colapsan los taludes, las medidas de control del caudal que se apliquen en el fondo de la cárcava, deberán acompañarse con suavizado de taludes.

El control de la erosión en cárcavas es caro y los productores de la subcuenca de Cointzio, carecen de los recursos necesarios para la rehabilitación de estas áreas. Con relación a la participación institucional en temas de rehabilitación de suelos, Cotler *et al.* (2007) sostienen que estas son débiles y dispersas y más bien han acentuado la degradación de suelos en México. Por ello, es necesario incrementar y fortalecer estrategias de desarrollo participativo que pugnen porque la conservación, y en general, el uso sostenible de los suelos, ocupe un lugar importante en la agenda económica y política de nuestro país.

CONCLUSIONES

Las características morfológicas de las cárcavas en la subcuenca de Cointzio, Michoacán, parecen estar determinadas por el agrietamiento en bordes de la cabecera y taludes, y por efecto del flujo preferencial los cuales inducen la erosión tubular y el colapso de taludes y cabecera, y por el esfuerzo cortante de caudales que afecta la profundidad de la cárcava. El cárcavamiento es la principal fuente de sedimentos y el mayor proceso de degradación del suelo en la cuenca de Cointzio, por lo que el principio de restauración debe basarse en el uso de la vegetación nativa e introducida, bajo el concepto de cuenca y con el involucramiento de usuarios e instituciones.

AGRADECIMIENTOS

Al fondo CONACYT-SEMARNAT por los apoyos al proyecto SEMARNAT-2004-C01-304/A-1, a los productores que permitieron el acceso a sus predios y a los técnicos de campo del INIFAP. Se agradece también a B. Serrato su contribución en el manejo de la vegetación y revisión del primer borrador.

LITERATURA CITADA

- Bocco, G. 1991. Gully erosion: processes and models. *Progress in Physical Geography* 15: 392-406.
- Bocco, G. and F. Garcia-Oliva. 1992. Research gully erosion in Mexico. *J. Soil Water Conserv.* 47: 365-367.
- Bravo-Espinosa, M., B. Serrato-Barajas, L. Medina-Orozco y L. E. Fregoso-Tirado. 2007. Rehabilitación de taludes en cárcavas de la subcuenca de Cointzio, Michoacán. pp. 214-226. *In: Sánchez-Brito et al.* (eds.) Bases metodológicas para el manejo integral de cuencas hidrológicas. Libro Técnico No. 4. INIFAP. Uruapan, Michoacán, México.
- Cotler, H., S. Cortina, E. Sotelo, J. Domínguez, L. Quiñones y M. Zorrilla. 2007. La conservación de suelos como interés público o ¿Por qué la degradación de suelos no representa un interés público nacional? INE. Documento de trabajo. México, D. F. http://www.ine.gob.mx/dgoe/cuencas/download/con_suelos_int_pub.pdf. (Consulta: enero 14, 2007).
- De Baets, S., J. Poesen, G. Gyssels, and A. Knapen. 2006. Effects of grass roots on the erodibility of topsoils during concentrated flow. *Geomorphology* 76: 54-67.
- Guanglu, Li, A. Klik, and Wu Faqi. 2004. Gully erosion features and its causes of formation on the (Yuan) land in the Loess Plateau, China. pp. 131-142. *In: Li, Y., J. Poesen, and C. Valentin* (eds.). *Gully Erosion Under Global Change*. Sichuan Science and Technology Press. Chengdu, China.
- Ionita, I. 2006. Gully development in the Moldavian Plateau of Romania. *Catena* 68: 133-140.
- López B., J. y J. L. Palacio. 1995. Cuantificación del crecimiento de las áreas erosionadas en cabeceras de cárcavas procesando imágenes de video. *Núm. Esp. Bol. Inst. Geografía* 3: 77-100.
- Martineli C., F. and L. de Almeida Prado. 2007. Analysis of the influence of gully erosion in the flow pattern of catchment streams, Southeastern Brazil. *Catena* 69: 230-238.
- Medina O., L. E., M. Bravo, C. Prat, M. Martínez, E. Ojeda y B. Serrato. 2008. Pérdidas de suelo, agua y nutrientes en un acrisol bajo diferentes sistemas agrícolas en Michoacán, México. *Agríc. Téc. Méx.* 34: 201-211.
- Mendoza C., M. E., E. López y G. Bocco. 2004. Erosión en la cuenca del Lago de Cuitzeo: Un análisis espacial a nivel regional. pp. 80-88. *In: Garduño, V. H.* (ed.). *Contribuciones a la geología e impacto ambiental de la región de Morelia*. Instituto de Investigaciones Metalúrgicas, UMSNH. Morelia, Michoacán, México.
- Nyssen, J., M. Veyret-Picot, J. Poesen, J. Moeyersons, M. Haile, J. Deckers, and G. Govers. 2004. The effectiveness of loose rock check dams for gully control in Tigray, northern Ethiopia. *Soil Use Manage.* 20: 55-64.
- Oostwoud Wijdenes, D. J., J. Poesen, L. Vandekerckhove, and M. Ghesquiere. 2000. Spatial distribution of gully head activity and sediment supply along an ephemeral channel in a Mediterranean environment. *Catena* 39: 147-167.
- Palacio-Prieto, J. L. and J. López-Blanco. 1994. Using video imagery for gully erosion evaluation. *Z. Geomorphol. N. F.* 38: 33-43.
- Pathak, P., S. P. Wani, and R. Sudi. 2005. Gully control in SAT watersheds. *Global Theme on Agroecosystems Report No. 15*. ICRISAT, Andhra Pradesh, India.
- Poesen, J., J. Nachtergaele, G. Verstraeten, and C. Valentin. 2003. Gully erosion and environmental change: Importance and research needs. *Catena* 50: 91-133
- SCSA (Soil Conservation Society of America). 1982. *Resource conservation glossary*. Ankeny, IA, USA.
- Stocking, M. and N. Murnaghan. 2001. *Handbook for the field assessment of land degradation*. Earthscan Publications Ltd. London, UK.
- Strunk, H. 2005. Soil degradation and overland flow as causes of gully erosion on mountain pastures and in forests. *Catena* 50 :185-198.
- USDA-SCS (United States Department of Agriculture-Soil Conservation Service). 1966. *Technical Release No. 32 (Geology)*. US Department of Agriculture. Washington, DC, USA.
- Valentin, C., J. Poesen, and Y. Li. 2005. Gully erosion: Impacts factors and control. *Catena* 63: 132-153.
- Vanwalleghem, T., J. Poesen, J. Nachtergaele, and G. Verstraeten. 2005. Characteristics, controlling factors and importance of deep gullies under cropland on loess-derived soils. *Geomorphology* 69: 76-91.
- Wilson, G. V., R. K. Periketi, G. A. Fox, S. M. Dabney, F. D. Shields, and R. F. Cullum. 2007. Soil properties controlling seepage erosion contributions to streambank failure. *Earth Surf. Processes Landforms* 32: 447-459.