

Identificación de Áreas Críticas por Erosión Hídrica en la Cuenca del Río Tejalpa, en el Centro de México Identification of Hotspot Areas Due to Water Erosion in the Tejalpa River Basin, Central Mexico

Isabel Reyes-Avilés^{1†}, Erasto Domingo Sotelo-Ruiz² y Salvador Adame-Martínez³

¹ Universidad Autónoma del Estado de México, Facultad de Planeación Urbana y Regional, Cátedras COMECyT, ³ Profesor-Investigador. Calle Mariano Matamoros casi esquina Paseo Toluca s/n, Colonia Universidad. 50130 Toluca, Estado de México, México; (I.R.A.), (S.A.M.).

[†] Autora para correspondencia: isabelreyes.aviles@gmail.com

² Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias. Carretera Toluca-Zitácuaro km 4.5, Vialidad Adolfo López Mateos, Col. Los Ángeles. 51350 Zinacantepec, Estado de México, México; (E.D.S.R.).

RESUMEN

La cuenca del río Tejalpa en el centro de México, tiene una extensión de 21 748 ha. Se origina en las laderas del Área de Protección de Flora y Fauna Nevado de Toluca (APFFNT) y finaliza en el Parque Estatal Sierra Morelos (PESM), las cuales son áreas naturales protegidas representativas a nivel estatal y ayudan a mejorar las condiciones ambientales y paisajísticas de la ciudad de Toluca, Estado de México. La cuenca en estudio ha estado sometida a un proceso de urbanización por ser parte de la zona metropolitana de Toluca, lo que ha provocado erosión y pérdida del paisaje. El objetivo de este estudio fue identificar las áreas críticas de erosión hídrica del suelo en sus formas laminar y canalillos a través de la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo Revisada (RUSLE) en el marco de un Sistema de Información Geográfica. La metodología RUSLE se basa en los siguientes factores; erosividad de la lluvia (R), erodabilidad del suelo (K), longitud y grado de pendiente (LS), manejo de cobertura (C) y prácticas de conservación (P). Los resultados muestran que el 41% de la superficie de la cuenca tiene una erosión moderada de 10 a 50 Mg ha⁻¹ año⁻¹, lo cual corresponde a una superficie de 9004 ha, mientras que las zonas con erosión crítica >200 Mg ha⁻¹ año⁻¹, representan 7.14% de la cuenca con una extensión de 1553 ha, que se traduce en suelos con escasa protección vegetal, áreas con pendientes abruptas y fuertes precipitaciones, cuyas implicaciones son bajo rendimiento en la producción agrícola, azolve de los cuerpos de agua e inundaciones en las áreas urbanas.

Palabras clave: RUSLE, suelo, usos de suelo.

SUMMARY

The Tejalpa river basin has an extension of 21 748 ha. It originates from the hillsides Area de Protección de Flora y Fauna Nevado de Toluca (APFFNT), and ends in the Parque Estatal Sierra Morelos (PESM), both of are representative protected natural areas at the state level and that helps improve environmental and landscape conditions in Toluca. The Tejalpa river basin has been subjected to an urbanization process, being part of the Toluca metropolitan area, which has caused erosion and landscape loss. The objective of the study was to identify the critical areas of soil water erosion (in its sheet or rill forms), through the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE). The Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE) methodology is based on the following factors: rainfall erosivity (R), soil erodibility (K), length and grade of slope (LS), cover management (C) and conservation practices (P). The results showed that 41% of the basin has a moderate erosion 10 to 50 Mg ha⁻¹ year⁻¹ which is equivalent to an area of 9004 ha, while the areas with critical erosion >200 Mg ha⁻¹ year⁻¹ represent 7.14% of the total basin with an extension of 1 553 ha,



Cita recomendada:

Reyes-Avilés, I., Sotelo-Ruiz, E. D., & Adame-Martínez, S. (2024). Identificación de Áreas Críticas por Erosión Hídrica en la Cuenca del Río Tejalpa, en el Centro de México. *Terra Latinoamericana*, 42, 1-15. e1827. <https://doi.org/10.28940/terra.v42i0.1827>

Recibido: 4 de octubre de 2023.
Aceptado: 1 de agosto de 2024.
Artículo. Volumen 42.
Agosto de 2024.

Editor de Sección:
Dr. Luis G. Hernandez Montiel

Editor Técnico:
Dr. Gerardo Cruz Flores



Copyright: © 2024 by the authors.
Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY NC ND) License (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

which translates into the presence of soils with little plant protection, areas with steep slopes, heavy rainfall; these imply low yields in agricultural production, silting of bodies of water and flooding in urban areas.

Index words: *RUSLE, soils, land use.*

INTRODUCCIÓN

El suelo es vital para producir alimentos, mantener la estabilidad y el desarrollo de las economías (Amundson *et al.*, 2015; Keesstra *et al.*, 2016; Cotler, Corona y Galeana, 2020). Sin embargo, en la actualidad, la erosión hídrica es uno de los principales procesos de degradación del suelo y se ha convertido en una amenaza a la sustentabilidad alimentaria y ambiental en los ecosistemas del mundo (Pimentel y Kounang, 1998; Li *et al.*, 2022). El suelo, como recurso natural, necesita cerca de 300 años para formar una capa superficial de 25 mm bajo condiciones naturales sin disturbio de la vegetación (Hudson, 1982). Por lo que, en el proceso de degradación natural, se pierde de 0.1 a 1 Mg ha⁻¹ año⁻¹ de suelo y mediante erosión antropogénica, la pérdida de suelo es de 10 a 1000 veces mayor que la primera (Benchettouh, Kouri y Jebari, 2017).

La erosión hídrica es provocada por la energía liberada de las gotas de lluvia que golpean al suelo expuesto; la salpicadura de las gotas de lluvia y el escurrimiento superficial del suelo cuando alcanza la saturación, elimina la capa fina de suelo y provoca el desplazamiento de material, es decir, la erosión laminar, la cual es la forma de erosión predominante (Pimentel y Kounang, 1998). En este sentido, el efecto principal de la erosión hídrica sobre el suelo, se refleja en la alteración de la infiltración de agua (Fayas, Abeysingha, Nirmanee, Samaratunga y Mallawatantri, 2019; Mohammed *et al.*, 2020; Pimentel y Kounang, 1998), además, sedimenta los cauces y reservorios de agua e incrementa las inundaciones (Gürtekin y Gökçe, 2021). Por consiguiente, los agricultores requieren de mayor fertilización al suelo para obtener un mejor rendimiento (Mohammed *et al.*, 2020).

Según Panagos y Katsoyiannis (2019), a nivel mundial más del 20.01 × 10⁵ km² de suelo reflejan alto riesgo de erosión (>1000 Mg km⁻² año⁻¹), lo cual causaría pérdidas económicas significativas en perjuicio de la población. Por su parte, Arabameri *et al.* (2021) mencionan que la erosión anual del suelo ocasionara pérdidas cercanas a los 8 mil millones de dólares del PIB mundial.

En México, la erosión del suelo ocurre, debido a su relieve y conformación orográfica de once regiones montañosas (Gómez-Díaz y Villalobos, 2020). Dicha situación propicia que 65% del territorio cuente con pendientes mayores a 10% (Pando-Moreno, Gutiérrez, Maldonado, Palacio y Estrada, 2003). Derivado de lo anterior, se han realizado estudios de la erosión en el país, siendo uno de los más recientes el reportado por Bolaños-González *et al.* (2016), quienes indicaron que 76% del suelo de México posee un nivel de alteración por erosión, valorada como leve en 37.06%, moderado en 26.37%, fuerte en 5.79% y, con un grado de erosión extrema en 6.79%, siendo el Estado de México uno de los más afectados del país.

Valdivia *et al.* (2022) mencionaron que es importante comprender las fuerzas impulsoras que favorecen la erosión del suelo (tipo, uso de suelo y distribución de la precipitación), toda vez que es posible identificar más fácilmente las áreas propensas a la misma dentro de un paisaje y con ello abordar el problema de manera estratégica.

Para avanzar en este tema de estudio, se han utilizado modelos de evaluación de erosión de suelo, por mencionar algunos: Water Erosion Prediction Project (WEPP), Soil Erosion Model for Mediterranean Regions (SEMED), Areal Non-point Source Watershed Environment Response Simulation (ANSWERS), Limburg Soil Erosion Model (LISEM), y la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo Revisada (RUSLE), la cual es un método indirecto empleado para predecir el promedio anual de pérdida de suelo en sus formas laminar o de canalillos en cuencas agrícolas y forestales (Renard, Foster, Weesies, McCool y Yoder, 1997). Asimismo, es compatible con un Sistema de Información Geográfica (SIG) y eficaz para planificar la conservación del suelo en diferentes regiones del mundo, incluyendo Argelia (Benchettouh *et al.*, 2017), Turquía (Gürtekin y Gökçe, 2021) y México (Téllez, Aragón, Quentin y Delgado, 2009).

La ecuación RUSLE mantiene la estructura de su modelo anterior, es decir, la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo (Wischmeier y Smith, 1978), la diferencia es la incorporación de información de regiones no agrícolas y de montaña, esta última, es un factor que no puede ser ignorado en la erosión del suelo (Renard *et al.*, 1997; Wei, Liu, Zhang y Li, 2024). Es así como, RUSLE está compuesta por cinco factores: erosividad de la lluvia (R), erodabilidad del suelo (K), longitud y grado de pendiente (LS), manejo de cobertura (C) y prácticas de conservación (P). El objetivo del presente estudio fue identificar en la cuenca del río Tejalpa las áreas críticas de erosión hídrica del suelo en sus formas laminar o de canalillos a través de la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo Revisada.

MATERIALES Y MÉTODOS

Localización del Área de Estudio

La presente investigación se realizó en la cuenca del río Tejalpa, que se localiza en $19^{\circ} 7' 50''$ y $19^{\circ} 19' 10''$ N y $99^{\circ} 51' 50''$ y $99^{\circ} 40' 30''$ O en el centro de la República Mexicana, con una extensión de 21 748 ha (INEGI, 2023). La cuenca se origina en las laderas del Área de Protección de Flora y Fauna Nevado de Toluca (APFFNT) y termina en una porción del Parque Estatal Sierra Morelos (PESM). Sus elevaciones van desde los 2640 hasta los 4582 m de altitud. El cauce principal es el río Tejalpa, uno de los ríos tributarios del río Lerma (Figura 1).

La cuenca comprende parte de cuatro municipios pertenecientes al Estado de México: Zinacantepec, Toluca, Almoloya de Juárez y Temascaltepec. Zinacantepec tiene la mayor extensión territorial dentro de la cuenca, con 82% del total, en contra parte, Temascaltepec abarca sólo el 0.04% (Cuadro 1).

El área de estudio presenta clima templado con lluvias en verano. En la porción del APFFNT, el clima es semifrío a frío, con un porcentaje de precipitación invernal menor a 5%, el verano es largo, e isotermal, la temperatura más elevada es de 23°C , que se presenta antes del solsticio de verano (CONABIO, 2019). En la cuenca del río Tejalpa, la precipitación anual promedio es de 733.1 mm, con base en las normales climatológicas de 1951-2010 de la estación meteorológica Toluca. Las mayores precipitaciones se presentan en la parte del Nevado de Toluca y en San Francisco Oxtotilpan (SMN, 2010). Además, es parte de la región biogeográfica del Sistema Volcánico Transversal (SVT). De acuerdo con la carta geológica de INEGI (1980), la geología está conformada de la siguiente manera (Cuadro 2).

Con respecto a la edafología de la cuenca, las unidades de suelo más representativas son Feozem Háptico + Fluvisol Eutricto con una superficie de 10 030 ha, que corresponden al 46.12% del total del área de estudio (INEGI, 1980), (Cuadro 3).

Las principales formas de erosión hídrica presentes en la cuenca son; erosión laminar y en surcos. La Figura 2a muestra la erosión en canalillos y la figura 2b erosión laminar, presente en áreas de montaña, ambas con escasa cobertura vegetal.

Estimación de los Parámetros Fisiográficos de la Cuenca del Río Tejalpa

La estimación de los parámetros fisiográficos de la cuenca se realizó empleando el submódulo de parámetros de cuenca implementado en el módulo del ciclo del agua, del software TerrSet 2020, el cual requiere de entrada dos imágenes en formato raster (*.rst), el Modelo de Elevación Digital y el límite de la cuenca (Eastman, 2020).

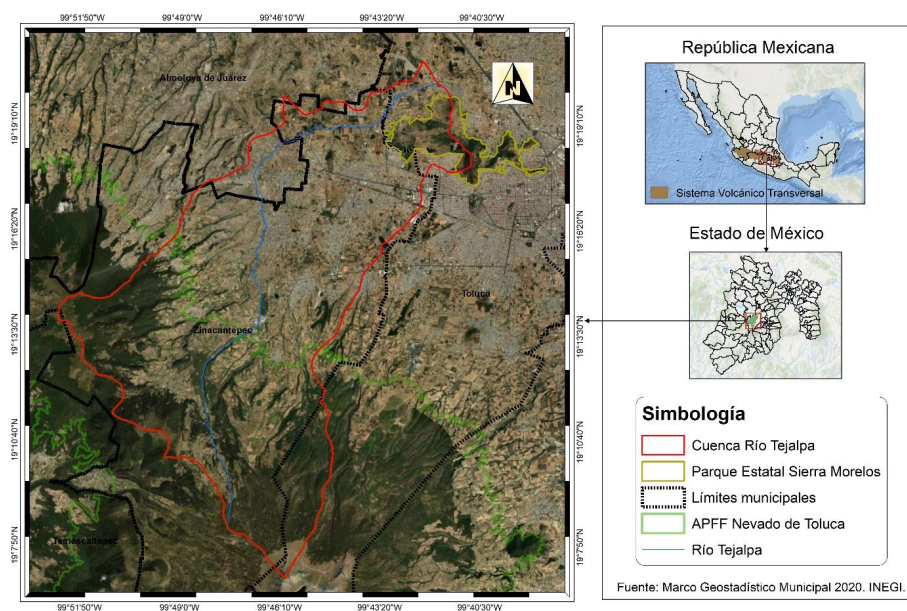


Figura 1. Ubicación geográfica de la cuenca del río Tejalpa.
Figure 1. Geographic location of the Tejalpa river basin.

Cuadro 1. Municipios que integran la cuenca del río Tejalpa.
Table 1. Municipalities that make up the Tejalpa river basin.

Municipio	Superficie	
	ha	%
Zinacantepec	17 997	82.75
Toluca	2678	12.31
Almoloya de Juárez	1064	4.90
Temascaltepec	9	0.04
Total	21 748	100

Fuente: Datos vectoriales (INEGI, 1980).
 Source: Vector data (INEGI, 1980).

Recopilación de Información Cartográfica

El Cuadro 4, presenta información obtenida del portal del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI) y del Servicio Meteorológico Nacional (SMN). El trabajo de campo consistió en el levantamiento de puntos con el empleo de un Sistema de Posicionamiento Global (GPS), principalmente con el fin de revisar y corroborar las áreas de erosividad, los usos y las coberturas de suelo.

Aplicación de la Ecuación RUSLE en la Cuenca del río Tejalpa

De acuerdo a Renard *et al.* (1997), la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo Revisada comprende cinco factores de acuerdo a la siguiente expresión:

$$A = (R)(K)(LS)(C)(P) \quad (1)$$

Donde: A = Pérdidas de suelo por unidad de área ($\text{Mg ha}^{-1} \text{año}^{-1}$); R = Factor de erosividad de la lluvia ($\text{MJ mm h}^{-1} \text{ha}^{-1} \text{año}^{-1}$); K = Factor de erodabilidad del suelo ($\text{Mg ha h ha}^{-1} \text{MJ}^{-1} \text{mm}^{-1}$); LS = Factor de longitud y grado de pendiente de la cuenca (adimensional); C = Factor manejo de coberturas (adimensional); P = Factor del método de control de erosión (adimensional).

Cuadro 2. Geología de la cuenca río Tejalpa.
Table 2. Geology of the Tejalpa river basin.

Tipo de roca	Entidad	Superficie	
		ha	%
Brecha Volcánica	Roca	7800	35.85
Aluvión	Suelo	5800	26.66
Extrusiva intermedia (APFFNT)	Roca	4000	18.40
Arenisca- Toba	Roca	3500	16.08
Andesita	Roca	457	2.15
Toba	Roca	105	0.47
Arenisca-conglomerado	Roca	47	0.21
Brecha	Roca	39	0.18
Total		21 748	100

Fuente: Datos de carta geológica (INEGI, 1980).
 Source: Geological map data (INEGI, 1980).

Cuadro 3. Unidades de suelo que integran la cuenca río Tejalpa.
Table 3. Soil units of the Tejalpa river basin.

Unidad de suelo	Superficie	
	ha	%
Feozem Háptico + Fluvisol Éutrico	10 030	46.12
Andosol Húmico + Andosol Ócrico + Leptosol	8607	39.58
Vertisol Pélico	1340	6.16
Andosol Ócrico + Feozem Háptico + Leptosol	954	4.39
Andosol Mólico + Feozem Háptico	432	1.99
Cambisol Cromico+Andosol Húmico	136	0.63
Litosol +Feozem Háptico	108	0.50
Planosol Molico + Húmico	58	0.27
Fluvisol Eutrico	49	0.23
Luvisol + Regosol Eutrico	20	0.09
Regosol Eutrico + Leptosol	14	0.06
Total	21 748	100

Factor R

El factor R fue determinado de las estaciones climatológicas dentro y fuera de la cuenca. Debido a la falta de instrumentos que midan la intensidad de la lluvia, se aplicó la ecuación de Figueroa-Sandoval (1991) quienes asociaron regiones con condiciones similares de lluvia en México, de las cuales se obtuvieron 14 regiones mediante un análisis de regresión lineal. Para el centro de México, la zona de estudio corresponde la región ocho (8) con la siguiente ecuación:

$$I = 1.9967X + 0.003270X^2 \quad (2)$$

Donde: I = intensidad de la lluvia; X = Precipitación media anual de la región (mm).



Figura 2. Indicadores visuales de la erosión del suelo en la cuenca del río Tejalpa: (a) Canalillos, (b) Laminar.
Figure 2. Visual indicators of soil erosion in the Tejalpa river basin: (a) Rill, (b) Sheet.

Cuadro 4. Información utilizada para la modelación de la Ecuación Universal de Pérdida de suelo de la cuenca del río Tejalpa.
Table 4. Information used in order to modeling of the Universal Soil Loss Equation in the Tejalpa river basin.

Factor	Tipo de dato	Formato	Fuente	Descripción
R	Datos de precipitación (mm)	Excel	SMN	Datos de normales de 16 estaciones climatológicas de 59 años (1951-2010).
K	Datos edafológicos (Unidad de suelo)	Shape	INEGI	Digitalización propia con base en cartas de INEGI. Escala 1:50 000 Claves: E14A37 y 14A47.
LS	Modelo de elevación digital	Raster	INEGI	Continuo de Elevaciones Mexicano 3.0. Resolución 15 m x 15 m.
C	Datos de uso del suelo	Shape	Base Map de ArcGIS 10.3 año 2022(Esri, 2022). Geoportal del Sistema Nacional sobre Biodiversidad	Digitalización propia con base en Base Map. Con fecha del julio-2022 Resolución 15 metros

Fuente: Elaboración propia (INEGI, 1980).
 Source: Own elaboration (INEGI, 1980).

Factor K

El factor K representa la susceptibilidad del suelo a ser removido y transportado por la lluvia y el escurrimiento, está influenciado por la textura del suelo (Fu, Chen y McCool, 2006). Cada unidad de suelo se georreferenció y se digitalizó de dos cartas Edafológicas adquiridas de la plataforma digital del INEGI con clave E14A37 y E14A47 a escala 1:50 000. La textura fue de acuerdo con la clasificación de la Comisión de Estudios del Territorio Nacional (CETENAL). El factor K, se calculó considerando las clases de erodabilidad de FAO (1980a).

Factor LS

El factor LS es el más importante para el modelo de erosión de suelos en áreas de montaña (Getu, Nagy y Addis, 2022), se determinó a través del Modelo de Elevación Digital y los módulos de exposición (aspect) y pendiente (slope) en ArcGIS. Para calcular el factor de longitud de la pendiente (L) se utilizó la ecuación 3:

$$L = \left(\frac{\lambda}{22.13} \right)^m \quad (3)$$

Donde: λ es la longitud de la pendiente en metros, m es un exponente con la modificación hecha por Foster, Meyer y Onstad (1977):

$$m = \frac{\beta}{(\beta + 1)} \quad (4)$$

Los valores de β para condiciones donde los suelos son moderadamente susceptibles a la erosión entre canalillos y en canalillos fueron calculados por McCool, Foster, Mutchler y Meyer (1989), utilizando la ecuación 5:

$$\beta = \frac{\frac{\text{sen}\theta}{0.0896}}{3.0(\text{sen}\theta)^{0.8} + 0.56} \quad (5)$$

Donde: θ es el ángulo de la pendiente. El valor de λ se obtuvo a partir de la metodología expuesta por Flores-López, Martínez, Oropeza, Mejía y López (2003):

$$\lambda = \frac{30}{\cos\theta} \quad (6)$$

Se utilizó el modelo de elevación digital de INEGI con una distancia entre píxeles de 30 m (de ahí viene el 30 de la ecuación 6), y el ángulo se obtuvo en ArcGIS 10.3 (Esri, 2022), con la extensión Spatial Analyst, herramienta Surface, opción slope; se le pide la pendiente en grados, lo cual genera un raster de pendiente en grados.

El factor inclinación de la pendiente (S), se calculó con las siguientes ecuaciones:

$$S = 13.8 \text{ Sen}\theta + 0.03, \text{ para } S < 9\% \quad (7)$$

$$S = 16.8 \text{ Sen}\theta - 0.50, \text{ si } S \geq 9\% \quad (8)$$

De acuerdo con Van-Zidam (1986), los mapas de morfo-conservación hacen énfasis en la clasificación de la pendiente, por ejemplo, la inclinación y la estabilidad. La inclinación de la pendiente es usada como atributo importante para el tipo y la tasa de erosión, así como para los movimientos en masa.

Factor C

El factor C representa la efectividad de las plantas como cubierta protectora del suelo frente a la energía de impacto de las gotas de lluvia y a la fuerza del flujo superficial (Hudson, 1982). El proceso para determinar el factor de cobertura del suelo C se digitalizó directamente de la imagen de satélite de Basemap de ArcGIS de julio de 2022 (Esri, 2022), se seleccionó dicho mes, debido a que, en esa época del año los colores de los tipos de cobertura vegetal están definidos por la temporada de lluvia. Además, mediante un conocimiento preciso de áreas que se visitaron para su verificación, se pudo identificar las coberturas al observar esa misma área en la imagen satelital. A partir de lo anterior, se digitalizaron seis coberturas de suelo, las cuales son las predominantes y representativas de la zona de estudio, a saber: área agrícola, bosque, área sin vegetación, cuerpo de agua, minas y área urbana (tejido urbano continuo y discontinuo, zonas comerciales e industriales, vías de comunicación, áreas verdes urbanas, instalaciones deportivas y recreativas). El valor del factor C se obtuvo de valores propuestos por USEPA (2005), donde el valor 1 es una cobertura de suelo desnudo (erosión) y el valor 0, proporciona una eficiente protección al suelo (cubiertas forestales), (Figura 3).

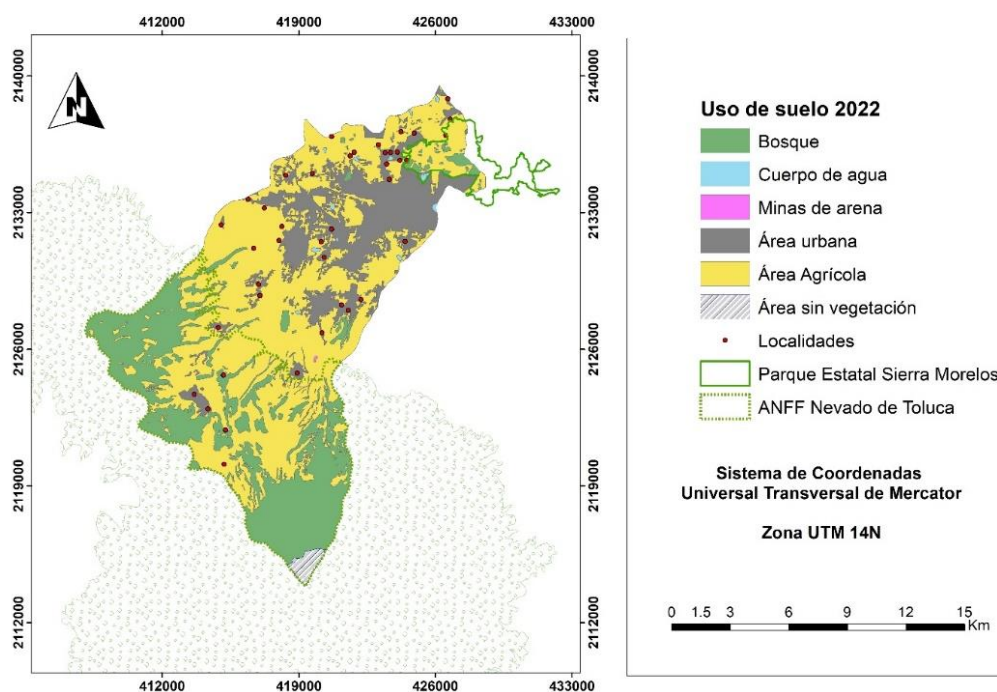


Figura 3. Distribución espacial de los usos de suelo (2022) en la Cuenca del río Tejalpa. Fuente: elaboración propia con información del Marco Estadístico Municipal 2020 de INEGI.

Figure 3. Spatial distribution of land uses (2022) in the Tejalpa river basin. Source: Own elaboration with information from the INEGI Municipal Geostatistical framework 2020.

Factor P

El factor P representa el efecto que tienen las prácticas de tipo mecánicas, por ejemplo: cultivos en contorno, fajas y terrazas en el proceso de erosión hídrica. Se obtiene a través de tablas de USEPA, (2005) y sus valores varían entre 0 y 1. Cuando no se realizan prácticas, P es igual a 1 (Renard *et al.*, 1997).

Para la aplicación de la ecuación RUSLE Se empleó del software ArcGIS 10.3., dentro del módulo álgebra de mapas donde se realizó la multiplicación de cada factor (Esri, 2022). La Figura 5, muestra los datos de salida de cada factor de la ecuación RUSLE para identificar las áreas críticas de erosión hídrica.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Con base a los resultados obtenidos de los parámetros fisiográficos de la cuenca (Cuadro 5), se determinó que el escurrimiento natural del agua se asocia a procesos erosivos y de sedimentación. Se considera que es una cuenca exorreica, debido a que, el río Tejalpa (río principal) desemboca en una corriente mayor, el cual es el río Lerma. Su elevación media ($E_m = 3011$ m de altitud), indica que tiene efectos sobre las variables climáticas y florísticas del paisaje, que inciden en el desarrollo de los suelos, el clima en la cuenca es generalmente frío y, por lo tanto, las velocidades de reacción en el suelo son bajas (Hudson, 1982), en consecuencia, el proceso de intemperismo y el desarrollo pedogenético es más tardado en dicho lugar. La pendiente media ($P_m = 10\%$) dejar ver que el relieve es inclinado, ocasionando que el proceso erosivo en la cuenca del río Tejalpa sea moderado y la velocidad de los escurrimientos se presenta de lento a medio. En algunas partes se acentúa la erosión porque está en función del uso y manejo que se le dé al suelo. El coeficiente de compacidad ($k_c = 2.39$) indica que la cuenca tiende a ser alargada y el valor de la relación circularidad ($R_{ci} = 0.18$) lo corrobora, originando que los escurrimientos se concentren más lentamente, disminuyendo la erosión hídrica en su cauce.

Con respecto a los resultados cartográficos de la aplicación de la ecuación RUSLE se presenta lo siguiente:

Factor R

En la cuenca del río Tejalpa, la cantidad de precipitación y su distribución espacial puede ser observado en la Figura 4 y Cuadro 6. El factor R fue dividido en dos clases mostrando; erosionabilidad alta ($7312.32 \text{ MJ mm h}^{-1} \text{ ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$) en la zona que corresponde al APFFNT y erosionabilidad baja ($3742.77 \text{ MJ mm h}^{-1} \text{ ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$) en la parte noroeste del PESM (Figura 5a).

Cuadro 5. Parámetros fisiográficos de la cuenca río Tejalpa.
Table 5. Physiographic parameters of the Tejalpa River basin.

Parámetro	Abreviación	Valor
Superficie de la cuenca		21 748 ha 217.48 km
Elevación media de la cuenca	E_m	3011 m de altitud.
Pendiente media de la cuenca	P_m	5.69°
Pendiente media de la cuenca	P_m	10.08%
Coeficiente de compacidad	K_c	2.39
Relación de circularidad	R_{ci}	0.18
Relación hipsométrica	R_h	2.9
Longitud del eje del río principal	Long	49.48 km
Longitud directa del río principal	L_a	34.21 km
Coeficiente de sinuosidad hidráulico	S_h	1.45
Elevación Máxima del río principal	E_{m_x}	3958 m
Elevación Mínima del río principal	E_{m_n}	2576
Pendiente promedio del río principal	S_{c_p}	3.9 %
Tiempo de concentración de Kirpich	$T_{c_Kirpich_h}$	5.28

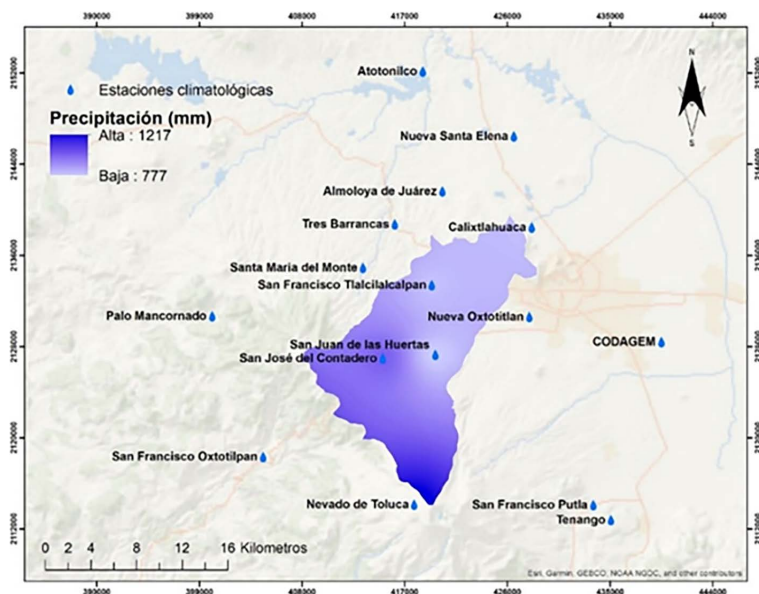


Figura 4. Distribución espacial de las estaciones climatológicas fuera y dentro de la cuenca del río Tejalpa.

Figure 4. Spatial distribution of weather stations outside and inside the Tejalpa river basin.

Cuadro 6. Estaciones climatológicas que se encuentran dentro y fuera de la zona de estudio (16), su clave, coordenadas UTM, la altura y precipitación total promedio anual registrada de 59 años (1951-2010) y el factor R.

Table 6. Waterstation that are located inside and outside the study area (16), their key, UTM coordinates of location, hight and total annual average precipitation recorded for 59 years (1951-2010) and the R factor.

Estación	Clave	X	Y	Elevación	Precipitación total	Factor R
				m de altitud	mm	MJ mm h ⁻¹ ha ⁻¹ año ⁻¹
San Francisco Tlalcalalcalpan	15 089	419 374	213 339 0	2773	799.5	3686.5
Tres Barrancas	15 282	416 146	213 873 4	2682	869.8	4210.7
Atotonilco	15 010	418 599	215 215 6	2557	839	3977.1
Palo Mancornado	15 374	400 140	213 066 8	2817	975.8	5062.0
CODAGEM	15 266	439 512	212 840 5	2762	844.7	4019.8
San Francisco Putla	15 240	433 534	211 410 2	2742	873.8	4241.4
Tenango	15 122	435 078	211 277 5	2828	808.5	3751.8
San Francisco Oxtotilpan	15 088	404 601	211 831 8	2605	1437.2	9624.0
Calixtlahuaca	15 203	428 137	213 846 8	2630	804	3719.1
Nueva Oxtotitlan	15 211	427 931	213 059 9	2695	817.2	3815.5
Nueva Santa Elena	15 063	426 565	214 646 6	2611	842.8	4005.5
Nevado de Toluca	15 062	417 840	211 412 9	4283	1227.1	7374.0
Santa María del Monte	15 108	413 342	213 492 5	2839	875.2	4252.3
San José del Contadero	15 276	415 069	212 696 5	3045	997	5241.1
San Juan de las Huertas	15 293	419 684	212 728 3	2905	777.2	3527.0

Factor LS

El Cuadro 7, muestra los intervalos de la pendiente, suavemente inclinadas con una superficie de 7 706.04 ha (35.43%) seguido de un relieve moderadamente escarpado con una superficie de 5 484.25 ha (25.20%). La Figura 5b muestra valores desde 648.41 a 0.03.

Factor K

El Cuadro 8, muestra los valores de K según el tipo de suelo y textura superficial. Los valores de erodabilidad del suelo varían desde 0.02 Mg ha h ha⁻¹MJ⁻¹mm⁻¹ (suelos con textura media) a 0.026 Mg ha h ha⁻¹MJ⁻¹mm⁻¹ (suelos con textura fina) encontradas en áreas del PESM (Figura 5c).

Factor C

El Cuadro 9, muestra los valores estimados del factor C en el área de estudio que van de 0 a 1, es decir, el valor cercano a 1 es 0.24 que corresponde al área agrícola y minas de arena, el valor que se acerca a 0 es 0.001 representa al bosque (semidenso), por tal motivo, se argumenta que el tipo de cobertura que representa mayor pérdida de suelo es el área agrícola por presentar suelo expuesto, además de áreas con algún tipo de degradación (Figura 5d).

Factor P

Al factor P se le asignó el valor de 1, debido a que, se considera que, en la zona de estudio, no se emplean prácticas de conservación del suelo (Figura 5).

La Figura 6, muestran las áreas con pérdida de suelo y áreas críticas, resultado de los factores de salida de la ecuación RUSLE del presente trabajo.

Áreas Críticas por Erosión Hídrica en la Cuenca del río Tejalpa

En la Figura 6, se muestran la porción del Parque Estatal Sierra Morelos, es una zona de montaña con elevaciones de 2800 m de altitud, la cual tiene un valor alto de recarga de agua, paisajístico y recreación. Sin embargo, se presentan valores muy altos de erosión, específicamente en el ejido de San Mateo Oxtotitlán y la delegación de Tecaxic, áreas que tienen depósitos volcánicos, comunes en el Sistema Volcánico Transversal (Escamilla-Sarabia Solleiro, Sedov y Gama, 2006), los cuales están expuestos debido a la escasa cobertura vegetal, estas son características que indican la susceptibilidad del suelo a la erosión (factor K) y favorecen la circulación y evaporación del agua sobre el terreno, lo cual limita la retención de nutrientes y conservación de agua en el suelo (DeFries, Foley y Asner, 2004) además se observa asentamientos irregulares, por lo que estas áreas fueron catalogadas con un nivel de erosión muy alto (áreas críticas) (Cuadro 10).

Cuadro 7. Superficie de pendientes de la cuenca del río Tejalpa.
Table 7. Slope Surface of the Tejalpa river basin.

Características	Intervalo de pendiente		Superficie	
	%	ha	%	ha
Plana o casi plana	0 - 2	943.89	4.34	
Suavemente inclinada	3 - 7	7 706.04	35.43	
Relieve inclinado	8 - 15	5 191.63	23.90	
Moderadamente escarpada	16 - 30	5 484.25	25.20	
Escarpada	31 - 70	2 417.66	11.10	
Muy escarpada	>70	5.00	0.02	
Total		21 748	100	

Cuadro 8. Valores de K erodabilidad del suelo de acuerdo con la clasificación FAO (1980a).
Table 8. Soil K erodibility values according to the FAO classification (1980a).

Unidad de suelo	Abreviatura	Textura	Valor de K
			Mg ha h ha ⁻¹ MJ ⁻¹ mm ⁻¹
Fluvisol Eutrico	Je	Media	0.02
Luvisol+Regosol eutrico	I+Re	Gruesa	0.013
Regosol eutrico+Litosol	Re+I	Gruesa	0.013
Cambisol cromico+Andosol húmico	Bc+Th	Media	0.03
Andosol molico+Feozem háplico	Tm+Hh	Media	0.02
Vertisol pélico	Vp	Fina	0.026
Feozem háplico+Fluvisol eutrico	Hh+Je	Media	0.025
Planosol molico+húmico	Wm+Wh	Media	0.04
Litosol+Feozem háplico	I+Hh	Media	0.02

Con respecto a la porción del Área de Protección de Flora y Fauna Nevado de Toluca que se integra a la cuenca río Tejalpa, su uso de suelo es agrícola, seguido de forestal. Sin embargo, en el ejido de Loma Alta presenta un nivel de erosión muy alto (áreas críticas). Como lo mencionan González-Camacho, Nava, Arteaga y García (2020) el Ejido San Pedro Tejalpa y el Ejido Loma Alta entre otros, forman un corredor integrado por núcleos agrarios que atraviesan la mitad del APFFNT, dicho corredor coincide con la ubicación de carreteras federales, las cuales fragmentan el ecosistema y el recurso suelo. Además, las zonas que presentan valores más altos de erosión son las agrícolas, lo cual concuerda con los resultados obtenidos (Figura 6).

Áreas con Erosión Moderada en la Cuenca del río Tejalpa

Las áreas con erosión moderada (10 a 50 Mg ha⁻¹ año⁻¹) tienen una mayor superficie en la cuenca río Tejalpa con 9004 ha y representa el 41.40%, están localizadas en casi toda la cuenca, y está determinado principalmente por la predominancia de pendientes bajas a moderadas y cantidades de lluvia moderadas, además al manejo del suelo, principalmente de áreas agrícolas, así como, uso de suelo urbano, que conllevan a la generación de escurrimientos y sedimentos que afectan las partes bajas de la cuenca como son las áreas habitacionales.

Las áreas con erosión alta corresponden a una superficie de 5495 ha, (25.26%) y se encuentran pequeños polígonos distribuidos en casi toda la cuenca, aquí predominan las pendientes moderadamente escarpadas.

Cuadro 9. Usos del suelo de la cuenca del río Tejalpa y valores de C (USEPA, 2005).
Table 9. Land uses of the Tejalpa river basin and C values (USEPA, 2005).

Uso de suelo	Superficie	Superficie	Valores de C
	ha	%	(USEPA, 2005)
Área agrícola	11 684	53.80	0.24
Bosque (Semidenso)	5867	27.00	0.001
Área urbana	3949	18.12	-
Área sin vegetación	180	0.83	-
Cuerpo de agua	64	0.30	-
Minas de arena	4	0.02	0.24
Total	21 748	100	

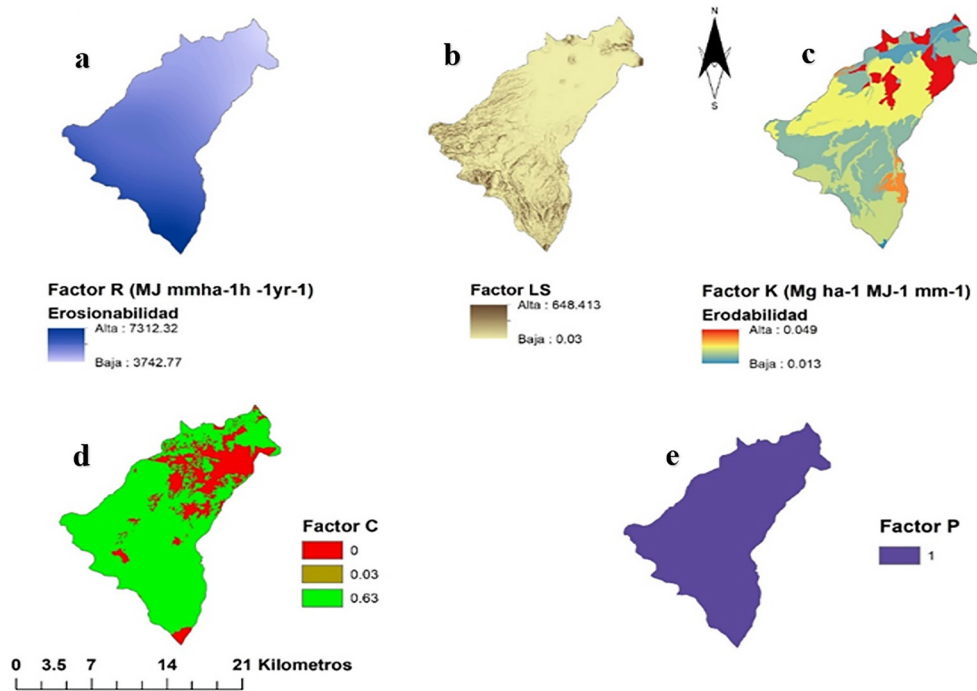


Figura 5. Factores de salida de la ecuación RUSLE: Factor R (a), Factor LS (b), Factor K (c), Factor C (d) y Factor P (e) para obtener el mapa de identificación de áreas críticas de erosión en la cuenca del río Tejalpa.

Figure 5. Output factors of the RUSLE equation: R factor (a), LS factor (b), K factor (c), C factor (d) and P factor (e) in order to get the identification of hotspot areas in the Tejalpa river basin.

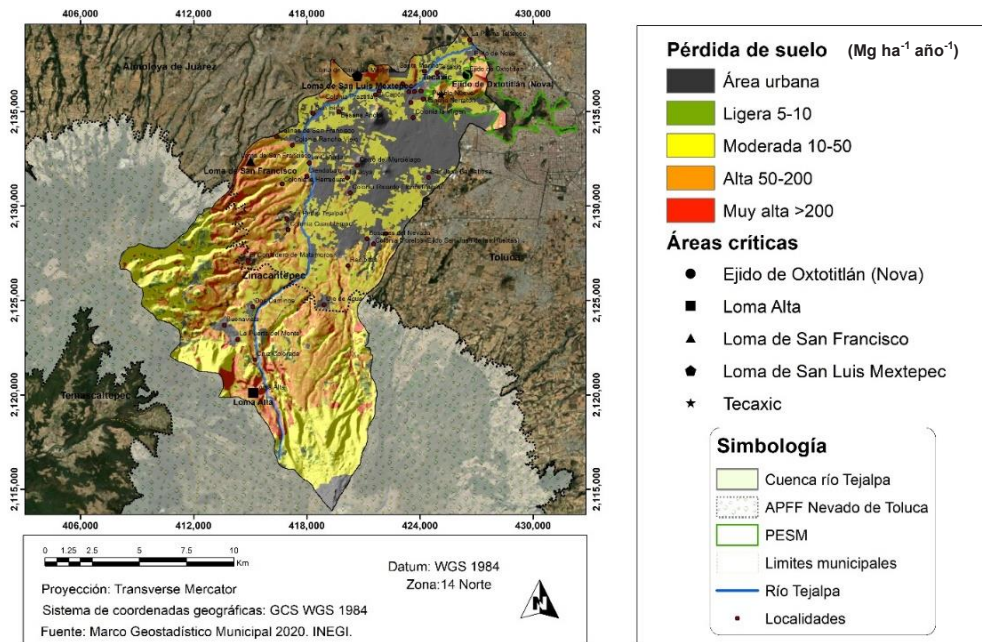


Figura 6. Identificación espacial de áreas críticas de erosión en la Cuenca del río Tejalpa.

Figure 6. Spatial identification of critical erosion areas in the Tejalpa river basin.

Cuadro 10. Límites de tolerancia de la erosión hídrica propuesto por la FAO (1980b) y superficie de erosión actual de la cuenca del río Tejalpa.
Table 10. Tolerance limits of water erosion FAO (1980b) and Current erosion surface of the Tejalpa river basin.

Niveles de erosión	Intervalo de erosión	Superficie de erosión de la Cuenca río Tejalpa	
		ha	%
Ninguna (Área urbana)	0 a 5	4962	22.81
Ligera	5 a 10	734	3.37
Moderada	10 a 50	9004	41.40
Alta	50 a 200	5495	25.26
Muy alta (áreas críticas)	>200	1553	7.14
Total		21 748	100

Estos resultados se confirman al contrastar los datos obtenidos por Bolaños-González *et al.* (2016) quienes mencionan que el Estado de México (Toluca), es de los más afectados por erosión apreciable, y por Téllez *et al.* (2009), quienes mencionan que el municipio de Toluca y Zinacantepec presentan zonas con niveles de erosión altos. Así, los resultados de otras investigaciones (tesis, capítulo de libro y folleto) concuerdan en la identificación de los municipios mencionados. En definitiva, la principal recarga de agua de los municipios de Toluca y Zinacantepec proviene del Nevado de Toluca.

CONCLUSIONES

El 7.14% con 1553 ha de la cuenca del río Tejalpa tiene la categoría de área crítica de erosión y se localizan principalmente en las laderas y partes altas con pendientes mayores a 70% del PESH y el APFFNT. El Parque Estatal Sierra Morelos lo integran las delegaciones de Tecaxic, San Mateo Oxtotitlán y el Ejido de San Mateo Oxtotitlán pertenecientes al municipio de Toluca, presentan áreas de bosque degradado. Por otra parte, se tiene a las localidades de Loma alta, Loma de San Luis Mextepec, Loma de San Francisco pertenecientes al municipio de Zinacantepec, las cuales son áreas de cultivo, principalmente de maíz y papa, y están contiguas al Área de Protección de Flora y Fauna Nevado de Toluca (APFFNT).

Las áreas con erosión moderada de 10 a 50 Mg ha⁻¹ año⁻¹ tienen mayor superficie en la cuenca con 9004 ha y representa 41.40%, se localizan en toda la cuenca, y está determinado principalmente por la predominancia de pendientes bajas a moderadas y precipitación moderada. Por lo que esto tiene un impacto importante en los servicios ambientales como: disminución del almacenamiento de carbono en el suelo e infiltración de agua en las áreas de bosque; por otra parte, las propiedades físicas y químicas relacionadas a la fertilidad y capacidad productiva de los suelos agrícolas disminuyen y afectan la calidad del suelo, las cuales favorecen la acumulación de sedimentos en el río Tejalpa y contribuye al desbordamiento del río provocando inundaciones en las localidades de San Pedro Tejalpa y San Antonio Acahualco del municipio de Zinacantepec.

Finalmente, 22.81% de la cuenca del río Tejalpa es de uso urbano, dado que, es parte de la zona metropolitana de Toluca y el rápido crecimiento urbano y demográfico ha tomado áreas forestales y agrícolas. Por lo tanto, es necesario continuar con las campañas de reforestación en las zonas que presentan erosión.

DECLARACIÓN DE ÉTICA

No aplicable.

CONSENTIMIENTO PARA PUBLICACIÓN

No aplicable.

DISPONIBILIDAD DE DATOS

Los datos utilizados en el estudio están disponibles a solicitud razonables.

CONFLICTO DE INTERESES

Los autores declaran que no tienen intereses en competencia.

FINANCIACIÓN

Con fondos del Programa de Investigadoras e Investigadores COMECYT-EDOMÉX 2022.

CONTRIBUCIÓN DE LOS AUTORES

Idea original, conceptualización, investigación, metodología, toma de datos, análisis, software, redacción, revisión: I.R.A. Idea original: S.A.M. Supervisión, revisión, trabajo de campo: E.D.S.R.

AGRADECIMIENTOS

Al Instituto Nacional de Investigaciones Forestales Agrícolas y Pecuarias (INIFAP) por el apoyo a esta investigación.

LITERATURA CITADA

- Amundson, R., Berhe, A. A., Hopmans, J. W., Olson, C., Sztein, A. E., & Sparks, D. L. (2015). Soil and human security in the 21st century. *Science*, 348(6235), 1261071. <https://doi.org/10.1126/science.1261071>.
- Arabameri, A., Chandra Pal, S., Costache, R., Saha, A., Rezaie, F., Seyed Danesh, A., ... & Hoang, N. D. (2021). Prediction of gully erosion susceptibility mapping using novel ensemble machine learning algorithms. *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, 12(1), 469-498.
- Benchettouh, A., Kouri, L., & Jebari, S. (2017). Spatial estimation of soil erosion risk using RUSLE/GIS techniques and practices conservation suggested for reducing soil erosion in Wadi Mina watershed (northwest, Algeria). *Arabian Journal of Geosciences*, 10, 1-14.
- Bolaños-González, M. A., Paz-Pellat, F., Cruz-Gaistardo, C. O., Argumedo-Espinoza, J. A., Romero-Benítez, V. M., & de la Cruz-Cabrera, J. C. (2016). Mapa de erosión de los suelos de México y posibles implicaciones en el almacenamiento de carbono orgánico del suelo. *Terra Latinoamericana*, 34(3), 271-288.
- CONABIO (Comisión Nacional para el Conocimiento y el Uso de la Biodiversidad). (2019). Áreas protegidas. Consultado 25 de abril, 2024, desde <https://www.biodiversidad.gob.mx/region/areasprot>
- Cotler, H., Corona, J. A., & Galeana-Pizaña, J. M. (2020). Erosión de suelos y carencia alimentaria en México: una primera aproximación. *Investigaciones Geográficas*, 101, 1-14. <https://doi.org/10.14350/rig.59976>
- DeFries, R. S., Foley, J. A., & Asner, G. P. (2004). Land-use choices: Balancing human needs and ecosystem function. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 2(5), 249-257. [https://doi.org/10.1890/1540-9295\(2004\)002\[0249:LCBHNA\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1890/1540-9295(2004)002[0249:LCBHNA]2.0.CO;2)
- Escamilla-Sarabia, G., Solleiro-Rebolledo, E., Sedov, S., & Gama-Castro, J. (2002). Tepetates del glacis de Buenavista, Morelos: interacción de procesos geomorfológicos y pedogenéticos. *Investigaciones Geográficas*, 48, 76-89.
- Esri (2022). *ArcGIS User's Guide. Released 10.3*. Redlands, CA, USA: Environmental Systems Research Institute.
- Eastman, J. R. (2020). *TerrSet. Version 18.21. Clark Labs for Cartographic Technology and Geographic Analysis*. Worcester, MA, USA: Clark University.
- FAO (Food and Agriculture Organization of the United Nations). (1980a). *Soil erosion: the greatest challenge to sustainable soil management*. Rome, Italy: FAO-UNESCO.
- FAO (Food and Agriculture Organization of the United Nations). (1980b). *Metodología provisional para la evaluación de la degradación de los suelos*. Roma, Italia: FAO-UNESCO.
- Fayas, C. M., Abeysingha, N. S., Nirmanee, K. G. S., Samaratunga, D., & Mallawatantri, A. (2019). Soil loss estimation using rusle model to prioritize erosion control in KELANI river basin in Sri Lanka. *International Soil and Water Conservation Research*, 7(2), 130-137. <https://doi.org/10.1016/j.iswcr.2019.01.003>.
- Flores-López, H. E., Martínez-Menes, M., Oropeza-Mota, J. L., Mejía-Sáenz, E., & López-Carrillo, R. (2003). Integración de la EUPS a un SIG para estimar la erosión hídrica del suelo en una cuenca hidrográfica de Tepatlán, Jalisco, México. *Terra Latinoamericana*, 21(2), 233-244.
- Figueroa-Sandoval, B. (1991). *Manual de predicción de pérdidas de suelo por erosión*. Montecillo, Estado de México, México: Colegio de Posgraduados.
- Foster, G. R., Meyer, L. D., & Onstad, C. A. (1977). A runoff erosivity factor and variable slope length exponents for soil loss estimates. *Transactions of the ASAE*, 20(4), 683-0687.
- Fu, G., Chen, S., & McCool, D. K. (2006). Modeling the impacts of no-till practice on soil erosion and sediment yield with RUSLE, SEDD, and ArcView GIS. *Soil and Tillage Research*, 85(1-2), 38-49.
- Getu, L. A., Nagy, A., & Addis, H. K. (2022). Soil loss estimation and severity mapping using the RUSLE model and GIS in Megech watershed, Ethiopia. *Environmental Challenges*, 8, 100560. <https://doi.org/10.1016/j.envc.2022.100560>
- Gómez-Díaz, J. A., & Villalobos, F. (2020). Montañas: cómo se definen y su importancia para la biodiversidad y la humanidad. *Ciencia Ergo-sum*, 95, 87-82.
- González-Camacho, G., Nava-Bernal, G., Arteaga-Reyes, T. T., & García-Fajardo, B. (2020). Análisis del programa de conservación de suelos en el área de protección de flora y fauna Nevado de Toluca. *Investigaciones Geográficas*, 102, 1-19. <https://doi.org/10.14350/rig.59998>
- Gürtekin, E., & Gökçe, O. (2021). Estimation of erosion risk of Harebakayış sub-watershed, Elazığ, Turkey, using GIS based RUSLE model. *Environmental Challenges*, 5, 100315. <https://doi.org/10.1016/j.envc.2021.100315>.
- Hudson, N.W. (1982). *Conservación del Suelo*. Barcelona. España: Reverte. ISBN: 8429110275.
- INEGI (Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática). (2023). Estadísticas básicas del Estado de México. Síntesis Geográfica del Estado de México. Consultada el 29 de mayo, 2023, desde <http://www.inegi.org.mx/>

- INEGI (Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática). (1980). Carta Geológica, escala 1:50 000. Consultada el 29 de mayo, 2022, desde <http://www.inegi.org.mx/>
- Keesstra, S. D., Bouma, J., Wallinga, J., Tittonell, P., Smith, P., Cerdà, A., ... & Fresco, L. O. (2016). FORUM paper: The significance of soils and soil science towards realization of the UN sustainable development goals (SDGs). *Soil Discussions*, 2016, 1-28.
- Li, H., Guan, Q., Sun, Y., Wang, Q., Liang, L., Ma, Y., & Du, Q. (2022). Spatiotemporal analysis of the quantitative attribution of soil water erosion in the upper reaches of the Yellow River Basin based on the RUSLE-TLSD model. *Catena*, 212, 106081.
- Mohammed, S., Alsafadi, K., Talukdar, S., Kiwan, S., Hennawi, S., Alshihabi, O., & Harsanyie, E. (2020). Estimation of soil erosion risk in southern part of Syria by using RUSLE integrating geo informatics approach. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, 20, 100375. <https://doi.org/10.1016/j.rsase.2020.100375>.
- McCool, D. K., Foster, G. R., Mutchler, C. K., & Meyer, L. D. (1989). Revised slope length factor for the Universal Soil Loss Equation. *Transactions of the ASAE*, 32(5), 1571-1576.
- Pando-Moreno, M., Gutiérrez-Gutiérrez, M., Maldonado-Hernández, A., Palacio-Prieto, J. L., & Estrada-Castillón, A. E. (2003). Comparación de métodos en la estimación de erosión hídrica. *Investigaciones Geográficas*, 51, 23-36.
- Pimentel, D., & Kounang, N. (1998). Ecology of soil erosion in ecosystems. *Ecosystems*, 1, 416-426. <https://doi.org/10.1007/s100219900035>
- Pacheco, H. A., Méndez, W., & Moro, A. (2019). Soil erosion risk zoning in the Ecuadorian coastal region using geo-technological tools. *Earth Sciences Research Journal*, 23(4), 293-302. <https://doi.org/10.15446/esrj.v23n4.71706>
- Panagos, P., & Katsoyiannis, A. (2019). Soil erosion modelling: The new challenges as the result of policy developments in Europe. *Environmental Research*, 172, 470-474. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2019.02.043>
- Renard, K. G., Foster, G. R., Weesies, G. A., McCool, D. K., & Yoder, D. C. (1997). *Predicting soil erosion by water: a guide to conservation planning with the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE)*. Washington, DC, USA: USDA-ARS. ISBN: 0-16-048938-5.
- SMN (Servicio Meteorológico Nacional). (2010). Datos de normales climatológicas (1951-2010). Consultado el 23 de abril, 2023, desde <https://smn.conagua.gob.mx/es/informacion-climatologica-por-estado?estado=mex>
- Téllez, M. H., Aragón, J. A. G., Quentin, E., & Delgado, C. D. (2009). Identificación de áreas críticas de erosión en el Curso Alto del Río Lerma. *CIENCIA Ergo-sum*, 16(2), 181-188.
- USEPA (Unites States Environmental Protection Agency). (2005). *National Managenement Measures to Control Non-Point Source Pollution for Urban Areas EPA-841-B-03-004*. Washington D.C. USA: U.S. Environmental Protection Agency.
- Valdivia-Martínez, O., Peña-Uribe, G. D. J., Rufino-Rodríguez, F., Torres-González, J. A., Meraz-Jiménez, A. D. J., & López-Santos, A. (2022). Ajuste de la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo en parcelas de escurrimiento ubicadas en una región del centro de México. *Terra Latinoamericana*, 40, 1-14. <https://doi.org/10.28940/terra.v40i0.990>
- Van-Zidam, R. A. (1986). *Aerial photo-interpretation in terrain analysis and geomorphologic mappig*. New York, USA: Smits Publishers. ISBN 9070043246.
- Wei, W., Liu, Y., Zhang, L., & Li, L. (2024). Distribution assessment of soil erosion with revised RUSLE model in Tianshan Mountains. *Journal of Mountain Science*, 21(3), 850-866. <https://doi.org/10.1007/s11629-022-7881-9>
- Wischmeier, W. H., & Smith, D. D. (1978). *Predicting rainfall erosion losses: a guide to conservation planning (No. 537)*. Port Antonio, Portland, Jamaica: Department of Agriculture, Science and Education Administration.