VOLUMEN 48
XXXI Verano De la Ciencia
ISSN 2395-9797
www.jovenesenlaciencia.ugto.mx

Evaluación de la vulnerabilidad de la pérdida del suelo ante eventos de lluvia en México

Assessment of Soil Erosion Vulnerability to Rainfall Events in Mexico

Yesenia Elena Trejo Nila[1], Pablo Andrés Pineda Chapacho[2], Ismael Orozco Medina[3*]

[1]Licenciatura de Ingeniería Hidráulica, División de Ingenierías del Campus Guanajuato, Universidad de Guanajuato, Av. Juárez 77, Zona Centro, Guanajuato, 36000, México; ye.trejonila@ugto.mx
[2]Doctorado en Ciencia y Tecnología del Agua, División de Ingenierías del Campus Guanajuato, Universidad de Guanajuato, Av.Juárez 77, Zona Centro, Guanajuato, 36000, México; pa.pinedacapacho@ugto.mx
[3]Departamento de Ingeniería Geomática e Hidráulica, División de Ingenierías del Campus Guanajuato, Universidad de Guanajuato, Av.Juárez 77, Zona Centro, Guanajuato, 36000, México; i.orozco@ugto.mx; *Autor de correspondencia.

Resumen

La erosión hídrica constituye uno de los principales procesos de degradación del suelo en México, afectando la productividad agrícola, los recursos hídricos y el equilibrio de los ecosistemas. En este estudio se estimó la pérdida potencial de suelo y su vulnerabilidad mediante la implementación distribuida de la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo (USLE), integrando información geoespacial oficial del INEGI, CONABIO, CONAGUA y SGM. Los factores de erosividad de la lluvia, erodabilidad del suelo, longitud e inclinación de la pendiente, cobertura vegetal y prácticas de conservación fueron generados en formato ráster con una resolución espacial de 90 m utilizando herramientas de Sistemas de Información Geográfica. Los resultados muestran que la mayor parte del territorio nacional presenta una baja susceptibilidad a la erosión hídrica, mientras que las zonas de vulnerabilidad media se concentran principalmente en regiones montañosas del centro, occidente y sur del país. La metodología desarrollada proporciona una herramienta útil para identificar áreas prioritarias de conservación y apoyar la gestión sostenible del suelo en México.

Palabras clave: erosión hídrica, USLE, eventos de lluvia, vulnerabilidad.

Introducción

La erosión es un proceso geomorfológico natural que implica el desprendimiento de partículas del suelo por la acción de agentes externos como el agua, el viento, el deshielo y la gravedad (Zepeda, 2005). Según Borrelli et al. (2017), la intensidad y la dinámica de este proceso dependen de la interacción entre factores climáticos, topográficos, edafológico, geológicos y del uso de suelo y la cubierta vegetal. A nivel mundial, la erosión del suelo constituye uno de los procesos de degradación ambiental más severos y de mayor impacto sobre la provisión de servicios ecosistémicos (Borrelli et al., 2017). Las tasas actuales de erosión superan ampliamente la velocidad natural de formación del suelo, comprometiendo la seguridad alimenticia, la seguridad hidrológica y la coservación de los ecosistemas (Montgomery, 2007). Según la FAO (2015), se estima que anualmente se pierden alrededor de 24 mil millones de toneladas de suelo fértil por procesos erosivos, mientras que aproximadamente 7.5 millones de km² presentan tasas de erosión superiores al umbral considerado tolerable (10 Mg ha^{-1} $año^{-1}$). Diversos estudios advierten que la intensificación de los procesos del ciclo hidrológico debido al cambio climático está incrementando la erosión hídrica global entre 30 % y 66 % durante las próximas décadas, agravando los procesos de degradación del suelo y la sedimentación en cuerpos de agua (como, por ejemplo: Nearing et al., 2004; Borrelli et al., 2020; Ma et al., 2021). En México, la erosión del suelo representa uno de los principales problemas ambientales (Cotler et al., 2007). Esto debido a la combinación de condiciones naturales y actividades antropogénicas que se desarrollan en el país (Cotler et al., 2007). La diversidad climática, la compleja orografía, la ocurrencia de eventos extremos de precipitación y la presencia de extensas zonas deforestadas favorecen el desarrollo de procesos erosivos en México, particularmente de erosión hídrica (Martínez-Mena et al., 2020). A estos factores se suman el cambio de uso del suelo y cubierta vegetal, el sobrepastoreo, las prácticas agrícolas inadecuadas y la expansión urbana, que incrementan la susceptibilidad del terreno a la pérdida de suelo (Martínez-Mena et al., 2020). A pesar de

la importancia ambiental, económica y social de este fenómeno, en México aún persisten importantes vacíos de información respecto a la distribución espacial y magnitud de la pérdida potencial de suelo a escala nacional, particularmente mediante metodologías que representen de manera explícita la variabilidad espacial de los factores que controlan la erosión. Contar con este tipo de información resulta indispensable para identificar áreas prioritarias de conservación, orientar estrategias de restauración de suelos y apoyar la formulación de políticas públicas encaminadas al manejo sostenible de los recursos naturales y a la adaptación frente al cambio climático. En este contexto, el presente estudio tiene como objetivo evaluar la pérdida potencial de suelo y la vulnerabiidad a la erosión hídrica en el territorio mexicano mediante la implementación distribuida de la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo, integrando información geoespacial oficial y herramientas de Sistemas de Información Geográfica. Lo anterior con la finalidad de estimar espacialmente cada uno de sus factores constitutivos y generar una cartografía nacional de la erosión potencial, proporcionando un diagnóstico homogéneo que constituye un insumo técnico para la planificación territorial, la conservación de los suelos y la gestión integral de los recursos naturales.

Caso de estudio

El área de estudio seleccionada para realizar el presente estudio corresponde al territorio de México, ubicado en el continente americano (Figura 1). El territorio mexicano cuenta con una superficie continental de 1.96 millones de km². Este se ubica entre los 14° y 33° de latitud norte, específicamente en la zona de transición entre las regiones tropical y templada. Lo cual, favorece una elevada heterogeneidad geográfica, climática, hidrológica y ecológica. El territorio está conformado por extensos sistemas montañosos como la Sierra Madre Occidental, la Sierra Madre Oriental, la Sierra Madre del Sur, el Eje Neovolcánico Transversal y la Sierra Madre de Chiapas. Dichos sistemas montañosos ocupan cerca del 60 % del territorio nacional y condicionando importantes gradientes climáticos, hidrológicos y edafológicos.

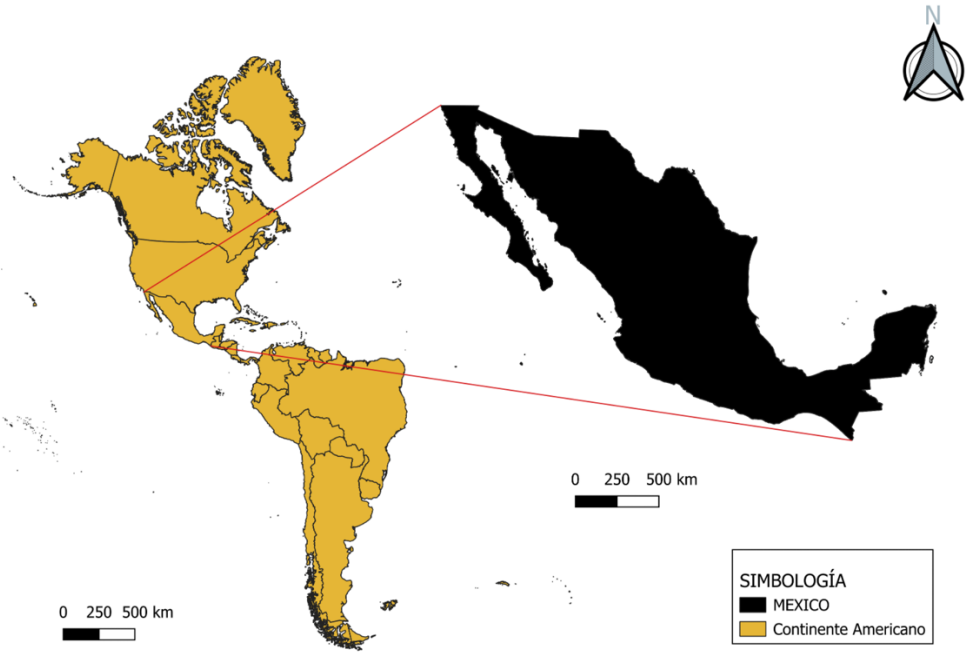

Figura 1. Ubicación geográfica del área de estudio (Fuente: Elaboración propia).

El país se divide en 37 Regiones Hidrológicas, 757 cuencas hidrológicas y 653 acuíferos, los cuales presentan una marcada variabilidad espacial en la disponibilidad del recurso hídrico. Aproximadamente el 68 % de la precipitación anual ocurre entre junio y septiembre, mientras que cerca del 67 % del escurrimiento superficial se concentra en las regiones del sur y sureste. En contraste, las regiones del norte y centro del país presentan una disponibilidad hídrica limitada y una alta presión sobre los recursos superficiales y subterráneos. Además,

en México predominan condiciones áridas y semiáridas en aproximadamente el 52 % del territorio. En el resto del país existen climas tropicales, templados y de alta montaña. La precipitación acumulada media anual es cercana a 760 mm. Aunque presenta una elevada variabilidad espacial, con valores inferiores a 100 mm anuales en zonas desérticas del noroeste y superiores a 2,000 mm en regiones del sureste del país. Esta heterogeneidad climática influye directamente en la intensidad de los procesos hidrológicos y en la erosividad de las precipitaciones. Por otro lado, México cuenta con una cubierta vegetal constituida principalmente por matorrales xerófilos, bosques templados y selvas tropicales. El uso de suelo es de cerca del 30 % destinado a actividades agropecuarias, incluyendo agricultura de temporal y de riego, así como pastizales inducidos. Durante las últimas décadas, el crecimiento urbano, la expansión de la frontera agrícola, la deforestación y el sobrepastoreo han transformado significativamente el paisaje, reduciendo la cobertura vegetal protectora y aumentando la exposición del suelo a la acción de los agentes erosivos.

Metodología

En el presente estudio la erosión hídrica se ha estimado utilizando la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo (USLE, por sus siglas en inglés), desarrollada por Wischmeier y Smith (1978). La ecuación de la USLE es uno de los modelos empíricos más utilizados a nivel mundial para cuantificar la pérdida de suelo mediante efectos hídricos. La ecuación expresa la pérdida media anual de suelo como el producto de cinco factores que representan las condiciones climáticas, edafológicas, topográficas y de manejo del terreno (Ec. 1).

$$\boldsymbol{A = R \times K \times LS \times C \times P} \qquad \text{Ec. 1}$$

Donde:
A = pérdida media anual de suelo (Mg ha^{-1} año^{-1}),
R = factor de erosividad de la lluvia (MJ mm ha^{-1} h^{-1} año^{-1}),
K = factor de erodabilidad del suelo en Mg h MJ^{-1} mm^{-1}),
LS = factor combinado de longitud e inclinación de la pendiente (adimensional),
C = factor de cobertura y manejo vegetal (adimensional) y
P = factor de prácticas de conservación del suelo (adimensional).

A diferencia de otros estudios en los que se ha aplica la ecuación de la USLE a nivel de parcela o escala de cuenca, en este trabajo se ha implementado la ecuación de la USLE de forma distribuida discretizando el territorio mexicano en celdas de 90 m x 90 m. Incluyendo el procesamiento e integración de información geoespacial oficial mediante Sistemas de Información Geográfica. Cada uno de los factores de la ecuación fue representado en un mapa en formato ráster, permitiendo su estimación espacial de manera continua en todo el territorio mexicano. Posteriormente, mediante álgebra de mapas los factores *R*, *K*, *LS*, *C* y *P* fueron estimados celda por celda para generar un mapa nacional de pérdida potencial anual de suelo. Este enfoque distribuido ha permitido representar la variabilidad espacial de las condiciones climáticas, edafológicas, topográficas y de cobertura vegetal, proporcionando una evaluación más detallada de la vulnerabilidad del territorio a la erosión hídrica e identificando áreas prioritarias para la implementación de estrategias de conservación y manejo sostenible del suelo.

Resultados

Los factores y parámetros que integran la ecuación de la USLE se han obtenido a partir del procesamiento de información geoespacial oficial a escala 1:250,000 obtenida del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), la Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO), la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) y el Servicio Geológico Mexicano (SGM). Las diferentes capas temáticas fueron sometidas a un proceso de preprocesamiento geoespacial que incluyó la homologación del sistema de referencia espacial, resolución, extensión y formato ráster, con el propósito de garantizar su compatibilidad durante el análisis. Posteriormente, mediante técnicas de álgebra de mapas implementadas en el *software* de código abierto QGIS, se generaron los factores *R, K, LS, C* y *P*. En el caso del factor *R* se ha obtenido usando la ecuación propuesta por Cortés en 1991. Esta ecuación ha sido desarrollada a partir de datos de estaciones meteorológicas mexicanas y posteriormente adoptada en diversos estudios nacionales. La ecuación emplea en el cálculo del factor *R* la precipitación acumulada media anual (*P*, mm)

estimada a partir de las estaciones meteorológicas (Ec. 2). En la Figura 2 se presenta el factor *R* obtenido para la República Mexicana.

$$R = 2.8959P + 0.002983P^2 \quad \text{Ec. 2}$$



Figura 2. Factor de la erodabilidad de la lluvia en formato ráster (Fuente: Elaboración propia).

En el cálculo del factor *K* se utilizaron los valores propuestos por Panagos et al. (2014) de acuerdo con la textura edafológica. En este caso la edafología utilizada ha sido la de CONABIO. Las características que se obtuvieron de esta información son tipo de suelo y textura. De acuerdo con la clasificación del tipo de suelo y de su textura superficial (gruesa, media o fina) se le ha asignado un factor *K*, el cual está representado en la Figura 3.

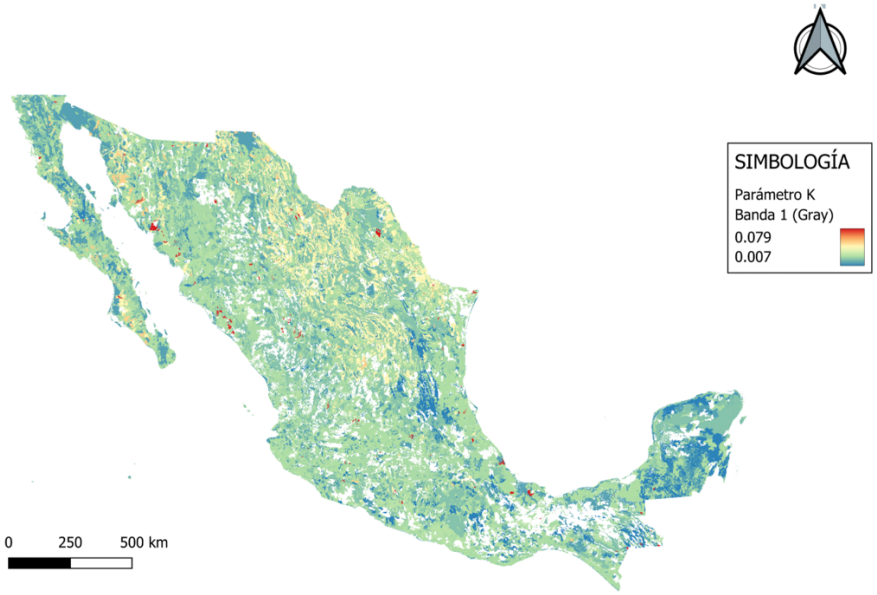

Figura 3. Factor de la erodabilidad del suelo en formato ráster (Fuente: Elaboración propia).

En el cálculo del factor *LS* se ha utilizado el Modelo Digital de Elevación (DEM, por sus siglas en inglés) del INEGI con una resolución de 90 m x 90 m. En la Figura 4 se presenta el resultado obtenido para el factor *LS* mediante el uso de la herramienta Qgis.



Figura 4. Factor combinado de longitud e inclinación de la pendiente en formato ráster (Fuente: Elaboración propia).

El factor *C* ha sido obtenido usando los valores propuestos por Panagos et al. (2015) asociando los tipos de vegetación y uso de suelo del Conjunto de Datos Vectoriales de Uso del Suelo y Vegetación-Serie VI del INEGI (año 2016). El fator *C* obtenido se presenta en la Figura 5.

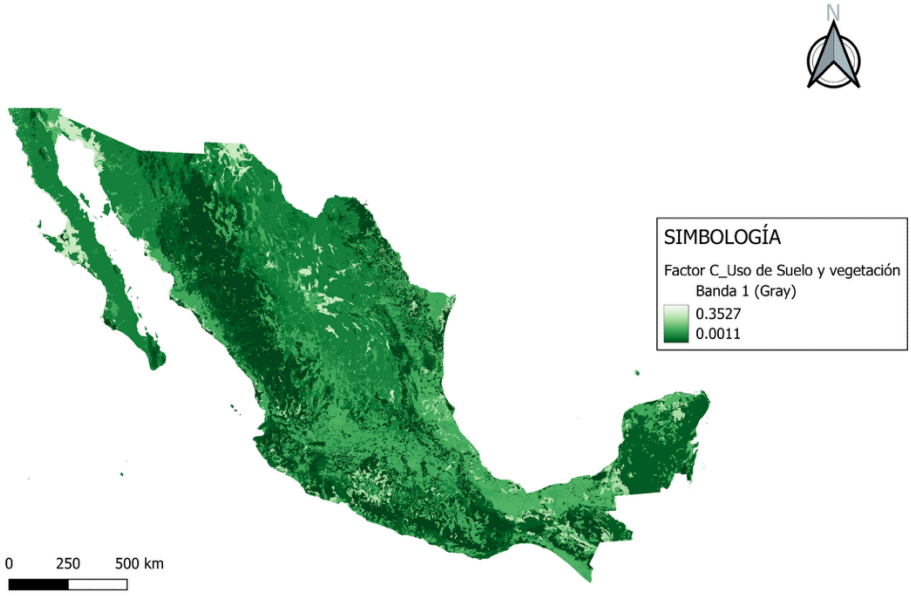

Figura 5. Factor de cobertura y manejo vegetal en formato ráster (Fuente: Elaboración propia).

Para el caso del factor *P*, en México no se cuenta con información acerca de la aplicación de prácticas de conservación de suelo en las áreas de cultivo o áreas forestales. Es por ello, que para el presente estudio se ha asignado un valor de *P* igual a uno. Que corresponde al escenario más drástico que favorece la erosión hídrica del suelo. En la Figura 6 se muestra el resultado obtenido y utilizado en la estimación de pérdida de suelo mediante la ecuación de la USLE.



Figura 6. Factor de prácticas de conservación del suelo en formato ráster (Fuente: Elaboración propia).

Los resultados obtenidos muestran que la mayor parte del territorio nacional presenta valores de vulnerabilidad bajos, comprendidos entre 0 y 8, lo cual indica en términos generales, que México posee una susceptibilidad moderada a baja frente a la erosión hídrica potencial (Figura 7). Estos resultados pueden atribuirse a la presencia de extensas regiones con pendientes suaves, coberturas vegetales relativamente conservadas y zonas áridas o semiáridas donde, aunque la cobertura vegetal es escasa, la baja erosividad de la precipitación limita las tasas potenciales de pérdida de suelo. Sin embargo, el mapa evidencia la existencia de áreas dispersas con vulnerabilidad media (8–16), concentradas principalmente en regiones montañosas y zonas con mayor intensidad de precipitación. Estas áreas coinciden con las principales provincias fisiográficas del país, como la Sierra Madre Occidental, Sierra Madre Oriental, Sierra Madre del Sur, el Eje Neovolcánico Transversal y la Sierra Madre de Chiapas, donde la combinación de pendientes pronunciadas, lluvias intensas y modificaciones en el uso del suelo incrementa significativamente el potencial erosivo.



Figura 7. Erosión hídrica obtenida mediante la ecuación de la USLE en formato ráster (Fuente: Elaboración propia).

Es importante destacar que, de acuerdo con la escala de clasificación adoptada, no se han identifican áreas con vulnerabilidad alta (16–25) en los resultados obtenidos (Figura 7). El valor máximo observado es cercano a 12.4, lo que sitúa las mayores pérdidas potenciales dentro de la categoría de vulnerabilidad media. Este resultado sugiere que, a escala nacional, los factores naturales y antrópicos considerados en la USLE no generan condiciones extremas de erosión de manera generalizada, aunque sí existen regiones donde el riesgo de degradación del suelo es considerablemente mayor que en el resto del país.

Conclusiones

La implementación distribuida de la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo ha permitido evaluar de manera distribuida la susceptibilidad del territorio mexicano a la erosión hídrica, integrando factores climáticos, edafológicos, topográficos y de uso del suelo mediante herramientas de análisis geoespacial. Los resultados muestran que la mayor parte del país presenta una vulnerabilidad baja (0–8), lo que indica que las condiciones naturales predominantes limitan la ocurrencia de procesos erosivos severos en gran parte del territorio nacional. No obstante, se identificaron zonas con vulnerabilidad media (8–16) localizadas principalmente en regiones montañosas del centro, occidente y sur del país, donde la combinación de pendientes pronunciadas, elevada erosividad de la lluvia y modificaciones en la cobertura vegetal favorece una mayor pérdida potencial de suelo.

Agradecimientos

A la Dirección de Apoyo a la Investigación y al Posgrado (DAIP) de la Universidad de Guanajuato por el financiamiento asignado a la estudiante participante en este proyecto dentro de la Convocatoria Institucional del Verano de la Ciencia 2026. Asimismo, al comité organizador del XXXI Verano de la Ciencia de la Universidad de Guanajuato.

Referencias

Borrelli, P., Robinson, D. A., Fleischer, L. R., Lugato, E., Ballabio, C., Alewell, C., Meusburger, K., Modugno, S., Schütt, B., Ferro, V., Bagarello, V., Van Oost, K., Montanarella, L., & Panagos, P. (2017). An assessment of the global impact of 21st century land use change on soil erosion. Nature Communications, 8, Article 2013. https://doi.org/10.1038/s41467-017-02142-7

Borrelli, P., Robinson, D. A., Panagos, P., Lugato, E., Yang, J. E., Alewell, C., Wuepper, D., Montanarella, L., & Ballabio, C. (2020). Land use and climate change impacts on global soil erosion by water (2015–2070). Proceedings of the National Academy of Sciences, 117(36), 21994–22001. https://doi.org/10.1073/pnas.2001403117

Cortés T., J. I. (1991). La erosividad de la lluvia en la República Mexicana. Tesis de Maestría. Colegio de Postgraduados, Montecillo, Estado de México, México.

Cotler, H., Galindo, A., González, I. D., Raich, O., & Rodríguez, R. (2007). Determinación de zonas prioritarias para la rehabilitación de suelos en México. Investigaciones Geográficas, 64, 92–113.

FAO & Intergovernmental Technical Panel on Soils (ITPS). (2015). Status of the World's Soil Resources (SWSR) – Main Report. Food and Agriculture Organization of the United Nations.

Ma, X., Zhao, C., & Zhu, J. (2021). Aggravated risk of soil erosion with global warming – A global meta-analysis. CATENA, 200, Article 105129.https://doi.org/10.1016/j.catena.2020.105129

Martínez-Mena, M., Carrillo-López, E., Boix-Fayos, C., Almagro, M., García-Franco, N., Díaz-Pereira, E., Montoya, I., & de Vente, J. (2020). Long-term effectiveness of sustainable land management practices to control runoff, soil erosion, and nutrient loss and the role of rainfall intensity in Mediterranean rainfed agroecosystems. CATENA, 187, Article 104352. https://doi.org/10.1016/j.catena.2019.104352

Montgomery, D. R. (2007). Soil erosion and agricultural sustainability. Proceedings of the National Academy of Sciences, 104(33), 13268–13272. https://doi.org/10.1073/pnas.0611508104

Nearing, M. A., Pruski, F. F., & O'Neal, M. R. (2004). Expected climate change impacts on soil erosion rates: A review. Hydrological Processes, 18(3), 439–457. https://doi.org/10.1002/hyp.5293

Panagos, P., Borrelli, P., Meusburger, K., Alewell, C., Lugato, E., & Montanarella, L. (2015). Estimating the soil erosion cover-management factor at the European scale. Land Use Policy, 48, 38–50. https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2015.05.021

Panagos, P., Meusburger, K., Ballabio, C., Borrelli, P., & Alewell, C. (2014). Soil erodibility in Europe: A high-resolution dataset based on LUCAS. Science of the Total Environment, 479–480, 189–200. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2014.02.010

Wischmeier, W. H., & Smith, D. D. (1978). Predicting rainfall erosion losses: A guide to conservation planning (Agriculture Handbook No. 537). U.S. Department of Agriculture, Science and Education Administration.

Zepeda, R. (2005). Las regiones climáticas de México. Instituto de Geografía, Universidad Nacional Autónoma de México.https://books.google.com.mx/books?hl=es&lr=&id=6xvqM4XQRFUC&oi=fnd&pg=PA13&dq=tipos+de+climas+en+Mexico+&ots=D3UaknwtUh&sig=7VIwB60jHmexzYupxYAYU3hPmp8&redir_esc=y#v=onepage&q=tipos%20de%20climas%20en%20Mexico&f=false