

Predictive model for the estimation of sediment volume captured by lama-bordo systems in the Mixteca Alta of Oaxaca, Mexico

Modelo predictivo para la estimación de volumen de sedimentos captado por sistemas lama-bordo en la Mixteca Alta de Oaxaca, México

Blanca E. Santiago-Mejía¹; Demetrio S. Fernández-Reynoso^{1*}; Adolfo López-Pérez¹; Martín A. Bolaños-González¹; Jacinta Palerm-Viqueira²; Antonia Macedo-Cruz¹

¹Colegio de Postgraduados, Campus Montecillo, Postgrado en Hidrociencias. km 36.5 carretera México-Texcoco. C. P. 56230. Montecillo, Texcoco, Estado de México, México.

²Colegio de Postgraduados, Postgrado en Desarrollo Rural, Campus Montecillo. C. P. 56230. km 36.5 carretera México-Texcoco. Montecillo, Texcoco, Estado de México, México.

*Corresponding author: demetrio@colpos.mx; tel.: +52 595 957 4476.

Abstract

Introduction: The lama-bordo systems (LBS) are built in natural watercourses and favor retention of sediment and runoff moisture for the development of agricultural activity.

Objective: To obtain a model for predicting the volume of soil permanently captured by LBS, based on the morphometric and hydrological characteristics of the micro-watersheds where they have prevailed in the Mixteca Alta of Oaxaca, Mexico

Materials and methods: The study was carried out in 27 sites where morphometric parameters and hydrological indexes were determined to obtain the volume prediction model by multiple linear regression (backward elimination technique).

Results and discussion: The systems studied were found in micro-watersheds under conditions that favor sediment transport: elongated shape, areas smaller than 2 km² with 1st and 2nd order streams, at altitudes above 2000 m and slopes greater than 10 %. Twelve morphometric parameters and three hydrological indexes characterize these micro-watersheds and explain the physical conditions that allow their establishment, but only four (micro-watershed area, average slope of the mainstream, topographic wetness index and sediment transport index) explain the cumulative sediment volume ($R^2 = 0.85$, $P < 0.001$).

Conclusions: The model evaluated for volume estimation is reliable for application at sites under similar conditions.

Keywords: hydrologic indices; micro-watershed; morphometric parameters; lama-bordo system; sediment transport.

Resumen

Introducción: Los sistemas lama-bordo (SLB) se construyen en cauces naturales y favorecen la retención de sedimentos y humedad del escurrimiento para el desarrollo de la actividad agrícola.

Objetivo: Obtener un modelo de predicción de volumen de suelo captado por los SLB en forma permanente, a partir de las características morfométricas e hidrológicas de las microcuencas donde estos han prevalecido en la Mixteca Alta de Oaxaca, México.

Materiales y métodos: El estudio se hizo en 27 sitios donde se determinaron parámetros morfométricos e índices hidrológicos que permitieron obtener el modelo de predicción de volumen mediante regresión lineal múltiple tipo *backward stepwise*.

Resultados y discusión: Los sistemas estudiados se encontraron en microcuencas bajo condiciones que favorecen el transporte de sedimentos: forma alargada, áreas menores de 2 km² con corrientes de 1° y 2° orden, en altitudes superiores a los 2000 m y pendientes mayores de 10 %. Doce parámetros morfométricos y tres índices hidrológicos caracterizan dichas microcuencas y explican las condiciones físicas que permiten su establecimiento, pero solo cuatro (área de la microcuenca, pendiente media de la corriente principal, índice topográfico de humedad e índice de transporte de sedimentos) explican el volumen de sedimento acumulado ($R^2 = 0.85$, $P < 0.001$).

Conclusiones: El modelo evaluado para la estimación de volumen es confiable para su aplicación en sitios bajo condiciones similares.

Palabras clave: índices hidrológicos; microcuenca; parámetros morfométricos; sistema lama-bordo; transporte de sedimentos.

Introduction

The Mixteca region of Oaxaca is located in the Sierra Madre del Sur (Instituto Nacional de Estadística y Geografía [INEGI], 2001). This region experiences natural resource degradation, mainly soil erosion, triggered by the interaction of geological, topographical and anthropogenic variables (Toledo et al., 2018). Soil erosion observed is severe (Palacio et al., 2016); according to INEGI (2014), 54 % is hydric.

Environmental deterioration in the region has been noted by several authors (Pérez & Anderson, 2013; Pérez et al., 2019; Reyes et al., 2019) as a consequence of population growth, land use change, overexploitation of natural resources and introduction of grazing. This has caused changes in the ecosystems that are attributed to the initial settlements and agricultural techniques (Leigh et al., 2013), together with current migration (Palacio et al., 2016), which reduces the labor force and causes carelessness in activities that are essential to prevent soil erosion.

In a scenario of dry soils, subject to water erosion, low moisture retention and irregular rainfall, the Mixtecs developed an agricultural system of terraces along intermittent streams, called lama-bordo (LBS), which has become important in terms of production to the present day (Bocco et al., 2019; Leigh et al., 2013; Pérez Sánchez, 2019). According to Rivas et al. (2008), the LBS is a traditional system built with a series of stone curbs or compacted earth, perpendicular to the riverbeds, to capture sediment coming from the upper parts to form new croplands. Stone walls can measure 1 to 4 m in height and 10 to 200 m in length (Spores, 1969). These fluvial terrace systems, in addition to managing water flow, slow down the speed, favor runoff infiltration and drain excess moisture (Perez, 2016); for this reason, it is considered an adaptive practice for food production and important for soil use and management (Perez & Anderson, 2013) and moisture retention.

According to the research by Leigh et al. (2013), LBS may date back at least 3400 to 3500 years. Currently, Mixtec communities continue to cultivate in the LBS, maintaining their basic function of reducing soil erosion, retaining sediments, and creating farmland (Pérez & Anderson, 2013). The retained sediment consists of eroded material from adjacent slopes, transported in suspension, and detached from the bed and banks of the channel during torrential events, which need to be analyzed at the watershed scale.

The watershed is a hydrological unit that generates runoff as a result of precipitation and is prone to soil erosion degradation induced by anthropogenic

Introducción

La región Mixteca del estado de Oaxaca se ubica en la provincia fisiográfica Sierra Madre del Sur (Instituto Nacional de Estadística y Geografía [INEGI], 2001). La región presenta degradación de recursos naturales, principalmente la erosión del suelo, detonada por la interacción de variables geológicas, topográficas y antrópicas (Toledo et al., 2018). La erosión del suelo que se observa es severa (Palacio et al., 2016); de acuerdo con el INEGI (2014), 54 % es de tipo hídrica.

El deterioro ambiental en la región se ha señalado por diversos autores (Pérez & Anderson, 2013; Pérez et al., 2019; Reyes et al., 2019) como consecuencia del crecimiento poblacional, cambio de uso de suelo, sobrexplotación de los recursos naturales e introducción del pastoreo. Esto ha ocasionado cambios en los ecosistemas que se atribuyen a los asentamientos iniciales y sus técnicas agrícolas (Leigh et al., 2013), aunado a la migración actual (Palacio et al., 2016) que disminuye la mano de obra y causa desatención en actividades primordiales para evitar la erosión del suelo.

Ante un escenario de suelos de secano, sujetos a la erosión hídrica, retención escasa de humedad y precipitaciones irregulares, los mixtecos desarrollaron un sistema agrícola de terrazas a lo largo de cauces intermitentes, denominado lama-bordo (SLB), que ha trascendido por su importancia productiva hasta nuestros días (Bocco et al., 2019; Leigh et al., 2013; Pérez Sánchez, 2019). De acuerdo con Rivas et al. (2008), el SLB es un sistema tradicional construido con una serie de bordos de piedra acomodada o tierra compactada, perpendicular a los cauces, para captar el sedimento proveniente de las partes altas a fin de formar tierras nuevas de cultivo. Los muros de piedra pueden medir 1 a 4 m de altura y 10 a 200 m de longitud (Spores, 1969). Estos sistemas de terrazas fluviales, además de manejar el flujo de agua, disminuyen su velocidad, favorecen la infiltración de los escurrimientos y drenan el exceso de humedad (Pérez, 2016); por este motivo se considera una práctica adaptativa para la producción de alimentos e importante para el uso y manejo del suelo (Pérez & Anderson, 2013) y la humedad.

De acuerdo con la investigación de Leigh et al. (2013), los SLB pueden tener una antigüedad de al menos 3400 a 3500 años. En la actualidad, las comunidades mixtecas continúan cultivando en los SLB que conservan su función básica de reducir la erosión, retener sedimentos y crear tierras de cultivo (Pérez & Anderson, 2013). El sedimento retenido es material erosionado de las laderas colindantes, transportado en suspensión y desprendido del lecho y taludes del cauce durante eventos torrenciales, que es necesario analizar a escala de cuenca.

activities and extreme natural events; its size and boundary depend on the length of the stream (Chandniha & Kansal, 2017; Sridhar & Ganapuram, 2021). As noted by Sujatha et al. (2015) and Prabhakar et al. (2019), morphometric factors, dependent on the watershed's topography, shape, and drainage network, are descriptive elements of a hydrographic watershed.

Morphometric analysis provides insights into the evolution, characteristics, dynamics, and potential of a watershed (Sujatha et al., 2015), including its spatial distribution (Rajasekhar et al., 2020). It also quantitatively assesses the hydrological unit (Chandniha & Kansal, 2017) and identifies the relationships among its parameters (Sukristiyanti et al., 2017). By employing equations, this analysis scrutinizes the shape, size, and hydrological relationships within the watershed (Parupalli et al., 2019). Additional complementary parameters for watershed studies are the Topographic Wetness Index (TWI), Flow Power Index (FPI), and Sediment Transport Index (STI), contributing to the hydrological analysis of the landscape. According to Bannari et al. (2017) and Ahmad et al. (2019), these parameters are associated with soil erosion, flow accumulation, sediment deposition, and particle detachment onto the channel. The combination of hydrological indices and morphometric parameters allows for the assessment of potential erosion and flash floods (Abu El-Magd et al., 2021).

The objective of this study is to obtain a model to predict the volume of soil captured by the LBS, based on the morphometric and hydrological characteristics of the micro-watersheds, prevailing in the Mixteca Alta of Oaxaca, Mexico.

Materials and Methods

Study area

A total of twenty-seven sites with LBS were studied (Figure 1), distributed in 13 municipalities of the Mixteca Alta region of Oaxaca, between the coordinates 17° 06' 00" and 17° 48' 00" N and 97° 06' 00" and 97° 36' 00" W (Figure 2). According to Köppen's climate classification, modified by García (2004), the study area has a semi-arid temperate BS_{1kw} and temperate $C(w_0)$ and $C(w_1)$ climates, all with mean annual temperatures between 12 and 18 °C with rainfall in summer. The soils are Lithosol, Feozem, Regosol, Luvisol and Cambisol (INEGI, 2005).

Micro-watershed delimitation and morphometric parameter estimation

The micro-watersheds were delimited with the Continuo de Elevaciones Mexicano 3.0 (INEGI, 2013),

La cuenca es una unidad hidrológica que genera escurrimiento como resultado de las precipitaciones y es propensa a la degradación por erosión del suelo, inducida por actividades antrópicas y eventos naturales extremos; su tamaño y límite dependen de la longitud de la corriente (Chandniha & Kansal, 2017; Sridhar & Ganapuram, 2021). De acuerdo con Sujatha et al. (2015) y Prabhakar et al. (2019), uno de los factores descriptivos de una cuenca hidrográfica son los morfométricos, que dependen de la topografía del relieve que compone la cuenca, y de la forma y extensión de la red de drenaje.

El análisis morfométrico proporciona una idea de la evolución, características, dinámica y potencial de una cuenca (Sujatha et al., 2015) y de su distribución espacial (Rajasekhar et al., 2020); asimismo, evalúa la unidad hidrológica cuantitativamente (Chandniha & Kansal, 2017) e identifica la relación de sus parámetros (Sukristiyanti et al., 2017). Para un análisis morfométrico, los datos de entrada son: delimitación del área de la cuenca, red de drenaje, modelo digital de elevaciones (Sukristiyanti et al., 2017) y, con la ayuda de ecuaciones, se analiza la forma, el tamaño y sus relaciones hidrológicas (Parupalli et al., 2019). Otros parámetros complementarios para el estudio de las cuencas son el índice topográfico de humedad (ITH), índice de potencia de flujo (IPF) e índice de transporte de sedimentos (ITS) que contribuyen al análisis hidrológico del paisaje. De acuerdo con Bannari et al. (2017) y Ahmad et al. (2019), tales parámetros se asocian a la erosión del suelo, acumulación del flujo, deposición de sedimentos y al desprendimiento de partículas sobre el cauce. La asociación de índices hidrológicos y parámetros morfométricos permite evaluar la erosión potencial e inundaciones repentinas (Abu El-Magd et al., 2021).

El presente estudio tiene por objetivo obtener un modelo de predicción de volumen de suelo captado por los SLB, a partir de las características morfométricas e hidrológicas de las microcuencas donde estos han prevalecido en la Mixteca Alta de Oaxaca, México.

Materiales y métodos

Área de estudio

Se estudiaron 27 sitios que cuentan con SLB (Figura 1), distribuidos en 13 municipios de la región Mixteca Alta de Oaxaca, entre las coordenadas 17° 06' 00" y 17° 48' 00" LN y 97° 06' 00" y 97° 36' 00" LO (Figura 2). De acuerdo con la clasificación climática de Köppen, modificada por García (2004), el área de estudio cuenta con los climas semiárido templado BS_{1kw} y templados subhúmedo $C(w_0)$ y $C(w_1)$, todos con temperatura media anual entre 12 y 18 °C con lluvias en verano. Los suelos son de tipo Litosol, Feozem, Regosol, Luvisol y Cambisol (INEGI, 2005).



Figure 1. Lama-bordo system in the Mixteca Alta of Oaxaca, México. L = lama, B = bordo, E = lateral runoff, Ba = gullies or flood, V = spillway.

Figura 1. Sistema lama-bordo en la Mixteca Alta de Oaxaca, México. L = lama, B = bordo, E = escurrimientos laterales, Ba = barrancadas o avenidas, V = vertedor.

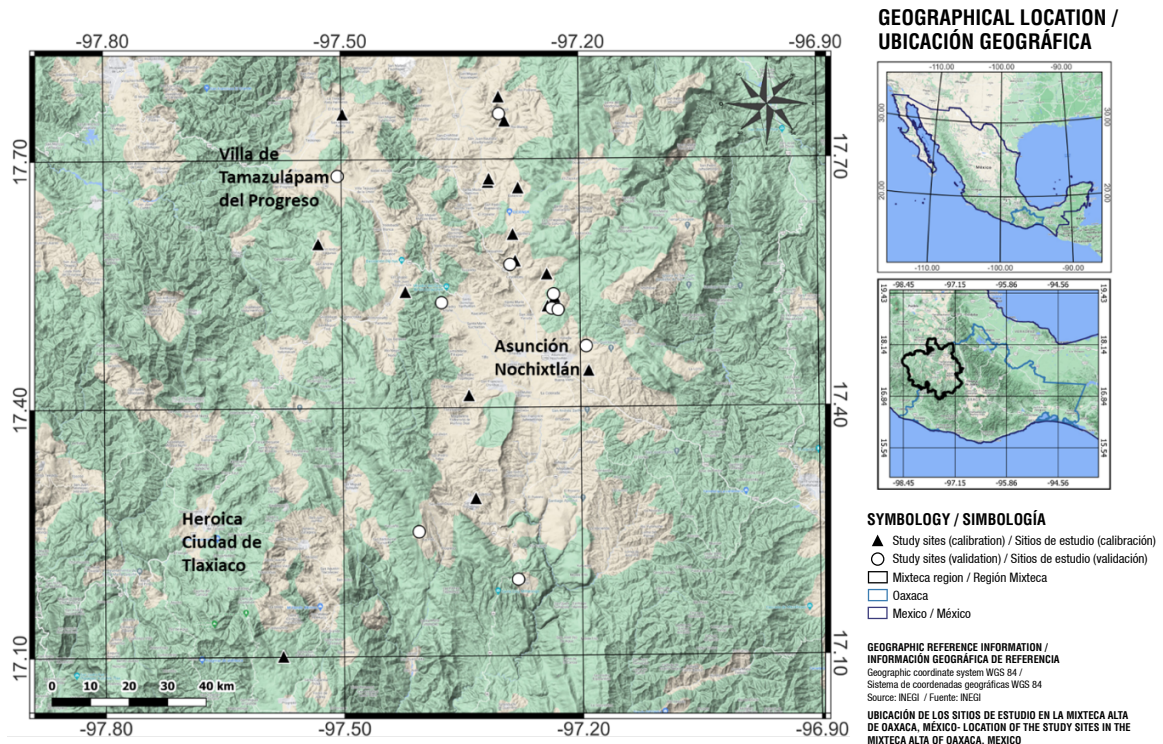


Figure 2. Location of study sites with lama-bordo systems in the Mixteca Alta of Oaxaca, Mexico

Figura 2. Ubicación de los sitios de estudio con sistemas lama-bordo en la Mixteca Alta de Oaxaca, México.

the Red Hidrográfica 2.0 (INEGI, 2010) and the automated watershed delimitation module of SWAT (Soil & Water Assessment Tool) model. With this information, the following morphometric parameters were estimated for each micro-watershed: drainage area (A), micro-watershed perimeter (P), maximum micro-watershed elevation (EMa), minimum micro-watershed elevation (EMi), micro-watershed length (Wl), stream order (Oc), main stream length (Le), mean micro-watershed slope (Pc) and mean main stream slope (Pe). These parameters facilitated the calculation of the circularity ratio (Cr), elongation ratio (Er), shape index (Si), time of concentration (Tc) and soil volume (Sv) which are described below.

Circularity ratio

It is the ratio between the area of the watershed (A, km²) and the area of the circle that has the same circumference as the perimeter (P, km) of the watershed (Miller, 1953); its expression is $Cr = 4\pi A / P^2$. This parameter is influenced by the length and frequency of streams, geological structure, land use and cover, climate and slope of the watershed (Balasubramani et al., 2019).

Elongation ratio

The elongation ratio (Er) represents the relationship between the diameter of a circle with the same area as the watershed and the maximum length of the watershed. When the value approaches 1, the shape of the watershed resembles a circle (Schumm, 1956). This parameter serves as an indicator of topography; values close to 1.0 are found in regions with very low relief, while values ranging from 0.6 to 0.8 are generally associated with high relief and steep slopes (Strahler, 1964). The expression is as follows: $Er = 2/Le * (A/\pi)^{0.5}$; where A is the area of the watershed (km²), and Le is the length of the main stream (km).

Shape Index

It is the ratio of the width to the length of the watershed squared (Horton, 1932), indicating the flow intensity of a watershed for a defined area. The index should be less than 0.7854, a value corresponding to a perfectly circular watershed (Kandekar et al., 2021). The lower the value, the more elongated the watershed (Singh et al., 2014). The expression of the index is as follows: $SI = A / L^2$; where A is the area of the watershed (km²), and L is the length of the watershed (km).

Time of Concentration

Time of concentration is the duration required for a volume of water to travel from the hydrologically

Delimitación de las microcuencas y estimación de los parámetros morfométricos

Las microcuencas se delimitaron con el Continuo de Elevaciones Mexicano 3.0 (INEGI, 2013), la Red Hidrográfica 2.0 (INEGI, 2010) y el módulo automatizado de delimitación de cuencas del modelo SWAT (Soil & Water Assessment Tool, por sus siglas en inglés). Con esta información se estimaron los siguientes parámetros morfométricos de cada microcuenca: área de drenaje (A), perímetro de la microcuenca (P), elevación máxima de la microcuenca (EMa), elevación mínima de la microcuenca (EMi), longitud de la microcuenca (Lc), orden de la corriente (Oc), longitud de la corriente principal (Le), pendiente media de la microcuenca (Pc) y pendiente media de la corriente principal (Pe). Estos parámetros permitieron calcular la relación de circularidad (Rc), relación de elongación (Re), índice de forma (If), tiempo de concentración (Tc) y volumen de suelo (Vs) que se describen a continuación.

Relación de circularidad

Es la relación entre el área de la cuenca (A, km²) y el área del círculo que tiene la misma circunferencia que el perímetro (P, km) de la cuenca (Miller, 1953); su expresión es $Rc = 4\pi A / P^2$. Este parámetro tiene influencia de la longitud y frecuencia de las corrientes, la estructura geológica, uso y cobertura del suelo, el clima y la pendiente de la cuenca (Balasubramani et al., 2019).

Relación de elongación

Es la relación entre el diámetro de un círculo con la misma área de la cuenca y la longitud máxima de la cuenca. Cuando el valor se acerca a 1, la forma de la cuenca se asemeja a un círculo (Schumm, 1956). El parámetro es un indicador de relieve; los valores cercanos a 1.0 se presentan en regiones de muy bajo relieve, mientras que los valores de 0.6 a 0.8, generalmente, están asociados con un alto relieve y una fuerte pendiente del suelo (Strahler, 1964). La expresión es la siguiente: $Re = 2/Le * (A/\pi)^{0.5}$; donde A es el área de la microcuenca (km²) y Le es la longitud de la corriente principal (km).

Índice de forma

Es la relación entre el ancho y la longitud de la cuenca al cuadrado (Horton, 1932) que indica la intensidad de flujo de una cuenca para un área definida. El índice debe ser inferior a 0.7854, valor correspondiente a una cuenca perfectamente circular (Kandekar et al., 2021); cuanto menor sea el valor, más alargada será la cuenca (Singh et al., 2014). La expresión del índice es la siguiente: $If = A / L^2$; donde A es el área de la microcuenca (km²) y L es la longitud de la microcuenca (km).

farthest point of a watershed to a downstream reference point (Kaufmann et al., 2017). Several methods are employed for its estimation, and the Kirpich method has been proven to be the most suitable for small watersheds (Rawat & Mishra, 2016). The formula for concentration time is expressed as: $T_c = 0.066 * (Le/\sqrt{Pe})^{0.77}$; where Le represents the length of the main runoff (km), and Pe is the slope of the main runoff ($m \cdot m^{-1}$).

Hydrological Parameters

The specific catchment area and hydrological indexes were estimated using the 'WhiteboxTools' included the QGIS program version 3.20.2 (QGIS, 2022), requiring the slope in degrees (β) for the entire watershed. This is distinct from Pe , which refers to the average slope of the main stream. The values reported for each site are weighted averages.

Topographic Wetness Index

This index was proposed by Beven and Kirkby (1979) to quantify the tendency of water distribution in the soil affected by topography (Raduła et al., 2018). The index is determined by the following expression: $TWI = \ln(A_s / \tan \beta)$; where A_s is the specific catchment area, and β is the slope in degrees.

Stream Power Index

This index is directly proportional to stream power, measures the erosive power of surface flow (Moore et al., 1993) and can be used to identify locations where soil conservation measures need to be implemented (Moore et al., 1991). The parameter is estimated with the following expression: $SP = A_s^p * \tan \beta$; where A_s is the specific catchment area, p is an exponent that controls the ratio of the location between the contributing area and the discharge (1.0) and β is the slope in degrees.

Sediment Transport Index

This index predicts erosion at a specific point on the landscape (Moore et al., 1991); moreover, it is a fundamental component in the Universal Soil Loss Equation (Bannari et al., 2017). The expression of the index is as follows: $STI = (n + 1) * (A_s / 22.13)^n * (\sin \beta / 0.0896)^m$; where A_s is the specific catchment area, β is the slope in degrees, $n = 0.4$ and $m = 1.3$. It is important to differentiate that A_s depends on the direction of flow and refers to the area of the LBS catchment that contributes to the sediment load at a specific point in the channel (Moore et al., 1991).

Tiempo de concentración

Es el tiempo necesario para que una cantidad de agua viaje desde el punto hidrológicamente más distante de una cuenca hasta un punto de referencia aguas abajo (Kaufmann et al., 2017). Existen varios métodos para su estimación y se ha comprobado que el más adecuado para cuencas pequeñas es el de Kirpich (Rawat & Mishra, 2016). La expresión es la siguiente: $T_c = 0.066 * (Le/\sqrt{Pe})^{0.77}$; donde Le es la longitud del escurrimiento principal (km) y Pe es la pendiente del escurrimiento principal ($m \cdot m^{-1}$).

Parámetros hidrológicos

El área de captación específica y los índices hidrológicos se estimaron con la herramienta 'WhiteboxTools' incluida en el programa QGIS versión 3.20.2 (QGIS, 2022), que requiere la pendiente en grados (β) de la totalidad de la cuenca. Esta última es diferente a Pe que se refiere a la pendiente media de la corriente principal. Los valores reportados para cada sitio son promedios ponderados.

Índice topográfico de humedad

Este índice fue propuesto por Beven y Kirkby (1979) con el objetivo de cuantificar la tendencia de la distribución del agua en el suelo que se ve afectada por la topografía (Raduła et al., 2018). El índice se determina con la expresión siguiente: $ITH = \ln(A_s / \tan \beta)$; donde A_s es el área de captación específica y β es la pendiente en grados.

Índice de potencia de flujo

Este índice es directamente proporcional a la potencia de la corriente, mide el poder erosivo del flujo superficial (Moore et al., 1993) y puede usarse para identificar lugares donde es necesario implementar medidas de conservación de suelo (Moore et al., 1991). El parámetro se estima con la expresión siguiente: $PF = A_s^p * \tan \beta$; donde A_s es el área de captación específica, p es un exponente que controla la relación de la ubicación entre el área contribuyente y la descarga (1.0) y β es la pendiente en grados.

Índice de transporte de sedimentos

Este índice predice la erosión en un punto específico del paisaje (Moore et al., 1991); además, es un componente fundamental en la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo (Bannari et al., 2017). La expresión del índice es la siguiente: $ITS = (n + 1) * (A_s / 22.13)^n * (\sin \beta / 0.0896)^m$; donde A_s es el área de captación específica, β es la pendiente en grados, $n = 0.4$ y $m = 1.3$. Es importante diferenciar que A_s depende de la dirección del flujo y se

Soil Volume

This parameter allows us to know the approximate amount of soil accumulated in the LBS, with the following expression: $S_v = A_L * H_m$; where A_L is the area of the LBS and H_m is the average height of the LBS. It should be clarified that in the present study an estimated value of S_v was used as observed data, due to the complexity of obtaining real data in channels filled with sediment that hide the variations in hydraulic sections and changes in slope.

Statistical Analysis

The data were analyzed using RStudio version 1.4.1717 (R Core Team, 2021) to estimate basic statistics (minimum, maximum, mean, standard deviation, and coefficient of variation). Multiple linear regression models were employed to derive the final model explaining the parameter S_v . The model's variables were selected using the backward stepwise method, where initially all calculated parameters were considered and gradually eliminated one by one. The elimination criterion was based on the parameter contributing the smallest amount to R^2 . The procedure stopped when the reduction in R^2 was statistically significant with the remaining predictors (Ruengvirayudh & Brooks, 2016).

To validate the results, the assumptions of the final multiple linear regression model were assessed using Shapiro-Wilks test for normality, Breusch-Pagan test for heteroscedasticity, and variance inflation factor test for multicollinearity.

Results and Discussion

Morphometric Characterization of the Lama-Bordo System

The morphometric characterization data of the LBS are presented in Tables 1 and 2. The behavior of the parameters in the system is described below.

Area

The area of the watersheds where the LBS is located ranges from less than 7.86 km² to more than 0.13 km², classifying them as micro-watersheds, as indicated by Campos (1992). The perimeter exceeds 1.88 km. Shri et al. (2015) state that the size of watersheds determines the speed of rainfall reaching the main stream, with smaller watersheds experiencing faster runoff compared to larger ones.

Altitude and Average Slope

The analyzed micro-watersheds range in altitude from 2053 to 2871 m. The average slopes vary between 10.00 and 48.52 %, and their main streams exhibit

refiere al área de la cuenca del SLB que contribuye a la carga de sedimentos en un punto específico del cauce (Moore et al., 1991).

Volumen de suelo

Este parámetro permite conocer la cantidad aproximada de suelo acumulado en el SLB, con la siguiente expresión: $V_s = A_L * H_m$; donde A_L es el área del SLB y H_m es la altura media del SLB. Cabe aclarar que en el presente estudio se utilizó un valor estimado de V_s como datos observados, debido a la complejidad para obtener un dato real en cauces rellenos con sedimento que ocultan las variaciones en secciones hidráulicas y cambios de pendiente.

Análisis estadístico

Los datos se analizaron con el programa RStudio versión 1.4.1717 (R Core Team, 2021), para estimar la estadística básica (mínimo, máximo, media, desviación estándar y coeficiente de variación) y, mediante el uso de modelos de regresión lineal múltiple, se obtuvo el modelo final que explica el parámetro V_s . Las variables del modelo se seleccionaron con el método *backward stepwise*, donde inicialmente se contemplaron todos los parámetros calculados, los cuales se fueron eliminando uno a la vez, el que aportara la cantidad más pequeña al R^2 ; el procedimiento se detuvo cuando la reducción en R^2 fue estadísticamente significativa con los predictores restantes (Ruengvirayudh & Brooks, 2016).

Para comprobar la validez de los resultados, los supuestos del modelo final de la regresión lineal múltiple se verificaron con la prueba de Shapiro-Wilks para normalidad, la prueba de Breusch-Pagan para heteroscedasticidad y la prueba del factor de inflación de la varianza para multicolinealidad.

Resultados y discusión

Caracterización morfométrica del sistema lama-bordo

Los datos de la caracterización morfométrica de los SLB se muestran en los Cuadros 1 y 2. A continuación se describe el comportamiento de los parámetros en el sistema.

Área

El área de las cuencas donde se encuentran ubicados los SLB es inferior a 7.86 km² y superior a 0.13 km², por lo que se clasifican como microcuencas, conforme lo indica Campos (1992); el perímetro es mayor de 1.88 km. Shri et al. (2015) refieren que el tamaño de las cuencas determina la velocidad de llegada del agua precipitada a la corriente principal, pues en las cuencas pequeñas es más rápida que en cuencas grandes.

Table 1. Basic morphometric parameters of the micro-watersheds of the lama-bordo systems in the Mixteca Alta region of Oaxaca.
Cuadro 1. Parámetros morfométricos básicos de las microcuencas de los sistemas lama-bordo en la región Mixteca Alta de Oaxaca.

| Sites/ Sitios | Area/ Área (km ²) | Perimeter/ Perímetro (km) | Mae/EMA (m) | Mie/EMi (m) | Wl/Lc (km) | Le (km) | Pc (%) | Pe (%) |
|--------------------|-------------------------------------|---------------------------------|----------------|----------------|---------------|------------|-----------|-----------|
| 1 | 4.04 | 12.52 | 2568.00 | 2153.00 | 4.03 | 4.11 | 17.52 | 7.56 |
| 2 | 1.65 | 8.27 | 2313.00 | 2103.00 | 2.66 | 2.58 | 18.89 | 9.46 |
| 3 | 0.72 | 4.65 | 2326.00 | 2152.00 | 1.38 | 1.29 | 23.81 | 14.39 |
| 4 | 2.33 | 10.87 | 2444.00 | 2131.00 | 3.36 | 4.31 | 27.55 | 18.56 |
| 5 | 0.36 | 3.95 | 2341.00 | 2208.00 | 1.04 | 1.04 | 18.55 | 14.20 |
| 6 | 0.84 | 5.00 | 2255.00 | 2143.00 | 1.52 | 1.08 | 10.00 | 5.79 |
| 7 | 1.69 | 7.54 | 2221.00 | 2075.00 | 2.13 | 2.01 | 13.93 | 7.92 |
| 8 | 2.19 | 9.93 | 2307.00 | 2085.00 | 2.94 | 2.93 | 25.06 | 11.82 |
| 9 | 2.06 | 7.99 | 2731.00 | 2391.00 | 2.34 | 2.18 | 21.47 | 15.85 |
| 10 | 0.13 | 1.88 | 2223.00 | 2155.00 | 0.56 | 0.48 | 18.33 | 18.55 |
| 11 | 2.52 | 8.93 | 2710.00 | 2270.00 | 2.75 | 3.16 | 48.52 | 21.33 |
| 12 | 1.38 | 6.98 | 2103.00 | 2404.00 | 1.88 | 1.67 | 20.58 | 15.62 |
| 13 | 0.38 | 3.52 | 2198.00 | 2333.00 | 0.88 | 0.79 | 16.49 | 9.26 |
| 14 | 0.88 | 5.65 | 2167.00 | 2396.00 | 1.75 | 1.76 | 29.97 | 18.94 |
| 15 | 0.71 | 5.04 | 2166.00 | 2383.00 | 1.50 | 1.36 | 29.29 | 23.88 |
| 16 | 1.06 | 6.28 | 2394.00 | 2627.00 | 1.87 | 1.80 | 18.08 | 16.83 |
| 17 | 0.68 | 4.74 | 2435.00 | 2534.00 | 1.31 | 1.27 | 18.13 | 10.54 |
| 18 | 2.19 | 9.06 | 2319.00 | 2127.00 | 2.24 | 2.35 | 19.41 | 10.56 |
| 19 | 0.88 | 5.59 | 2280.00 | 2128.00 | 1.78 | 1.69 | 17.32 | 9.64 |
| 20 | 1.88 | 8.20 | 2345.00 | 2152.00 | 2.26 | 2.29 | 27.43 | 13.45 |
| 21 | 2.77 | 10.75 | 2307.00 | 2053.00 | 3.74 | 3.23 | 17.40 | 9.96 |
| 22 | 7.86 | 20.57 | 2447.00 | 2119.00 | 6.42 | 7.02 | 24.07 | 8.88 |
| 23 | 2.40 | 10.08 | 2871.00 | 2501.00 | 3.35 | 3.33 | 18.83 | 19.91 |
| 24 | 0.56 | 4.86 | 2404.00 | 2064.00 | 1.44 | 1.43 | 31.92 | 18.76 |
| 25 | 0.89 | 5.34 | 2342.00 | 2150.00 | 1.52 | 1.46 | 26.39 | 16.23 |
| 26 | 0.27 | 3.85 | 2307.00 | 2156.00 | 1.23 | 1.20 | 17.39 | 13.23 |
| 27 | 0.65 | 4.43 | 2195.00 | 2386.00 | 1.28 | 1.10 | 27.39 | 17.25 |
| Minimum/ Mínimo | 0.13 | 1.88 | 2103.00 | 2053.00 | 0.56 | 0.48 | 10.00 | 5.79 |
| Maximum/ Máximo | 7.86 | 20.57 | 2871.00 | 2627.00 | 6.42 | 7.02 | 48.52 | 23.88 |
| Average/ Media | 1.63 | 7.28 | 2359.96 | 2236.26 | 2.19 | 2.18 | 22.36 | 14.01 |
| ±SD/ ±DE | 1.56 | 3.75 | 181.04 | 160.88 | 1.22 | 1.38 | 7.46 | 4.74 |
| CV (%) | 95.82 | 51.58 | 7.67 | 7.19 | 55.86 | 63.26 | 33.38 | 33.84 |

Mae: maximum elevation, Mie: minimum elevation, Wl: micro-watershed length, Le: main stream length, Pc: average slope of watershed, Pe: slope of the main stream. ±SD: standard deviation of the mean, CV: coefficient of variation.

Ema: elevación máxima, Emi: elevación mínima, Lc: longitud de la microcuenca, Le: longitud de la corriente principal, Pc: pendiente media de la cuenca, Pe: pendiente de la corriente principal. ±DE: desviación estándar de la media, CV: coeficiente de variación.

Table 2. Morphometric and Hydrological Parameters of Micro-watersheds in Lama-Bordo Systems in the Mixteca Alta Region of Oaxaca.**Cuadro 2. Parámetros morfométricos e hidrológicos de las microcuencas de los sistemas lama-bordo en la región Mixteca Alta de Oaxaca.**

| Sites/Sitios | Si/If (adim) | Cr/Rc (adim) | Er/Re (adim) | Tc (min) | TWI/ITH (adim) | FPI/IPF (adim) | STI/ITS (adim) | Sv/Vs (m ³) |
|--------------------|-----------------|-----------------|-----------------|-------------|-------------------|-------------------|-------------------|----------------------------|
| 1 | 0.25 | 0.32 | 0.55 | 28.79 | 9.06 | 673.85 | 8.08 | 975 871.95 |
| 2 | 0.23 | 0.30 | 0.56 | 24.27 | 8.66 | 101.98 | 5.20 | 525 326.59 |
| 3 | 0.38 | 0.42 | 0.74 | 11.68 | 9.07 | 484.90 | 9.35 | 191 671.88 |
| 4 | 0.21 | 0.25 | 0.40 | 34.43 | 8.17 | 66.69 | 3.96 | 434 514.41 |
| 5 | 0.33 | 0.29 | 0.65 | 10.26 | 9.28 | 328.45 | 13.03 | 97 483.20 |
| 6 | 0.36 | 0.42 | 0.96 | 13.32 | 8.79 | 31.43 | 1.70 | 318 530.33 |
| 7 | 0.37 | 0.37 | 0.73 | 20.87 | 8.46 | 69.68 | 3.94 | 728 631.59 |
| 8 | 0.25 | 0.28 | 0.57 | 27.05 | 8.60 | 182.38 | 8.07 | 890 980.00 |
| 9 | 0.38 | 0.41 | 0.74 | 15.86 | 9.82 | 474.49 | 11.44 | 153 574.83 |
| 10 | 0.41 | 0.45 | 0.84 | 4.83 | 7.89 | 102.21 | 10.29 | 180 702.67 |
| 11 | 0.33 | 0.40 | 0.57 | 22.43 | 7.87 | 34.19 | 4.15 | 172 703.00 |
| 12 | 0.39 | 0.35 | 0.79 | 13.22 | 8.60 | 365.57 | 14.26 | 459 882.22 |
| 13 | 0.49 | 0.39 | 0.89 | 8.62 | 9.98 | 329.52 | 10.13 | 63 407.65 |
| 14 | 0.29 | 0.34 | 0.60 | 13.98 | 8.87 | 702.88 | 15.87 | 131 128.83 |
| 15 | 0.32 | 0.35 | 0.70 | 11.18 | 8.63 | 738.00 | 14.92 | 85 271.13 |
| 16 | 0.30 | 0.34 | 0.65 | 15.80 | 7.64 | 82.65 | 6.02 | 119 605.14 |
| 17 | 0.40 | 0.38 | 0.73 | 13.18 | 8.22 | 45.35 | 4.07 | 135 907.69 |
| 18 | 0.44 | 0.34 | 0.71 | 21.83 | 9.04 | 164.96 | 5.98 | 516 080.63 |
| 19 | 0.28 | 0.36 | 0.63 | 15.88 | 8.57 | 85.80 | 6.07 | 290 605.02 |
| 20 | 0.37 | 0.35 | 0.67 | 21.66 | 7.95 | 22.37 | 1.71 | 154 622.00 |
| 21 | 0.20 | 0.30 | 0.58 | 29.07 | 8.36 | 57.22 | 3.03 | 458 929.57 |
| 22 | 0.19 | 0.23 | 0.45 | 61.05 | 8.04 | 28.28 | 2.37 | 1 835 990.94 |
| 23 | 0.21 | 0.30 | 0.52 | 23.94 | 9.87 | 1057.65 | 21.14 | 831 329.88 |
| 24 | 0.27 | 0.30 | 0.59 | 11.76 | 9.74 | 926.29 | 21.45 | 108 758.06 |
| 25 | 0.39 | 0.39 | 0.73 | 12.89 | 8.13 | 92.05 | 6.62 | 156 126.97 |
| 26 | 0.18 | 0.23 | 0.49 | 10.95 | 7.94 | 71.21 | 6.92 | 494 686.30 |
| 27 | 0.40 | 0.42 | 0.83 | 9.29 | 8.72 | 315.45 | 10.63 | 86 249.33 |
| Minimum/ Mínimo | 0.18 | 0.23 | 0.40 | 4.83 | 7.64 | 22.37 | 1.70 | 63 407.65 |
| Maximum/ Máximo | 0.49 | 0.45 | 0.96 | 61.05 | 9.98 | 1057.65 | 21.45 | 1 835 990.94 |
| Average/ Media | 0.32 | 0.34 | 0.66 | 18.82 | 8.67 | 282.80 | 8.53 | 392 539.70 |
| ±SD/ ±DE | 0.08 | 0.06 | 0.13 | 11.19 | 0.66 | 300.46 | 5.45 | 393 390.22 |
| CV (%) | 26.52 | 17.38 | 20.25 | 59.45 | 7.56 | 106.24 | 63.86 | 100.22 |

Si: Shape Index, Cr: Circularity Ratio, Er: Elongation Ratio, Tc: Time of Concentration, TWI: Topographic Wetness Index, FPI: Flow Power Index, STI: Sediment Transport Index, Sv: Soil Volume. ±SD: standard deviation of the mean, CV: coefficient of variation.

If: índice de forma, Rc: relación de circularidad, Re: relación de elongación, Tc: tiempo de concentración, ITH: índice topográfico de humedad, IPF: índice de potencia de flujo, ITS: índice de transporte de sedimentos, Vs: volumen de suelo. ±DE: desviación estándar de la media, CV: coeficiente de variación.

slopes between 5.79 and 23.88 %. These parameters favor sudden flooding events, leading to high erosion in mountainous areas and significant sediment accumulation in low-lying areas (Abu El-Magd et al., 2021). These factors have contributed to the formation of the Lama-Bordo Systems (LBS) in the region.

Stream Order

According to Strahler's classification (1964), the streams in 14 micro-watersheds are of the first order, while in 13 micro-watersheds, they are of the second order. This suggests a higher susceptibility to water erosion (Méndez-Gutiérrez et al., 2021).

Main Stream Length

The main stream length varies from 0.48 to 7.02 km. Shri et al. (2015) suggest that relatively shorter lengths are characteristic of areas with steeper slopes and fine soil textures, aligning with the rugged terrain and soil conditions where the Lama-Bordo Systems (LBS) are located.

Shape Index

The shape index in the LBS ranged from 0.17 to 0.44, with an average of 0.29, suggesting an elongated shape of the micro-watersheds experiencing low maximum flows with longer duration (Singh et al., 2014). This indicates low intensity (Kumar & Chaudhary, 2016; Kusre, 2016) and the ability to manage floods (López & Fernández, 2021).

Circularity Ratio

The values ranged from 0.23 to 0.45, with an average of 0.33, indicating an elongated shape (<0.5), low runoff discharge, and permeable subsurface conditions, according to Singh et al. (2014) and Malik et al. (2019).

Elongation Ratio

Based on the classification proposed by Schumm (1956), 4 % of the sites have a circular shape (>0.9), 11 % oval shape (0.8-0.9), 30 % less elongated shape (0.7-0.8), 44 % elongated shape (0.5-0.7) and 11 % very elongated shape (<0.5). In general, most of the micro-watersheds where LBS are found have elongated shape. Soni (2017) points out that areas with high E_r values have high infiltration capacity and low runoff, which favors moisture storage in LBS.

Time of Concentration

The estimated times for the LBS were from 4.83 to 61.05 minutes. The influence of the length of the main stream could be observed, as shorter response times were obtained.

Altitud y pendiente media

Las microcuencas analizadas van de 2053 a 2871 m de altitud, las pendientes medias oscilan entre 10.00 y 48.52 % y sus corrientes principales tienen pendientes entre 5.79 y 23.88 %. Estos parámetros favorecen los eventos de inundaciones repentinas, lo que provoca una erosión alta en zonas montañosas y acumulación alta de sedimentos en zonas bajas (Abu El-Magd et al., 2021) que han contribuido a la formación de los SLB de la región.

Orden de corriente

Las corrientes, conforme a la clasificación de Strahler (1964), son de primer y segundo orden en 14 y 13 microcuencas, respectivamente. Esto indica que son más susceptibles a la erosión hídrica (Méndez-Gutiérrez et al., 2021).

Longitud de la corriente principal

La longitud fluctúa de 0.48 a 7.02 km. Shri et al. (2015) indican que las longitudes relativamente más pequeñas son características de áreas con pendientes mayores y texturas de suelo finas, que concuerda con la ubicación accidentada y los suelos donde se encuentran los SLB.

Índice de forma

El índice en los SLB osciló entre 0.17 y 0.44 con una media de 0.29, lo que sugiere una forma alargada de las microcuencas que experimentan caudales máximos bajos con mayor duración (Singh et al., 2014). Esto sugiere baja intensidad (Kumar & Chaudhary, 2016; Kusre, 2016) y que son capaces de manejar las inundaciones (López & Fernández, 2021).

Relación de circularidad

Los valores variaron de 0.23 a 0.45 con una media de 0.33 que indica una forma alargada (<0.5), baja descarga de escurrimiento y condiciones del subsuelo permeables, de acuerdo con Singh et al. (2014) y Malik et al. (2019).

Relación de elongación

Con base en la clasificación propuesta por Schumm (1956), 4 % de los sitios tiene una forma circular (>0.9), 11 % forma ovalada (0.8-0.9), 30 % forma menos alargada (0.7-0.8), 44 % forma alargada (0.5-0.7) y 11 % forma muy alargada (<0.5). En general, la mayor parte de las microcuencas donde se encuentran los SLB tienen forma alargada. Soni (2017) señala que las áreas con valores altos de R_e tienen capacidad alta de infiltración y escorrentía baja, lo cual favorece el almacenamiento de humedad en los SLB.

Hydrological Characterization of Lama-Bordo Systems

The hydrological characterization data of the LBS are presented in Table 2. The following describes how the parameters behave within the system.

Topographic Wetness Index

Values ranged between 7.87 and 10.06, indicating areas more susceptible to flooding based on the assessment of local relief (Pourali et al., 2014). Higher values are associated to drainage lines (Różycka et al., 2017), where the LBS are situated due to a gentler slope, facilitating moisture accumulation. On the other hand, it identifies areas prone to landslides (Różycka et al., 2017) contributing sediments to the system.

Flow Power Index

The values ranged from 22.37 to 1057.65, indicating particle detachment due to accumulation and flow velocity effects (Bannari et al., 2017), where the energy of runoff water moves the soil's surface layer. Low values suggest potential sediment deposition and are characteristic of the lower parts of watersheds and the main channel, while high values indicate a higher risk of erosion (Abu El-Magd et al., 2021). For the LBS, higher values were found on their sides (runoff areas) with steeper slopes, contributing to increased acceleration in the currents that transport sediments and water to the terraces.

Sediment Transport Index

The values ranged from 1.70 to 21.45, indicating the capacity for sediment transport, accumulation, and their spatial distribution (Ahmad et al., 2019). The highest values observed in the LBS were situated on their sides (lateral runoff), while the lower values were found in the lamas or terraces. This agrees with the findings of Bannari et al. (2017), who suggested that lower areas are prone to flooding and serve as deposition points for transported particles; low values reflect slow mobility and sediment accumulation. The system as a whole is not significantly affected by this index, but the lateral areas, due to their steep slopes, are highly susceptible. Similar to the Flow Power Index (FPI), slope gradient is a critical factor influencing these areas.

Although morphometric analysis allows the prioritization and location of the places where it is necessary to implement soil and water conservation structures, in the micro-watersheds under study there are already LBS that have contributed to soil and moisture retention for agricultural purposes and

Tiempo de concentración

Los tiempos estimados para los SLB fueron de 4.83 a 61.05 minutos. Se pudo observar la influencia de la longitud de la corriente principal, al obtenerse tiempos más cortos de respuesta.

Caracterización hidrológica de los sistemas lama-bordo

Los datos de la caracterización hidrológica de los SLB se muestran en el Cuadro 2. A continuación se describe el comportamiento de los parámetros en el sistema.

Índice topográfico de humedad

Los valores oscilaron entre 7.87 y 10.06 y muestran las áreas más propensas a inundaciones, a partir de la cuantificación del relieve local (Pourali et al., 2014). Los valores altos denotan las líneas de drenaje (Różycka et al., 2017) que es donde se establecen los SLB al existir menor pendiente, lo que favorece la acumulación de humedad; por otra parte, ubica las áreas propensas al deslizamiento de tierras (Różycka et al., 2017) que son las que aportan sedimentos al sistema.

Índice de potencia de flujo

Los valores fluctuaron entre 22.37 y 1057.65 que indican desprendimiento de partículas por efecto de la acumulación y velocidad del flujo (Bannari et al., 2017), donde la energía del agua de escurrimiento mueve la capa superficial del suelo. Los valores bajos indican deposición potencial de los sedimentos y son característicos de la parte baja de las cuencas y el canal principal, mientras que los valores altos muestran mayor riesgo de erosión (Abu El-Magd et al., 2021). Para el SLB, los valores más altos se ubicaron en sus laterales (áreas de escurrimiento), que tienen mayor pendiente, lo cual colabora a que exista mayor aceleración en las corrientes que aportan sedimentos y agua a las terrazas.

Índice de transporte de sedimentos

Los valores oscilaron de 1.70 a 21.45, los cuales muestran la capacidad de transporte y acumulación de sedimentos y su distribución espacial (Ahmad et al., 2019). Los valores más altos observados en el SLB se ubicaron en sus laterales (escurrimientos laterales) y los menores en las lamas. Esto coincide con lo mencionado por Bannari et al. (2017), quienes indican que las partes bajas son propensas a inundaciones y es donde se depositan las partículas transportadas; sus valores bajos reflejan lenta movilidad y acumulación de sedimentos. En general, el sistema no se ve afectado por este índice, pero sí los laterales que por su pendiente son altamente susceptibles; al igual que en el IPF, la pendiente es el factor que afecta estas áreas.

where local materials are used for their construction. On the other hand, the hydrological indexes allow the detection of areas of moisture accumulation and those most prone to erosion that will contribute to the system over time.

Calibration and Validation of the Model for Soil Volume Estimation

The model, constructed through backward stepwise regression, initially involved 11 variables from the first 17 sites (Tables 1 and 2). It was then reduced to parameters A, Pe, TWI, and STI, which, according to the analysis, are directly related to the captured sediment volume. The importance of this model lies in demonstrating the potential of LBS in storing soil particles and explores its impact on the soil erosion problem.

Table 3 shows the regression analysis presenting coefficients for each parameter, all of which are statistically significant ($P < 0.01$). These coefficients facilitated the development of the predictive model to estimate Sv in the LBS of the region of Mixteca Alta, Oaxaca:

$$Sv = 2716854.49 + 257920.43 * A - 98429.14 * Pe - 266848.94 * TMI + 43620.51 * STI$$

Using the parameter values of the micro-watershed area (A), main stream slope (Pe), topographic Wetness Index (TWI), and sediment transport index (STI), 85 % of the observed variability in accumulated sediment volume is explained ($R^2 = 0.8502$), with a P-value of 6.894E-05. Therefore, the estimation of sediment volume in the LBS is considered reliable.

To test the above results, the model was validated with data from 10 independent sites (18-27 from Tables 1 and 2). The simple linear regression analysis of the observed and predicted cumulative sediment volume

Si bien, el análisis morfométrico permite la priorización y ubicación de los lugares donde es necesario implementar obras de conservación de suelo y agua, en las microcuencas de estudio ya existen los SLB que han coadyuvado a la retención de suelo y humedad con fines agrícolas y donde se usan materiales locales para su construcción. Por su parte, los índices hidrológicos permiten la detección de áreas de acumulación de humedad y las más propensas a la erosión que contribuirán al sistema a través del tiempo.

Calibración y validación del modelo para la estimación del volumen del suelo

El modelo construido a partir de la regresión lineal múltiple (*backward stepwise*), donde inicialmente se usaron 11 variables de los primeros 17 sitios (Cuadros 1 y 2), se redujo a los parámetros A, Pe, ITH e ITS que, acorde con el análisis, son los que tienen relación directa sobre el volumen de sedimento captado. La importancia de este modelo recae en mostrar la potencialidad del SLB en el almacenamiento de partículas de suelo y en qué medida contribuye al problema de erosión.

El Cuadro 3 muestra el análisis de regresión donde se observan los coeficientes para cada parámetro, todos estadísticamente significativos ($P < 0.01$). Estos permitieron la obtención del modelo predictivo para estimar Vs en los SLB de la región Mixteca Alta de Oaxaca:

$$Vs = 2716854.49 + 257920.43 * A - 98429.14 * Pe - 266848.94 * ITH + 43620.51 * ITS$$

Con el uso de los valores de los parámetros de área de la microcuenca (A), pendiente de la corriente principal (Pe), índice topográfico de humedad (ITH) e índice de transporte de sedimentos (ITS), se explica 85 % de la variabilidad observada en el volumen de sedimentos (Vs) acumulados ($R^2 = 0.8502$), con un valor $P = 6.894E-05$; por lo tanto, la estimación del volumen de los sedimentos en los SLB es confiable.

Table 3. Multiple linear regression analysis of morphometric parameters and hydrological indexes of lama-bordo systems in the Mixteca Alta region of Oaxaca.

Cuadro 3. Análisis de regresión lineal múltiple de los parámetros morfométricos e índices hidrológicos de los sistemas lama-bordo en la región Mixteca Alta de Oaxaca.

| Parameters/ Parámetros | Coefficients/ Coeficientes | Standard error/ Error estándar | t | p> t |
|---------------------------|-------------------------------|-----------------------------------|--------|-------------|
| Intercept/Intercepto | 2716855 | 698801 | 3.888 | 0.00216** |
| Area/Área | 257920 | 35727 | 7.219 | 1.06E-05*** |
| Pe | -98429 | 19532 | -5.039 | 0.00029*** |
| TWI/ITH | -266849 | 77505 | -3.443 | 0.00487** |
| STI/ITS | 43621 | 13054 | 3.342 | 0.00587** |

Pe = main stream slope, TWI = topographic wetness index, STI = sediment transport index. $R^2 = 0.8502$, $P = 6.894E-05$.

Pe = pendiente de la corriente principal, ITH = índice topográfico de humedad, ITS = índice de transporte de sedimentos. $R^2 = 0.8502$, $P = 6.894E-05$.

can be seen in Table 4, with a P value = 5.32E-05 proving to be statistically significant.

Figure 3 shows the linear regression with $R^2 = 0.883$, indicating a good fit of the model and demonstrating certainty in its subsequent use for sediment volume estimation in the LBS.

The parameters included in the predictive model (A, Pe, TWI, and STI) turned out to be a combination of variables that allowed the physical and hydrological

Para comprobar lo anterior, el modelo se validó con datos de 10 sitios (18-27 de los Cuadros 1 y 2). El análisis de regresión lineal simple del volumen de sedimento acumulado observado y predicho se puede ver en el Cuadro 4, con un valor $P = 5.32E-05$ que demuestra ser estadísticamente significativo.

La Figura 3 muestra la regresión lineal donde se obtuvo $R^2 = 0.883$ que indica un buen ajuste del modelo y demuestra certidumbre en su uso posterior para la estimación de volumen de sedimentos en los SLB.

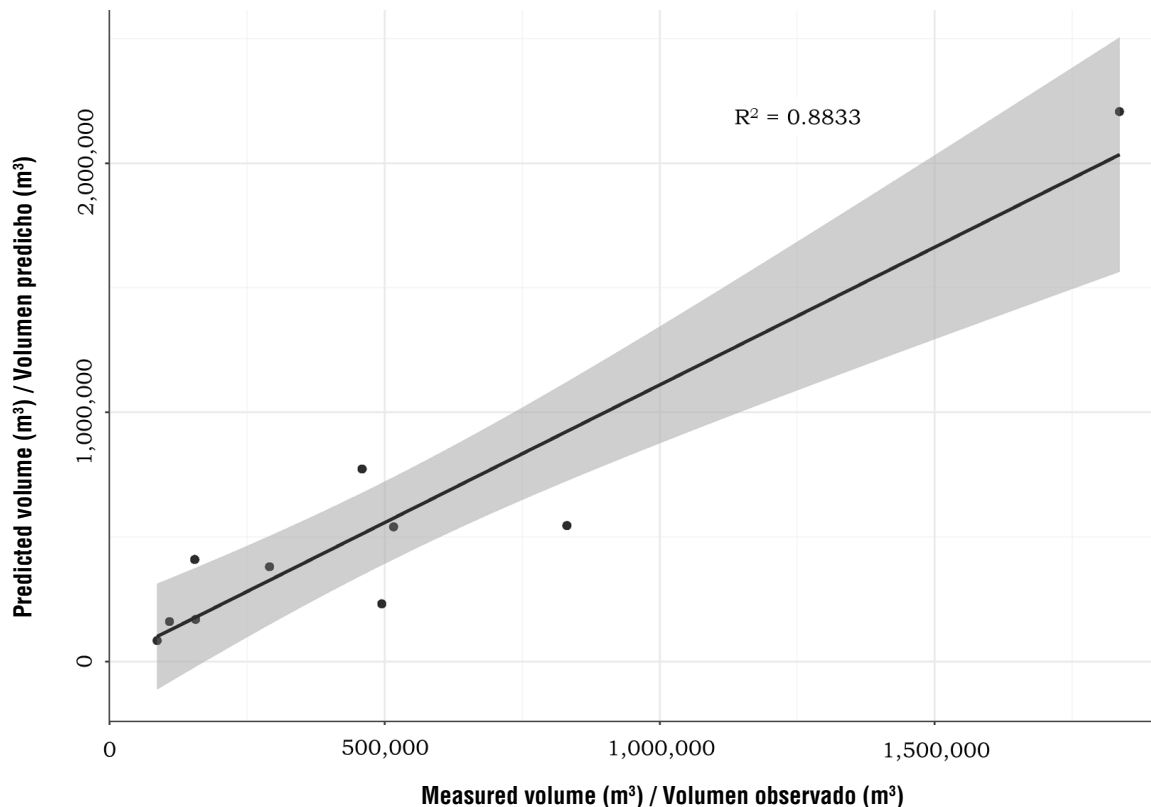


Figure 3. Regression of measured and predicted sediment volume for model validation.

Figura 3. Regresión del volumen de sedimentos observado y predicho para la validación del modelo.

Table 4. Simple linear regression analysis for validation of sediment volume estimation model ($R^2 = 0.8833$) in the lama-bordo systems.

Cuadro 4. Análisis de regresión lineal simple para validación del modelo de estimación del volumen de sedimentos ($R^2 = 0.8833$) en los sistemas lama-bordo.

| Parameters/ Parámetros | Coefficient/ Coeficiente | Standard error/ Error estándar | t | p> t |
|---------------------------------------|-----------------------------|-----------------------------------|-------|-------------|
| Intercept/ Intercepto | 4973.946 | 99762.395 | 0.050 | 0.961 |
| Measured volume/ Volumen observado | 1.105 | 0.142 | 7.782 | 5.32E-05*** |

characterization of LBS, because they are formed in micro-watersheds with high slopes and are established in the lower parts, where sediment deposition is favored. The slope has a greater impact on sediment accumulation in LBS as it influences Pe, TWI, and STI. This is because it is one of the factors determining geomorphic activity (Guerra et al., 2017), closely related to soil erosion processes (Manyevere et al., 2016).

The involvement of STI and TWI in the model is interesting. The former has a positive effect, demonstrating spatial sediment transport capacity (Bannari et al., 2017), with higher values on the sides of the LBS, indicating soil particle contribution to the systems. In the case of TWI, its relationship is negative with sediment accumulation; higher TWI values are within the LBS, where there is less slope, preventing sediment loss and promoting moisture accumulation.

This is where morphometric analysis provides an understanding of the drainage watershed hydrology, and hydrological indexes help identify areas prone to flash floods and soil erosion. This combined approach provides a tool for comprehending and determining sediment accumulation, erosion, and the zoning of flash floods, as mentioned by Abu El-Magd et al. (2021).

A combination of parameters supports the formation of the sites where LBS are located. Additionally, local farmers construct and maintain the containing walls using family labor and locally sourced materials, keeping costs low and making it accessible. These systems are implemented on a small scale; at larger scales, it would be necessary to consider different materials, labor, and machinery.

The LBS have played a crucial role in maintaining the system in balance for many years by retaining sediments, they prevent their loss and facilitate deposition in the lower parts of micro-watersheds. This alteration in the landscape proves beneficial for land-use changes, particularly in integrating agricultural components and ensuring self-sufficiency in food production.

Conclusions

Morphometric parameters and hydrological indexes were employed to characterize the conditions that facilitate the development of lama-bordo systems. These systems hold significant importance in the Mixteca region of Oaxaca, Mexico, where they are established within natural watercourses for erosion control, sediment retention, and moisture storage, conditions crucial for the local agriculture's development. The obtained model provides a reliable estimate of sediment volume storage using geographic information systems

Los parámetros que integran el modelo predictivo (A, Pe, ITH e ITS) resultaron ser una combinación de variables que permitieron la caracterización física e hidrológica de los SLB, puesto que se forman en microcuencas con pendientes altas y se establecen en las partes bajas, donde se favorece la deposición de sedimentos. La pendiente tiene mayor impacto en la acumulación de sedimentos en los SLB al intervenir en Pe, ITH y ITS. Esto se debe a que es uno de los factores que determinan la actividad geomórfica (Guerra et al., 2017), debido a su relación estrecha con el proceso de erosión del suelo (Manyevere et al., 2016).

Resulta interesante la forma en que intervienen el ITS y el ITH en el modelo. El primero afecta de manera positiva y muestra la capacidad de transporte de sedimentos de forma espacial (Bannari et al., 2017), donde los laterales del SLB muestran los valores más altos, lo cual indica que aporta partículas de suelo hacia los sistemas. Para el caso del ITH, su relación es negativa con la acumulación de sedimentos; los valores más altos de este índice están dentro del SLB, donde existe menos pendiente y esto evita la pérdida de sedimentos y la acumulación de humedad.

En este punto es donde la visión morfométrica permite la comprensión de la hidrología de la cuenca de drenaje y los índices hidrológicos ayudan a identificar las zonas susceptibles de inundaciones repentinas y propensas a la erosión. Este enfoque combinado proporciona un recurso para la comprensión y determinación de la acumulación de sedimentos, la erosión y la zonificación de inundaciones repentinas como lo mencionan Abu El-Magd et al. (2021).

Una conjunción de parámetros favorece la formación de los sitios en los que se ubican los SLB; además, los campesinos construyen y dan mantenimiento a los muros con mano de obra familiar y utilizan materiales locales, lo cual permite que los costos no se eleven y sea accesible. Estos sistemas se encuentran en pequeña escala que, a escalas superiores, sería necesario considerar otro tipo de materiales, mano de obra y maquinaria.

Los bordos han ayudado durante muchos años a mantener el sistema en equilibrio, pues con la retención de sedimentos, estos no se pierden y solo se depositan en las partes bajas de las microcuencas donde modifican el paisaje y benefician el cambio de uso de suelo, al integrar el componente agrícola y proporcionar autoabastecimiento de alimentos.

Conclusiones

Los parámetros morfométricos y los índices hidrológicos permitieron caracterizar las condiciones que propician

and equations incorporating morphometric parameters (micro-watershed area and main channel slope) and hydrological indexes (topographic wetness index and sediment transport index). The model accounted for 85 % of the observed variability, indicating that the estimation of sediment volume accumulated in lama-bordo systems is reliable and potentially applicable to sites with similar characteristics to those in this study.

Acknowledgments

The first author thanks CONACyT for the doctoral scholarship (705649) awarded to support the completion of this research.

End of English version

References / Referencias

- Abu El-Magd, S. A., Orabi, H. O., Ali, S. A., Parvin, F., & Pham, Q. B. (2021). An integrated approach for evaluating the flash flood risk and potential erosion using the hydrologic indices and morpho-tectonic parameters. *Environmental Earth Sciences*, 80(20), 1–17. <https://doi.org/10.1007/s12665-021-10013-0>
- Ahmad, I., Dar, M. A., Teke, A. H., Gebre, T., Gadissa, E., & Tolosa, A. T. (2019). Application of hydrological indices for erosion hazard mapping using Spatial Analyst tool. *Environmental Monitoring and Assessment*, 191(8), 1–16. <https://doi.org/10.1007/s10661-019-7614-x>
- Balasubramani, K., Gomathi, M., Bhaskaran, G., & Kumaraswamy, K. (2019). GIS-based spatial multi-criteria approach for characterization and prioritization of micro-watersheds: a case study of semi-arid watershed, South India. *Applied Geomatics*, 11(3), 289–307. <https://doi.org/10.1007/s12518-019-00261-y>
- Bannari, A., Ghadeer, A. El-Battay, A., Hameed, N. A., & Rouai, M. (2017). Detection of areas associated with flash floods and erosion caused by rainfall storm using topographic attributes, hydrologic indices, and GIS. In S. Pirasteh, & J. Li (Eds.), *Global changes and natural disaster management: Geo-information technologies* (pp. 155–174). Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-319-51844-2_13
- Beven, K., & Kirkby, M. (1979). A physically based, variable contributing area model of basin hydrology. *Hydrological Sciences Journal*, 24(1), 43–69. <https://doi.org/10.1080/02626667909491834>
- Bocco, G., Solís, B., Orozco, Q., & Ortega, A. (2019). La agricultura de terrazas en la adaptación a la variabilidad climática en la Mixteca Alta, Oaxaca, México. *Journal of Latin American Geography*, 18(1), 141–168. <https://doi.org/10.1353/lag.2019.0006>
- Campos, D. (1992). *Procesos del ciclo hidrológico*. Editorial Universitaria Potosina.
- Chandniha, S. K., & Kansal, M. L. (2017). Prioritization of sub-watersheds based on morphometric analysis using geospatial technique in Piperiya watershed, India. *Applied Water Science*, 7(1), 329–338. <https://doi.org/10.1007/s13201-014-0248-9>

la formación de los sistemas lama-bordo. Estos tienen importancia alta en la región Mixteca de Oaxaca, México, donde se establecen dentro de los cauces naturales para el control de la erosión, la retención de sedimentos y el almacenamiento de humedad, las cuales son condiciones útiles para el desarrollo de la agricultura local. El modelo obtenido hace una estimación confiable del volumen de sedimento almacenado, mediante un sistema de información geográfica y la aplicación de ecuaciones que consideran parámetros morfométricos (área de la microcuenca y pendiente de la corriente principal) e índices hidrológicos (índice topográfico de humedad e índice de transporte de sedimentos). El modelo explicó 85 % de la variabilidad observada; por tanto, la estimación del volumen de sedimentos acumulados en los sistemas lama bordo es confiable y puede ser replicable en sitios con características similares a los de este estudio.

Agradecimientos

La primera autora agradece al CONACyT por la beca doctoral (705649) otorgada para la realización de la presente investigación.

Fin de la versión en español

- García, E. (2004). *Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen*. Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geografía. <http://www.publicaciones.igg.unam.mx/index.php/ig/catalog/view/83/82/251-1>
- Guerra, A. J. T., Fullen, M. A., Jorge, M. C. O., Bezerra, J. F. R., & Shokr, M. S. (2017). Slope processes, mass movement and soil erosion: A review. *Pedosphere*, 27(1), 27–41. [https://doi.org/10.1016/S1002-0160\(17\)60294-7](https://doi.org/10.1016/S1002-0160(17)60294-7)
- Horton, R. (1932). Drainage basin characteristics. *Transactions, American Geophysical Union*, 13(3), 350–361. <https://doi.org/10.1029/TR013i001p00350>
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). (2001). *Conjunto de datos vectoriales fisiográficos (Shape)*. Continuo Nacional Serie I. Escala 1:1,000,000. <https://www.inegi.org.mx/app/biblioteca/ficha.html?upc=702825267575>
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). (2005). *Conjunto de datos edafológicos (Shape)*. Serie I. Escala 1:1,000,000. <https://www.inegi.org.mx/app/biblioteca/ficha.html?upc=702825267636>
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). (2010). *Red hidrográfica 2.0 (Shape)*. Escala 1:50,000. https://antares.inegi.org.mx/analisis/red_hidro/siatl/
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). (2013). *Continuo de elevaciones mexicano 3.0 (Raster)*. 15 m * 15 m. <https://www.inegi.org.mx/app/geo2/elevacionesmex/>
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). (2014). *Conjunto de datos de erosión del suelo (Shape)*. Escala 1:250,000. <https://www.inegi.org.mx/app/biblioteca/ficha.html?upc=702825004223>
- Kandekar, V. U., Gavit, B. K., Atre, A. A., Bansod, R. B., & Nimbalkar, C. A. (2021). Morphometric analysis of Agadgaon watershed

- using remote sensing and geographic information system. *Journal of Pharmacognosy and Phytochemistry*, 10(2), 450–460. <https://doi.org/10.22271/phyto.2021.v10.i2f.13839>
- Kaufmann, I., Kaufmann, A., Garcia, S., & Alves, T. (2017). Performance of methods for estimating the time of concentration in a watershed of a tropical region. *Hydrological Sciences Journal*, 62(14), 2406–2414. <https://doi.org/10.1080/02626667.2017.1384549>
- Kumar, S., & Chaudhary, B. S. (2016). GIS applications in morphometric analysis of Koshalya-Jhajhara watershed in northwestern India. *Journal of the Geological Society of India*, 88(5), 585–592. <https://doi.org/10.1007/s12594-016-0524-4>
- Kusre, B. C. (2016). Morphometric analysis of Diyung watershed in northeast India using GIS technique for flood management. *Journal of the Geological Society of India*, 87(3), 361–369. <https://doi.org/10.1007/s12594-016-0403-z>
- Leigh, D. S., Kowalewski, S. A., & Holdridge, G. (2013). 3400 years of agricultural engineering in Mesoamerica: lama-bordos of the Mixteca Alta, Oaxaca, México. *Journal of Archaeological Science*, 40(11), 4107–4011. <https://doi.org/10.1016/j.jas.2013.05.009>
- López, A., & Fernández, D. S. (2021). Watershed prioritization using morphometric analysis and vegetation index: a case study of Huehuetan river sub-basin, Mexico. *Arabian Journal of Geosciences*, 14(8), 1–21. <https://doi.org/10.1007/s12517-021-08212-x>
- Malik, A., Kumar, A., & Kandpal, H. (2019). Morphometric analysis and prioritization of sub-watersheds in a hilly watershed using weighted sum approach. *Arabian Journal of Geosciences*, 12(4), 1–12. <https://doi.org/10.1007/s12517-019-4310-7>
- Manyevere, A., Muchaonyerwa, P., Mnkeni, P. N. S., & Laker, M. C. (2016). Examination of soil and slope factors as erosion controlling variables under varying climatic conditions. *CATENA*, 147, 245–257. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2016.06.035>
- Méndez-Gutiérrez, A., Corral-Rivas, S., Nájera-Luna, J. A., Cruz-Cobos, F., & Pompa-García, M. (2021). Análisis morfométrico de la cuenca El Salto, Durango, México. *Terra Latinoamericana*, 39, 1–11. <https://doi.org/10.28940/terra.v39i0.641>
- Miller, V. (1953). *A quantitative geomorphic study of drainage basin characteristics in the Clinch Mountain Area, Virginia and Tennessee. Project NR 389-402, Technical Report 3, Columbia University. Department of Geology, New York.*
- Moore, I., Gessler, P., Nielsen, N., & Peterson, G. (1993). Soil attribute prediction using terrain analysis. *Soil Science Society of America Journal*, 57(2), 443–452. <https://doi.org/10.2136/sssaj1993.03615995005700020026x>
- Moore, I., Grayson, R. & Ladson, A. (1991). Digital terrain modelling: a review of hydrological, geomorphological, and biological applications. *Hydrological Processes*, 5(1), 3–30. <https://doi.org/10.1002/hyp.3360050103>
- Palacio, J. L., Rosado, E., Ramírez, X., Oropeza, O., Cram, S., Ortiz, M. A., Figueroa, J. M., & Fernández de Castro, G. (2016). Erosion, culture and geoheritage; the case of Santo Domingo Yanhuatlán, Oaxaca, México. *Geoheritage*, 8(4), 359–369. <https://doi.org/10.1007/s12371-016-0175-2>
- Parupalli, S., Kumari, K., & Ganapuram, S. (2019). Assessment and planning for integrated river basin management using remote sensing, SWAT model and morphometric analysis (case study: Kaddam river basin, India). *Geocarto International*, 34(12), 1332–1362. <https://doi.org/10.1080/10106049.2018.1489420>
- Pérez, I. Y., Gardezi, A. K., Fernández, D. S., Escalona, M. J., & Haro, G. (2019). Analysis of ecosystem services in the Oaxacan Mixtec region (Tiltepec watershed). *International Journal Environmental & Agriculture Research*, 5(8), 1–12. <https://doi.org/10.5281/zenodo.3383012>
- Pérez Sánchez, J. M. (2019). Agricultural terraces in Mexico. In M. Varotto, L. Bonardi, & P. Tarolli (Eds.), *World terraced landscapes: History, environment, quality of life* (pp. 159–176). Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-319-96815-5_10
- Pérez, V. (2016). Terrace agriculture in the Mixteca Alta region, Oaxaca, México: ethnographic and archeological insights on terrace construction and labor organization. *Culture, Agriculture, Food and Environment*, 38(1), 18–27. <https://doi.org/10.1111/cuag.12062>
- Pérez, V., & Anderson, K. (2013). Terracing in the Mixteca Alta, Mexico: Cycles of resilience of an ancient land-use strategy. *Human Ecology*, 41(3), 335–349. doi: 10.1007/s10745-013-9578-8
- Pourali, S. H., Arrowsmith, C., Chrisman, N., Matkan, A. A., & Mitchell, D. (2014). Topography wetness index application in Flood-Risk-Based land use planning. *Applied Spatial Analysis and Policy*, 9(1), 39–54. <https://doi.org/10.1007/s12061-014-9130-2>
- Prabhakar, A. K., Singh, K. K., Lohani, A. K., & Chandniha, S. K. (2019). Study of Champua watershed for management of resources by using morphometric analysis and satellite imagery. *Applied Water Science*, 9(5), 1–16. <https://doi.org/10.1007/s13201-019-1003-z>
- QGIS (2022). *QGIS Geographic Information System. Un sistema de información geográfica libre y de código abierto.* <http://www.qgis.org>
- R Core Team (2021). *R: A language and environment for statistical computing.* R Foundation for Statistical Computing. URL <https://R-project.org/>
- Raduła, M., Szymura, T., & Szymura, M. (2018). Topographic wetness index explains soil moisture better than bioindication with Ellenberg's indicator values. *Ecological Indicators*, 85, 172–179. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2017.10.011>
- Rai, P., Chandel, R., Mishra, V., & Singh, P. (2018). Hydrological inferences through morphometric analysis of lower Kosi river basin of India for water resource management based on remote sensing data. *Applied Water Science*, 8, 15. <https://doi.org/10.1007/s13201-018-0660-7>
- Rajasekhar, M., Raju, G. S., & Raju, R. S. (2020). Morphometric analysis of the Jilledubanderu River Basin, Anantapur District, Andhra Pradesh, India, using geospatial technologies. *Groundwater for Sustainable Development*, 11, 100434. <https://doi.org/10.1016/j.gsd.2020.100434>
- Rawat, K. S., & Mishra, A. K. (2016). Evaluation of relief aspects morphometric parameters derived from different sources of DEMs and its effects over time of concentration of runoff (TC). *Earth Science Informatics*, 9(4), 409–424. <https://doi.org/10.1007/s12145-016-0261-7>
- Reyes, A., Martínez, M. R., Rubio, E., García, E., & Exebio, A. A. (2019). Impacto del sistema zanja bordo sobre la cobertura vegetal en pastizales de la región Mixteca, estado de Oaxaca. *Terra*

- Latinoamericana*, 37, 231–242. <https://doi.org/10.28940/terra.v37i3.327>
- Rivas, M., Rodríguez, B., & Palerm, J. (2008). El sistema de jollas una técnica de riego no convencional en la Mixteca. *Boletín del Archivo Histórico del Agua*, 13 (número especial), 6–16. <https://biblat.unam.mx/hevila/Boletindelarchivohistoricodelagua/2008/vol13/noesp/1.pdf>
- Różycka, M., Migoń, P., & Michniewicz, A. (2017). Topographic wetness index and terrain ruggedness Index in geomorphic characterization of landslide terrains on examples, from the Sudetes, SW Poland. *Zeitschrift für Geomorphologie*, 61(2), 61–80. https://doi.org/10.1127/zfg_suppl/2016/0328
- Ruengvirayudh, P., & Brooks, G. P. (2016). Comparing stepwise regression models to the best-subsets models, or, the art of stepwise. *General Linear Model Journal*, 42(1), 1–14. http://www.glmj.org/archives/articles/Pornchanok_v42n1.pdf
- Schumm, S. (1956). Evolution of drainage systems and slopes in Badlands at Perth Amboy, New Jersey. *Geological Society of America Bulletin*, 67(5), 597–646. [https://doi.org/10.1130/0016-7606\(1956\)67\[597:eodsas\]2.0.co;2](https://doi.org/10.1130/0016-7606(1956)67[597:eodsas]2.0.co;2)
- Shri, K., Sumeet, M., Renu, D., & Surjeet, S. (2015). Morphometric analysis of Sonar sub-basin using SRTM data and geographical information system (GIS). *African Journal of Agricultural Research*, 10(12), 1401–1406. <https://doi.org/10.5897/AJAR2013.7907>
- Singh, P., Gupta, A., & Singh, M. (2014). Hydrological inferences from watersheds analysis for water resource management using remote sensing and GIS techniques. *The Egyptian Journal of remote Sensing and Space Science*, 17(2), 111–121. <https://doi.org/10.1016/j.ejrs.2014.09.003>
- Soni, S. (2017). Assessment of morphometric characteristics of Chakrar watershed in Madhya Pradesh India using geospatial technique. *Applied Water Science*, 7(5), 2089–2102. <https://doi.org/10.1007/s13201-016-0395-2>
- Spores, R. (1969). Settlement, farming technology, and environment in the Nochixtlan Valley. *Science*, 166(3905), 557–569. <https://doi.org/10.1126/science.166.3905.557>
- Sridhar, P., & Ganapuram, S. (2021). Morphometric analysis using fuzzy analytical hierarchy process (FAHP) and geographic information systems (GIS) for the prioritization of watersheds. *Arabian Journal Geosciences*, 14(236). <https://doi.org/10.1007/s12517-021-06539-z>
- Strahler, A. N. (1964). Quantitative geomorphology of drainage basin and channel networks. In V. T. Chow (Ed.), *Handbook of applied hydrology* (pp. 39–76). McGraw Hill Book Company.
- Sujatha, E. R., Selvakuma, R., Rajasimman, U. A. B., & Rajamanickam, G. V. (2015). Morphometric analysis of sub-watershed in parts of Western Ghats, South India using ASTER DEM. *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, 6(4), 326–341. <https://doi.org/10.1080/19475705.2013.845114>
- Sukristiyanti, S., Maria, R., & Lestiana, H. (2017). Watershed-based morphometric analysis: a review. *IOP Conference Series: Earth Environmental Science*, 118(1), 012028. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/118/1/012028>
- Toledo, M. L., Fernández, D. S., Martínez, M. R., Rubio, E., & García, J. L. (2018). Identificación de covariables ambientales que influyen en la formación de cárcavas en la Mixteca Oaxaqueña. *Terra Latinoamericana*, 36(4), 323–335. <https://doi.org/10.28940/terra.v36i4.329>