

# **UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE SAN LUIS POTOSÍ**

FACULTAD DE CIENCIAS QUÍMICAS, INGENIERÍA Y MEDICINA  
PROGRAMAS MULTIDISCIPLINARIOS DE POSGRADO EN CIENCIAS  
AMBIENTALES

TESIS QUE PARA OBTENER EL GRADO DE  
**MAESTRÍA EN CIENCIAS AMBIENTALES**

**“INESTABILIDAD DEL PAISAJE Y SUSCEPTIBILIDAD A EROSIÓN  
EN CÁRCAVAS EN EL ÁREA DE CERRO DE SAN PEDRO, SAN LUIS  
POTOSÍ”**

PRESENTA:

**LOURDES DE LA TORRE ROBLES**

**DIRECTOR DE TESIS:**

DR. CARLOS ALFONSO MUÑOZ ROBLES

**ASESORES:**

DR. JUAN ANTONIO REYES AGÜERO

DRA. PATRICIA JULIO MIRANDA

**23 DE NOVIEMBRE DE 2018**

# **CRÉDITOS INSTITUCIONALES**

## **PROYECTO REALIZADO EN:**

El Instituto de Investigación de Zonas Desérticas (IIZD) de la Universidad Autónoma de San Luis Potosí, bajo la tutoría del Dr. Carlos Alfonso Muñoz Robles

## **CON FINANCIAMIENTO DE:**

CONSEJO NACIONAL DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA (CONACyT)

**AGRADEZCO A CONACyT EL OTORGAMIENTO DE LA BECA-TESIS**

**Becario No. 772869**

**LA MAESTRÍA EN CIENCIAS AMBIENTALES RECIBE APOYO  
ATRAVÉS  
DEL PROGRAMA NACIONAL DE POSGRADOS DE CALIDAD (PNPC)  
CRÉDITOS INSTITUCIONALES**

## **DEDICATORIA**

A mi mamá, quien me brindado la mejor de las herencias “la educación”. Gracias por todo tu amor, apoyo, confianza y por ser mi principal impulso siempre en cada meta.

A mi padre y abuelo que son los ángeles que siempre guían mi camino.

A mi director de tesis y asesores por tan grandiosa oportunidad y por toda su dedicación, entusiasmo y apoyo.

## **AGRADECIMIENTOS**

Al Programa Multidisciplinario de Posgrado en Ciencias Ambientales (PMPCA) por la oportunidad dada para realizar mi maestría, a todos mis maestros y administrativos.

Al Dr. Carlos Alfonso Muñoz Robles por la oportunidad y confianza brindada para realizar este trabajo de investigación bajo su dirección y cumplir con ello una meta más de mi carrera profesional. Gracias por toda su dedicación, entusiasmo y consejos gran maestro y amigo.

A mis asesores, el Dr. Juan Antonio Reyes Agüero y la Dra. Patricia Julio Miranda por todo su apoyo, dedicación y consejos.

En general a mi comité académico por brindarme una gran oportunidad de desarrollo profesional y personal y ser uno de mis principales ejemplos a seguir.

A mis compañeros Estefanía Vázquez y Guillermo Sánchez, así como a los estudiantes de Ingeniería Ambiental, Raúl Ávila, Jorge Gámez, Adriana Juárez y Marco Juárez por su apoyo para realizar el trabajo de campo.

A las personas de las localidades de Jesús María y Monte Caldera y a minera San Xavier por permitirme el acceso a los sitios de trabajo para el desarrollo de esta investigación.

A mis amigos, Estefanía, Elizabeth, Guillermo, Sandy, Luis, Karina, Edith, Laura y Domingo por su amistad y apoyo durante el transcurso de este proyecto.

## ÍNDICE

<b>ÍNDICE DE FIGURAS .....</b>	<b>iv</b>
<b>ÍNDICE DE TABLAS.....</b>	<b>v</b>
<b>RESUMEN .....</b>	<b>6</b>
<b>ABSTRACT.....</b>	<b>2</b>
<b>INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>3</b>
Objetivos .....	6
Hipótesis .....	7
<b>1. REVISIÓN DE LITERATURA .....</b>	<b>8</b>
1.1 El concepto de suelo.....	8
1.2 Factores de formación y componentes del suelo.....	8
1.3 Importancia del recurso suelo .....	9
1.4 Degradación de suelos .....	10
1.5 Erosión del suelo.....	11
1.5.1 Erosión hídrica.....	12
1.5.2 Erosión en cárcavas .....	13
1.5.3 Clasificación de las cárcavas.....	14
1.5.4 Factores y control de erosión en cárcavas .....	15
1.6 Antecedentes históricos del área de estudio.....	16
<b>2. MÉTODOS .....</b>	<b>21</b>
2.1 Descripción general del área de estudio .....	21

2.2 Descripción de los sitios de estudio .....	23
2.3 Caracterización y evaluación de la actividad de cárcavas .....	24
2.3.1 Identificación de cárcavas.....	24
2.3.2 Dimensiones de cárcavas.....	24
2.3.3 Actividad de cárcavas.....	25
2.4 Evaluación de los factores relacionados con la erosión en cárcavas.....	26
2.4.1 Cobertura superficial del suelo .....	30
2.4.2 Estabilidad de agregados del suelo .....	31
2.4.3 Factores topográficos y geomorfológicos .....	32
2.4.4 Litología superficial y tipos de suelo .....	35
2.4.5 Rasgos antropogénicos .....	36
2.5 Determinación de umbrales topográficos para la presencia de cárcavas .....	37
2.6 Elaboración de modelo de susceptibilidad a la erosión en cárcavas .....	38
2.7 Análisis de datos.....	38
<b>3. RESULTADOS.....</b>	<b>41</b>
3.1 Dimensiones y actividad de cárcavas .....	41
3.2 Cobertura superficial del suelo.....	43
3.3 Relación entre dimensiones, actividad de cárcavas y factores ambientales....	43
3.4 Umbrales topográficos .....	48
3.5 Diferencias entre microcuencas estables e inestables.....	49
3.6 Susceptibilidad del paisaje a la erosión en cárcavas .....	51
<b>4. DISCUSIÓN .....</b>	<b>53</b>
4.1 Características y actividad de cárcavas .....	53

4.2 Factores relacionados con las características de las cárcavas.....	54
4.3 Características ambientales en microcuencas estables e inestables.....	57
4.3.1 <i>Diferencias en el umbral topográfico en microcuencas estables e inestables</i> .....	58
4.3.2 <i>Topografía, factores antropogénicos y cobertura superficial del suelo</i> .....	60
4.4 Susceptibilidad a la erosión en cárcavas .....	63
<b>5. CONCLUSIONES .....</b>	<b>68</b>
<b>6. REFERENCIAS.....</b>	<b>71</b>

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1.</b> Localización del área de estudio, en el municipio de Cerro de San Pedro, microcuencas con cárcavas y sin cárcavas .....	23
<b>Figura 2.</b> Topografía e índices topográficos del área de estudio. <b>a)</b> elevación, <b>b)</b> pendiente, <b>c)</b> posición de pendiente (TPI), <b>d)</b> forma de relieve (TPI), <b>e)</b> curvatura del terreno, <b>f)</b> índice de humedad topográfica (TWI), <b>g)</b> índice de transporte de sedimentos <b>(h)</b> índice de poder de corriente. ....	34
<b>Figura 3.</b> <b>a)</b> Litología superficial (SGM, 2017) y <b>b)</b> tipos de suelo del área de estudio (INEGI, 1974). ....	35
<b>Figura 4.</b> Caminos y bordos de agua en el área de estudio. ....	36
<b>Figura 5.</b> Cárcavas digitalizadas en el área de estudio. ....	41
<b>Figura 6.</b> Actividad de cárcavas en campo agrupadas de acuerdo con su longitud km. ....	42
<b>Figura 7.</b> Proporción de cobertura superficial del área de estudio.....	43
<b>Figura 8.</b> Diagrama log-log de las relaciones entre el área de drenaje y la pendiente local para microcuencas inestables (■) y estables (□). Las líneas continuas ajustadas muestran el umbral topográfico promedio para microcuencas inestables (ecuación inferior izquierda; n=17) y la línea punteada ajustada el umbral topográfico para microcuencas estables (ecuación superior derecha, n=17). ....	49
<b>Figura 9.</b> Árbol de clasificación con los umbrales de las principales variables que influyen en la presencia de cárcavas (números marcados en rojo) y ausencia de cárcavas (números marcados en verde). ....	51
<b>Figura 10.</b> Mapa de áreas susceptibles a la presencia y desarrollo de cárcavas en el área de estudio.....	52



## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla 1.</b> Descripción de indicadores visuales del Método DLA (Tongway, 2007).....	26
<b>Tabla 2.</b> Descripción de las variables empleadas para el estudio. Fuente: elaboración propia .....	27
<b>Tabla 3.</b> Promedio, mínimo y máximo de las características dimensionales (m) y actividad de 10 cárcavas (%) medidas en campo en el área de Cerro de San Pedro San Luis Potosí .....	42
<b>Tabla 4.</b> Coeficientes de correlación de Spearman para la actividad y dimensiones de cárcavas y las variables explicativas en la topografía de colinas en el área de Cerro de San Pedro, SLP.....	46
<b>Tabla 5.</b> Coeficientes de correlación de Spearman para la actividad y dimensiones de cárcavas y las variables explicativas en la topografía arroyos profundos en el área de Cerro de San Pedro, SLP.....	47
<b>Tabla 6.</b> Coeficientes de correlación de Spearman para la actividad y dimensiones de cárcavas y las variables explicativas en la topografía pendientes abiertas en el área de Cerro de San Pedro, SLP.....	47
<b>Tabla 7.</b> Coeficientes de correlación de Spearman para la actividad y dimensiones de cárcavas y las variables explicativas en la topografía de llanuras en el área de Cerro de San Pedro, SLP.....	48
<b>Tabla 8.</b> Valores promedio ( $\pm$ ES) de las variables consideradas en el análisis de diferencias entre microcuencas estables e inestables. ....	50

## RESUMEN

La erosión en cárcavas es un tema de importancia global que puede acelerar la desertificación en paisajes áridos y semiáridos. Este proceso de erosión es complejo, y resulta de la interacción de diversas variables de diversa índole que da lugar al inicio y desarrollo de cárcavas. La presente investigación se realizó en la región semiárida de Cerro de San Pedro, San Luis Potosí, y sus objetivos fueron: (1) identificar los factores ambientales y antropogénicos relacionados con la erosión en cárcavas, (2) analizar las diferencias de estas variables entre microcuencas estables (sin cárcavas) e inestables (con cárcavas) y (3) generar un modelo de susceptibilidad a la erosión en cárcavas. Se caracterizaron en campo la actividad y dimensiones de cárcavas y se realizaron análisis de correlación para determinar sus relaciones con la cobertura, atributos topográficos y rasgos antropogénicos como distancia a caminos y a bordos de agua. Se utilizaron pruebas de Wilcoxon para identificar diferencias ambientales entre microcuencas con cárcavas y sin cárcavas y un análisis de covarianza para determinar umbrales topográficos para su presencia o ausencia. Las variables estudiadas se integraron a un modelo de susceptibilidad construido con un árbol de clasificación CART. Se encontraron las mayores correlaciones entre la actividad y dimensiones de cárcavas con factores topográficos y la disgregación de agregados del suelo en las tofoformas de colinas y arroyos profundos. Las microcuencas inestables tuvieron pendientes menos pronunciadas, menor capacidad de transporte de sedimentos y poder erosivo de la pendiente, menor cobertura del suelo y menor distancia a caminos y a bordos en comparación con las microcuencas estables. Las áreas con mayor cercanía a caminos y con menor cobertura son las más susceptibles a la presencia de cárcavas y se ubican al norte del área de estudio. Los resultados pueden ser usados para la toma de decisiones referentes al control de la erosión en cárcavas en este paisaje semiárido.

**Palabras clave:** actividad de cárcavas, degradación de suelo y estabilidad, microcuenca, umbral topográfico

## **ABSTRACT**

Gully erosion is an important global problem that accelerates desertification in arid and semi-arid environments. Gully erosion is a complex process involving the interaction among several environmental variables that cause gully initiation and development. This study was conducted in the semi-arid region of Cerro de San Pedro, San Luis Potosi and its objectives were to: (1) identify the environmental and anthropogenic factors related to gully erosion; (2) analyse the differences regarding these factors between stable (ungullied) and unstable (gullied) sub-basins and (3) generate a model to evaluate the susceptibility to gully erosion. Gully activity and dimensions were characterised in the field and a correlation analysis was undertaken to determine their relationships with groundcover, topographic attributes and anthropogenic features such as distance to roads and small water dams. Wilcoxon rank sum tests were done to identify differences between sub-basins with and without gullies and to determine thresholds of gully presence-absence, a covariance analysis was conducted. All explanatory variables were integrated into a susceptibility model by means of a CART classification tree. The highest correlations were found between gully characteristics and topographic attributes and slacking of soil aggregates in high ridges and deeply incised streams. Unstable sub-basins had gentler slopes, minor sediment transport capacity and stream power, lower ground cover and minor distance to roads and dams compared to stable sub-basins. The areas located <416 m from roads and with groundcover <81 % are the most susceptible to gully erosion, and are distributed mainly in the northern section of the study area. Results can be used as basis for decision making regarding the control of gully erosion in this semi-arid landscape.

**Key words:** gully activity, soil degradation, stability, basin, topography thresholds.

## INTRODUCCIÓN

El suelo es un recurso natural que se caracteriza por tener horizontes diferenciados de profundidad variable conformados por minerales meteorizados, organismos, materia orgánica, aire y agua (Jenny, 1941). El suelo desempeña un papel clave en diversas actividades humanas, ya que brinda servicios ambientales como aprovisionamiento, regulación y cultura (Poesen, 2018; Smith y Smith, 2007). Sin embargo, alguna modificación física, química o biológica de sus propiedades puede degradarlo, lo que disminuye sus capacidades funcionales en el ecosistema natural y en el sistema social (Gashaw *et al.*, 2014).

La erosión del suelo es una de las causas de degradación en una gran amplitud rango de ambientes en nivel mundial (Valentin *et al.*, 2005; Zucca *et al.*, 2006). Esta degradación modifica el funcionamiento hidrológico de cuencas, lo que incrementa la erosión, las fuentes de sedimentos y disminuye notablemente los servicios ambientales (Dube *et al.*, 2014; Poesen, 2018; Slimane *et al.*, 2018; Valentin *et al.*, 2005).

La erosión del suelo es un fenómeno natural en una escala geológica; sin embargo, cuando la tasa de pérdida de suelo es mayor que la de formación a través de la meteorización del lecho rocoso, se convierte en un grave problema (Chaplot, 2013). En muchos casos, la erosión acelerada resulta de actividades antropogénicas que involucran cambios de la cobertura superficial del suelo, debido a prácticas de manejo y gestión inadecuadas como sobrepastoreo, deforestación y construcción de caminos. Estos cambios ocasionan pérdida de estabilidad de agregados del suelo, reducción de infiltración y aumento de escorrentía superficial y la consecuente pérdida

de suelo y desarrollo de cárcavas, por lo que es necesario el establecimiento de planes de control y reducción de la erosión (Lal, 2001; Rose, 1993; Valentin *et al.*, 2005). De acuerdo con datos de Convención de las Naciones Unidas en la lucha contra la desertificación (UNCCD, 2014), durante los últimos 40 años se han perdido alrededor de un tercio de los suelos por erosión, y el 25% de la superficie mundial está sujeta a cambios de uso de suelo, lo que puede favorecer la erosión del suelo.

La erosión en cárcavas es una de las formas de erosión que más impacta las regiones áridas y semiáridas y constituye un indicador de desertificación (Avni, 2005; Lal, 2001; Poesen *et al.*, 2003; O Rahmati *et al.*, 2017). Las cárcavas se caracterizan por ser canales profundos de flujo superficial concentrado en áreas con pendientes pronunciadas, que traen consigo la remoción del suelo (Graham, 1984; Kakembo *et al.*, 2009; Morgan, 2005). Así mismo, las cárcavas son elementos clave de conectividad en nivel de paisaje, y representan una evidencia morfológica de disfuncionalidad debido a las interacciones humano-ambientales (Kakembo *et al.*, 2009; Poesen, 2011). En nivel mundial, la erosión en cárcavas es reconocida como un importante indicador de degradación del suelo, que requiere de extensas investigaciones orientadas a la mitigación de los problemas ambientales, económicos y sociales que este tipo de erosión causa (Mararakanye y Sumner, 2017; Poesen *et al.*, 2003).

La mayoría de las investigaciones sobre la erosión hídrica del suelo se han centrado procesos de erosión laminar y en canalillos, que suceden en áreas agrícolas. Sin embargo, existen pocos estudios sobre la susceptibilidad a la erosión en cárcavas que operan en escalas espaciales mayores (Poesen *et al.*, 2003). La presencia de

cárcavas no es exclusiva de ciertos paisajes o tipos de suelo, clima o área geográfica, por lo que existe una propensión natural a su presencia en casi cualquier ambiente, una vez que son superados ciertos umbrales (Graham, 1984). Sin embargo, algunos estudios sugieren que hay predominancia en el desarrollo de cárcavas en áreas áridas y semiáridas, en donde son consideradas como una de las formas más destructivas de erosión, con tendencia a acelerar los procesos de desertificación (O Rahmati *et al.*, 2017).

Es hasta años recientes que el estudio de la erosión en cárcavas se ha convertido en un tema mundial de preocupación e interés debido a la necesidad de comprender la relación de los factores que influyen en su origen y desarrollo, ya que dependen de las características intrínsecas de cada sitio. Así, el entendimiento de los factores que influyen en la erosión en cárcavas puede contribuir a detener su desarrollo o a disminuir de sus efectos *in situ* (*i.e.* disminución de productividad por pérdida del suelo fértil) y *ex situ* (*i.e.* sedimentación de cuerpos de agua) (Chaplot, 2013; Radoane *et al.*, 1995 ; Rose, 1993). La erosión en cárcavas es sin duda un tema que requiere de extensas investigaciones, que conlleven a acciones de mitigación y reducción de la erosión (Mararakanye y Sumner, 2017).

Algunos estudios indican que el 64% de los suelos en México presenta degradación de ligera a extrema, de la cual, el 37% es causada por erosión hídrica y el 12% por erosión en cárcavas (CONAFOR, 2007). En San Luis Potosí, 178,175 ha (2.72%) presentan erosión hídrica ligera, 223, 609 ha (3.42%) tienen una erosión moderada, 61,651 ha (0.94%) con erosión severa y 2241 ha (0.03%) con erosión extrema (SEMARNAT, 2012).

Si bien se han incrementado los estudios sobre la erosión del suelo (Poesen, 2018), la investigación acerca de la erosión en cárcavas en México, aún es escasa, en particular para las zonas áridas y semiáridas. El presente trabajo es una contribución al entendimiento de los factores ambientales y antropogénicos que controlan la presencia y el desarrollo de cárcavas en la región semiárida en la zona oeste del valle de Cerro de San Pedro, San Luis Potosí. El estudio responde a las preguntas ¿Cuáles factores están relacionados con la actividad, dimensiones y presencia de las cárcavas? ¿Qué variables ambientales y antropogénicas son necesarias para generar un modelo de susceptibilidad a la erosión en cárcavas?

Esta información es fundamental para la identificación de áreas susceptibles y provee de información oportuna para la toma de decisiones referentes a la prevención de la erosión en cárcavas y a la restauración de áreas afectadas. Además, el estudio contribuye al desarrollo de modelos que ayudan en la predicción del inicio de cárcavas, tema que es una prioridad de investigación en virtud de que este tipo de erosión es una operacionalización de los resultados para la toma de decisiones en la gestión de áreas con presencia de esta forma de erosión menos estudiado en el nivel mundial (Poesen *et al.*, 2003).

## **Objetivos**

1. Analizar la relación entre las dimensiones y actividad de erosión en cárcavas con variables topográficas, geomorfológicas, estabilidad de agregados del suelo, cobertura y uso de suelo y distancia a bordos y caminos en el área de Cerro de San Pedro, San Luis Potosí.

2. Determinar las diferencias entre las variables de estudio en las microcuencas inestables (con cárcavas) y estables (sin cárcavas).
3. Identificar las áreas susceptibles a la erosión en cárcavas en el área de estudio.

### **Hipótesis**

La presencia de cárcavas en Cerro de San Pedro, San Luis Potosí está condicionada por factores topográficos, hidrológicos, de cobertura del suelo y por presión antropogénica. Las microcuencas con cárcavas presentan un mayor gradiente de pendiente, mayor área de drenaje, baja cobertura vegetal, mayor cercanía a caminos y bordos de agua, lo que contribuye a su mayor actividad y volumen en comparación con las microcuencas sin cárcavas, que poseen mayor estabilidad.



## **1. REVISIÓN DE LITERATURA**

### **1.1 El concepto de suelo**

El suelo es un término derivado del latín *solum* = suelo, que puede englobar distintos significados. Generalmente, se define como un cuerpo natural compuesto de sólidos minerales y orgánicos, gases, líquidos y organismos vivos que puede fungir como medio de crecimiento para las plantas (Brady y Weil, 2008). Otros autores lo definen como un recurso fundamental básico no renovable, que se caracteriza por ser dinámico y propenso a la degradación (Blanco y Lal, 2008). Es decir, el suelo es un sistema complejo en el cuál se realiza un conjunto de procesos de transformación y transferencia de sustancias y energía (Cojocarú, 2016).

### **1.2 Factores de formación y componentes del suelo**

El suelo está integrado por distintos horizontes paralelos a la superficie y con límites definidos (FitzPatrick, 1996). Su formación implica un complejo proceso que inicia con la meteorización, la cual consiste en la fragmentación física de las rocas expuestas, que se expanden y contraen repetidamente, así como por la descomposición química (e.g. hidratación y oxidación) y la formación de sus constituyentes minerales (Hillel, 2008). Para ello, se requiere la acción de cinco factores principales que son  $S = f(c, o, r, p, t)$ , es decir, clima, biota, topografía, el material parental y tiempo (Jenny, 1941). El material parental definirá las características del suelo en el proceso de formación, transportación y depósito; sin embargo, el desarrollo del suelo dependerá del tipo y velocidad de formación con base en variables como precipitación y temperatura que afectan los procesos físicos,

químicos y biológicos (Brady y Weil, 2008). Además, con apoyo de la biota, así como por topografía, la meteorización puede ser más rápida o lenta; en cualquier caso, es un proceso que requiere de tiempo para mostrar sus efectos (Jenny, 1941).

Una vez formado el suelo, se integra por cuatro componentes esenciales que son minerales (arcillas, limos y arenas), aire, agua y materia orgánica en una relativa proporción que puede variar dependiendo del lugar, pero que influirá en su productividad y dinámica (Murphy, 2007).

### **1.3 Importancia del recurso suelo**

Los suelos desempeñan una función esencial en los ecosistemas terrestres para el sostenimiento de la vida, al mantener múltiples y complejos enlaces entre factores bióticos y abióticos, los cuales pueden agruparse en cinco servicios principales (Brady y Weil, 2008; Tóth *et al.*, 2013):

- (1) **Medio para crecimiento de plantas:** Las propiedades del suelo determinan la naturaleza de la vegetación presente y al revés, también proporciona condiciones para el desarrollo de las raíces de las plantas, suministra los nutrientes esenciales y es fuente de suministro de agua y aire entre otros.
- (2) **Sistemas de abastecimiento y purificación de agua:** las propiedades del suelo funcionan como un filtro que controla el destino del agua y minerales en los sistemas hidrológicos, además de favorecer a la producción de biomasa.
- (3) **Sistema de reciclaje de desechos orgánicos:** los productos de desecho (restos de plantas, animales) son asimilados en forma de detritus, y sus elementos

químicos son puestos a disposición de la próxima generación de vida para su reutilización.

- (4) **Hábitat para organismos del suelo:** proporciona hábitat para una gran cantidad de organismos, desde pequeños mamíferos, reptiles a delgados insectos microscópicos de gran diversidad.
- (5) **Medio de ingeniería y herencia cultural:** el suelo juega un importante rol en el ecosistema construido por el hombre, al proporcionar la plataforma para la edificación de estructuras como caminos, edificios, entre otros. Así mismo los suelos contribuyen al patrimonio físico y cultural por ejemplo un medio de tradiciones y descubrimientos científicos.

#### **1.4 Degradación de suelos**

La degradación del suelo se ha convertido en un problema mundial importante desde el siglo XX, ya que incluye todos aquellos procesos que disminuyen su capacidad para realizar sus funciones y servicios esenciales en los ecosistemas terrestres (Lal, 2001). El origen de la degradación es atribuido tanto a condiciones naturales (e.g. factores topográficos, tipo de suelo, entre otros) como antropogénicas (e.g. crecimiento de la población, deforestación, disminución de la cobertura superficial, sobrepastoreo e inadecuadas actividades agrícolas) (Gashaw *et al.*, 2014), las cuales contribuyen a la erosión del suelo, una grave amenaza que irrumpe los servicios de regulación y provisión del ecosistema a mediano y largo plazo (Poesen, 2018).

La degradación del suelo puede ser de tres tipos: física (declive de la estructura del suelo, reducción de infiltración y aumento de escorrentía), química (salinización, alcalinización, acidificación) y biológica (pérdida de biodiversidad del suelo y reducción de materia orgánica (Lal, 2001)).

De manera general, la degradación del suelo que exagera la erosión, ya sea hídrica o eólica, ha conllevado a la desertificación de las zonas áridas y semiáridas, que es uno de los graves problemas ambientales en nivel mundial, y que afecta aproximadamente el 70% de los suelos, poniendo en riesgo los medios de subsistencia para los ecosistemas terrestres (Jie *et al.*, 2002).

### **1.5 Erosión del suelo**

La erosión del suelo es un proceso geomórfico que involucra tres aspectos fundamentales: desprendimiento de partículas del suelo, transporte a lugares diversos por agua o viento y sedimentación, ya sea por procesos erosivos naturales o procesos inducidos por el hombre (Lal, 2001; Morgan, 2005; Poesen, 2018). La erosión del suelo se caracteriza por ser de dos tipos: geológica o acelerada. La primera consiste en un proceso de meteorización lento a lo largo del tiempo, con tasas bajas de pérdida de suelo; mientras que la segunda se caracteriza por altas tasas de erosión que superan el nivel umbral de formación del suelo, mayormente desencadenado por causas antropogénicas como los cambios de cobertura superficial, la deforestación, modificaciones en el patrón hidrológico de las cuencas y las inadecuadas prácticas agrícolas y ganaderas (Blanco y Lal, 2008; Cojocarú, 2016). Es importante resaltar que las tasas de erosión del suelo siempre dependerán de las características de suelo y

de los factores naturales o antropogénicos relacionados según sea el caso, por ende, cada región debe determinar sus límites críticos.

### **1.5.1 Erosión hídrica**

La erosión hídrica es un proceso que disminuye la productividad de los suelos y cuya intensidad puede ser provocada por un manejo inadecuado de la cobertura vegetal que, en su caso, es removida parcial o totalmente. De forma general, el desprendimiento y el transporte del material de la superficie del suelo en terrenos inclinados se debe en gran medida al impacto generado por las gotas de lluvia sobre el suelo desprotegido y a la fuerza de transporte de la escorrentía (Cojocarú, 2016; Roswell *et al.*, 2001).

Existen tres formas de erosión hídrica: (1) laminar o por salpicadura, (2) en canalillos y (3) en cárcavas (Brady y Weil, 2008). La erosión laminar se caracteriza por un desprendimiento y dispersión del suelo causada por el impacto de las gotas de lluvia sobre la superficie del suelo y una escorrentía difusa. Dichas gotas al golpear el suelo forman pequeños orificios de formas y tamaños distintos que influyen en la erosión del suelo (Blanco y Lal, 2008). La erosión en canalillos se relaciona mayormente con el comienzo de la escorrentía superficial, la cual desarrolla pequeños surcos por los cuales fluye el material erosionado y depende de la intensidad de la lluvia (*e.g.* erosividad), cobertura superficial así como el grado de desprendimiento de las partículas del suelo (erosionabilidad) y la pendiente del terreno y suele ser el tipo de erosión más común (Blanco y Lal, 2008; Roswell *et al.*, 2001). Lo referente a la erosión en cárcavas, que es el tema central de esta investigación, se explica con mayor detalle en el siguiente apartado.

### 1.5.2 Erosión en cárcavas

De acuerdo con el antiguo diccionario español “Tesoro de la lengua Castellana” De Cobarruvias (1611), la palabra cárcava deriva de la combinación de las palabras latinas carne (“car-”) y “agujero” (“-cava”), etimología vinculada con la excavación de pozos profundos, o bien, con la palabra carcavón que define grandes incisiones debido a eventos de precipitación extrema. Dependiendo del lugar donde se encuentren las cárcavas o “gullies” (en Inglés), suelen tener distintas nominaciones, por ejemplo: “cárcavas” en España, “ravine” en Francia, “lavaka” en Madagascar, “wadi” en Arabia, “donga” en Sudáfrica, “voco-roca” en Brasil, “barranco” en Argentina y “arroyos profundos o cárcavas” en Norteamérica (Castillo y Gómez, 2016). La mayoría de las definiciones de cárcavas coinciden en caracterizarlas como canales de erosión extendidos que permiten al flujo de agua intermitente, con altos niveles de pérdida de suelo a profundidades considerables, que no pueden ser eliminadas por operaciones de labranza convencional (Graham, 1984; Poesen *et al.*, 2003).

Las cárcavas inician cuando se altera el equilibrio de una línea de drenaje por aumento de la descarga o disminución de la resistencia del suelo al desprendimiento y transporte de partículas, que es acelerado por los cambios inducidos en la cobertura vegetal (Roswell *et al.*, 2001). El desarrollo de las cárcavas es un proceso que comprende distintas etapas. En sus comienzos se forman pequeñas depresiones sobre las laderas, como resultado de una menor proporción de la cobertura superficial mayormente relacionado con actividades antropogénicas. A su vez, el agua se acumula en las depresiones y las amplía hasta formar un canal incipiente. Posteriormente, la erosión se incrementa en las coronas (*i.e.* las partes más altas y de

crecimiento más reciente) de manera que desarrolla pendientes casi verticales y en ellas se presenta flujo superficial, que ocasiona una mayor pérdida de material en el canal y una mayor profundidad, y con el socavamiento de la corona, donde hay mayor colapso de material, comienza una erosión remontante con la caída de material del banco de la línea de drenaje (Leopold *et al.*, 1964).

### **1.5.3 Clasificación de las cárcavas**

Las cárcavas pueden ser clasificadas con criterios relacionados con la diversidad de factores que controlan su inicio y su desarrollo (Rădoane y Rădoane, 2017). Considerando su evolución, pueden ser clasificadas en dos tipos: (1) cárcavas continuas: son generadas por la presencia de distintas ramificaciones en las coronas de la cárcava, lo que implica que rápidamente se vuelvan más profundas aguas abajo y constantes a lo largo de la línea de drenaje; (2) cárcavas discontinuas: se inician en cualquier parte del perfil de la ladera y su profundidad disminuye hacia su corona (Heede, 1970). Por su forma o tamaño, se clasifican por sus secciones transversales en forma de “U” o “V”, lo que se relaciona con la resistencia del material presente a la mayor o menor erosión. Las “U” se producen cuando tanto el suelo como subsuelo se erosionan fácilmente y desarrollan paredes verticales debido al hundimiento del suelo por escorrentía concentrándola en depresiones no protegidas. Las “V” se concentran en dichas depresiones donde el subsuelo es resistente a la erosión (Radoane *et al.*, 1995 ). Por sus tamaños, se clasifican como cárcavas pequeñas, medianas y grandes, considerando la profundidad, longitud y el área de drenaje que presenten en cada región (Mongkonpanya, 1986).

#### 1.5.4 Factores y control de erosión en cárcavas

La erosión en cárcavas es una evidencia morfológica que refleja los impactos de los cambios ambientales ocasionados por las actividades antropogénicas en relación al uso del suelo y por las precipitaciones extremas (Poesen, 2011). En muchas ocasiones, las cárcavas son una forma acelerada de erosión, e inician cuando se exceden umbrales geomorfológicos, lo que rompe el equilibrio de la línea de drenaje debido a una descarga de escorrentía, en combinación con una disminución de la resistencia al desprendimiento y transporte de partículas de suelo, factores que están asociados a los cambios de cobertura superficial inducidos por actividades humanas (Eustace *et al.*, 2011; Le Roux y Sumner, 2012; Muñoz-Robles *et al.*, 2010; Patton y Schumm, 1975).

Una de las formas más aceptadas para evaluar el potencial de iniciación de cárcavas es mediante la estimación de umbrales topográficos, que integran la pendiente del terreno y el área de acumulación de flujo para determinar las condiciones topográficas que propician el inicio del desarrollo de cárcavas (Maugnard *et al.* (2014) y Torri y Poesen (2014). Sin embargo, los factores asociados a la presencia de cárcavas pueden depender de las características inherentes a cada sitio (Sonneveld *et al.*, 2005), y pueden incluir no solamente atributos topográficos, lo que dificulta la predicción de la presencia de cárcavas, sino también, la presencia y desarrollo de cárcavas es el resultado de procesos que son controlados por diferentes factores estrechamente interrelacionados, entre los que destacan la topografía, la precipitación pluvial, los patrones de drenaje, la litología superficial, el tipo de suelo, la condición superficial del suelo el uso de suelo y vegetación, así como factores antropogénicos



como la distancia a caminos, la deforestación y el sobrepastoreo (Gómez-Gutiérrez *et al.*, 2009; Igwe, 2012; Luca *et al.*, 2011; Mukai, 2017; Shit *et al.*, 2015; Valentin *et al.*, 2005).

El análisis de los factores ambientales y antropogénicos que influyen en el inicio y desarrollo de cárcavas hace posible generar modelos de susceptibilidad, es decir, modelos estadísticos que predicen la ocurrencia espacial de las cárcavas (Luca *et al.*, 2011). Desde un punto de vista sostenible, la susceptibilidad a la erosión en cárcavas relaciona su localización con la variabilidad espacial de los factores predictores que se han convertido en una herramienta de información clave para la predicción de cárcavas y su posible prevención o mitigación (Gómez-Gutiérrez *et al.*, 2015). Estos modelos espaciales de susceptibilidad representan una llave para explicar la conexión entre pasado y presente para definir condiciones futuras de erosión en cárcavas (Al-Abadi y Al-Ali, 2018; Conoscenti *et al.*, 2018). A su vez, el conocimiento de las áreas susceptibles a la iniciación y desarrollo de cárcavas es útil para prevenir impactos ambientales, considerando el sitio o la región de estudio para la implementación de medidas efectivas como la adecuada planificación del uso del suelo y la mitigación de la erosión mediante prácticas de conservación del suelo y control de la erosión (Garosi *et al.*, 2018; Guyassa *et al.*, 2018; Liu *et al.*, 2018; Nazari Samani *et al.*, 2009; Oostwoud Wijdenes y Bryan, 2001).

## **1.6 Antecedentes históricos del área de estudio**

La historia más evidente que envuelve a el área de Cerro de San Pedro, se relaciona en parte con el descubrimiento de las minas en 1592 y su posterior

explotación, la cual, indiscutiblemente condujo a periodos de gran desarrollo económico, así como periodos de estancamiento muy evidentes durante el siglo XX, específicamente entre los años 1900 – 1994, conociendo estos escenarios de apogeo y decadencia definieron en gran magnitud las características e impactos ambientales presentes hoy en día en el paisaje del sitio de estudio (Martínez *et al.*, 2010).

Durante la primera mitad del siglo XX, en Cerro de San Pedro funcionó un ferrocarril a la ciudad de San Luis Potosí llamado popularmente “El Piojito” o tren de la sierra, con 21 km para Cerro de San Pedro y 58 km para Sierra de Álvarez (estación Santiago o km cero). Esto fue mayormente motivado por las condiciones de incentivación minera por parte de la empresa ASARCO, cuya influencia se extendería hasta la capital potosina para llevar el mineral a las fundidoras más importantes como las de Morales, así como al centro y norte del país (González, 2002). La vida de servicio de esta red ferroviaria estuvo presente por 49 años (1898 - 1947) con servicios de carga y de pasajeros a lo largo de las etapas de estabilidad o inestabilidad económica.

Esta incentivación minera trajo consigo el surgimiento y establecimiento de asentamientos humanos y con ello el establecimiento de las actividades agropecuarias relacionadas con el trajinar de arrieros y carreteros, el aprovisionamiento de alimentos, agua, metales, carbón y leña, lo que impulsó el desarrollo de los caminos que transformaron la economía local y la estructura social (Palacios, 2008). El desarrollo de las actividades primarias incorporó a sus áreas económicas los montes y bosques próximos, compuestos principalmente por encinares, mezquitales y saucedales. Estas áreas de vegetación leñosa provisionarían la madera para los 12 hornos de fundición

de Morales que llegaron a tener una producción de 1,000 toneladas diarias, oro, plata, plomo y zinc donde trabajaban aproximadamente 1,300 personas en el año de 1905. Esta actividad implicó la tala de los bosques para el abastecimiento de la leña, se ubicó un aserradero en el km 58 o el Aguacatal, en Sierra de Álvarez, a donde el tren subía los miércoles y viernes para cargar la leña. Sin embargo, no solo regresaba con la leña, sino todo lo que encontrara a su paso (e.g. arena, carbón, mezcal, madera, maguey, gallinas, puercos, vacas, caballos, piedra caliza, nopal, entre otros) es decir, lo que “chupaba” a su paso; de allí su nombre “El Piojito” (Palacios, 2008). La tala fue considerada como una infracción a la ley, lo que llevó al virrey Revillagigedo a realizar una petición y recomendación para cuidar los bosques de San Luis Potosí dado que los consideraba como los mejores del mundo y era necesario cuidarlos y no explotarlos (Beltrán, 1956). De manera general, la minería involucró dos periodos de crecimiento casi exponencial en los periodos 1904–1923 y 1923–1948. Los años posteriores a 1948 implicaron un periodo de inestabilidad económica en el sector minero.

Entre 1948 y 1997, en el periodo de suspensión de las actividades mineras, se llevó a buscar alternativas para la subsistencia. El establecimiento de la agricultura (maíz y frijol) y la ganadería extensiva (bovino, caprino, lanar y equino), que implicaron la ocupación de otras unidades espaciales en términos productivos, dentro de terrenos de haciendas como La Saucedá, que hoy en día ocupan las localidades Jesús María y Monte Caldera. Estas actividades implicaron cambios de uso de suelo que aumentaron la producción ganadera 2,737 en 1920 a 22,242 cabezas de ganado en 1960, de los cuales el 60% eran ovinos convirtiéndose en el principal centro de acopio, pero que fue decayendo con el paso del tiempo hasta el periodo de 1990, cuando se

contabilizaron 7,965 (González, 2002; Martínez *et al.*, 2010). Es posible que esta decadencia estuvo relacionada con la disminución de la población humana, que fue de un 50% en el territorio de Cerro de San Pedro, debido a la reducción de la actividad humana, lo que coincide con el fortalecimiento industrial de la ciudad de San Luis Potosí. Esto se convirtió en un eje importante de oferta de trabajo, por lo que la población más joven del municipio y localidades sustituyó las actividades de campo (*i.e* pastoreo), lo que implicó que el número de cabezas de ganado quedara a cargo de la población adulta que poco a poco se miró impedida para su cuidado que implicaban extensas caminatas especialmente en relación al ganado menor (*e.g* cabras y borregas). Esta tendencia en cuanto a presencia de ganado se ha mantenido hasta el periodo actual, pero con tendencia hacia el ganado menor en particular cabras (Martínez *et al.*, 2010)

Es evidente el estado de antropización del entorno natural actual de la región (400 años de aprovechamiento), pero especialmente intensificado desde finales del siglo XVIII hasta el siglo XX, cuando la cobertura vegetal fue severamente transformada por los efectos acumulados e interconectados de las actividades económicas, dando como resultado una “primera crisis ecológica”, debido a la perturbación de los ecosistemas, relacionada con los escenarios ambientales dinámicos al interactuar con la población (González, 2002).

Es posible que la mayor presencia de pastizal en esta área de estudio en la actualidad, se deba principalmente al proceso de transformación de una cubierta vegetal precedente que estuvo dominada por formas arborescentes y arbustivas de

encino y matorral xerófilo que ha resultado en vegetación secundaria en forma de mosaicos fragmentados (Martínez *et al.*, 2010).

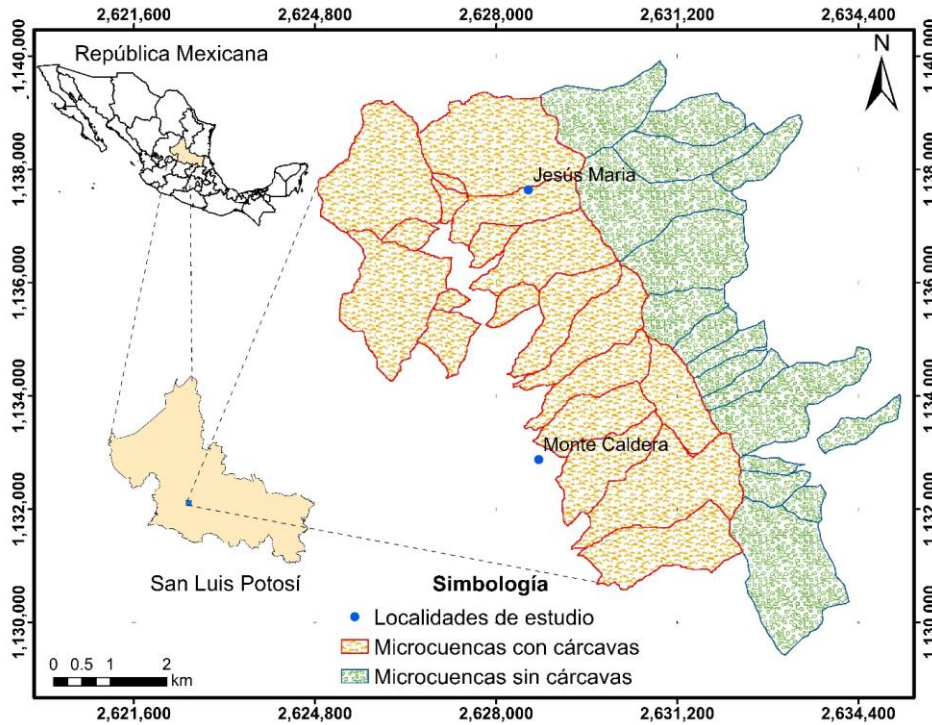
De esta forma, es posible que uno de los aspectos más críticos en ausencia de la actividad minera estuvo relacionada en un proceso de subvaloración continuo y progresivo de pérdida de cobertura vegetal asociado con actividades antropogénicas y relacionado con los procesos de erosión actual del suelo y lo impactos ambientales acumulados a lo largo del tiempo.

## 2. MÉTODOS

### 2.1 Descripción general del área de estudio

El área de estudio se localiza entre las coordenadas 22°11'41" y 22°16'06" de latitud Norte y los 100°44'21" y 100°45'19" de longitud Oeste. Comprende un área de 51.20 km<sup>2</sup> en las localidades de Monte Caldera y Jesús María, en los municipios de Cerro de San Pedro y Armadillo de los Infante, ubicados en la parte del Valle de San Luis Potosí, México (Figura 1). Se ubica en la provincia Sierra Madre Oriental, en particular en la subprovincia de Sierras y Llanuras Occidentales (Cervantes-Zamora *et al.*, 1990; INEGI, 2010). En esta subprovincia, las topofomas se caracterizan por sierras y llanuras con elevaciones que van de los 1,800 a los 2,500 m s.n.m. El clima predominante de acuerdo a la clasificación de Köppen modificada por García (1973) es semiseco templado (BS<sub>1</sub>kw), con temperatura mínimas y máximas de 10.5 y 26.9°C y precipitación anual promedio de 312 mm de acuerdo con los datos de la estación minera San Xavier, Cerro de San Pedro, localizada a 5 km del área de estudio aproximadamente. El área de estudio se localiza sobre calizas cretácicas asociadas con la Sierra Madre Oriental que incluyen a la Formación Tamabra que son depósitos de talud de una paleoplataforma carbonatada. Esa formación está constituida por estratos de 10 a 100 cm de espesor interestratificadas con capas delgadas de pedernal. Las calizas son de tipo micrita y están intrudidas por un pórfido de composición granodiorítica (SGM, 2017). Por otra parte, las lutitas – areniscas representan la etapa final de relleno de las microcuencas mientras las volcánicas son parte del vulcanismo asociado con el origen y evolución de la Sierra Madre Occidental. Otras formaciones presentes al noroeste del área son la Indidura, ignimbritas de Santa

María y la Andesita Casita Blanca. Las rocas del cenozoico abarcan del Oligoceno al Pleistoceno, en la base está la Andesita Casita Blanca y está cubierta por las ignimbritas de Santa María (SGM, 2017). El área forma parte de las regiones hidrográficas El Salado y Pánuco (CONAGUA, 2007), e incluye microcuencas con corrientes de agua intermitente. Los suelos predominantes al norte del área son los Leptosoles poco profundos (<10 cm) con laderas pedregosas que presentan gravas y arenas, con asociaciones a Castañozem, mientras que al sur muestran asociaciones con castañozems de tipo lúvico, rendzinas y feozem lúvico de textura media (INEGI, 1974). Su susceptibilidad a la erosión va de moderada a muy alta y depende en gran medida de la topografía del terreno. Los principales tipos de vegetación integrados en forma de mosaico son chaparral, bosque de encino, pastizal y matorral desértico rosetófilo (Rzedowski, 2006). Se caracterizan por presentar fases de sucesión que revelan fragmentación y perturbación antropogénica con remanentes discontinuos de bosque de encino en conjunción con llanuras dominantes de pastizal (Martínez *et al.*, 2010). Asimismo, existen áreas destinadas a la agricultura y ganadería extensiva de ganado ovino, caprino, bovino y equino.



**Figura 1.** Localización del área de estudio, en el municipio de Cerro de San Pedro, microcuencas con cárcavas y sin cárcavas

## 2.2 Descripción de los sitios de estudio

Debido a que el enfoque del estudio consideró la comparación de factores ambientales que influyen en la presencia o ausencia de cárcavas, el área de estudio incluyó microcuencas inestables (con cárcavas) y estables (sin cárcavas) que se derivaron a partir de un modelo digital de elevaciones con una resolución espacial de 15 m (INEGI), con el programa ArcMap 10.2 (ESRI, 2013). Las elevaciones mínima y máxima en los sitios de estudio comprendieron entre los 1,790 y 2,425 m.s.n.m. y pendientes de suaves a moderadas (5–50%), en el caso de microcuencas con cárcavas, y de 20 a 100% en microcuencas sin cárcavas. Las topofomas en los sitios de estudio son pendientes abiertas, colinas, arroyos profundos y llanuras.



## **2.3 Caracterización y evaluación de la actividad de cárcavas**

### **2.3.1 Identificación de cárcavas**

Se digitalizaron manualmente los contornos y líneas de drenaje de 17 cárcavas; en una imagen Ikonos de 1 m de resolución espacial, en el programa Google Earth Pro 2017, posteriormente los segmentos fueron convertidos al formato shapefile para obtener el perímetro, el área y la longitud de las líneas de drenaje en el programa ArcMap 10.2 (ESRI, 2013).

### **2.3.2 Dimensiones de cárcavas**

Del total de cárcavas se seleccionó un subgrupo de 10 cárcavas con base a sus dimensiones, para caracterizar su actividad. En cada una se distribuyeron 11 puntos de muestreo equidistantes entre sí desde el inicio hasta el término de las líneas de drenaje principal para evaluar en campo su actividad y sus dimensiones. Las coordenadas de los puntos de muestreo se registraron con un GPS con precisión de localización ~1 m. Las cárcavas fueron recorridas desde la corona hasta su término, que fue identificado cuando el área de la sección transversal fuera <30 cm, considerado como el valor umbral entre cárcavas y canales (Poesen *et al.*, 1998), o bien, cuando la cárcava se unía con la línea de drenaje de cuarto orden (arroyo), que es el cauce al que se unen todas las cárcavas. En cada punto de muestreo se midió la anchura al nivel del banco de la cárcava, la anchura de la base y la profundidad. El volumen de cada cárcava se calculó multiplicando el área de cada sección por su longitud.

### **2.3.3 Actividad de cárcavas**

La actividad de cárcavas se describió con el método semicuantitativo de evaluación de la línea de drenaje – Ephemeral Stream Assesment (DLA). El método consta de ocho indicadores (Tabla 1), que se evalúan de manera visual y a los que se asignan puntuaciones relativas considerando cuatro factores: 1) el tipo y condición de la vegetación presente en la cárcava, 2) la forma y perfil de la línea de drenaje y condiciones del suelo, 3) la naturaleza de la línea de drenaje y paredes de la cárcava y 4) la naturaleza del contorno de la cárcava en la superficie y regulación del flujo lateral (Landloch, 2003; Tongway, 2007). Estos indicadores fueron evaluados en cada uno de los 11 puntos de muestreo de cada una de las 10 cárcavas seleccionadas, y se asignaron las puntuaciones de acuerdo con la escala de valores porcentuales indicados en el método. La actividad de cárcavas va desde muy activa (<50%), activa (50–59%), potencialmente estable (60–69%), estable (70–80%) hasta muy estable (mayor a 80%).

**Tabla 1.** Descripción de indicadores visuales del Método DLA (Tongway, 2007).

<b>Indicador</b>	<b>Objetivo</b>
Vegetación en el piso de la línea de drenaje	Evalúa el nivel de actividad en la línea de drenaje
Vegetación en paredes de líneas de drenaje	Cuantifica el nivel de actividad de las paredes de la cárcava
Forma de la línea de drenaje de la sección transversal	Evalúa la magnitud del grado de erosión de acuerdo con la forma de la sección transversal
Morfología longitudinal de la línea de drenaje	Evalúa el flujo predominante y la relación entre la línea de drenaje y las características de las laderas adyacentes
Tamaño de partículas de los materiales en el piso de la línea de drenaje	Evalúa tipo de material disponible para ser removido durante la erosión
Naturaleza de los materiales en la pared de la línea de drenaje	Evalúa la inestabilidad de agregados del suelo o materiales en las paredes
Forma del banco o pendiente	Evalúa si el flujo proviene de aguas arriba o de una fuente lateral
Naturaleza de regulación del flujo lateral	Evalúa la fuente de flujo adyacente a la línea de drenaje

#### **2.4 Evaluación de los factores relacionados con la erosión en cárcavas**

La erosión en cárcavas es un proceso que depende en gran medida de umbrales topográficos, geomorfológicos, geológicos, de cobertura superficial del suelo, presencia de rasgos antropogénicos, uso de suelo y estabilidad de agregados del suelo (Conforti *et al.*, 2011; Gómez-Gutiérrez *et al.*, 2015; Igwe, 2012; Valentin *et al.*, 2005). En el presente estudio, se evaluó la relación entre las dimensiones y actividad de cárcavas con diversos factores (Tabla 2), y cómo estos influyen en la presencia-ausencia de cárcavas y las áreas susceptibles.

**Tabla 2.** Descripción de las variables empleadas para el estudio. Fuente: elaboración propia

<b>Variable (grupo/nombre)</b>	<b>Descripción (unidades)</b>	<b>Método y referencia</b>
<b>VARIABLES DE RESPUESTA</b>		
<b>Actividad de cárcavas</b>		
Actividad de coronas Actividad de cárcavas	Actividad erosiva actual en una escala porcentual (%). Donde 0% es muy activa y 100% muy estable	Método evaluación de la línea de drenaje con ocho indicadores visuales (Tongway, 2007).
<b>Dimensiones de cárcavas</b>		
Anchura de la cárcava a la altura de la superficie del suelo	Distancia entre paredes o taludes de cárcava (m).	Medición en campo en cada punto de muestreo.
Anchura en la base de la cárcava	Distancia entre paredes de cárcava en la base de la línea de drenaje (m).	Medición en campo en cada punto de muestreo.
Profundidad	Distancia de la base de línea de drenaje al borde superior del talud de la cárcava (m).	Medición directa o con cálculo de tangente del ángulo medido con clinómetro en puntos de difícil acceso.
Longitud	Distancia entre la corona de la cárcava (inicio) y su término (km)	Determinada mediante digitalización de líneas de drenaje en Google Earth-Pro.
Volumen	Cantidad aproximada de suelo perdido por cárcava (m <sup>3</sup> )	Sumatoria del volumen (área de sección × longitud de sección) de las 11 secciones de cada cárcava.
<b>Atributos topográficos</b>		
Área de la microcuenca	Superficie total (ha)	Áreas delimitadas con el MDE en ArcMap 10.2
Pendiente	Grado de inclinación del terreno (%)	Derivado del MDE, en ArcMap 10.2

<b>VARIABLES EXPLICATIVAS</b>		
<b>Variable (grupo/nombre)</b>	<b>Descripción (unidades)</b>	<b>Método y referencia</b>
TWI (Índice de humedad topográfica). Índice secundario	Cuantifica el control topográfico en los procesos hidrológicos e identifica las áreas saturadas por la escorrentía (adimensional).	Derivado del MDE (Modelo Digital de Elevaciones) y el área de contribución en Whitebox 3.4 (Luca <i>et al.</i> , 2011).
SPI (Índice del poder del flujo superficial). Índice secundario	Medida del poder erosivo del flujo de agua (adimensional).	Derivado del MDE y el área de contribución en Whitebox 3.4 (Luca <i>et al.</i> , 2011).
STI (Índice de transporte de sedimentos). Índice secundario	Mide el efecto de la topografía en los procesos de transporte y deposición por erosión (adimensional).	Derivado del MDE y el área de contribución en Whitebox 3.4 (Dube <i>et al.</i> , 2014).
Curvatura del terreno	Representa la morfología del terreno y determina su inestabilidad en relación con el régimen hidrológico. Valores positivos indican curvaturas convexas y valores negativos, curvaturas cóncavas (adimensional).	Derivada del MDE mediante Spatial Analyst Tools de ArcMap 10.3. (Luca <i>et al.</i> , 2011).
<b>Geomorfología</b>		
Forma de relieve	Formas naturales de la superficie, clasificadas en: arroyos profundos, llanuras, pendientes abiertas y colinas.	Se deriva de valores de celdas del índice de posición topográfica (TPI) a partir del MDE, con la herramienta topography tools de ArcMap 10.3 (De Reu <i>et al.</i> , 2013).
Posición topográfica de la pendiente	Unidad geográfica que clasifica el paisaje en seis posiciones de pendiente: valle, pendiente inferior, pendiente plana, pendiente media, pendiente superior y colina.	Se deriva de los valores del índice de posición topográfica (TPI), con MDE y la herramienta topography tools de ArcMap 10.3.

<b>Variable (grupo/nombre)</b>	<b>Descripción (unidades)</b>	<b>Método y referencia</b>
<b>Geología</b>		
Litología superficial	Indicador de la conductividad hidráulica y la resistencia a la cizalladura de los materiales.	Carta geológica escala 1:50,000 (Dai <i>et al.</i> , 2001; SGM, 2017).
<b>Cobertura superficial</b>	Proporción de cobertura superficial del suelo (%).	Mapa de cobertura superficial derivado con modelo de regresión a partir del NDVI (índice de diferencia normalizada de vegetación) calculado en imagen de satélite Sentinel 2A.
<b>Suelo</b>		
<b>Tipo de Suelo</b>	Unidades y asociaciones de suelo predominantes.	Carta edafológica escala 1:50,000 (INEGI, 1974).
Estabilidad de agregados	Propiedad del suelo que afecta sus características físicas e hidrodinámicas (adimensional).	Índice de dispersión de agregados del suelo ASWAT (Dimoyiannis, 2012; McKenzie y Koppi, 1997)
<b>Rasgos antropogénicos</b>		
Camino Bordos de agua	Distancias euclidianas de cada cárcava a caminos y bordos de almacenamiento de agua (m).	Análisis de distancias en ArcMap 10.3.

### 2.4.1 Cobertura superficial del suelo

La proporción de cobertura superficial del suelo es un factor importante que controla la cantidad de escorrentía y pérdida de suelo (Liu *et al.*, 2017). La cobertura superficial del suelo fue representada cartográficamente mediante el análisis de una imagen de satélite Sentinel 2A. La imagen multiespectral Sentinel 2A con resolución espacial de 10 m, fue capturada el 15 de enero del 2018 y obtenida del sitio <https://scihub.copernicus.eu/dhus/#/home>, un servidor de la Agencia Espacial Europea. La imagen fue corregida geométricamente con puntos de control obtenidos de una imagen Landsat georeferida, con un error cuadrático medio (RMS) de 0.6 m. Para esta imagen se calculó, en el programa ArcMap 10.2, el índice de diferencia normalizada de vegetación (NDVI), que es un índice espectral que permite estimar el verdor y vigor de la vegetación con base en las diferencias de reflectancia y absorbancia en el espectro del rojo e infrarrojo cercano. Los valores del NDVI van de -1 a 1, y los altos indican un mayor verdor, mientras los más bajos corresponden a sitios de suelo desnudo o roca (Gandhi *et al.*, 2015).

El NDVI fue calibrado con datos de cobertura superficial del suelo obtenidos en campo. El porcentaje de cobertura fue estimado en 79 parcelas de 10 ×10 m distribuidas aleatoriamente, y que cubrieron el rango de cobertura de 0 a 100%. Este tamaño de las parcelas se definió para disminuir el efecto del error en la geo-referencia de la imagen de satélite, y fue obtenido con la ecuación  $A = (P (1 + 2G))^2$ , donde A es el área a muestrear, P es el tamaño de píxel y G es la precisión geométrica de la imagen de satélite (Justice y Townshend, 1981). La ubicación de las parcelas en campo se realizó tomando sus coordenadas con GPS de precisión en la posición ~1

m. Dentro de cada parcela, se registró la proporción de plantas herbáceas perennes y anuales, hojarasca, suelo desnudo, roca, plantas arbustivas, costra biológica y excretas animales usando el método de pasos (Raymond A. Evans y Merton R., 1957). Este método consistió en trazar ocho líneas transversales dentro de cada parcela con un promedio de 10 pasos por línea colocando la punta de la bota en un ángulo vertical de 30° con respecto a la superficie. La cobertura se registró en cada paso y la proporción de la cobertura se determinó considerando el total de pasos en la parcela.

#### **2.4.2 Estabilidad de agregados del suelo**

La estabilidad de los agregados del suelo es usualmente considerada como una de las propiedades físicas del suelo más importantes que controlan la infiltración y retención de agua, y además influye en la susceptibilidad del suelo a la erosión hídrica en ambientes semiáridos (Barthes y Roose, 2002; Igwe, 2012; Vermang *et al.*, 2009). En cada punto de muestreo de las 10 cárcavas medidas en campo se obtuvieron tres muestras de suelo; las muestras se recolectaron en el horizonte superficial, medio e inferior del perfil de la pared de la cárcava. Para cada muestra, se realizaron en el laboratorio las pruebas de estabilidad de agregados del suelo con el método ASWAT (Aggregate Stability in Water), que mide el grado de disgregación y dispersión de los agregados del suelo (McKenzie y Koppi, 1997). Previo a las pruebas de ASWAT, las muestras fueron secadas a temperatura ambiente por 48 horas. Durante las pruebas, se colocaron de tres a cuatro agregados por muestra de suelo con tamaños de 3 a 5 mm de diámetro en cajas Petri con agua purificada y se observó la disgregación durante 5 minutos. La disgregación consistió en medir la desintegración de un agregado de suelo en fragmentos más pequeños al humedecerse. Se asignó una

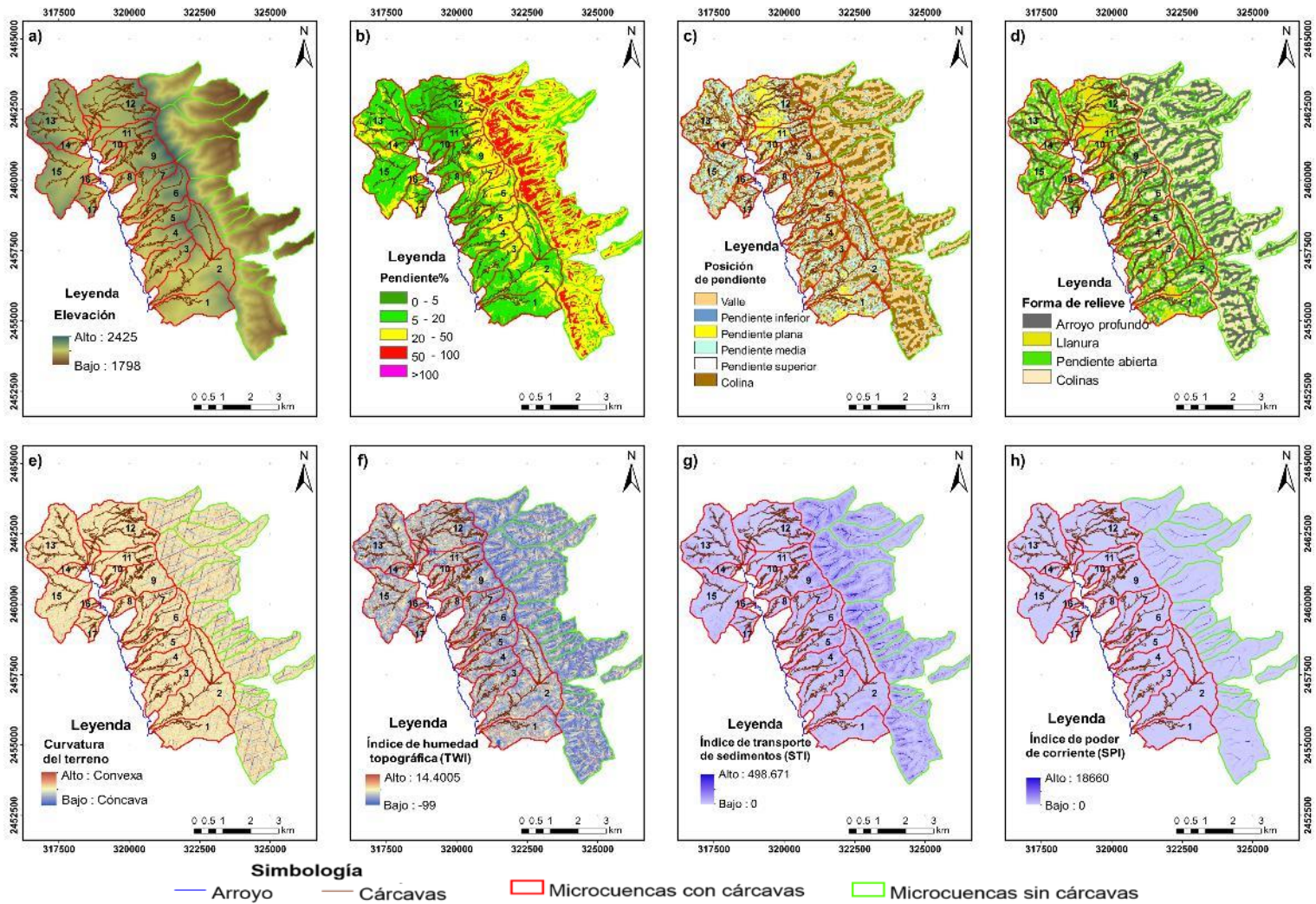


puntuación entre 0 y 4 a cada agregado, donde cero indicó un agregado intacto y el cuatro cuando el agregado colapsó en granos individuales. Por otra parte, la dispersión se evaluó a los 10 minutos, y se asignaron valores entre 0 y 4, donde cero representó un agregado sin dispersión al humedecerse y un valor de cuatro con un grado de dispersión alto. Los agregados que no se dispersaron en los 10 minutos fueron remodelados, es decir, mezcladas a mano y sumergidos nuevamente en agua por 2 horas para evaluar nuevamente su dispersión de la manera antes descrita. La dispersión consistió en medir la separación del suelo en partículas individuales y se calculó al combinar la dispersión en húmedo y la dispersión después de una remodelación (alteración). Al finalizar las pruebas, se sumaron las puntuaciones de la disgregación y la dispersión para obtener el índice de dispersión de cada muestra. Los valores del índice cercanos a cero indican mayor estabilidad, mientras que los valores cercanos a 16 indican mayor grado de dispersión de los agregados del suelo.

#### **2.4.3 Factores topográficos y geomorfológicos**

De acuerdo con Moore *et al.* (1991b) y O Rahmati *et al.* (2017) la topografía y la geomorfología tienen una importante influencia en la variación espacial de condiciones hidrológicas, como la tasa de generación de escorrentía, flujo subsuperficial, disgregación del suelo y la estabilidad de la pendiente, variables relacionadas con la susceptibilidad del paisaje a la erosión. Los factores topográficos analizados incluyeron la pendiente, la curvatura del terreno, el índice de posición topográfica (TPI), el índice de humedad topográfica (TWI), el índice del poder de la corriente (SPI) y el índice de transporte de sedimentos (STI). Las formas de relieve y la posición de la pendiente en el paisaje se derivaron del índice de posición topográfica

TPI (Figura 2). Para su estimación se utilizó un modelo digital (MDE), con 15 m de resolución espacial (INEGI, 2017).



**Figura 2.** Topografía e índices topográficos del área de estudio. **a)** elevación, **b)** pendiente, **c)** posición de pendiente (TPI), **d)** forma de relieve (TPI), **e)** curvatura del terreno, **f)** índice de humedad topográfica (TWI), **g)** índice de transporte de sedimentos (STI) **h)** índice de poder de corriente.

#### 2.4.4 Litología superficial y tipos de suelo

La litología superficial es un indicador importante de la erosión en cárcavas, ya que es influenciada por las propiedades litológicas de los distintos materiales presentes y expuestos en la superficie del suelo (Figura 3a), y además controla las características geomorfológicas y el grado de susceptibilidad a la erosión en cárcavas (Conforti *et al.*, 2011; Omid Rahmati *et al.*, 2017). Por otra parte, el tipo de suelo define el grado de erosionabilidad con base en sus propiedades físicas y químicas (Igwe, 2012). Los mapas de litología superficial y tipos de suelo fueron generados en formato digital a partir de los mapas disponibles del SGM (2017) y de INEGI (1974), escala 1:50,000 (Figura 3b).

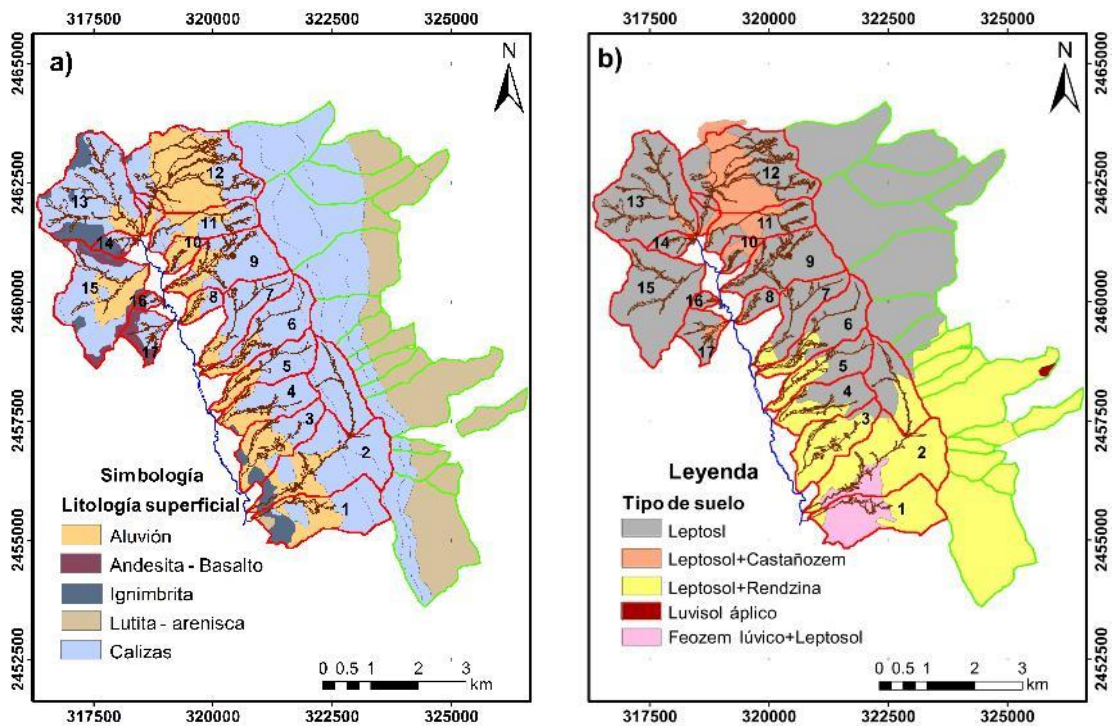
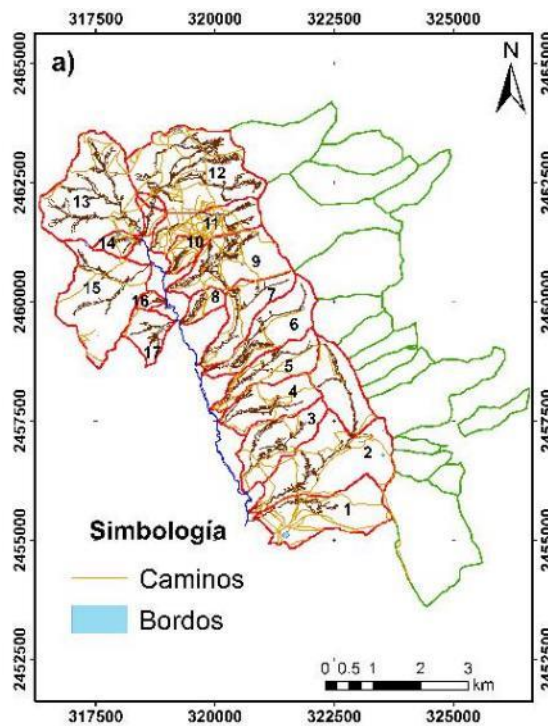


Figura 3. a) Litología superficial (SGM, 2017) y b) tipos de suelo del área de estudio (INEGI, 1974).

### 2.4.5 Rasgos antropogénicos

La influencia antropogénica es un factor que influye en la erosión en cárcavas; y a ciertas actividades que implican un mal uso del suelo y ocasionan escorrentía que puede resultar en una pérdida acelerada de suelo. La infraestructura de caminos, cuerpos de agua y la disminución de la cobertura superficial del suelo ya sea por deforestación o sobrepastoreo favorecen el aumento y la concentración de flujo en canales que eventualmente se transforman en cárcavas (Igwe, 2012; Katz *et al.*, 2014). Los bordos de agua y la red de caminos se digitalizaron en Google Earth Pro 2017 para determinar su distribución espacial y su relación con la presencia de las cárcavas en el área de estudio (Figura 4).



**Figura 4.** Caminos y bordos de agua en el área de estudio.

## 2.5 Determinación de umbrales topográficos para la presencia de cárcavas

Se consideraron 17 microcuencas con cárcavas y 17 microcuencas adyacentes sin cárcavas con el fin de identificar el umbral topográfico de presencia-ausencia de cárcavas.

El umbral topográfico indica que, bajo determinadas condiciones de pendiente, existe un tamaño mínimo requerido de área de drenaje para el inicio de cárcavas (Dewitte *et al.*, 2015; Gómez-Gutiérrez *et al.*, 2009; Poesen, 2018). El umbral topográfico incluye la integración de la pendiente local  $S$  ( $m.m^{-1}$ ) que controla la velocidad de escorrentía y de  $A$ , que es el área de drenaje (ha), que a su vez controla la descarga de flujo superficial. Se utilizó un MDE corregido (*i.e.* remoción de depresiones) para disminuir el error hidrológico y del cual se obtuvieron el mapa de pendiente y acumulación de flujo con el software TAUDDEM 5.1. Los valores del área de drenaje y la pendiente se extrajeron de estos mapas usando estadísticas de zonas en ArcMap 10.3 (ESRI, 2013) para las coronas de cárcavas en microcuencas inestables y en una posición aproximada en el inicio de las líneas de drenaje en las microcuencas estables y fueron graficados en escala logarítmica. Para identificar el umbral para la iniciación de cárcavas se ajustó un modelo de regresión de la forma:  $S = a \cdot (1 + X)^b$ . En esta expresión, el coeficiente  $a$  indica el valor umbral que debe excederse para la presencia de cárcavas y está en función de la litología, características del suelo, uso de suelo y cobertura superficial del suelo. Por otra parte, el exponente  $b$  se refiere la relación con los procesos de flujo superficial, como la tensión de corte de flujo, poder de escorrentía por unidad de volumen y tipología de

flujos dominantes durante la formación y desarrollo de cárcavas (Hayas *et al.*, 2017; Rossi *et al.*, 2015; Torri y Poesen, 2014).

## **2.6 Elaboración de modelo de susceptibilidad a la erosión en cárcavas**

Para determinar las variables que más influyen en la presencia de cárcavas en el paisaje, se elaboraron árboles de clasificación y regresión CART (Gómez *et al.*, 2009; Rahmati *et al.*, 2016). Este método no paramétrico consiste en un procedimiento de partición binaria recursiva, capaz de procesar variables explicativas continuas y nominales en subgrupos homogéneos, utilizando algoritmos para minimizar la varianza (Breiman *et al.*, 1984; Gómez *et al.*, 2009; Steinberg y Colla, 1995). Un árbol CART está integrado por el nodo raíz (primer nivel), nodos internos (segundo nivel), descendientes hacia la izquierda y derecha derivados del nodo principal y nodos terminales resultantes de la división final (Breiman *et al.*, 1984). Dado que la variable de respuesta fue binaria (presencia-ausencia) se generó un árbol de clasificación que integró los mapas de las variables explicativas continuas y categóricas de la Tabla 2 para identificar y jerarquizar las de mayor importancia en la presencia de cárcavas.

## **2.7 Análisis de datos**

Se realizaron los siguientes análisis: (1) estimación de la cobertura superficial del suelo con parcelas medidas en campo y con la imagen Sentinel 2A; (2) relación entre dimensiones y actividad de cárcavas medidas en campo con las variables explicativas descritas en la Tabla 2; (3) comparación del umbral topográfico en microcuencas estables e inestables; (4) análisis de las diferencias en las variables físicas, biológicas y de rasgos antropogénicos entre microcuencas estables e

inestables; (5) identificación de áreas susceptibles al inicio de cárcavas. En el análisis 2, se usaron datos del subgrupo de 10 cárcavas medidas en campo, mientras que para los análisis 3, 4 y 5 se usaron datos de las 17 microcuencas inestables y las 17 microcuencas estables.

Para el mapa de vegetación, las parcelas de muestreo en campo se sobrepusieron al mapa del NDVI para extraer sus valores promedio mediante estadísticas de zonas en ArcMap 10.2 (ESRI, 2013). Con estos datos se ajustó un modelo de regresión polinómica para estimar la cobertura a partir del NDVI y con esto generar el mapa de cobertura superficial. Los datos de cobertura fueron transformados con el logaritmo natural para cumplir con los supuestos de normalidad residuales y homogeneidad de varianza.

La base de datos de las variables explicativas usada para los puntos de análisis 2 y 5, fue generada a partir de un esquema de muestreo, cuyas unidades fueron rectángulos de 10 m de largo sobrepuestos digitalmente, de manera perpendicular a la pendiente en cada uno de los 11 puntos de muestreo en las cárcavas de microcuencas inestables, y en 11 puntos de muestreo equidistantes, que fueron distribuidos sobre la línea de drenaje en microcuencas estables. Los rectángulos abarcaron el ancho de cada microcuenca en cada punto de muestreo. Se extrajeron los valores promedio (para variables continuas) y los valores de mayoría (*i.e.* el valor de mayor frecuencia en cada rectángulo, para el caso de variables categóricas) con estadísticas zonales en ArcMap 10.2 (ESRI, 2013).

Los rectángulos de muestreo se agruparon por topoforma (*i. e.* colinas, arroyos profundos, pendientes abiertas, llanuras) para explorar las relaciones entre las



dimensiones y actividad de cárcavas y las variables explicativas mediante análisis de correlación de Spearman en virtud de que los datos no seguían una distribución normal.

La curva del umbral topográfico para microcuencas inestables se comparó con la curva del umbral topográfico en microcuencas estables a fin de detectar diferencias entre ambas condiciones. La pendiente y el origen de las curvas de regresión de las microcuencas inestables y estables fueron comparadas con un análisis de covarianza, realizado en el programa R 3.3.0 (R Development Core Team, 2016).

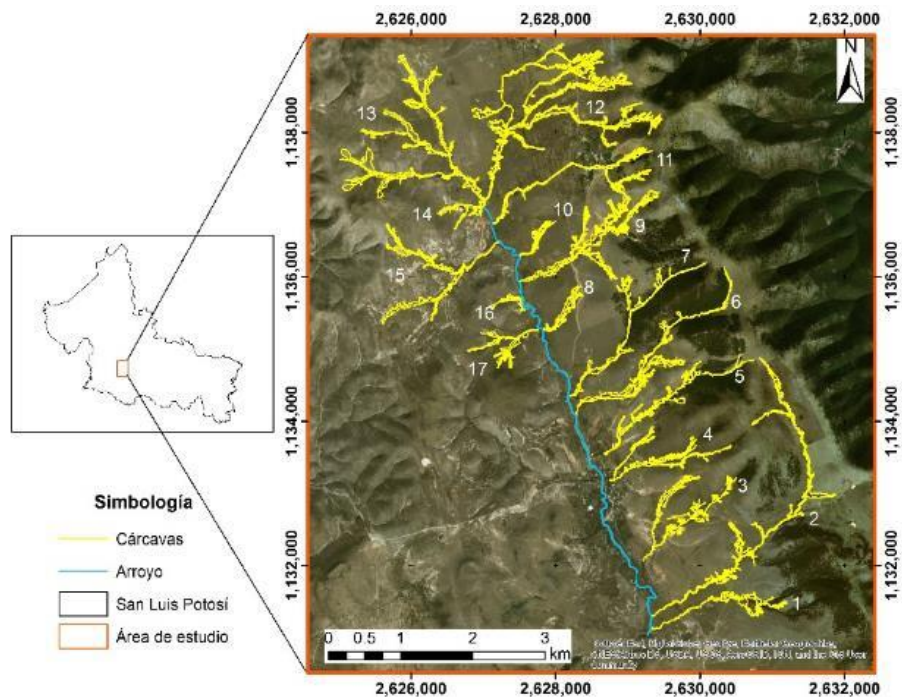
Los valores promedio de las características físicas, biológicas y de rasgos antropogénicos en microcuencas estables e inestables fueron obtenidas con el nivel de microcuenca y comparadas utilizando una prueba de rangos de Wilcoxon debido a que los datos no siguieron una distribución normal.

Los datos para construir el árbol de clasificación se obtuvieron de las 374 unidades de muestreo rectangulares distribuidas a lo largo de las líneas de drenaje de las microcuencas inestables y de los arroyos de las microcuencas estables. El árbol de clasificación fue implementado en el programa ENVI 5.2, a partir del cual, se determinó la distribución espacial de áreas susceptibles a la presencia de cárcavas a nivel de paisaje. Todos los análisis estadísticos fueron realizados en el programa R 3.3.0 (R Development Core Team, 2016) y se estableció un nivel de significancia de  $P < 0.05$ ; el árbol de clasificación se creó con la librería rpart.

### 3. RESULTADOS

#### 3.1 Dimensiones y actividad de cárcavas

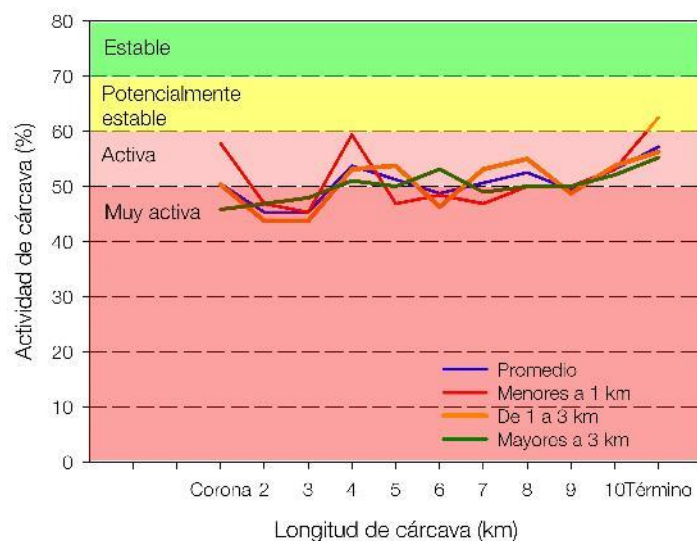
Las 17 cárcavas digitalizadas mostraron longitudes de líneas de drenaje entre 0.6 y 5.4 km, mientras que el área planimétrica mínima y máxima fue de 1.6 y 42 ha respectivamente; el perímetro de las cárcavas osciló entre 2.28 km y 48.8 km (Figura 5). El volumen promedio estimado para las cárcavas medidas en campo fue de 595 Mm<sup>3</sup>, con un mínimo de 46 Mm<sup>3</sup> y un máximo de 1,348 Mm<sup>3</sup> (Tabla 3).



**Figura 5.** Cárcavas digitalizadas en el área de estudio.

De los 110 puntos muestreados en campo, 46 mostraron un nivel de actividad de muy activo (41.91%), 54 con nivel de activo (49.09), nueve potencialmente estables (8.18%) y solo uno fue estable (0.10%) (Tabla 3). La actividad promedio de cárcavas

se caracterizó por secciones mayormente inestables desde la corona al término (Figura 6).



**Figura 6.** Actividad de cárcavas en campo agrupadas de acuerdo con su longitud km.

**Tabla 3.** Promedio, mínimo y máximo de las características dimensionales (m) y actividad de 10 cárcavas (%) medidas en campo en el área de Cerro de San Pedro San Luis Potosí

Característica	Promedio	Mínimo	Máximo
Anchura al nivel del banco	24.77	1.06	131.35
Anchura de base	4.43	1.00	30.00
Profundidad	7.08	0.30	36.18
Actividad en corona	50.46	34.37	71.87
Actividad en término	57.18	46.87	65.62
Actividad en toda la cárcava	50.69	44.88	57.10

Cárcavas muy activa <50%; activa (50 – 59 %), potencialmente estable (60 – 69%); estable (70 – 80%); muy estable >80%

### 3.2 Cobertura superficial del suelo

El modelo de regresión polinómica para estimar la cobertura superficial del suelo fue significativo ( $P < 0.05$ ) y explicó el 92.4% de la variabilidad de la cobertura. El modelo tuvo la forma:  $(-4.1812 + (-53.1117 \times \text{NDVI}) + (-441.9186 \times \text{NDVI}^2) + (-128.4783 \times \text{NDVI}^3))$  y fue aplicado para obtener la distribución espacial de la cobertura superficial (Figura 7).

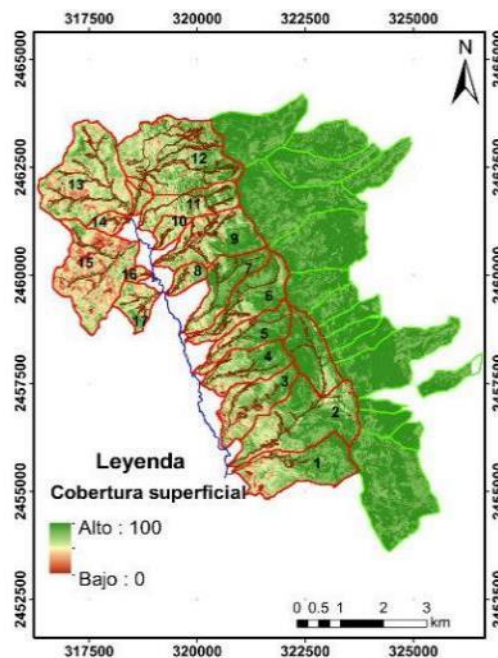


Figura 7. Proporción de cobertura superficial del área de estudio

### 3.3 Relación entre dimensiones, actividad de cárcavas y factores ambientales

Como era de esperarse en todas las tofoformas, el ancho al nivel del banco y la profundidad estuvieron altamente correlacionados con el volumen de cárcavas, dado que este último se estima a partir de las dos primeras variables.

En la topografía de las colinas, la disgregación del perfil inferior de la pared de las cárcavas y la pendiente del terreno tuvieron correlaciones positivas con el volumen de las cárcavas ( $P < 0.05$ ; Tabla 4); así, un mayor grado de disgregación de agregados del suelo y una mayor pendiente pueden resultar en un mayor volumen de las cárcavas. De manera similar, la disgregación del perfil inferior mostró una correlación positiva con la profundidad ( $P < 0.05$ ), lo que indicó que a mayores profundidades de cárcavas hay un mayor nivel de disgregación de los agregados del suelo en el perfil inferior de la pared de las cárcavas. Los mayores anchos en el nivel del banco de las cárcavas estuvieron correlacionados con valores bajos de cobertura superficial ( $P < 0.05$ ), y conforme la pendiente del terreno aumentó, la anchura al nivel del banco fue mayor ( $P < 0.05$ ). Las anchuras de base de las cárcavas no tuvieron correlaciones significativas con las variables consideradas ( $P > 0.05$ ). La actividad de cárcavas estuvo más relacionada con las características topográficas de la topografía de las colinas. A mayor pendiente, mayor capacidad de transporte de sedimentos, mayor poder de flujo superficial y mayor concavidad, los valores del DLA fueron menores, lo que indicó una mayor actividad en las cárcavas ( $P < 0.05$ ) bajo estas condiciones. Así mismo, conforme la distancia de las cárcavas a los bordos de agua fue mayor, la actividad de las cárcavas disminuyó ( $P < 0.05$ ). La actividad de cárcavas fue mayor conforme el nivel de dispersión del horizonte inferior disminuyó ( $P < 0.05$ ).

En la topografía de arroyos profundos (cárcavas), el aumento en la capacidad de transporte de sedimentos y el poder del flujo superficial estuvieron correlacionados con mayores volúmenes, mayores anchuras al nivel del banco y mayores profundidades de las cárcavas ( $P < 0.05$ ). Así mismo, pendientes pronunciadas del

terreno estuvieron correlacionadas con mayores profundidades de cárcavas ( $P < 0.05$ ). El volumen de cárcavas mostró una correlación negativa con la dispersión del perfil superior ( $P < 0.05$ ), lo que indica que los volúmenes mayores están asociados con una menor dispersión en la superficie del banco de las cárcavas. Los anchuras de base de las cárcavas no tuvieron correlaciones significativas con las variables consideradas ( $P > 0.05$ ). El volumen de las cárcavas estuvo correlacionado negativamente con la actividad de las cárcavas, por lo que, a mayor volumen, los valores del DLA fueron menores, lo que indicó una mayor actividad ( $P < 0.05$ ). Por otra parte, una mayor actividad de cárcavas estuvo correlacionada con una mayor cobertura superficial ( $P < 0.05$ , Tabla 5).

En la topoforma de pendientes abiertas, el volumen y la profundidad de las cárcavas no tuvieron correlaciones significativas con las variables consideradas ( $P > 0.05$ , Tabla 6). Las anchuras al nivel del banco se correlacionaron positivamente con la distancia a bordos de agua ( $P < 0.05$ ), lo que indicó, que los anchos mayores del banco estuvieron asociados con distancias lejanas a bordos de agua. Por otro lado, las anchuras de base de las cárcavas mostraron correlaciones positivas con la cobertura superficial del suelo y la distancia a caminos ( $P < 0.05$ ); es decir, las mayores anchuras de la base de las cárcavas están asociados con una mayor cobertura superficial del suelo y una mayor distancia a caminos. Los valores del DLA fueron mayores conforme aumentaron la dispersión y el índice de dispersión de los agregados del suelo del perfil superior ( $P < 0.05$ ), lo que indicó una menor actividad de las cárcavas cuando hay un alto nivel de dispersión.

En la topografía de llanuras, el volumen tuvo una correlación positiva con la distancia a bordos de agua ( $P < 0.05$ ); así, a mayor distancia a bordos de agua, existe un mayor volumen de las cárcavas (Tabla 7). La dispersión y el índice de dispersión del perfil medio estuvieron correlacionados negativamente con las anchuras de base de la cárcava ( $P < 0.05$ ); así, una menor dispersión e índice de dispersión del perfil medio puede resultar en un menor ancho de base de la cárcava. Los valores del DLA mostraron una correlación positiva con la profundidad de las cárcavas ( $P < 0.05$ ), lo que indicó que, a mayor actividad, la profundidad de las cárcavas aumentó. La anchura del nivel del banco no mostró correlaciones significativas con las variables consideradas ( $P > 0.05$ ).

**Tabla 4.** Coeficientes de correlación de Spearman para la actividad y dimensiones de cárcavas y las variables explicativas en la topografía de colinas en el área de Cerro de San Pedro, SLP.

Variables	DLA	Volumen	Profundidad	Ancho al nivel del banco	Ancho de base
DLA	<b>1</b>				
Volumen	-0.437	<b>1</b>			
Profundidad	-0.420	<b>0.934</b>	<b>1</b>		
Ancho del nivel del banco	-0.269	<b>0.875</b>	<b>0.755</b>	<b>1</b>	
Ancho de base	-0.321	<b>0.450</b>	<b>0.502</b>	0.281	<b>1</b>
Disgregación perfil inferior	-0.243	<b>0.610</b>	<b>0.541</b>	<b>0.593</b>	0.074
Índice de dispersión perfil inferior	<b>0.448</b>	-0.027	0.054	-0.037	-0.060
Cobertura superficial del suelo	-0.224	-0.226	-0.186	<b>-0.474</b>	0.084
STI	<b>-0.641</b>	0.221	0.317	0.012	0.257
SPI	<b>-0.490</b>	0.050	0.150	-0.083	0.222
Pendiente	<b>-0.600</b>	0.364	0.441	0.158	0.423
Pendiente del terreno	-0.279	<b>0.451</b>	0.355	<b>0.520</b>	0.058
Curvatura del terreno	<b>-0.527</b>	0.416	0.330	0.347	0.173
Distancia a bordos	<b>0.530</b>	0.180	0.152	0.180	0.019

Los números marcados en negritas denotan coeficientes de correlación significativos  $P < 0.05$ ;  $n = 23$

**Tabla 5.** Coeficientes de correlación de Spearman para la actividad y dimensiones de cárcavas y las variables explicativas en la topografía arroyos profundos en el área de Cerro de San Pedro, SLP.

Variables	DLA	Volumen	Profundidad	Ancho al nivel del banco	Ancho de base
DLA	<b>1</b>				
Volumen	<b>-0.504</b>	<b>1</b>			
Profundidad	-0.301	<b>0.835</b>	<b>1</b>		
Ancho del nivel del banco	-0.100	<b>0.796</b>	<b>0.721</b>	<b>1</b>	
Ancho de base	-0.351	<b>0.511</b>	0.236	0.378	<b>1</b>
Dispersión perfil superior	0.263	<b>-0.435</b>	-0.351	-0.354	-0.056
Cobertura superficial del suelo	<b>-0.539</b>	0.201	0.186	-0.169	-0.051
STI	-0.319	<b>0.532</b>	<b>0.515</b>	<b>0.500</b>	0.049
SPI	-0.295	<b>0.519</b>	<b>0.509</b>	<b>0.478</b>	0.069
Pendiente	-0.316	0.385	<b>0.420</b>	0.322	-0.003

Los números marcados en negritas denotan coeficientes de correlación significativos  $P < 0.05$ ;  $n = 28$

**Tabla 6.** Coeficientes de correlación de Spearman para la actividad y dimensiones de cárcavas y las variables explicativas en la topografía pendientes abiertas en el área de Cerro de San Pedro, SLP.

Variables	DLA	Volumen	Profundidad	Ancho al nivel del banco	Ancho de base
DLA	<b>1</b>				
Volumen	-0.050	<b>1</b>			
Profundidad	-0.073	<b>0.902</b>	<b>1</b>		
Ancho del nivel del banco	0.072	<b>0.871</b>	<b>0.925</b>	<b>1</b>	
Ancho de base	-0.005	<b>0.644</b>	<b>0.441</b>	<b>0.456</b>	<b>1</b>
Dispersión perfil superior	<b>0.492</b>	-0.057	-0.121	-0.058	0.147
Índice de dispersión perfil superior	<b>0.491</b>	0.043	-0.031	0.039	0.200
Cobertura de la superficie del suelo	-0.091	0.111	-0.131	-0.098	<b>0.426</b>
Distancia a caminos	0.119	0.120	-0.099	-0.008	<b>0.438</b>
Distancia a bordos	0.203	0.140	0.191	<b>0.369</b>	0.025

Los números marcados en negritas denotan coeficientes de correlación significativos  $P < 0.05$ ;  $n = 33$



**Tabla 7.** Coeficientes de correlación de Spearman para la actividad y dimensiones de cárcavas y las variables explicativas en la topografía de llanuras en el área de Cerro de San Pedro, SLP.

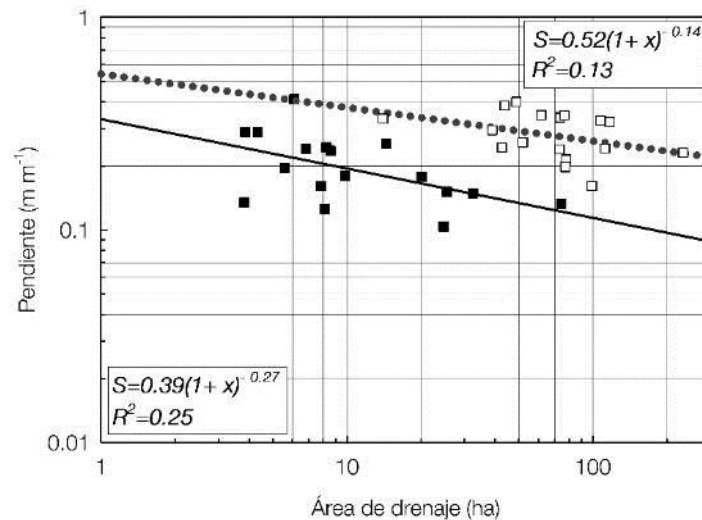
Variables	DLA	Volumen	Profundidad	Ancho al nivel del banco	Ancho de base
DLA	<b>1</b>				
Volumen	-0.401	<b>1</b>			
Profundidad	<b>-0.493</b>	<b>0.911</b>	<b>1</b>		
Ancho del nivel del banco	-0.301	<b>0.929</b>	<b>0.890</b>	<b>1</b>	
Ancho de base	-0.007	0.113	-0.049	0.125	<b>1</b>
Dispersión perfil medio	0.302	-0.040	-0.126	-0.044	<b>-0.436</b>
Índice de dispersión perfil medio	0.304	-0.204	-0.201	-0.219	<b>-0.440</b>
Distancia a bordos	-0.394	<b>0.443</b>	0.411	0.349	0.151

Los números marcados en negritas denotan coeficientes de correlación significativos  $P < 0.05$ ;  $n = 26$

### 3.4 Umbrales topográficos

Las microcuencas con cárcavas y sin cárcavas fueron analizadas para determinar la relación entre área de drenaje y pendiente y con ello identificar los umbrales topográficos de inestabilidad y estabilidad. Para ambas condiciones de pendiente se obtuvo una relación de potencia negativa significativa ( $P < 0.05$ ) entre el log S y log A al logaritmo de la pendiente crítica (Figura 8). Los coeficientes de estas relaciones en las microcuencas inestables fueron de  $a=0.39$  y  $b=-0.27$ . Así mismo, las cárcavas pueden encontrarse en áreas con pendientes de  $0.30 \text{ m m}^{-1}$  y con áreas de drenaje mayores a 3.5 ha en las áreas escarpadas y con pendientes de  $0.13 \text{ m m}^{-1}$  y áreas de drenaje  $>75$  ha en las áreas con pendientes suaves. Los coeficientes del modelo en las microcuencas sin cárcavas fueron de  $a=0.52$  y  $b= -0.14$ ; el umbral topográfico en estas microcuencas estables osciló entre  $0.33$  y  $0.23 \text{ m m}^{-1}$  de pendiente y entre 14 y 230 ha de área de drenaje.

El análisis de covarianza mostró que los valores de la pendiente de las líneas de regresión de microcuencas estables e inestables son paralelas (*i.e.* pendientes de las líneas similares) ( $P < 0.05$ ), lo que indicó, que el cambio de la pendiente conforme disminuye el área de drenaje no influye en la estabilidad o inestabilidad de las microcuencas (Figura 8). Sin embargo, las intersecciones de las curvas de regresión fueron significativamente diferentes entre microcuencas estables e inestables ( $P < 0.05$ ); las microcuencas estables mostraron pendientes locales más pronunciadas que las microcuencas inestables.



**Figura 8.** Diagrama log-log de las relaciones entre el área de drenaje y la pendiente local para microcuencas inestables (■) y estables (□). Las líneas continuas ajustadas muestran el umbral topográfico promedio para microcuencas inestables (ecuación inferior izquierda;  $n=17$ ) y la línea punteada ajustada el umbral topográfico para microcuencas estables (ecuación superior derecha,  $n=17$ ).

### 3.5 Diferencias entre microcuencas estables e inestables

La pendiente en microcuencas estables fue mayor que la pendiente de las de microcuencas inestables ( $P < 0.05$ ). El índice de transporte de sedimentos y el índice del poder de la corriente fue mayor en las microcuencas estables que en las

microcuencas inestables ( $P < 0.05$ ). La distancia a caminos y a bordos de agua y la cobertura superficial del suelo fueron mayores en las microcuencas estables que en las microcuencas inestables ( $P < 0.05$ ). La forma del relieve fue diferente entre microcuencas estables e inestables; la topoforma predominante en microcuencas inestables fueron las colinas, mientras que en las microcuencas estables predominaron las pendientes abiertas. El área y perímetro de la microcuenca, el índice de posición topográfica, el índice de humedad topográfica, la curvatura del terreno y la posición de la pendiente fueron similares entre microcuencas estables e inestables ( $P > 0.05$ ; Tabla 8).

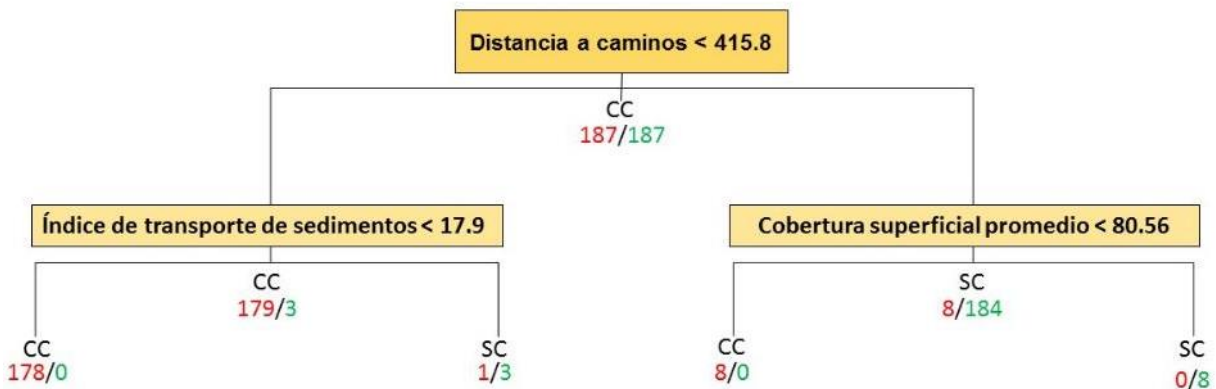
**Tabla 8.** Valores promedio ( $\pm$ ES) de las variables consideradas en el análisis de diferencias entre microcuencas estables e inestables.

<b>Variable</b>	<b>Inestable</b>	<b>Estable</b>
Área (ha)	177.54 (31.56) a	124.27 (23.57) a
Perímetro (km)	8.19 (1.03) a	4.93 (0.46) a
Pendiente (%)	16.93 (0.92) a	37.072 (1.57) b
SPI (adimensional)	43.86 (3.01) a	140.32 (11.25) b
TPI (adimensional)	0.001 (0.00) a	-0.006 (0.00) a
STI (adimensional)	6.75 (0.45) a	18.32 (1.13) b
TWI (adimensional)	4.77 (0.39) a	5.79 (0.40) a
Curvatura del terreno (adimensional)	0.0002 (0.00) a	-0.003 (0.00) a
Cobertura superficial del suelo (%)	71.81 (2.51) a	95.037 (0.42) b
Distancia a caminos (m)	131.98 (19.01) a	3131.28 (530.38) b
Distancia a bordos (m)	506.14 (52.35) a	1516.48 (186.72) b

*Los promedios en filas seguidos por letras diferentes son significativamente diferentes  $P < 0.05$  de acuerdo con el análisis no paramétrico Wilcoxon.  $n = 17$  para cada grupo de microcuencas.*

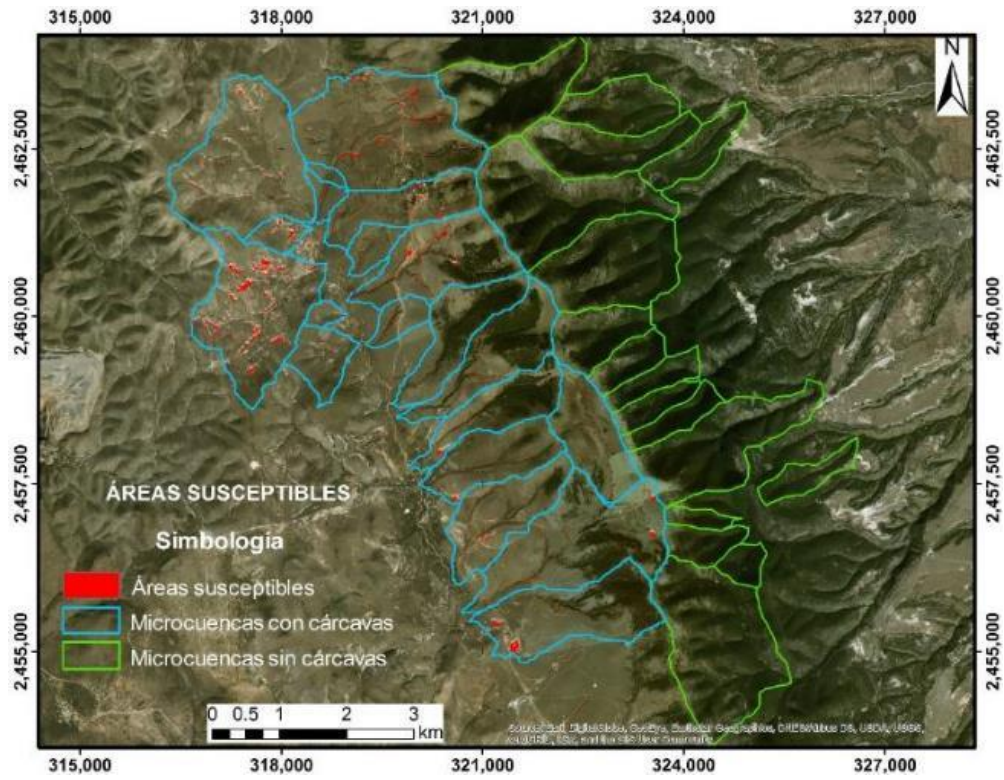
### 3.6 Susceptibilidad del paisaje a la erosión en cárcavas

El árbol de clasificación tuvo tres nodos derivados de las variables explicativas utilizadas para generar el modelo de susceptibilidad a la erosión en cárcavas (Figura 9). La variable del nodo raíz que más contribuyó a la presencia de cárcavas fue la distancia a caminos. Las otras variables relacionadas con la presencia de cárcavas fueron el índice de transporte de sedimentos y la cobertura de la superficie del suelo.



**Figura 9.** Árbol de clasificación con los umbrales de las principales variables que influyen en la presencia de cárcavas (números marcados en rojo) y ausencia de cárcavas (números marcados en verde).

La aplicación cartográfica del árbol de clasificación mostró las zonas susceptibles para la presencia y desarrollo de cárcavas (Figura 10). Las áreas con mayor susceptibilidad a la presencia y desarrollo de cárcavas se ubican al norte del área de estudio, mientras que al sur disminuyen las áreas susceptibles.



**Figura 10.** Mapa de áreas susceptibles a la presencia y desarrollo de cárcavas en el área de estudio.

## 4. DISCUSIÓN

### 4.1 Características y actividad de cárcavas

Los sitios de estudio forman un sistema de cárcavas complejo y continuo, unido a una red de drenaje dendrítico con coronas activas que descargan en un arroyo (Mitusov *et al.*, 2017), y que son frecuentes en zonas áridas y semiáridas (Rădoane y Rădoane, 2017). Este sistema de cárcavas indica una relación con grandes volúmenes de escorrentía con una mínima de 140.4 mm una máxima 447.6 mm de y un promedio de 312 mm y sedimentos generados por la ubicación de las coronas, es decir, la parte alta en el paisaje (*i.e.* colinas) y la conectividad con sitios localizados en llanuras y pendientes abiertas que descargan al arroyo principal, lo que de acuerdo a Zegeye *et al.* (2018) los convierte en sistemas eficientes de transporte de sedimentos, vinculados con la erosión. Estas relaciones entre la geomorfología y el transporte de sedimentos generan una gran conectividad de erosión en el paisaje, lo que influye en el crecimiento de las cárcavas, que pueden alcanzar longitudes de varios kilómetros, anchuras mayores a 100 m y profundidades de hasta 35 m (Gómez-Gutiérrez *et al.*, 2015; Le Roux y Sumner, 2012; Slimane *et al.*, 2018; Vanmaercke *et al.*, 2016) tal y como en el área de estudio. Otros factores como la pendiente, la geología y la geomorfología influyen en la tasa de avance de las cárcavas, que a su vez está relacionada con su edad (Radoane *et al.*, 1995 ).

El perfil de la longitud de la cárcava se ha considerado como un medio para determinar su morfología (ancho y profundidad), características que definen en gran medida la actividad de cárcavas y el estado de su desarrollo de acuerdo con Bravo-

Espinoza *et al.* (2010) y Stocking y Murnaghan (2001), y a su vez pueden ayudar a explicar la mayor proporción de secciones activas y muy activas en las cárcavas estudiadas.

Sin embargo, pocos estudios se han enfocado en el análisis de la actividad de cárcavas, a pesar de su importancia como elemento clave que define su crecimiento en paisajes semiáridos (Oostwoud *et al.*, 2000; Tichavský *et al.*, 2018; Zucca *et al.*, 2006). En el presente estudio, las categorías de actividad predominantes en las cárcavas fueron activa y muy activa desde la corona al término. Esto difiere de lo encontrado por un estudio reciente de Australia (Muñoz-Robles *et al.*, 2010), quienes encontraron una mayor actividad en las coronas que en las secciones terminales; no obstante, la evidencia de erosión reciente y la gran actividad de las coronas de las cárcavas estudiadas son características que favorecen su crecimiento en el sentido contrario a la pendiente, y que ha sido reportadas en otros estudios (Muñoz-Robles *et al.*, 2010; Shruthi *et al.*, 2015).

#### **4.2 Factores relacionados con las características de las cárcavas**

Cada sitio posee condiciones o características particulares que influyen de manera individual o conjunta en la dinámica de cárcavas en el paisaje. Las relaciones entre factores ambientales y la erosión en cárcavas constituye una prioridad de investigación dado el problema ambiental que representa la erosión del suelo en regiones semiáridas.

Diversos estudios se han enfocado en identificar los factores asociados con las dimensiones y la actividad de cárcavas, ya que las relaciones indican etapas de

desarrollo de las cárcavas o bien el perfil de la longitud de la cárcava es un indicador de su morfología y del estado de su desarrollo (Heede, 1970; Stocking y Murnaghan, 2001). En este sentido, en el presente estudio se encontró que la actividad, volumen, anchura y profundidad mostraron correlaciones con diferentes variables ambientales en función de la topoforma. Las correlaciones mayores se encontraron en las topoformas que implican gradientes de pendiente mayores (i.e. colinas y arroyos profundos), en comparación con las topoformas de pendientes más suaves (i.e. pendientes abiertas y llanuras). En este estudio, las variables topográficas están más relacionadas con las dimensiones de las cárcavas en los arroyos profundos y con la actividad de cárcavas en las colinas. Esto sugiere una mayor dinámica de erosión en áreas con pendientes más pronunciadas, ya que los factores topográficos definen en gran medida la erosión del suelo (Igwe, 2012). En el caso de las colinas, la pendiente mejora el drenaje, lo que aumenta el flujo superficial y deseca las zonas entre cárcavas, lo que reduce la producción de biomasa en las proximidades del nivel del banco (Costa y Bacellar, 2007; Poesen *et al.*, 2003), y al estar asociados con la morfología del terreno pueden resultar en una inestabilidad en relación con los regímenes hidrológicos de la superficie (Luca *et al.*, 2011). Además, las propiedades físicas del suelo son indicadores clave en la predicción de la erosionabilidad y características hidráulicas de los suelos (Igwe, 2012). La estabilidad de agregados del suelo (e.g. disgregación y dispersión) ha sido vinculada con la expansión y grado de erosión del suelo en ambientes semiáridos, ya que esta propiedad física del suelo tiene un alto grado de influencia en la tasa de infiltración del agua en el suelo, la conductividad hidráulica y erosionabilidad (Dimoyiannis, 2012; Vermang *et al.*, 2009). En las colinas, la disgregación del perfil inferior estuvo asociada con mayor volumen y



profundidad de cárcavas dado que en esta sección topográfica hay una gran producción y aporte de sedimentos. Algunos estudios sugieren que esto se debe a una disipación de la energía cinética del agua que conlleva a una mayor erosión por salpicaduras que a su vez implican una mayor profundidad de la cárcavas (Poesen *et al.*, 2002). Factores como una menor cobertura superficial del suelo y menor distancia a bordos de agua resultan en mayor actividad y anchos al nivel del banco de las cárcavas, probablemente relacionado con un uso inapropiado del suelo relacionado con sobrepastoreo y presencia de caminos (Gómez - Gutiérrez *et al.*, 2009; Tamene *et al.*, 2006). En los arroyos profundos, la relación entre el volumen y la actividad de cárcavas sugiere que una mayor inestabilidad puede resultar en un mayor volumen, ya que existen secciones que son menos activas dentro de la cárcava debido a que el mayor volumen y la mayor actividad de cárcavas se relaciona con pendientes abruptas en sus paredes, lo que influye en el flujo de escorrentía y en el aporte de sedimentos (Torri y Borselli, 2003).

Sin embargo, en las topofomas de arroyos profundos, pendientes abiertas y llanuras, la dispersión y el índice de dispersión no tuvieron las correlaciones esperadas. En este sentido, es probable que las correlaciones aparentemente contradictorias entre la dispersión y las características dimensionales y la actividad de cárcavas en el área de estudio (e.g. mayores dimensiones y mayor actividad de cárcavas conforme la dispersión disminuyó) se deba a que los suelos no tienen un alto contenido de arcillas, y que por esta razón las pruebas de ASWAT no sean las más adecuadas para los suelos de textura media del área de estudio. Es necesario entonces, realizar otro tipo de pruebas para evaluar las características de la dispersión,

como, por ejemplo, pruebas de laboratorio utilizando simuladores de lluvia (Vermang *et al.*, 2009).

Por otra parte, en las pendientes abiertas y llanuras las distancias a bordos y caminos no tuvieron las correlaciones esperadas con los anchos de nivel de banco, anchos de base y volumen ya que fueron mayores con mayores distancias. Es probable que esta falta de correlación se deba a una menor variabilidad de los factores analizados dentro de estas topofomas, así como a las modificaciones antropogénicas en el paisaje, (e.g. cambios de uso de suelo y pastoreo dada su accesibilidad), lo que implica perturbaciones en la geometría del terreno, que cambian la resistencia de la capa superficial del suelo a la erosión por modificaciones sobre la cobertura superficial y características del suelo (Deng *et al.*, 2015; Gómez-Gutiérrez *et al.*, 2009; Nyssen *et al.*, 2002). Por otra parte, en las llanuras, la actividad de cárcavas tuvo una relación negativa con la profundidad posiblemente debido al esfuerzo cortante del volumen la escorrentía (Bravo-Espinoza *et al.*, 2010).

#### **4.3 Características ambientales en microcuencas estables e inestables**

El identificar las diferencias entre las características de microcuencas con presencia y ausencia de cárcavas es útil para evaluar la erosión en cárcavas a gran escala, con el objetivo de conservar el suelo y el agua en regiones semiáridas (Liu *et al.*, 2018). Los factores que fueron diferentes entre las microcuencas estables e inestables fueron el umbral topográfico, la pendiente, el índice de poder de corriente, el índice de transporte de sedimentos, la forma de relieve, la cobertura superficial del suelo y la distancia a caminos y bordos de agua.

### 4.3.1 Diferencias en el umbral topográfico en microcuencas estables e inestables

La estimación de umbrales topográficos es una herramienta que permite definir la localización del inicio de cárcavas al nivel de paisaje y proporciona información para el establecimiento de prácticas preventivas para el control de la erosión en áreas susceptibles (Rossi *et al.*, 2015). El umbral de la pendiente ( $S$ ) y el área de drenaje crítica ( $A$ ), influyen en la magnitud y flujo de escorrentía, y, al ser excedidos, aumentan la presencia de cárcavas (Kakembo *et al.*, 2009; Patton y Schumm, 1975). Una relación negativa  $S-A$  sugiere un dominio de flujo superficial erosivo cuando los valores de  $b > 0.2$ , mismos que indican un dominio de flujo superficial hortoniano que al concentrarse puede derivar en la formación gradual de canales que se extienden sobre las laderas en paisajes semiáridos y áridos, mientras que valores de  $b < 0.2$  representan influencia de flujo subsuperficial (Montgomery y Dietrich, 1994; Moore I.D. *et al.*, 1988a; Vandekerckhove *et al.*, 2000b).

Los resultados en las microcuencas con cárcavas mostraron una relación negativa entre la pendiente local y el área de drenaje, lo que coincide con lo establecido por Le Roux y Sumner (2012), y Poesen *et al.* (2003), y una predominancia de flujo superficial hortoniano dado que  $b > 0.2$ . Los valores del coeficiente  $b$  fueron similares a los obtenidos por Nachtergaele *et al.* (2001), Nazari Samani *et al.* (2009), Patton y Schumm (1975), y Vandekerckhove *et al.* (2000b) en ambientes áridos y semiáridos en Irán, Portugal y Estados Unidos, que oscilaron entre 0.26 y 0.29. Sin embargo, los valores del coeficiente  $a$ , que indican el valor umbral que debe excederse para la

presencia de cárcavas fueron mayores a los reportados en estos estudios debido posiblemente a diferencias como el tipo de suelo, uso de suelo y cobertura superficial.

Al igual que para las microcuencas sin cárcavas, la relación  $A-S$  fue negativa en las microcuencas con cárcavas. Sin embargo, los valores del coeficiente  $b < 0.2$  sugieren un dominio de flujo subsuperficial; es decir, un proceso de infiltración en la parte inmediata de la superficie del suelo. Esto puede deberse a la presencia de una mayor cobertura superficial, lo que ocasiona una disminución del flujo hortoniano que evita la erosión del suelo, a pesar de encontrarse en pendientes pronunciadas mayores al 50%. Esto resalta, la importancia de la cobertura superficial como un factor de control de umbrales topográficos, al disminuir el riesgo al inicio de cárcavas por la presencia de zonas más resistentes al flujo superficial (Graf, 1979).

El valor del coeficiente  $a$  en las microcuencas sin cárcavas del presente estudio es similar al encontrado por Gabet y Bookter (2008) de 0.60, en una zona de colinas en bosques de pino y encino con bajo impacto ambiental ubicados al suroeste de Montana en Estados Unidos, una condición similar a los sitios de estudio. Por otra parte, el valor del coeficiente  $b$  en el presente estudio es similar al reportado por Vandekerckhove *et al.* (2000b) que osciló entre 0.10 y 0.14 en sitios de pastizal en ambientes semiáridos de España y Grecia, respectivamente.

El valor de la pendiente local del umbral topográfico en microcuencas con cárcavas fue menor a la pendiente local en microcuencas sin cárcavas, lo que difiere con lo encontrado por Muñoz-Robles *et al.* (2010), donde las microcuencas con cárcavas tuvieron mayor pendiente que las microcuencas sin cárcavas. Con base en lo anterior, las microcuencas sin cárcavas poseen las condiciones propicias en

términos de pendiente del terreno para el inicio de cárcava; sin embargo, es posible que la mayor proporción de cobertura superficial del suelo y un menor grado de perturbación debido a una menor accesibilidad disminuya el potencial de erosión en cárcavas en microcuencas estables (Tamene *et al.*, 2006). Además, un factor que puede disminuir el umbral topográfico es el sobrepastoreo, que tiende a aumentar el riesgo de erosión debido a una mayor desprotección del suelo y pisoteo del ganado que influye en la mayor dinámica de escorrentía (Gómez-Gutiérrez *et al.*, 2009; Zucca *et al.*, 2006). Por estos motivos, la estimación de valores del umbral topográfico es esencial para cada región o área de estudio y pueden variar de sitio a sitio, ya que están asociados a otras variables ambientales como el uso de suelo.

#### **4.3.2 Topografía, factores antropogénicos y cobertura superficial del suelo**

Las microcuencas con cárcavas se encuentran ubicadas en pendientes que van de suaves a moderadas, del 5 al 20%, con excepción de las coronas, que están ubicadas en pendientes del 20 al 50% e incluyen formas de relieve como colinas, arroyos profundos, pendientes abiertas y llanuras. Esto genera una gran variación de condiciones hidrológicas, principalmente relacionadas con la estabilidad de las pendientes y el flujo superficial (O Rahmati *et al.*, 2017). Estos valores de pendiente en microcuencas con cárcavas fueron similares a los encontrados por Omid Rahmati *et al.* (2017), Kakembo *et al.* (2009) y Le Roux y Sumner (2012), quienes especifican que las áreas con estos gradientes de pendiente representan un gran potencial para la acumulación de flujo superficial que puede resultar en el inicio de cárcavas. Por otra parte, las microcuencas sin cárcavas tuvieron pendientes superiores a las cuencas con

cárcavas (20 al 100%), pero localizadas en colinas, lo que implica una mayor estabilidad del terreno dada una menor variación de condiciones hidrológicas por una mayor presencia de cobertura vegetal que va del 95 al 100%.

Por lo anterior, la pendiente juega un papel importante en el área de estudio, ya que de acuerdo con Poesen *et al.* (2003) y Luca *et al.* (2011) ésta aumenta o disminuye el área de drenaje crítico que controla la escorrentía, a través del índice de poder de la corriente, un atributo secundario del terreno que influye en la erosión del suelo, ya sea por flujo distribuido o concentrado en una sola línea de drenaje. Sin embargo, al igual que para la pendiente del terreno, el poder de la corriente fue mayor para las microcuencas sin cárcavas, pero la mayor cobertura superficial de vegetación, rocas, costra biológica entre otras, se sugiere que la velocidad de escorrentía pueda ser disminuida por la rugosidad que ocasionan los elementos de la cobertura principalmente la vegetal, rocas, costra biológica y otros obstáculos y pierda poder para disgregar partículas del suelo.

En el caso de las microcuencas con cárcavas, a pesar de tener pendientes menores, y por ende un menor potencial de presencia de cárcavas, están sujetas a una gran presión antropogénica debido a su fácil acceso. Algunos estudios señalan que una mayor accesibilidad del terreno favorece a una erosión más severa, debido a una mayor perturbación por presencia de ganado, o compactación del suelo debido a una mayor cantidad de caminos. El caso contrario se presenta en terrenos más escarpados con menor accesibilidad y con menor exposición a los disturbios antropogénicos (Tamene *et al.*, 2006).

En este sentido, los factores antropogénicos como la distancia a caminos y bordos de agua son variables raramente incluidas en estudios de erosión en cárcavas. En el presente estudio se encontró que las cárcavas se encuentran a distancia a caminos y a bordos de agua menores que en las microcuencas sin cárcavas, donde la distancia fue mayor o incluso no hay caminos. Las áreas alejadas de los caminos en algunas ocasiones no muestran erosión en cárcavas debido al menor grado de perturbación en comparación con áreas con cárcavas, donde se registró un mayor grado de perturbación por una mayor densidad de caminos, lo que puede resultar en un mayor flujo superficial y en la baja capacidad de infiltración debido a la compactación del suelo (Dube *et al.*, 2014; Pathak *et al.*, 2005). Otros estudios asocian la presencia de caminos tanto de terracería en torno a las cárcavas, veredas de ganado principalmente ubicados en la tofoforma de colinas en las microcuencas y caminos asfaltados con una reorganización de patrones de drenaje que pueden conducir a la presencia y desarrollo de cárcavas en puntos de descarga (Katz *et al.*, 2014; Montgomery y Dietrich, 1994; Nyssen *et al.*, 2002).

Con respecto a la cobertura superficial del suelo, las microcuencas con cárcavas presentaron una menor proporción en comparación con las microcuencas sin cárcavas, donde se encontró mayor cobertura superficial. Esta mayor cobertura superficial en microcuencas estables en comparación con microcuencas inestables coincide con lo reportado por Muñoz-Robles *et al.* (2010) y Noguerras *et al.* (2000). La cobertura superficial del suelo y su distribución influye en la menor o mayor resistencia del suelo al flujo terrestre, dada principalmente por la rugosidad de la superficie, dando lugar a una menor velocidad de flujo y a una mayor capacidad de infiltración, lo que

modifica la escorrentía en paisajes semiáridos, donde la cubierta vegetal puede ser escasa (Graf, 1979; Poesen *et al.*, 2003). Normalmente los parches de vegetación superficial del suelo funcionan como unidades hidrológicas en paisajes semiáridos (Muñoz-Robles *et al.*, 2011). Estos parches que actúan como sumideros de agua que retienen la escorrentía y sedimentos producidos por áreas con menor cobertura o inter-parches; la organización espacial de los parches e inter-parches definen en gran medida la dinámica hidrológica y la erosión (Bautista *et al.*, 2007; Liu *et al.*, 2013; Ludwig y Tongway, 1995; Puigdefábregas, 2005). Es importante destacar que la comprensión de estas unidades ecohidrológicas permite definir prácticas de manejo más eficientes para los paisajes semiáridos.

#### **4.4 Susceptibilidad a la erosión en cárcavas**

La erosión en cárcavas es un problema relevante de degradación y pérdida de suelos para áreas áridas y semiáridas (Rahmati *et al.*, 2016; Vandekerckhove *et al.*, 2000a). Los modelos para identificar las áreas susceptibles a la erosión en cárcavas son considerados como una de las herramientas de mayor precisión que facilita la comprensión de su formación con el fin de planificar estratégicamente su control mediante prácticas eficientes en el nivel de paisaje (Conforti *et al.*, 2011; Conoscenti *et al.*, 2014; Poesen *et al.*, 2003).

El modelo de susceptibilidad usado en el presente estudio incluyó variables comúnmente utilizadas en otros modelos de susceptibilidad desarrollados para regiones semiáridas (Gómez *et al.*, 2009; Hughes y Prosser, 2012; Svoray *et al.*, 2012). Sin embargo, a diferencia de estos modelos, el utilizado aquí incluyó las variables de



distancia a caminos y cobertura superficial del suelo, ya que son de gran importancia en la región y no siempre son consideradas en los modelos de susceptibilidad.

Las tres variables principales que influyen en la presencia de cárcavas fueron la distancia a caminos, la capacidad de transporte de sedimentos y la cobertura superficial del suelo. Las áreas con mayor susceptibilidad a erosión en cárcavas se encuentran a distancias <415.8 m de los caminos, que es la variable que más explica la presencia de cárcavas en el paisaje. En general, se considera que una mayor lejanía a caminos, representa menor susceptibilidad a la erosión en cárcavas (Dube *et al.*, 2014), mientras que una distancia a caminos entre 0 y 100 m, indica una alta susceptibilidad a la erosión en cárcavas, pero si esta supera los 100 m la susceptibilidad es baja (O Rahmati *et al.*, 2017). Así mismo, el número de cárcavas aumenta en aquellos lugares donde los caminos cruzan las laderas en sentido perpendicular, lo que implica una mayor concentración de la escorrentía por alteración del funcionamiento hidrológico, siempre tomando en cuenta el sentido de la pendiente (Nyssen *et al.*, 2002; Seutloali *et al.*, 2015.).

El índice de transporte de sedimentos fue otra variable importante para determinar las áreas susceptibles a la erosión en cárcavas. Aquellas áreas con valores menores a 17.9, son las más susceptibles. Sin embargo, a pesar de que las áreas menos susceptibles son aquellas con valores mayores a 17.9, se considera que valores mayores a 4.0, pueden resultar en un nivel alto de energía que favorece a una mayor escorrentía, y con un ello un mayor transporte de sedimentos (Dube *et al.*, 2014; Le Roux y Sumner, 2012; Luca *et al.*, 2011), razón por la cual la presencia de cárcavas es posible en el área de estudio.

La cobertura superficial del suelo juega un papel importante en el paisaje al disminuir o aumentar el progreso de la erosión del suelo, que a su vez influye en una mayor o menor transferencia de escorrentía y transporte de sedimentos de las partes más elevadas (Conoscenti *et al.*, 2018; Guyassa *et al.*, 2018), lo que ocasiona que no existan cárcavas en áreas con cobertura superficial alta, a pesar de tener éstas pendientes más pronunciadas. En general, la erosión en cárcavas es mayor en áreas con una menor proporción de cobertura superficial del suelo (Le Roux y Sumner, 2012), que en áreas con gran cobertura, ya que esta incrementa la infiltración y la recarga subterránea (Chen *et al.*, 2018). La función de la cobertura superficial del suelo en la escorrentía y la erosión es una variable que rara vez se incluye en los estudios de susceptibilidad a erosión en cárcavas. Muchos estudios coinciden que para regiones semiáridas, existe un umbral inferior de entre 10 y 30% de cobertura a nivel de microcuencas para que se genere una cantidad de escorrentía que puede resultar en erosión acelerada (Eldridge, 2001; Liu *et al.*, 2017). Ante esto, es necesario mantener coberturas de entre 70 y 90% (valor umbral) para minimizar el riesgo de erosión, y el valor umbral de cobertura para reducir la susceptibilidad a la erosión en cárcavas, tal y como el obtenido en el presente estudio que se encuentra dentro de este rango.

La litología, la distancia a bordos y la pendiente también tuvieron aportación en el modelo de susceptibilidad, sin embargo, este nivel de aportación fue menor que la distancia a caminos, cobertura y el índice de transporte de sedimentos (STI). Estas variables de menor importancia influyen de diferentes formas en la presencia de cárcavas. El material litológico expuesto en la superficie define las características geomorfológicas, y la hidrodinámica del suelo ante la escorrentía superficial en

ambientes semiáridos (Igwe, 2012; Rahmati *et al.*, 2016), definiendo así su grado de vulnerabilidad ante otros factores ambientales o antropogénicos. Por otra parte, la distancia a bordos favorece la erosión del suelo e inicio de cárcavas en el paisaje, mientras que la pendiente del terreno juega un rol fundamental al aumentar la velocidad de la escorrentía y el transporte de sedimentos, con la consecuente susceptibilidad al inicio de cárcavas (Valentin *et al.*, 2005).

Sin embargo, considerando que las cárcavas son un tema multifactorial (Conforti *et al.*, 2011), la influencia de estos factores puede variar en dependencia del lugar donde se encuentren. Varios estudios han identificado que el inicio y desarrollo de cárcavas en el paisaje conduce a una importante pérdida de suelo (entre 10 y 95% del suelo original), lo que resulta en la degradación del suelo y en desertificación en zonas áridas y semiáridas (Avni, 2005; Poesen *et al.*, 2003). Por ende, la práctica actual desde el punto de vista de la susceptibilidad y los procesos de restauración de erosión en cárcavas requieren de un amplio conocimiento y comprensión de la dinámica hidrológica de las microcuencas (Tami, 2014), dado que son las unidades geográficas donde se da el principal manejo de los recursos agua, suelo y cobertura superficial en relación con las actividades antropogénicas.

Por todo lo anterior, el enfoque de la presente investigación contribuyó a generar y proporcionar información detallada sobre las interacciones entre los factores asociados a la erosión en cárcavas para paisajes semiáridos con el fin de facilitar la toma de decisiones en relación con el manejo oportuno de las microcuencas mediante técnicas y estrategias efectivas de control y reducción de la erosión. Los resultados del presente estudio pueden ser usados para planificar la estabilización de las secciones

de las cárcavas con mayor actividad para reducir su crecimiento, la restauración o rehabilitación de áreas desprovistas de cobertura superficial y la identificación de las áreas susceptibles para implementar medidas de prevención de la erosión. Un ejemplo sería disminuir la perpendicularidad de los caminos considerando las topoformas y la pendiente a fin de evitar un aumento de la escorrentía para otras áreas que no presenten erosión.

## 5. CONCLUSIONES

Las cárcavas en el área de estudio forman parte de un sistema continuo y complejo unido a la red de drenaje dendrítico, lo que las define como sistemas eficientes de transporte de sedimentos que a su vez influyen en los grandes volúmenes de suelo perdido.

La actividad de cárcavas no mostró una tendencia en su disminución desde de la corona hasta el término, sino que se caracterizó por tener secciones activas y muy activas independientemente de su localización en las microcuencas.

Las relaciones entre dimensiones, actividad y factores ambientales fueron diferentes por cada sistema de topografía. En las colinas, las variables topográficas como la pendiente, el índice de transporte de sedimentos, el índice del poder de flujo erosivo, así como la disgregación de agregados del suelo en el perfil inferior fueron los factores más relacionados con el desarrollo de las cárcavas. En los arroyos profundos, las variables topográficas como la pendiente, el índice de transporte de sedimentos, el índice del poder de flujo erosivo y el índice de dispersión de agregados del suelo fueron los de mayor correlación. En las pendientes abiertas y llanuras, las principales correlaciones fueron con variables antropogénicas como distancia a bordos de agua y caminos, sin embargo, no mostraron la dirección esperada en las correlaciones.

Los umbrales topográficos mostraron una relación negativa entre la pendiente local y área de drenaje, y fueron diferentes en microcuencas inestables y estables. Para microcuencas inestables predomina un flujo superficial hortoniano relacionado con la menor proporción de cobertura superficial, mientras que las microcuencas

estables tienen un flujo subsuperficial debido a la mayor proporción de cobertura superficial.

Las microcuencas inestables y estables mostraron diferencias entre las variables topográficas como pendiente, índice de poder de flujo superficial (SPI), índice de transporte de sedimentos (STI), así como con la cobertura superficial del suelo y variables antropogénicas como la distancia a caminos y bordos de agua.

Las áreas de mayor susceptibilidad a la erosión en cárcavas tienen una distancia cercana a caminos <415.8 m, un índice alto de transporte de sedimentos <17.9 y la cobertura superficial del suelo promedio <80.56%. En las áreas que cumplen con estos umbrales, existe un disturbio en el funcionamiento hidrológico en el nivel de paisaje que consigo mayor escorrentía superficial y menor infiltración, lo que aumenta la susceptibilidad del paisaje a la presencia y desarrollo de cárcavas. Las áreas más susceptibles se ubicaron al norte del área de estudio.

Los resultados evidencian factores ambientales y antropogénicos que influyen en la presencia y desarrollo de cárcavas, además de proveer las bases para definir condiciones de estabilidad e inestabilidad de microcuencas. Asimismo, constituyen una fuente de información para el establecimiento de obras agronómicas o ingenieriles en los procesos de restauración y control de la erosión a nivel de microcuenca.

Con base a la hipótesis planteada a priori y resultados de este estudio se concluye que en las microcuencas con cárcavas la pendiente y área de drenaje no cumplieron lo esperado, es decir, fueron menores en ambos casos. Por otra parte, la baja proporción de cobertura superficial, mayor cercanía a caminos y bordos de agua

cumplen con lo esperado y contribuye al mayor volumen y actividad de las cárcavas de acuerdo a lo esperado.

## 6. REFERENCIAS

- Al-Abadi, A. M., Al-Ali, A. K. (2018). Susceptibility mapping of gully erosion using GIS-based statistical bivariate models: a case study from Ali Al-Gharbi District, Maysan Governorate, southern Iraq. *Environmental Earth Sciences*, 77(6). doi:10.1007/s12665-018-7434-2
- Avni, Y. (2005). Gully incision as a key factor in desertification in an arid environment, the Negev highlands, Israel. *Catena*, 63(2-3), 185-220. doi:10.1016/j.catena.2005.06.004
- Barthes, B., Roose, E. (2002). Agregate stability as an indicator of soil susceptibility to runoff and erosión; validation at several levels. *Catena*, 47(2), 133-149.
- Bautista, S., Mayor, Á. G., Bourakhouadar, J., Bellot, J. (2007). Plant Spatial Pattern Predicts Hillslope Runoff and Erosion in a Semiarid Mediterranean Landscape. *Ecosystems*, 10(6), 987-998. doi:10.1007/s10021-007-9074-3
- Beltrán, E. (1956). El virrey Revillagigedo y los bosques de San Luis Potosí. *Revista de la sociedad mexicana de historia natural*, XVII(1-4), 121-131.
- Blanco, H., Lal, R. (2008). Soil and water conservation. In Springer (Ed.), *Principles of soil conservation and management* (pp. 626). London New York.
- Brady, N., Weil, R. (2008). *The nature and properties of soils* (Vol. Revised fourteenth edition ). United states of America 965 pp.
- Bravo-Espinoza, M., Mendoza, M. E., Medina-Orozco, L., Sáenz-Reyes, T. (2010). Características y control de cárcavas. *Terra Latinoamericana*, 28, 281-285.
- Breiman, L., Friedman, J. H., Oisen, R. A., Stone, C. J. (1984). *Clasificación and Regresión Trees*. Wadsworth, C.A. 368pp.
- Castillo, C., Gómez, J. A. (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
- Cervantes-Zamora, Y., Cornejo-Olgín, S. L., Lucero-Márquez, R., Espinoza-Rodríguez, J. M., Miranda-Viquez, E., Pineda-Velázquez, A. (Cartographer). (1990). Provincias Fisiográficas de México. Catálogo de metadatos geográficos. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad



- Cojocar, O. (2016). Soil erosion and its effects from the region of the region of the Negrea Village. *Lucrări Științifice*, 59 (2), 51-54.
- CONAFOR. (2007). *Protección, restauración y conservación de suelos forestales. Manual de obras y prácticas*. Zapopan, Jalisco, México, 207pp.
- CONAGUA (Cartographer). (2007). Subdirección General Técnica. Regiones Hidrológicas. escala 1:250000. República Mexicana
- Conforti, M., Aucelli, P. P. C., Robustelli, G., Scarciglia, F. (2011). Geomorphology and GIS analysis for mapping gully erosion susceptibility in the Turbolo stream catchment (Northern Calabria, Italy). *Natural Hazards*, 56(3), 881-898. doi:10.1007/s11069-010-9598-2
- Conoscenti, C., Agnesi, V., Cama, M., Caraballo-Arias, N. A., Rotigliano, E. (2018). Assessment of Gully Erosion Susceptibility Using Multivariate Adaptive Regression Splines and Accounting for Terrain Connectivity. *Land Degradation & Development*, 29(3), 724-736. doi:10.1002/ldr.2772
- Conoscenti, C., Angileri, S., Cappadonia, C., Rotigliano, E., Agnesi, V., Märker, M. (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
- Costa, F. M., Bacellar, L. d. A. P. (2007). Analysis of the influence of gully erosion in the flow pattern of catchment streams, Southeastern Brazil. *Catena*, 69(3), 230-238. doi:10.1016/j.catena.2006.05.007
- Chaplot, V. (2013). Impact of terrain attributes, parent material and soil types on gully erosion *Geomorphology*, 186, 1-11. doi:10.1016/j.geomorph.2012.10.031
- Chen, H., Zhang, X., Abla, M., Lü, D., Yan, R., Ren, Q., Ren, Z., Yang, Y., Zhao, W., Lin, P., Liu, B., Yang, X. (2018). Effects of vegetation and rainfall types on surface runoff and soil erosion on steep slopes on the Loess Plateau, China. *Catena*, 170, 141-149. doi:10.1016/j.catena.2018.06.006
- Dai, F. C., Lee, C. F., Xu, Z. W. (2001). Assessment of landslide susceptibility on the natural terrain of Lantau Island, Hong Kong. *Environmental Geology*, 40(3381-391).
- De Cobarruvias, S. (1611). Tesoro de la lengua castellana o española. Retrieved from <http://fondosdigitales.us.es/fondos/libros/765/16/tesoro-de-la-lengua-castellana-o-espanola/>

- De Reu, J., Bourgeois, J., Bats, M., Zwertvaegher, A., Gelorini, V., De Smedt, P., Chu, W., Antrop, M., De Maeyer, P., Finke, P., Van Meirvenne, M., Verniers, J., Crombé, P. (2013). Application of the topographic position index to heterogeneous landscapes. *Geomorphology*, 186, 39-49. doi:10.1016/j.geomorph.2012.12.015
- Deng, Q., Qin, F., Zhang, B., Wang, H., Luo, M., Shu, C., Liu, H., Liu, G. (2015). Characterizing the morphology of gully cross-sections based on PCA: A case of Yuanmou Dry-Hot Valley. *Geomorphology*, 228, 703-713. doi:10.1016/j.geomorph.2014.10.032
- Dewitte, O., Daoudi, M., Bosco, C., Van Den Eeckhaut, M. (2015). Predicting the susceptibility to gully initiation in data-poor regions. *Geomorphology*, 228, 101-115. doi:10.1016/j.geomorph.2014.08.010
- Dimoyiannis, D. (2012). Wet aggregate stability as affected by excess carbonate and other soil properties. *Land Degradation & Development*, 23(5), 450-455. doi:10.1002/ldr.1085
- Dube, F., Nhapi, I., Murwira, A., Gumindoga, W., Goldin, J., Mashauri, D. A. (2014). Potential of weight of evidence modelling for gully erosion hazard assessment in Mbire District – Zimbabwe. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 67-69, 145-152. doi:10.1016/j.pce.2014.02.002
- Eldridge, D. J. (2001). Soils and Rangeland management. In P. E. V. y. M. B. In Charman (Ed.), *Soils: their properties and management* (pp. 318-327). Melbourne, Oxford Univeristy Press.
- ESRI. (2013). ArcMap 10.3. Environmental Systems Ressearch Institute: Redlands, CA.
- Eustace, A. H., Pringle, M. J., Denham, R. J. (2011). A risk map for gully locations in central Queensland, Australia. *European Journal of Soil Science*, 62(3), 431-441. doi:10.1111/j.1365-2389.2011.01375.x
- FitzPatrick, E. A. (1996). *Introducción a la ciencia de los suelos* (I. a. l. c. d. l. suelos Ed.).
- Gabet, E. J., Bookter, A. (2008). A morphometric analysis of gullies scoured by post-fire progressively bulked debris flows in southwest Montana, USA. *Geomorphology*, 96(3-4), 298-309. doi:10.1016/j.geomorph.2007.03.016
- Gandhi, G. M., Parthiban, S., Thummalu, N., Christy, A. (2015). Ndvi: Vegetation Change Detection Using Remote Sensing and Gis – A Case Study of Vellore

District. *Procedia Computer Science*, 57, 1199-1210.  
doi:10.1016/j.procs.2015.07.415

- García, E. (1973). *Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köpen* (5 ed.). Universidad Nacional Autónoma de México, México: México, D.F. 98 p.
- Garosi, Y., Sheklabadi, M., Pourghasemi, H. R., Besalatpour, A. A., Conoscenti, C., Van Oost, K. (2018). Comparison of differences in resolution and sources of controlling factors for gully erosion susceptibility mapping. *Geoderma*, 330, 65-78. doi:10.1016/j.geoderma.2018.05.027
- Gashaw, T., Bantider, A., Silassie, H. G. (2014). Land degradation in Ethiopia: Causes, impacts and rehabilitation techniques. *Journal of Environmental and Earth Science*, 4(9), 98-104.
- Gómez-Gutiérrez, Á., Conoscenti, C., Angileri, S. E., Rotigliano, E., Schnabel, S. (2015). Using topographical attributes to evaluate gully erosion proneness (susceptibility) in two mediterranean basins: advantages and limitations. *Natural Hazards*, 79(S1), 291-314. doi:10.1007/s11069-015-1703-0
- Gómez-Gutiérrez, Á., Schnabel, S., Lavado, C. F. (2009). Gully erosion, land use and topographical thresholds during the last 60 years in a small rangeland catchment in SW Spain. *Land Degradation & Development*, 20(5), 535-550. doi:10.1002/ldr.931
- Gómez - Gutiérrez, A., Schanabel, S., Felicísimo, Á. M. (2009). Modelling the occurrence of gullies in rangelands of southwest Spain. *Earth Surface Processes and Landforms*, 34(14), 1894-1902.
- Gómez, G. Á., Schnabel, S., Lavado Contador, J. F. (2009). Using and comparing two nonparametric methods (CART and MARS) to model the potential distribution of gullies. *Ecological Modelling*, 220(24), 3630-3637. doi:10.1016/j.ecolmodel.2009.06.020
- González, F. F. J. (2002). *Cerro de San Pedro (1910 - 1920) una crisis minera o ecológica*. Colegio de San Luis, San Luis Potosí.
- Graf, W. L. (1979). The development of montane arroyos and gullies. *Earth Surface Processes and Landforms*, 4(1), 1-14.
- Graham, O. P. (1984). Gully erosion. *Journal of soil conservation N.S.W*, 40(1), 31-37.

- Guyassa, E., Frankl, A., Zenebe, A., Poesen, J., Nyssen, J. (2018). Gully and soil and water conservation structure densities in semi-arid northern Ethiopia over the last 80 years. *Earth Surface Processes and Landforms*, 43(9), 1848-1859. doi:10.1002/esp.4360
- Hayas, A., Poesen, J., Vanwalleghem, T. (2017). Rainfall and Vegetation Effects on Temporal Variation of Topographic Thresholds for Gully Initiation in Mediterranean Cropland and Olive Groves. *Land Degradation & Development*, 28(8), 2540 - 2552. doi:10.1002/ldr.2805
- Heede, B. H. (1970). Morphology of Gullies in the Colorado Rocky Mountains. *International Association of Scientific Hydrology. Bulletin*, 15(2), 79-89. doi:10.1080/02626667009493955
- Hillel, D. (2008). *Soil in the environment. Crucible of terrestrial life*. University of New England library 162pp.
- Hughes, A. O., Prosser, I. P. (2012). Gully erosion prediction across a large region: Murray - Darling Basin, Australia. *Soil Research*, 50(4), 267. doi:10.1071/sr12025
- Igwe, C. A. (2012). Gully erosion In Southesteern Nigeria: Role of soil properties and environmental factors *Research on soil erosion* (pp. 157 - 171).
- INEGI (Cartographer). (1974). Carta edafológica
- INEGI. (2010). *Compendio de Información Geográfica municipal 2010. Cerro de San Pedro, San Luis Potosí. Clave geoestadística 24009*. Productos y servicios. Aguascalientes.
- INEGI (Cartographer). (2017). Modelo Digital de Elevaciones
- Jenny, H. (1941). *Factors of soil formation. A system of quantitative pedology* (1994 ed.). New York, 271 pp.
- Jie, C., Jing-Zhang, C., Tan, M.-Z., Gong, Z.-T. (2002). Soil degradation: a global problem endangering sustainable development. *Journal of Geographical Sciences*, 12(2), 243-252.
- Justice, C. O., Townshend, J. G. (1981). Integrating ground data with remote sensing. *Terrain Analysis and Remote sensing*, 38-58.

- Kakembo, V., Xanga, W. W., Rowntree, K. (2009). Topographic thresholds in gully development on the hillslopes of communal areas in Ngqushwa Local Municipality, Eastern Cape, South Africa. *Geomorphology*, 110, 188 -194.
- Katz, H. A., Daniels, J. M., Ryan, S. (2014). Slope-area thresholds of road-induced gully erosion and consequent hillslope-channel interactions. *Earth Surface Processes and Landforms*, 39(3), 285-295. doi:10.1002/esp.3443
- Lal, R. (2001). Soil degradation by erosion. *Land Degradation & Development*, 12(6), 519-539.
- Landloch. (2003). A Geomorphic System for Gully Assessment. *Landloch Pty, Ltd, Darling Heights*.
- Le Roux, J. J., Sumner, P. D. (2012). Factors controlling gully development: Comparing continuous and discontinuous gullies. *Land Degradation & Development*, 23(5), 440-449. doi:10.1002/ldr.1083
- Leopold, L. B., Wolman, M. G., Miller, J. P. (1964). *Fluvial processes in geomorphology*. Freeman, San Francisco, 544 pp.
- Liu, J., Gao, G., Wang, S., Jiao, L., Wu, X., Fu, B. (2017). The effects of vegetation on runoff and soil loss: Multidimensional structure analysis and scale characteristics. *Journal of Geographical Sciences*, 28(1), 59-78. doi:10.1007/s11442-018-1459-z
- Liu, K., Ding, H., Tang, G., Song, C., Liu, Y., Jiang, L., Zhao, B., Gao, Y., Ma, R. (2018). Large-scale mapping of gully-affected areas: An approach integrating Google Earth images and terrain skeleton information. *Geomorphology*, 314, 13-26. doi:10.1016/j.geomorph.2018.04.011
- Liu, Y., Fu, B., Lü, Y., Gao, G., Wang, S., Zhou, J. (2013). Linking vegetation cover patterns to hydrological responses using two process-based pattern indices at the plot scale. *Science China Earth Sciences*, 56(11), 1888-1898. doi:10.1007/s11430-013-4626-1
- Luca, F., Conforti, M., Robustelli, G. (2011). Comparison of GIS-based gully susceptibility mapping using bivariate and multivariate statistics. *Geomorphology*, 134, 297-308. doi:10.1016/j.geomorph.2011.07.006
- Ludwig, J. A., Tongway, D. (1995). Spatial organisation of landscapes and its function in semi-arid woodlands, Australia. *Landscape Ecology*, 10(1), 51-63.

- Mararakanye, N., Sumner, P. D. (2017). Gully erosion: A comparison of contributing factors in two catchments in South Africa. *Geomorphology*, 288, 99-110. doi:10.1016/j.geomorph.2017.03.029
- Martínez, C., Paula A., Betancourt, M., Alexander, Nicolás, C., Miguel, Aguilar, R., Miguel. (2010). Procesos históricos y ambientales en Cerro de San Pedro, San Luis Potosí, México, 1948 -1997. *Región y sociedad*, XXII N° 48, 211-241.
- Maugnard, A., Van Dyck, S., Biielders, C. L. (2014). Assessing the regional and temporal variability of the topographic threshold for ephemeral gully initiation using quantile regression in Wallonia (Belgium). *Geomorphology*, 206, 165-177. doi:10.1016/j.geomorph.2013.10.007
- McKenzie, Koppi. (1997). ASWAT (Aggregate Stability in Water). *Australian Journal of Soil Research*, 35, 843-852.
- Mitusov, A. V., Burian, L., Khrisanov, V. R. (2017). Distribution of local landforms at head and end points of gullies on different grid spacing. *Catena*, 159, 159-170. doi:10.1016/j.catena.2017.08.010
- Mongkonpanya, T. (1986). Mechanics of gully erosion: A field and laboratory study. *Journal of soil conservation*, 40, 40.
- Montgomery, D. R., Dietrich, W. E. (1994). Landscape dissection and drainage area-slope thresholds. *Process Models and Theoretical Geomorphology*, 221-446.
- Moore I.D., Burch G.J., D.H., M. (1988a). Topographic effects on the distribution of surface soil water and the location of ephemeral gullies. *American Society of Agricultural Engineers*, 31(4).
- Moore, I. D., Grayson, R. B., Ladson, A. R. (1991b). Digital terrain modelling: a review of hydrological, geomorphological, and biological applications *Hydrological processes*, 5(1), 3-30.
- Morgan, R. C. P. (2005). Processes and mechanics of erosion. In P. Blackwell (Ed.), *Soil erosion and conservation* (3<sup>a</sup> ed., pp. 316). National soil resources institute, Cranfield University.
- Mukai, S. (2017). Gully Erosion Rates and Analysis of Determining Factors: A Case Study from the Semi-arid Main Ethiopian Rift Valley. *Land Degradation & Development*, 28(2), 602-615. doi:10.1002/ldr.2532

- Muñoz-Robles, C., Reid, N., Frazier, P., Tighe, M., Briggs, S. V., Wilson, B. (2010). Factors related to gully erosion in woody encroachment in south-eastern Australia. *Catena*, 83(2-3), 148-157. doi:10.1016/j.catena.2010.08.002
- Muñoz-Robles, C., Reid, N., Tighe, M., Briggs, S. V., Wilson, B. (2011). Soil hydrological and erosional responses in patches and inter-patches in vegetation states in semi-arid Australia *Geoderma*, 160(3-4), 524-534.
- Murphy, B. W. (2007). The nature of soil. In O. U. Express (Ed.), *Soils. Their properties and management* (3<sup>a</sup> ed., pp. 1-12). New York.
- Nachtergaele, J., Poesen, J., Vandekerckhove, L., Oostwoud, W. D., Roxo, M. (2001). Testing the Ephemeral Gully Erosion Model (EGEM) for two Mediterranean environments. *Earth Surface Processes and Landforms*, 26, 17-30.
- Nazari Samani, A., Ahmadi, H., Jafari, M., Boggs, G., Ghoddousi, J., Malekian, A. (2009). Geomorphic threshold conditions for gully erosion in southwestern Iran. *Journal of Asian Earth Sciences*, 35, 180-189.
- Nogueras, P., Burjachs, F., Gallart, F., Puigdefábregas, J. (2000). Recent gully erosion in the El Cautivo badlands (Tabernas, SE Spain). *Catena*, 40, 203-215.
- Nyssen, J., Poesen, J., Moeyersons, J., Luyten, E., Veyret-Picot, M., Deckers, J., Haile, M., Govers, G. (2002). Impact of road building on gully erosion risk: a case study from the Northern Ethiopian Highlands. *Earth Surface Processes and Landforms*, 27(12), 1267-1283. doi:10.1002/esp.404
- Oostwoud, W. D. J., Poesen, J., Liesbeth, V., Maryke, G. (2000). Spatial distribution of gully head activity and sediment supply along an ephemeral channel in a Mediterranean environment. *Catena*, 39, 147-167.
- Oostwoud Wijdenes, D. J., Bryan, R. (2001). Gully-head erosion processes on a semi-arid valley floor in Kenya: a case study into temporal variation and sediment budgeting. *Earth Surface Processes and Landforms*, 26(9), 911-933. doi:10.1002/esp.225
- Palacios, G. R. (2008). *El piojito, ferrocarril el potosí y rioverde 1898-1949*. México, 152 pp.
- Pathak, P., Wani, S., Sudi, R. (2005). *Gully control in SAT watersheds. Global theme on agroecosystems* Research institute for the semi-arid tropics, 29 pp.

- Patton, P. C., Schumm, S. A. (1975). Gully Erosion, Northwestern Colorado: a threshold phenomenon. . *Geology*, 3, 88-90.
- Poesen, J. (2011). Challenges in gully erosion research. *Landform Analysis*, 17, 5-9.
- Poesen, J. (2018). Soil erosion in the Anthropocene: Research needs. *Earth Surface Processes and Landforms*, 43(1), 64-84. doi:10.1002/esp.4250
- Poesen, J., Natchtergaele, J., Verstraeten, G., Valentin, C. (2003). Gully erosion and environmental change: importance and research needs. *Catena*, 50 ((2)), 91-133.
- Poesen, J., Vandaele, K., van Wesemael, B. (1998). *Gully erosion: Importance and Model Implications*. (Vol. 55). London: Springer-Verlag 517 pp.
- Poesen, J., Vandekerckhove, L., Nachtergaele, J., Oostwoud Wijdenes, D. J., Verstraeten, G., Wesemael, B. (2002). Gully erosion in dryland environments In L. J. B. y. M. J. Kirkby (Ed.), *Dryland Rivers. Hidrology and geomorphology of semi-arid channels* (pp. 393). K.U. Leuven, Belgium, 393 pp.
- Puigdefábregas, J. (2005). The role of vegetation patterns in structuring runoff and sediment fluxes in drylands. *Earth Surface Processes and Landforms*, 30(2), 133-147.
- R Development Core Team. (2016). R.
- Radoane, M., Ichim, I., Radoane, N. (1995 ). Gully Distribution and Development in Moldavia, Romania. *Catena*, 24(2), 127-146.
- Rădoane, M., Rădoane, N. (2017). Gully Erosion. In S. Geography (Ed.), *Landform dynamics and evolution in Romania* (pp. 371-396).
- Rahmati, O., Haghizadeh, A., Pourghasemi, H. R., Noormohamadi, F. (2016). Gully erosion susceptibility mapping: the role of GIS-based bivariate statistical models and their comparison. *Natural Hazards*, 82(2), 1231-1258. doi:10.1007/s11069-016-2239-7
- Rahmati, O., Tahmasebipour, N., Haghizadeh, A., Hamid, P. R., Feizizadeh, B. (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:10.1016/j.scitotenv.2016.10.176



- Rahmati, O., Tahmasebipour, N., Haghizadeh, A., Pourghasemi, H. R., Feizizadeh, B. (2017). Evaluation of different machine learning models for predicting and mapping the susceptibility of gully erosion. *Geomorphology*, 298, 118-137. doi:10.1016/j.geomorph.2017.09.006
- Raymond A. Evans, Merton R., L. (1957). The Step-Point Method of sampling A practical tool in range research. *Journal of Range Management*, 10(5), 208-212. doi:doi:10.2307/3894015
- Rose, C. W. (1993). Soil erosion by water. In M. Grant McTainsh and Walter C. Boughton (Ed.), *Land degradation proceses in Australia* (pp. 149-187). Longman Cheshire.
- Rossi, M., Torri, D., Santi, E. (2015). Bias in topographic thresholds for gully heads. *Natural Hazards*, 79(S1), 51-69. doi:10.1007/s11069-015-1701-2
- Roswell, C. J., Crouch, R. J., Morse, R. J. (2001). Forms of erosion. In P. E. V. y. M. B. In Charman (Ed.), *Soils. Their properties and management* (3<sup>a</sup> ed., pp. 14-40). Melbourne, Oxford University Press.
- Rzedowski, J. (2006). *Vegetación de México* (1ra Edición digital ed.). Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad: México, 504 p.
- SEMARNAT. (2012). Informe de la situación del medio ambiente en México. Retrieved from [http://app1.semarnat.gob.mx/dgeia/informe\\_12/index.html](http://app1.semarnat.gob.mx/dgeia/informe_12/index.html)
- Seutloali, K. E., Beckedahl, H. R., Dube, T., M., S. (2015.). An assessment of gully erosion along major armoured-roads in south-eastern region of South Africa. *Geocarto international*, 31(2), 225-239. doi:10.1080/10106049.2015.1047412
- SGM (Cartographer). (2017). Geología
- Shit, P. K., Paira, R., Bhunia, G., Maiti, R. (2015). Modeling of potential gully erosion hazard using geo-spatial technology at Garbheta block, West Bengal in India. *Modeling Earth Systems and Environment*, 1(1-2). doi:10.1007/s40808-015-0001-x
- Shruthi, R. B. V., Kerle, N., Jetten, V., Abdellah, L., Machmach, I. (2015). Quantifying temporal changes in gully erosion areas with object oriented analysis. *Catena*, 128, 262-277. doi:10.1016/j.catena.2014.01.010
- Slimane, A. B., Raclot, D., Rebai, H., Le Bissonnais, Y., Planchon, O., Bouksila, F. (2018). Combining field monitoring and aerial imagery to evaluate the role of

- gully erosion in a Mediterranean catchment (Tunisia). *Catena*, 170, 73-83. doi:10.1016/j.catena.2018.05.044
- Smith, T. M., Smith, R. L. (2007). Ambiente terrestre. In P. Education (Ed.), *Ecología* (6ª Edición ed., pp. 776). Madrid.
- Sonneveld, M. P. W., Everson, T. M., Veldkamp, A. (2005). Multi-scale analysis of soil erosion dynamics in Kwazulu-Natal, South Africa. *Land Degradation & Development*, 16(3), 287-301. doi:10.1002/ldr.653
- Steinberg, D., Colla, P. (1995). *CART: Tree-Structured Non-Parametric Data Analysis*. San Diego, Estados Unidos Salford systems
- Stocking, M., Murnaghan, N. (2001). *A handbook for the field assessment of land degradation*. London, UK.
- Svoray, T., Michailov, E., Cohen, A., Rokah, L., Sturm, A. (2012). Predicting gully initiation: comparing data mining techniques, analytical hierarchy processes and the topographic threshold. *Earth Surface Processes and Landforms*, 37(6), 607-619. doi:10.1002/esp.2273
- Tamene, L., Park, S., Dikau, R., Vlek, P. (2006). Analysis of factors determining sediment yield variability in the highlands of northern Ethiopia. *Geomorphology*, 76, 76-91. doi:10.1016/j.geomorph.2005.10.007
- Tami, A. G. (2014). Understanding effective gully control measures in Imo State, Nigeria. *Canadian open soil and erosion journal*, 1(1), 1-9.
- Tichavský, R., Kluzová, O., Břežný, M., Ondráčková, L., Krpec, P., Tolasz, R., Šilhán, K. (2018). Increased gully activity induced by short-term human interventions – Dendrogeomorphic research based on exposed tree roots. *Applied Geography*, 98, 66-77. doi:10.1016/j.apgeog.2018.07.008
- Tongway, D. (2007). Ephemeral Stream Assessment. *CSIRO, Sustainable Ecosystems*, 17 pp.,.
- Torri, D., Borselli, L. (2003). Equation for high-rate gully erosion *Catena*, 50, 449-467.
- Torri, D., Poesen, J. (2014). A review of topographic threshold conditions for gully head development in different environments. *Earth-Science Reviews*, 130, 73-85. doi:10.1016/j.earscirev.2013.12.006

- Tóth, G., Gardi, C., Bódis, K., Ivits, E., Aksoy, E., Jones, A., Jeffrey, S., Petursdottir, T., Montanarella, L. (2013). Continental-Scale assesment of provisioning soil functions in Europe. *Ecological Processes*, 2(32), 1-18.
- UNCCD. (2014). La tierra en cifras. Los medios de subsistencia en su punto de inflexión. Retrieved from [http://catalogue.unccd.int/859 Land In Numbers SP.pdf](http://catalogue.unccd.int/859_Land_In_Numbers_SP.pdf)
- Valentin, C., Poesen, J., Li, Y. (2005). Gully erosion: Impacts, factors and control. *Catena*, 63(2-3), 132-153. doi:10.1016/j.catena.2005.06.001
- Vandekerckhove, L., Poesen, J., Oostwoud, W. D., Nachtergaele, J., Kosmas, C., Roxo, M., de Figueiredo, T. (2000b). Thresholds for gully initiation and sedimentation in mediterranean europe. *Earth Surface Processes and Landforms*, 25, 1201-1220.
- Vandekerckhove, L., Poesen, J., Oostwoud, W. D. J., Gyssels, G., Beuselinck, L., de Luna, E. (2000a). Characteristics and controlling factors of bank gullies in two semi-arid mediterranean environments. *Geomorphology*, 33(1-2), 37-58. doi:https://doi.org/10.1016/S0169-555X(99)00109-9
- Vanmaercke, M., Poesen, J., Van Mele, B., Demuzere, M., Bruynseels, A., Golosov, V., Bezerra, J. F. R., Bolysov, S., Dvinskih, A., Frankl, A., Fuseina, Y., Guerra, A. J. T., Haregeweyn, N., Ionita, I., Makanzu Imwangana, F., Moeyersons, J., Moshe, I., Nazari Samani, A., Niacsu, L., Nyssen, J., Otsuki, Y., Radoane, M., Rysin, I., Ryzhov, Y. V., Yermolaev, O. (2016). How fast do gully headcuts retreat? *Earth-Science Reviews*, 154, 336-355. doi:10.1016/j.earscirev.2016.01.009
- Vermang, J., Demeyer, V., Cornelis, W. M., Gabriels, D. (2009). Aggregate Stability and Erosion Response to Antecedent Water Content of a Loess Soil. *Soil Science Society of America Journal*, 73(3), 718. doi:10.2136/sssaj2007.0134
- Zegeye, A. D., Langendoen, E. J., Guzman, C. D., Dagnew, D. C., Amare, S. D., Tilahun, S. A., Steenhuis, T. S. (2018). Gullies, a critical link in landscape soil loss: A case study in the subhumid highlands of Ethiopia. *Land Degradation & Development*, 29(4), 1222-1232. doi:10.1002/ldr.2875
- Zucca, C., Canu, A., Della, P. R. (2006). Effects of land use and landscape on spatial distribution and morphological features of gullies in an agropastoral area in Sardinia Italy. *Catena*, 68, 87-95.