



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE HIDALGO

INSTITUTO DE CIENCIAS BÁSICAS E INGENIERÍA

ÁREA ACADÉMICA DE CIENCIAS DE LA TIERRA Y
MATERIALES

Erodabilidad en la región Noreste de Metztitlán,
Hidalgo, México

TESIS

Para obtener el título de

Ingeniero en Geología Ambiental

PRESENTA:

Aurea Vega Islas

Director interno:

Dr. Enrique Cruz Chávez

Director externo:

Biól. Juan José Hernández Hernández
SGM

Mineral de la Reforma, Hidalgo, mayo 2025



Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo

Instituto de Ciencias Básicas e Ingeniería

School of Engineering and Basic Sciences

Mineral de la Reforma, Hgo., a 27 de mayo de 2025

Número de control: ICBI-D/822/2025

Asunto: Autorización de impresión.

**MTRA. OJUKY DEL ROCÍO ISLAS MALDONADO
DIRECTORA DE ADMINISTRACIÓN ESCOLAR DE LA UA EH**

Con Título Quinto, Capítulo II, Capítulo V, Artículo 51 Fracción IX del Estatuto General de nuestra Institución, por este medio, le comunico que el Jurado asignado a la egresada de la Licenciatura en Ingeniería en Geología Ambiental **Aurea Vega Islas**, quien presenta el trabajo de titulación "**Erodabilidad en la región Noreste de Metztlán, Hidalgo, México**", ha decidido, después de revisar fundamento en lo dispuesto en el Título Tercero, Capítulo I, Artículo 18 Fracción IV; dicho trabajo en la reunión de sinodales, **autorizar la impresión del mismo**, una vez realizadas las correcciones acordadas.

A continuación, firman de conformidad los integrantes del Jurado:

Presidente: Dr. José Alfredo Meneses Lugo

Secretario: Biol. Juan José Hernández Hernández

Vocal: Dr. Enrique Cruz Chávez

Suplente: Dra. Ingrid Arcega Santillán

Sin otro particular por el momento, reciba un cordial saludo.

Atentamente
"Amor, Orden y Progreso"

Mtro. Gabriel Vergara Rodríguez
Director del ICBI



GVR/YCC

Ciudad del Conocimiento, Carretera Pachuca-Tulancingo Km. 4.5 Colonia Carboneras, Mineral de la Reforma, Hidalgo, México. C.P. 42184
Teléfono: 771 71 720 00 Ext. 40001
direccion_icbi@uaeh.edu.mx,
vergarar@uaeh.edu.mx



uaeh.edu.mx

Dedicatoria

Al universo, por permitirme esta vida, por enseñarme que los ciclos pueden retomarse y que nunca es tarde para cerrar aquello que una vez quedó pendiente. Estoy convencida de que el tiempo siempre encuentra su momento.

A Nabor, León y Regina, me llena el corazón poder compartir este logro con ustedes. Su presencia, su amor y su paciencia me han llevado hasta aquí.

A mi madre, por ser mi guía silenciosa y mi ejemplo constante de entrega, fortaleza y amor incondicional. Gracias por tu presencia, por tus silencios. Este logro también es tuyo.

A mí, por atreverme a continuar, por volver a creer en mis capacidades y en mis sueños. Que esto me recuerde siempre que aún hay anhelos por alcanzar y caminos por recorrer.

Agradecimientos

Expreso mi más sincero agradecimiento al Dr. Enrique Cruz Chávez, director de esta tesis, por su guía, paciencia y compromiso a lo largo de todo el proceso. Su experiencia, orientación y apoyo constante fueron fundamentales para la realización de este trabajo.

Al Biólogo Juan José Hernández Hernández, codirector de esta tesis, le agradezco profundamente su valiosa orientación y acompañamiento, así como el compromiso demostrado durante el desarrollo de esta investigación.

A la Dra. Ingrid Arcega Santillán, le expreso mi gratitud por el tiempo dedicado a revisar minuciosamente cada detalle, así como por sus observaciones y sugerencias, que enriquecieron significativamente este estudio.

Al Dr. José Alfredo Meneses Lugo, agradezco sinceramente su tiempo, dedicación y apoyo brindado a lo largo de este proceso.

Resumen

El presente estudio evaluó cuantitativamente la erodabilidad y la susceptibilidad a la erosión hídrica en el noreste del municipio de Metztitlán, Hidalgo, mediante la aplicación del modelo USLE (Ecuación de Pérdida de Suelo) y el uso de herramientas de Sistemas de Información Geográfica (SIG). Se realizó una caracterización edáfica a través del muestreo y análisis físico-químico de suelos, conforme a la NOM-021-RECNAT-2000. La metodología consistió en el cálculo de los cinco factores de la USLE: R (erosividad de la lluvia), a partir de datos pluviométricos; K (erodabilidad del suelo), mediante la fórmula de Wischmeier y Smith; LS (pendiente y longitud de ladera), derivado de un modelo digital de elevación; C (cobertura vegetal), con base en el uso del suelo y la vegetación; y P (prácticas de conservación), considerando la zonificación de la Reserva de la Biosfera Barranca de Metztitlán.

La integración espacial de estos factores permitió generar un mapa de riesgo de erosión hídrica, con la identificación de zonas críticas caracterizadas por pendientes pronunciadas y cobertura vegetal limitada. Los resultados indicaron que los factores LS y C fueron determinantes en la variabilidad espacial de la pérdida potencial de suelo, registrándose valores elevados en áreas montañosas y agrícolas sin prácticas conservacionistas. Esta investigación aportó insumos técnicos relevantes para la gestión sostenible del recurso suelo y para el diseño de estrategias de mitigación en zonas ecológicamente sensibles. Se destacó la utilidad del enfoque SIG-USLE como una herramienta de apoyo para la toma de decisiones en conservación ambiental.

Abstract

This study quantitatively evaluated the erodibility and susceptibility to water erosion in the northeastern region of the municipality of Metztlán, Hidalgo, through the application of the Universal Soil Loss Equation (USLE) model and the use of Geographic Information Systems (GIS) tools. A soil characterization was carried out through sampling and physico-chemical analysis according to NOM-021-RECNAT-2000. The methodology included the calculation of the five USLE factors: R (rainfall erosivity), based on pluviometric data; K (soil erodibility), using the Wischmeier and Smith formula; LS (slope length and steepness), derived from a digital elevation model; C (vegetative cover), based on land use and vegetation; and P (conservation practices), considering the zoning of the Barranca de Metztlán Biosphere Reserve.

The spatial integration of these factors enabled the generation of a water erosion risk map, identifying critical zones characterized by steep slopes and limited vegetation cover. The results indicated that the LS and C factors were key drivers of the spatial variability in potential soil loss, with high values recorded in mountainous and agricultural areas lacking conservation management. This research provided valuable technical input for the sustainable management of soil resources and the development of mitigation strategies in ecologically sensitive areas. The usefulness of the GIS-USLE approach was highlighted as a decision-support tool for soil conservation planning

TABLA DE CONTENIDO

CAPÍTULO 1 GENERALIDADES	1
1.1 Introducción	1
1.2 Antecedentes.....	2
1.2.1 Antecedente Nacional.....	4
1.2.2 Antecedente Regional.....	6
1.3 Justificación.....	8
1.4 Objetivos	9
1.4.1 Objetivo General.....	9
1.4.1 Objetivos específicos.....	9
CAPÍTULO II MARCO TEÓRICO.....	10
2.1 Marco Normativo	10
2.2 Marco conceptual	12
2.2.1 Suelo.....	12
2.2.2 Características del suelo.....	14
2.2.3 Diversidad de suelos en México	15
2.2.4 Degradación de los suelos.....	18
2.2.5 Degradación de los suelos en México.....	18
2.2.6 Degradación física	19
2.2.7 Degradación química	19
2.2.8 Erosión eólica	20
2.2.9 Erosión hídrica.....	20

CAPÍTULO III DESCRIPCIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO	24
3.1 Localización.....	24
3.2 Clima	26
3.3 Fisiografía.....	29
3.4 Geología de Metztitlán.....	31
3.5 Geología Estructural	35
3.6 Hidrografía.....	36
3.7 Edafología	39
3.8 Reserva de la Biosfera Barranca de Metztitlán	42
CAPÍTULO IV MÉTODO DE TRABAJO	44
4.1 Muestreo de Suelo	44
4.2 Evaluación del grado de erosión.....	48
4.2.1 Ecuación universal de la pérdida de suelo (USLE)	48
4.3 Los SIG en el análisis de la erosión hídrica	72
CAPÍTULO V RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	74
5.1 Factor R.....	74
5.2 Factor K.....	76
5.3 Factor LS.....	82
5.4 Factor C.....	86
5.5 Factor P.....	90
5.6 Erosión hídrica.....	95

CAPÍTULO VI CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	103
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	105

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Principales grupos de suelo en México (INEGI, 2007).....	16
Figura 2. Tipos de suelo en el estado de Hidalgo de acuerdo a la clasificación de INEGI (2006) tomado de Ramírez-Bautista et al., en 2017.	17
Figura 3. Superficie relativa afectada por procesos de degradación en México (SEMARNAT, 2008).	21
Figura 4. Tipos de erosión en México (INEGI, 2014).	22
Figura 5. Mapa de localización de la zona de estudio, Noreste de Metztitlán.	25
Figura 6. Mapa de unidades climáticas de la región Noreste de Metztitlán.....	28
Figura 7. Mapa fisiográfico del Noreste de Metztitlán.	30
Figura 8. Mapa geológico de la región Noreste de Metztitlán.	34
Figura 9. Mapa de hidrología de la región Noreste de Metztitlán.	38
Figura 10. Mapa edafológico de la región Noreste de Metztitlán (INEGI, 2007).....	41
Figura 11. Método de trabajo de la investigación, elaboración propia.	44
Figura 12. Verificación de puntos de muestreo.....	45
Figura 13. Toma de muestras de suelo en terrenos agrícolas.	46
Figura 14. Toma de muestras representativas.	47
Figura 15. Regionalización Nacional de factor R, utilizada por (Montes-León, 2011).	51
Figura 16. Nomograma de erosionabilidad del suelo (Renard, 1997).	53
Figura 17. Clasificación y pesado de muestras de suelo para determinación de la textura.....	55
Figura 18. Agitación y llenado de probetas con muestras de suelo	56
Figura 19. Medición de la densidad de la suspensión y temperatura a diferentes tiempos	57
Figura 20. Triángulo de texturas (Fuente: U.S.D.A., 1993).	59
Figura 21. Cuarteo y pesado de muestras en laboratorio para determinar % de materia orgánica	60

Figura 22. Oxidación de suelo en solución de dicromato de potasio y ácido sulfúrico	61
Figura 23. Titulación de las muestras con sulfato ferroso	62
Figura 24. Mapa de localización de puntos de muestreo	64
Figura 25. Mapa de factor de erosividad de lluvia (Factor R) del NE de Metztlán.	75
Figura 26. Mapa del factor de erodabilidad con metodología (Factor K) del NE de Metztlán. .	81
Figura 27. Mapa de pendientes, NE de Metztlán.	84
Figura 28. Mapa del factor topográfico (Factor LS) del NE de Metztlán.	85
Figura 29. Mapa de Factor de cobertura vegetal, (Factor C) del NE de Metztlán.....	89
Figura 30. Mapa de Reserva de la Biosfera Barranca de Metztlán (CONANP, 2003).	91
Figura 31. Mapa de Factor de prácticas de conservación, (Factor P) en el NE de Metztlán. ..	94
Figura 32. Mapa de erosión hídrica en la región NE de Metztlán.	99
Figura 33. Perdida promedio de suelo por unidad edafológica	101

INDICE DE TABLAS

Tabla 1. Erosión Hídrica para Metztlán según CENAPRED, 2024.	7
Tabla 2. Corrección por temperatura	58
Tabla 3. Clases texturales de suelo USDA	59
Tabla 4. Clasificación de la materia orgánica.....	63
Tabla 5. Coordenadas de puntos de muestreo	65
Tabla 6. Tipo de estructura	66
Tabla 7. Permeabilidad del suelo USDA según textura del suelo.....	66
Tabla 8. Clase de permeabilidad	67
Tabla 9. Valores de K en función de su textura FAO (1980).	67
Tabla 10 . Factor C para vegetación y uso de suelo	71
Tabla 11. Valores del factor P.....	72
Tabla 12. Factor R.....	74
Tabla 13. Valores de los parámetros utilizados para el cálculo del factor K y los valores de K obtenidos	76
Tabla 14. Clasificación de la erodabilidad de acuerdo con el factor K,.....	78
Tabla 15. Valores del factor K por el método de la FAO (1980)	79
Tabla 16. Clasificación de pendientes	82
Tabla 17. Interpretación del Factor C.....	86
Tabla 18. Valores del Factor C de cobertura vegetal	87
Tabla 19. Valores referenciales del Factor P según zonificación ANP	92
Tabla 20. Valores del Factor P	92
Tabla 21. Valores de factores de erosión por muestra	95
Tabla 22. Clasificación de erosión hídrica.....	97

CAPÍTULO 1 GENERALIDADES

1.1 Introducción

El suelo es un recurso natural no renovable, esencial para el desarrollo de la vida humana, el funcionamiento de los ecosistemas y la producción de alimentos (FAO, 2015). Sin embargo, su degradación constituye una de las problemáticas ambientales más graves a nivel global. Entre los principales procesos de degradación del suelo se encuentra la erosión hídrica, la cual consiste en la remoción de partículas del suelo causada por el impacto de la precipitación y el escurrimiento superficial. Este proceso reduce la fertilidad, la capacidad de retención de agua y la productividad de los ecosistemas, afectando tanto al ambiente como a la economía local (SEMARNAT, 2012).

En México, aproximadamente el 45 % de los suelos presenta algún grado de degradación, siendo la erosión hídrica uno de los mecanismos más extendidos. De acuerdo con la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT, 2012), del total de 22.73 millones de hectáreas afectadas por este tipo de erosión, el 56.4 % se encuentra en un nivel ligero, el 39.7 % en un nivel moderado y el 3.9 % en niveles de erosión fuerte o extrema.

En particular, el noreste del municipio de Metztlán, Hidalgo, presenta condiciones geográficas y de uso del suelo que incrementan significativamente la vulnerabilidad a este fenómeno. Factores como las pendientes pronunciadas, la cobertura vegetal limitada y las prácticas agrícolas inadecuadas han intensificado la pérdida de suelo en esta zona, que además forma parte de la Reserva de la Biosfera Barranca de Metztlán, un área protegida con alta riqueza biológica.

Ante esta situación, resulta fundamental implementar metodologías que permitan cuantificar la pérdida de suelo y generar herramientas para la toma de decisiones. En este estudio se aplica la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo (USLE, por sus siglas en inglés), en combinación con herramientas de Sistemas de Información Geográfica (SIG), para estimar los niveles de erodabilidad y erosión hídrica en la región.

El objetivo principal de esta investigación es identificar las áreas con mayor susceptibilidad a la erosión hídrica en el noreste de Metztlán y aportar al desarrollo de estrategias para la conservación y el manejo sostenible del suelo. Los resultados permitirán la elaboración de mapas temáticos que servirán como insumo técnico para instituciones académicas y comunidades locales, fortaleciendo la gestión integrada de los recursos naturales en esta región.

1.2 Antecedentes

La erosión hídrica es un tema de gran interés a nivel global siendo este objeto de numerosas investigaciones tanto internacionales y nacionales, la revisión de los diferentes estudios para el conocimiento del estado del arte en el presente trabajo, donde se evalúa la erosión hídrica con diferentes metodologías y sus limitaciones particulares por diversos programas e instituciones.

Echeverría et al., (2006) midieron la erodabilidad de suelos representativos del Sur de la Región Semiárida en Argentina y la compararon con la estimada mediante los modelos WEPP Y USLE, con la recolección de muestras determinaron mediante simuladores de lluvias la resistencia del suelo a la erosión con la relación limo arcilla. Con el modelo WEPP determinaron la erodabilidad entre los surcos *ki* resultando *kib* (erodabilidad base) más alta a lo estimado. Los valores del factor K estimados a partir del nomograma tuvieron una variación significativa confirmando las predicciones del mismo que resultan poco confiables en suelos con el 65% o más de arenas.

Ramírez et al., (2009) dentro de la zona cafetera central del departamento de caldas en Colombia determinaron el factor K considerándolo el factor más importante para la predicción de la erosión reflejando el hecho de que diferentes suelos se erosionan a diferente tasa cuando los demás factores que actúan sobre la erosión no tienen variación significativa en dicho lugar. Se tomaron muestras de la zona determinando de forma directa y en laboratorio el factor K mediante un simulador de lluvia, se establecieron algunas propiedades del suelo y se correlacionaron con el factor K y con la aplicación de Sistemas de Información Geográfica (SIG) generaron el mapa para dicha zona de estudio.

Piscitelli *et al.*, (2010) obtuvieron valores de erodabilidad K mediante la aplicación de la fórmula USLE para suelos representativos de la cuenca alta del arroyo Azul, Buenos Aires Argentina, determinando que tanto la cuantificación de la erodabilidad, como su relación con algunas propiedades de los suelos pueden contribuir a entender la alta diversidad de los suelos, la fisiografía y asumir su complejidad al momento de plantear modelos de cuantificación de la erosión hídrica. Estableciendo la importancia de las propiedades del suelo y mejorando las recomendaciones sobre las medidas de manejo de los suelos teniendo en cuenta las limitaciones para la aplicación de los modelos de medición.

Portuguez (2015) Lima-Perú realizó la estimación de la pérdida de suelo por erosión hídrica en la cuenca del río Siguanay utilizando geoinformática, utilizó el modelo USLE como método para el cálculo de las tasas de pérdida del suelo, posibilitando la elaboración de una cartografía de estados erosivos permitiendo la identificación de las áreas de especial susceptibilidad a la erosión con la aplicación de SIG como herramienta eficaz en este estudio.

Rodrigo-Comino *et al.*, (2020) pertenecientes a la Universidad de Valencia y la Universidad de Málaga, publicaron un análisis detallado sobre cómo los procesos hidrológicos y las actividades humanas aceleran la erosión y degradación del suelo en distintos territorios. Su investigación, publicada en la revista *Water*, aborda desde experimentos de laboratorio hasta estudios de campo en diversas regiones, subrayando la complejidad de los mecanismos erosivos y la necesidad de enfoques integrados para la conservación del suelo.

Jaya-Santillan, (2020) de la Facultad de Ciencias de la Tierra y Agua. Universidad Regional Amazónica Ikiam, Tena. Napo, Ecuador. Basándose en el método USLE, se utilizó SIG para modelar las tasas de erosión en la Microcuenca de Río Muchacho (MRM). Los resultados de la simulación muestran una pérdida media de suelo de 74,4 t/ha/año, correspondiente a la categoría de "erosión alta". Las cabeceras de la MRM, caracterizadas por suelos dispersos, vegetación

escasa, pastoreo, pendientes pronunciadas y lluvias frecuentes, presentan tasas de erosión del suelo medias a muy altas (> 25 t/ha/año). Por otro lado, las zonas con alta densidad de vegetación, pendientes moderadas y escasas precipitaciones presentan tasas de erosión bajas (0-25 t/ha/año) y se sitúan principalmente en la parte central y baja de la cuenca. Los resultados de la simulación mostraron una distribución de los datos sesgada a la derecha ($skew = 1,8$), es decir presenta valores de erosión altos con mayor frecuencia; y leptocúrtica ($Kurt = 21,2$) con valores atípicos poco frecuentes.

Aramayo *et al.*, (2024) en un estudio publicado en Investigaciones Geográficas, analizaron la susceptibilidad a la erosión hídrica en una cuenca de la Patagonia árida utilizando el modelo USLE, herramientas de teledetección, sistemas de información geográfica (SIG) y análisis de componentes principales. Estimaron una tasa promedio de pérdida de suelo de 27 t/ha año y determinaron que el factor de pendiente tuvo el mayor control sobre la variabilidad de la erosión. Los escenarios evaluados mostraron que los cambios en la erosividad de las precipitaciones generaban mayores diferencias que los cambios en la cobertura vegetal o la intervención en humedales. Este enfoque permitió identificar áreas sensibles y definir prioridades para la conservación de recursos naturales en zonas áridas.

1.2.1 Antecedente Nacional

Dentro de las investigaciones nacionales se encuentra Espinosa *et al.*, (2011) quienes estudiaron la Zona II de la cuenca de Burgos (México) con el objetivo de evaluar y conocer los distintos tipos de degradación, originada por la acción antrópica, delimitando los tipos de suelos presentes y evaluando la degradación siguiendo la metodología de ASSOD propuesta por Van Lyden en 1997, dando como resultados el 74% de la zona estudiada presentó evidencias de degradación siendo la erosión hídrica, compactación y erosión eólica los dominantes y las causas principales el sobrepastoreo, prácticas agrícolas superficiales, actividades industriales.

Montes-León *et al.*, (2011) elaboraron un Mapa Nacional de Erosión Potencial para las 37 regiones hidrológicas del territorio mexicano utilizando información nacional disponible desarrollando un mapa con base en la USLE, lo cual identificaron las zonas más susceptibles de sufrir el problema de la erosión potencial, proponiendo implementar planes de conservación u otras medidas que mitiguen la erosión en los sitios donde la pérdida de suelo sea alta o extrema.

Bolaños *et al.*, (2016) derivado de un análisis de varios años presentaron el mapa Nacional de erosión escala 1:50 000 en colaboración el programa Mexicano del carbono con el colegio de postgraduados, mediante técnicas de fotointerpretación de imágenes satelitales, cartografía especializada e información de campo, dando como resultado que el 76% de la superficie nacional tiene algún grado de afectación por erosión hídrica que corresponde al 6.79% de grado extremo, el 5.79 % grado fuerte, 26.37% grado moderado y 37.06 grado leve, ubicando también los estados más afectados por erosión apreciable así también se presentó información básica requerida para que sea posible estimar de manera general las pérdidas de carbono orgánico del suelo debido a la erosión hídrica que se presenta.

Pérez-Salinas *et al.*, (2019) basados en la ecuación universal de pérdida de suelo estimaron la erodabilidad y riesgo de erosión para los suelos negros del centro de México: estudio de un Phaeozem con muestras aleatorias de tres sitios determinaron el porcentaje de materia orgánica, clase textural, tipos de estructura y permeabilidad, los resultados revelaron diferencias entre los factores obtenidos con la ecuación específica para molisoles en la provincia de Yunan en China y la nomografía de referencia desarrollada en EUA son estadísticamente diferentes. Una combinación de ambas podría dar mejores resultados que emplear solo valores de textura y que subestiman los resultados en cuanto a la tasa de erosión.

En una revisión realizada por Aguirre-Salado *et al.*, (2023) publicada bajo el título Erosión hídrica, redistribución del carbono orgánico del suelo y conservación del suelo y agua: una revisión, se

analizaron las principales tendencias de investigación a nivel global entre 2012 y 2022. Los resultados mostraron que el 80 % de los estudios se centraron en la redistribución del COS asociada a la erosión hídrica y el efecto de prácticas de manejo y conservación del suelo; sin embargo, no se encontraron investigaciones específicas para el caso de México. A pesar de la implementación exitosa de obras de conservación como presas de control de sedimentos, no se ha evaluado su impacto en el almacenamiento de carbono. Los autores identifican áreas clave para futuras investigaciones en México: analizar la redistribución del COS por erosión hídrica, estimar su almacenamiento en sedimentos, evaluar el potencial de prácticas mecánicas de conservación como sumideros de carbono y desarrollar un índice de riesgo de pérdida de COS mediante sensores remotos.

1.2.2 Antecedente Regional

De manera regional Vázquez-Cuevas y Roldan (2010) evaluaron los cambios de cobertura del suelo en la Reserva de la Biosfera Barranca de Metztitlán (RBBM), en un periodo de 33 años de 1977 al 2006 utilizando imágenes satelitales generando mapas comparativos de cobertura de suelo de ambas fechas para determinar el tipo de cobertura presente en la RBBM, determinando que la mayor presencia corresponde a matorral con 70.3% y 62.3 % respectivamente. Señalando que el mayor cambio generado en el periodo de estudio se debió a la influencia directa de las actividades antropogénicas dando como resultado al pastizal como la cobertura con mayor tasa de crecimiento y al contrario del bosque de latifoliadas redujo su cobertura en el área.

Hernández (2023) del Servicio Geológico México (SGM) elaboró un mapa de susceptibilidad a la erosión hídrica y erodabilidad en base a las características físico químicas para el municipio de Mineral del Monte, México que de acuerdo con la metodología del SGM y con la utilización de mapas temáticos asociados a factores que condicionan la erosión y erodabilidad.

Ruiz *et al.*, (2024) Presentaron en la Revista Latina Científica Multidisciplinar el cálculo de la relación inversa entre la erosión Hídrica de suelos en Hidalgo y el rendimiento de la agricultura, así como la correlación con la pobreza y la carencia alimentaria de la población, para dicha evaluación se utilizó la ecuación universal de pérdida de suelo y se obtuvo un coeficiente relacionado con los rendimientos de maíz grano, evaluando económicamente la pérdida de productividad y un análisis de correlación para vincularlo a la pobreza y carencia alimentaria, dando como resultados que en Hidalgo por cada tonelada por ha de suelo erosionado se pierden 0.0011 toneladas por ha de rendimientos que en valores monetarios se refleja en una cantidad de 25 pesos hasta 1663 pesos por ha. Concluyendo así que los costos de la erosión reflejan su impacto en la productividad agrícola, considerando al suelo como un recurso de la producción.

El Centro Nacional de Prevención de Desastres CENAPRED (2024) presenta el Atlas de Riesgos Metztlán donde se representa la distribución de los tipos de suelo, sus características y uso presentes en el municipio, así como la identificación de diferentes tipos de erosión hídrica dentro del municipio; erosión hídrica laminar; erosión en surcos y erosión en cárcavas. Dando cifras de 48 753 ha del territorio municipal no cuenta con alguna erosión evidente y mostrando resultados de erosión hídrica presente en el municipio que a continuación se agrupan las áreas según las clases y combinaciones de procesos erosivos, cabe mencionar que en el atlas de riesgo no se presenta la metodología utilizada para la obtención de los resultados de erosión.

Tabla 1. Erosión Hídrica para Metztlán según CENAPRED, 2024.

Categoría	Descripción	Hectáreas
Surco leve	Erosión hídrica por surco leve	11
Laminar extrema	Solo laminar extrema	729
	Cárcava moderada	402
	Cárcava leve	64
	Total laminar extrema	1,195
Laminar fuerte	Erosión hídrica laminar fuerte	5,297
Laminar moderada	Solo laminar moderada	7,203
	Surco moderado	87
	Surco leve	1,984
	Total laminar moderada	9,274

Laminar leve	Solo laminar leve	13,267
	Cárcava leve	23
	Eólica	584
	Total laminar leve	13,874

1.3 Justificación

El grado de erodabilidad y la erosión hídrica representan un reto significativo para los ecosistemas, la productividad agrícola y el bienestar social, especialmente en regiones vulnerables como el noreste de Metztitlán, Hidalgo. Este estudio permitirá identificar áreas críticas que requieren atención, ya que la pérdida de suelo impacta directamente en la capacidad de sostener la biodiversidad, garantizar la seguridad alimentaria y mantener los servicios ecosistémicos. Además, que gran parte de la región pertenece a la Reserva de la Biosfera Barranca de Metztitlán.

Es necesario cuantificar e identificar la susceptibilidad por erodabilidad y erosión hídrica proporcionando herramientas de toma de decisiones para desarrollar estrategias de manejo sostenible del suelo y los recursos naturales; contribuyendo en la creación de mapas temáticos basados en evidencia técnica y científica.

1.4 Objetivos

1.4.1 Objetivo General

Determinar el grado de erodabilidad y erosión hídrica mediante la integración de las características intrínsecas y fisicoquímicas de los suelos en la región noreste del municipio de Metztlán, Hidalgo, tomando como referencia la Ecuación Universal de Pérdida de suelos (USLE) para identificar las zonas de mayor vulnerabilidad en el territorio.

1.4.1 Objetivos específicos

- Realizar campaña de muestreo y colecta de suelos para su posterior análisis fisico-químicos mediante la NOM 021 RECNAT- 2000.
- Calcular el Factor R utilizando metodología de la FAO para determinar el grado de influencia del factor de la precipitación en el proceso de erodabilidad.
- Calcular el Factor K para determinar la erodabilidad del suelo a partir de la caracterización físico-química.
- Calcular el Factor LS (longitud y pendiente del terreno) considerando las características topográficas de la zona.
- Interpretar el Factor C (cubierta vegetal) para analizar la protección que ofrece la vegetación al suelo de acuerdo a la propuesta de Becerra, 1997.
- Interpretar el Factor P (prácticas de conservación del suelo) presentes en la región
- Genera un mapa temático que represente la susceptibilidad a la erosión hídrica en la región noreste de Metztlán.

CAPÍTULO II MARCO TEÓRICO

2.1 Marco Normativo

El artículo 27 Constitucional de los Estados Unidos Mexicanos establece las bases sobre la propiedad de la tierra y el suelo se da el derecho a la nación de regular el uso del suelo y los recursos naturales para asegurar su conservación, lo que incluye medidas para prevenir y controlar la erosión del suelo.

En México, debido a las consecuencias ambientales, económicas y sociales de la degradación de los suelos, se han implementado leyes, políticas y programas para su conservación. Sin embargo, la respuesta institucional sigue siendo insuficiente y poco cohesionada, lo que incrementa los costos asociados a la degradación, sólo la Ley General de Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente (LGEEPA) y la Ley de Desarrollo Forestal Sustentable (LGDFS) reconocen al suelo como un recurso natural que debe manejarse de forma sustentable y conservarse (Cotler *et al.*, 2007).

El Ordenamiento Ecológico General del Territorio (OEGT) de México en 2012 aborda de manera integral la gestión de los recursos naturales y el uso de suelo, incluyendo la problemática de la erosión del suelo que incluye identificar áreas vulnerables a la erosión y establecer estrategias adecuadas para su protección y conservación, fomenta las prácticas de uso sostenible del suelo que ayuden a minimizar la erosión, así mismo establece la necesidad de zonificar el territorio regulando el uso de suelo en áreas propensas a la erosión delimitando las inapropiadas a actividades que puedan agravar la erosión como la deforestación o ciertos tipos de agricultura intensiva y establece la importancia de implementar monitoreo y evaluación para detectar cambios en la erosión del suelo y ajustar las estrategias necesarias.

El Plan Nacional de Desarrollo (PND 2025-2030), referente a suelos se enfoca en la gestión y conservación del suelo, con el objetivo de lograr un desarrollo sostenible. Esto implica

implementar estrategias para mejorar el manejo del suelo en la agricultura, urbanizar de manera ordenada y sustentable, y promover la conservación de la biodiversidad. El PND busca evitar la degradación del suelo y promover su uso sostenible, para asegurar su disponibilidad y calidad a largo plazo.

El Instituto Nacional del Suelo Sustentable en 2020, con fundamento en las atribuciones que le otorga su Decreto de creación, dio inicio a la elaboración de la Política Nacional de Suelo (PNS) en 2018 y es un documento que busca transformar la gestión del suelo en México y que tiene por objetivo establecer principios, retos estratégicos y una agenda de coordinación institucional para gestionar el suelo de manera inclusiva y sostenible teniendo como uno de sus objetivos que la gestión del suelo garantizará la preservación y restauración del equilibrio ecológico, la protección al ambiente y el aprovechamiento sustentable del patrimonio natural.

La Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural puso en marcha la Estrategia Nacional de Suelo para la Agricultura Sostenible (ENASAS) en 2022 y en colaboración con organismos nacionales e internacionales con el objetivo de fomentar la ciencia e investigación para la recuperación y conservación del recurso suelo para crear conciencia sobre su importancia en la agricultura y la producción de alimentos resaltando que a mediano plazo el objetivo es generar e integrar conocimiento, desarrollar innovaciones tecnológicas promoviendo la restauración de los suelos degradados, mientras que a largo plazo será una ruta para desarrollar una Ley de Suelos y conformar una Comisión Nacional de Suelos.

Un Ordenamiento Ecológico Territorial (OET), de acuerdo la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT) es un instrumento de política ambiental que busca regular e inducir el uso del suelo y las actividades productivas, con el propósito de proteger el medio ambiente y aprovechar de forma sustentable los recursos naturales (LEGEPA, Título Primero, Art.3 fracción XXIV) se destaca que el Ordenamiento Ecológico es un elemento de planificación

del territorio que busca garantizar el uso de los recursos naturales e incluye disposiciones específicas para prevenir la degradación del suelo, promover su conservación y restauración, y regular su uso en actividades productivas. Además, se consideran factores como la contaminación, la erosión y la desertificación para definir políticas de manejo sostenible.

En el 2000 el Diario Oficial de la federación (DOF) decreta por el que se declara como Área Natural Protegida con el carácter de Reserva de la Biosfera, la región conocida como Barranca de Metztitlán donde en el Programa de Manejo la conservación de los suelos es uno de los objetivos de fijados para la Reserva. De esta manera dentro de los componentes de manejo referente a la restauración ecológica tiene como uno de sus objetivos identificar y ubicar áreas con problemas de erosión y diagnosticar el grado de conservación, elaborar el programa de restauración de suelos, construcción de obras para control de erosión en laderas y cauces, ubicar áreas potenciales para siembra directa en acciones de restauración.

2.2 Marco conceptual

2.2.1 Suelo

El suelo es un componente esencial del planeta y sus ecosistemas, está compuesto por minerales, materia orgánica, microorganismos, aire y agua, siendo el producto final de la influencia del tiempo combinado con clima, la topografía, organismos y materiales parentales. En el suelo se hallan componentes derivados de la roca original muy fragmentados, seres vivos y muertos con cierto nivel de descomposición, además de aire y agua, el suelo se compone de una sección mineral inorgánica y otra orgánica de una parte líquida y otra gaseosa (FAO,1996).

Por su parte el Departamento de Agricultura de los Estados Unidos (USDA) define que el suelo es un cuerpo natural formado por una fase sólida (minerales y materia orgánica), una fase líquida y una fase gaseosa que ocupa la superficie de la tierra, organizada en horizontes o capas de

materiales distintos a la roca madre, como resultado de adiciones, pérdidas, transferencias y transformaciones de materia y energía, que tiene capacidad para servir de soporte a las plantas con raíces en un medio natural.

Los componentes inorgánicos en el suelo pueden variar desde las gravas, las arenas en su mayor parte inactivas químicamente, partículas como los limos y arcillas finas sirven como depósitos de donde las raíces de las plantas extraen nutrientes, además que las partículas más finas llegan a determinar en gran medida la capacidad del suelo para almacenar agua vital para el desarrollo de las plantas.

El suelo contiene una fracción orgánica compuesta, en su mayoría, por residuos de origen vegetal y animal, la parte líquida del suelo es en su mayoría agua con elementos minerales en disolución, oxígeno y dióxido de carbono disueltos, llega a ser muy compleja y tiene una gran importancia por ser el medio por el que los nutrientes son absorbidos por las raíces de las plantas y cuando se carece de los elementos requeridos por las plantas para su desarrollo el suelo puede tornarse estéril. El componente gaseoso del suelo son el oxígeno, el nitrógeno y el dióxido de carbono principalmente (Bello, 2008).

la agricultura el suelo es la capa de materia fértil que recubre la superficie de la Tierra y de la cual las plantas obtienen soporte, nutrientes y agua. Para el medio ambiente cumple funciones y procesos ecosistémicos que regulan y distribuyen del flujo de agua (SEMARNAT, 2018).

- **Importancia económico social del suelo**

Según la FAO (2015) el suelo es la base para la agricultura y el medio en el que crecen casi todas las plantas de las que obtenemos alimentos y estima que el 95% de nuestros alimentos se produce directa o indirectamente en nuestros suelos.

El suelo es un recurso natural no renovable y se encuentra en todos los ecosistemas, desempeña funciones de las cuales dependen los servicios ambientales que mantienen la biodiversidad, en

el suelo se sostienen y alimentan las plantas para su desarrollo y también varios tipos de animales, incluida la existencia humana (SEMARNAT, 2018).

2.2.2 Características del suelo

Las características de cada suelo dependen de varios factores. Los más importantes son el tipo de roca que los originó, su antigüedad, el relieve, el clima, la vegetación y los animales que viven en él, además de las modificaciones causadas por la actividad humana.

El tamaño de las partículas minerales que forman el suelo determina sus propiedades físicas: textura, estructura, capacidad de drenaje del agua, aireación. Los gránulos son más grandes en los suelos arenosos, tienen una estructura suelta y son fáciles de manejar; sin embargo, los surcos tienden a deshacerse y el agua penetra en ellos con rapidez, tienen pocas reservas de nutrientes aprovechables por las plantas. Los suelos limosos tienen gránulos de tamaño intermedio, son pesados y con pocos nutrientes (FAO, 1996).

Los suelos arcillosos están formados por partículas muy pequeñas. Son pesados, no drenan ni se desecan fácilmente y contienen buenas reservas de nutrientes. Al secarse se endurecen y forman terrones. Son fértiles, pero difíciles de trabajar cuando están muy secos.

Los suelos francos son mezclas de arena, limo y arcilla. Son fértiles y al secarse forman pequeños terrones que se deshacen. Un suelo con una composición equilibrada de cada mineral es un suelo agrícola fácil de trabajar y con buenas reservas de nutrientes. Mantiene la humedad a pesar de drenar libremente (FAO, 1996).

Cuando los poros entre las partículas de suelo son muy pequeños, se favorece la retención de agua y el encharcamiento. La presencia de materia orgánica permite que el agua se impregne e infiltre lentamente, logrando así que las raíces la aprovechen mejor. A su vez, la presencia de materia orgánica permite limitar la pérdida de nutrientes y facilita que sean captados por las plantas. Los suelos no tienen una estructura uniforme: están constituidos por capas que se diferencian por el tamaño y composición de las partículas. La capa superficial es más compacta,

se seca con rapidez y está poblada por pocos organismos, especialmente lombrices. Por debajo de ella, está el humus, donde se acumulan microorganismos y nutrientes (FAO, 1996).

Las propiedades químicas del suelo dependen de la proporción de los distintos minerales y sustancias orgánicas que lo componen. El contenido de nitrógeno, fósforo, potasio, calcio y magnesio debe ser abundante y equilibrado. La materia orgánica siempre contiene carbono, oxígeno e hidrógeno, además de otros elementos. Al despedazar y descomponer las plantas y animales muertos, los microorganismos liberan los nutrientes permitiendo que puedan ser utilizados nuevamente (FAO, 1996).

- **Textura del suelo**

La textura revela la proporción de partículas de diferente tamaño, como la arena, el limo y la arcilla presentes en el suelo. La textura se relaciona con la facilidad con que se puede trabajar el suelo, la cantidad de agua y aire que puede almacenar y la rapidez con que el agua se filtra y atraviesa el suelo (FAO, 1996).

- **Determinación de la textura**

La identificación de la textura se limita en indicar para cierto suelo la proporción que representa cada uno de sus componentes, se trata de un análisis del tamaño de su granulometría.

Para determinar el tipo granulométrico o clase textural de un suelo, se recurre a varios métodos, se aplican los diagramas triangulares, el uso de un triángulo de texturas nos proporciona una aproximación inicial en la interpretación del análisis de un suelo, podemos decir que este diagrama facilita clasificar un suelo en un grupo definido por sus características; su aplicación ayuda a establecer conceptos y estandarizar en cierta medida la interpretación de los resultados del análisis granulométrico (Rucks *et al.*, 2004).

2.2.3 Diversidad de suelos en México

Los principios básicos para la clasificación de los suelos según la Base Referencial Mundial Del Recurso Suelo en 2022 (WRB por sus siglas en inglés) se basa en las propiedades definidas en

términos de horizontes, propiedades y materiales de diagnóstico, en medida de lo posible observadas en campo.

De acuerdo con el INEGI en (2007) mencionado por SEMARNAT en (2018), en México existen 26 de los 32 grupos de suelo reconocidos por el Sistema Internacional Base Referencial Mundial del Recurso Suelo (IUSS, 2014). Dominan los Leptosoles (28.3% del territorio), Regosoles (13.7%), Phaeozems (11.7%) y Calcisoles (10.4%), Luvisoles (9%) y Vertisoles (8.6%) que, en conjunto, ocupan 81.7% de la superficie nacional (Figura 1).

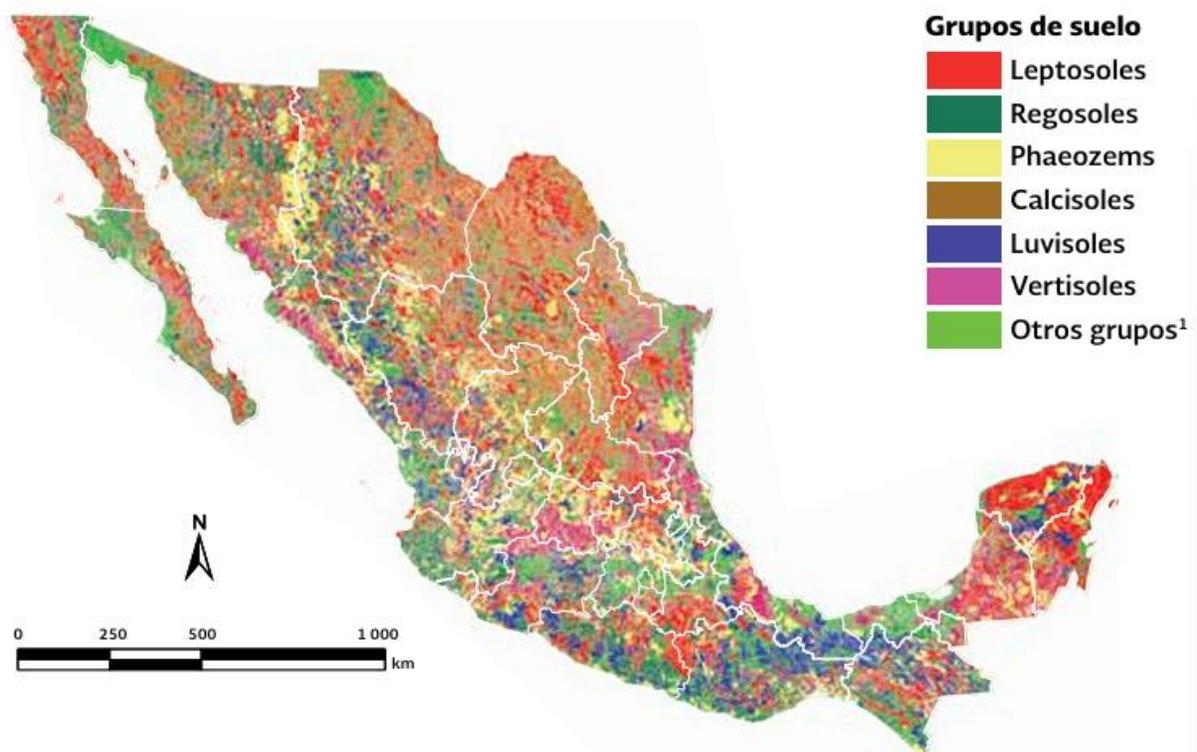


Figura 1. Principales grupos de suelo en México (INEGI, 2007).

La comprensión de los procesos formadores del suelo contribuye a una buena caracterización de los suelos en relación a la selección de características de diagnóstico, aunque los procesos de formación no deben usarse como criterios de diferenciación (FAO, 2015).

En el estado de Hidalgo se encuentran presentes doce principales unidades de suelo, de acuerdo con la clasificación FAO/UNESCO (1970), modificada por INEGI en 2006, y mencionada en Ramírez-Bautista et al., 2017 (Figura 2).

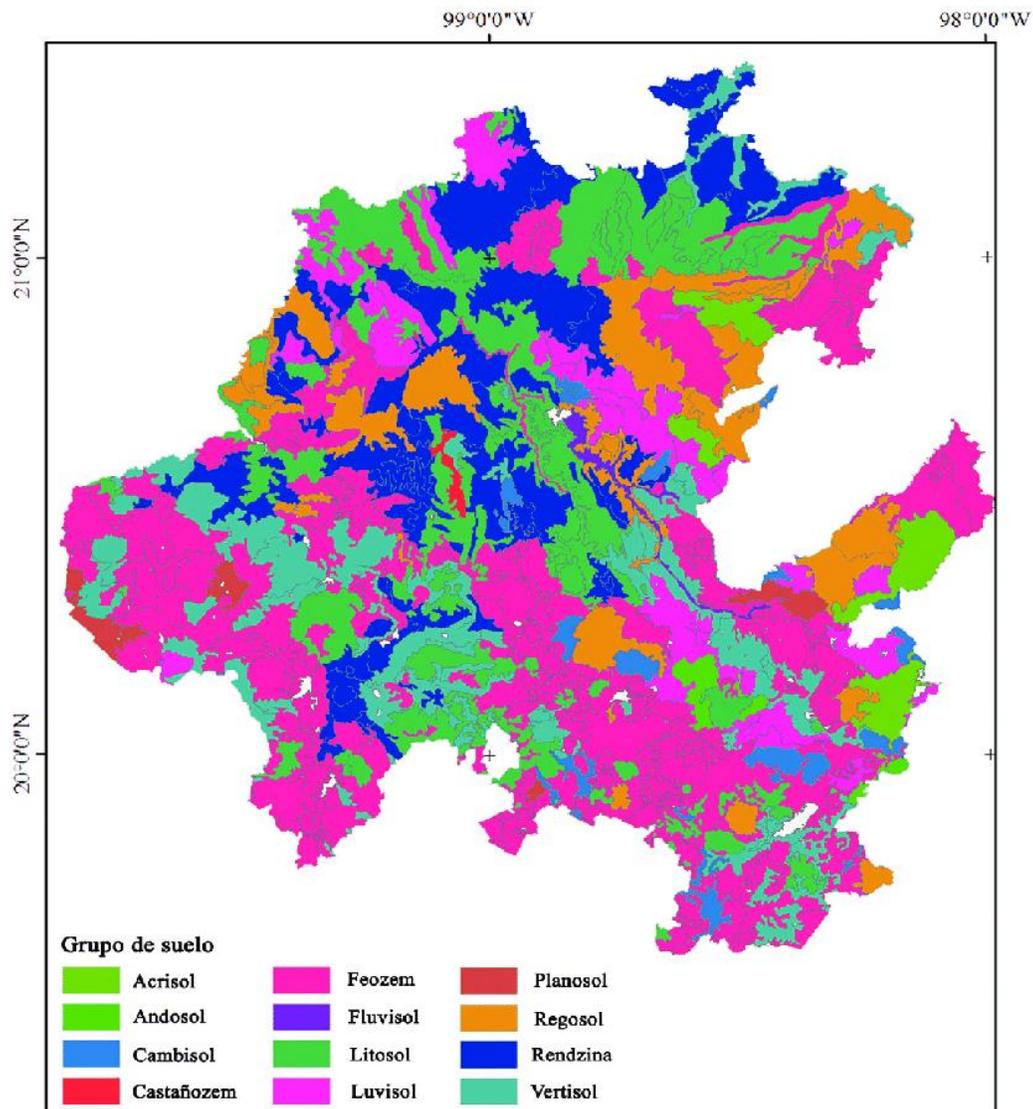


Figura 2. Tipos de suelo en el estado de Hidalgo de acuerdo a la clasificación de INEGI (2006) tomado de Ramírez-Bautista et al., en 2017.

2.2.4 Degradación de los suelos

La degradación del suelo hace referencia a los procesos inducidos por las actividades humanas que provocan la disminución de la productividad biológica, su biodiversidad y disminuye su capacidad actual y futura del suelo para sostener la vida (Oldeman, 1998).

Así mismo la FAO la define como un cambio en la salud del suelo resultando en una disminución de la capacidad del ecosistema para producir bienes o prestar servicios para sus beneficiarios. Los suelos degradados contienen un estado que no pueden proporcionar los bienes y servicios normales o lo que se espera del suelo.

La Comisión Europea en su Atlas Mundial de la Desertificación coloca la degradación del suelo en una perspectiva más amplia ya que la erosión del suelo no solo es un factor biofísico, sino que también en un componente complejo en los sistemas socio ambientales que altera los servicios fundamentales de los que el ser humano depende (Cherlet *et al.*, 2018).

Durante la conferencia internacional celebrada en Agadir, Marruecos, la UNESCO (2024) advirtió sobre el acelerado deterioro de los suelos a nivel mundial, señalando que para el año 2050, hasta un 90 % de los suelos del planeta podrían sufrir daños severos.

2.2.5 Degradación de los suelos en México

Por su relevancia económica, social y política de la degradación del suelo, tanto en el ámbito rural como el urbano, se han llevado a cabo tanto en México como en diversas partes del mundo diversas investigaciones para medir magnitud de la superficie impactada, junto con el tipo y grado.

En el caso de México, se han realizado distintos estudios que, por sus diversas aproximaciones, metodologías y definiciones, dificultan la comparabilidad de sus resultados. Ejemplo de esta divergencia son las estimaciones publicadas en 2013 por la Comisión Nacional Forestal (CONAFOR) y la Universidad Autónoma Chapingo (UACH) como parte del estudio para delimitar la Línea Base Nacional de Degradación de Tierras, y en el cual estimaron en 61.7% la superficie

nacional afectada por erosión hídrica, eólica y degradación química y física (Hernández *et al*, 2021).

Siendo la degradación el resultado de la interacción de factores ambientales, como el tipo de suelo, la topografía y el clima, y de factores humanos, como la deforestación, el sobrepastoreo y el uso de los recursos naturales. En un amplio muestreo llevado a cabo en campo y realizado por SEMARNAT en 2003 determinó de manera directa cuatro procesos de degradación del suelo, erosión hídrica y eólica y degradación física y química (Figura 3).

En México, los cuatro principales mecanismos de degradación del suelo son las actividades industrial, agrícola y ganadera, así como la urbanización, relacionadas sobre todo con la acción humana, las cuales disminuyen su productividad biológica y su capacidad actual o futura para sostener la vida de las personas. Los datos más recientes indican que 45 % de los suelos del país presentan algún tipo de degradación inducida por el hombre (SEMARNAT, 2012).

2.2.6 Degradación física

Se puede presentar en cinco tipos específicos: compactación, encostramiento, anegamiento, disminución de la disponibilidad de agua y pérdida de la función productiva. La degradación física es el proceso menos extendido en el país, ya que afecta a cerca de 6% de la superficie nacional; sin embargo, tiene un alto impacto debido a que es prácticamente irreversible y conlleva a la pérdida de la función productiva de los terrenos (SEMARNAT, 2012).

2.2.7 Degradación química

Como la declinación de la fertilidad y reducción del contenido de materia orgánica, contaminación, salinización/alcalinización, acidificación, eutrofización. La degradación química fue el proceso de degradación del suelo más extendido en el país en el año 2002, con alrededor de 34.04 millones de hectáreas (17.8% del territorio), esto de acuerdo al informe de la situación del medio ambiente generado por SEMARNAT en el 2012.

2.2.8 Erosión eólica

Cuando el suelo es débilmente agregado, es seco, la superficie lisa, desprovista de vegetación y los vientos sean fuertes, se encuentra propenso a la erosión eólica, afecta principalmente a las regiones áridas, semiáridas y subhúmedas secas del país, aunque no es exclusiva de ellas. Sus causas también se atribuyen a una insuficiente protección del suelo por la cubierta vegetal, a la destrucción de la estructura del suelo y a niveles bajos de humedad. A escala nacional, 18.12 millones de hectáreas (equivalentes al 9.5% del territorio) muestran evidencias de erosión eólica (SEMARNAT, 2012).

2.2.9 Erosión hídrica

Se debe a un proceso continuo de separación de partículas y agregados de la masa del suelo, su transporte y sedimentación, siendo el agua el agente activo de este proceso, generalmente se expresa en unidad de peso por unidad de área y unidad de tiempo (Mg /ha año) o en espesor del suelo perdido por unidad de tiempo (mm/año).

Este proceso de erosión se inicia cuando las gotas de lluvia golpean terrones y agregados de la superficie desnuda del suelo, causando el desplazamiento de las partículas más finas en suspensión en el flujo del agua, y en su trayecto por la pendiente va abriendo surcos a lo largo de su recorrido (López, 2002).

De la superficie nacional con erosión hídrica (22.73 millones de ha), 56.4% se encuentra en el nivel ligero, 39.7% en el nivel moderado y 3.9% entre fuerte y extremo (SEMARNAT, 2012).

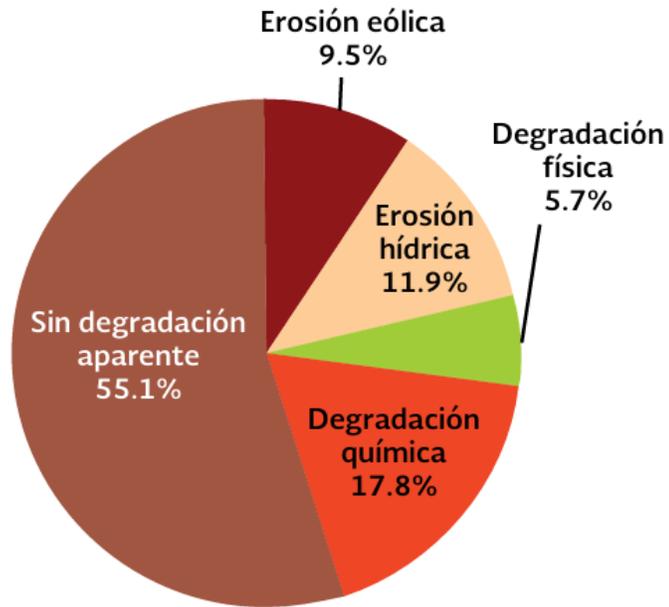


Figura 3. Superficie relativa afectada por procesos de degradación en México (SEMARNAT, 2008).

El Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI) publicó en 2014 los resultados preliminares del mapa de Erosión de Suelos en México escala 1:250 000, en el que muestra que cerca de 55% del territorio nacional está afectado por erosión hídrica y eólica (Figura 4).



Figura 4. Tipos de erosión en México (INEGI, 2014).

El estado de Hidalgo es el segundo estado más afectado por erosión hídrica (Ruiz *et al.*, 2024) se estima que se pierden 0.0011 toneladas por hectárea de producción agrícola en el estado, los datos indican que se pierde un promedio del 10% de la producción por la erosión de los suelos en Hidalgo (Ruiz *et al.*, 2024).

El Ordenamiento Ecológico Territorial del Estado de Hidalgo (OETH) en la etapa de diagnóstico 2019 considera la erosión del suelo es la remoción del material superficial por acción del viento o del agua. Este proceso resulta de la presencia del agua en las formas: pluvial o de escorrentía, que en contacto con el suelo (las primeras con impacto y las segundas con fuerzas tractivas), vencen la resistencia de las partículas (fricción o cohesión) del suelo generándose el proceso de erosión.

El OETH determinó el riesgo de erosión o erosión potencial clasificando que la zona de mayor riesgo de erosión está ubicada al N y NE del estado de mientras que el S y SE presentan un menor grado de potencial a la erosión. En las zonas N y NE, existen relieves altamente escarpados, donde se puede apreciar una relación directamente proporcional en la que a mayores pendientes es mayor el riesgo de erosión. Por lo que se puede determinar que las pendientes más escarpadas (que pertenecen al sistema de la Sierra Madre Oriental), donde la precipitación, tipo de suelo y la pendiente aumentan el riesgo de erosión.

La potencialidad de erosión a nivel estatal dio un rango de potencialidades de muy baja a muy fuerte, en el caso particular de la región de la Sierra Baja conformada por 5 municipios (Atotonilco el Grande, Cardonal, San Agustín Metzquititlán, Santiago de Anaya y Metzquititlán) la potencialidad de erosión moderada representa la mayor superficie con 39.38%, mientras que la de menor superficie con 4.63% fue la erosión muy baja.

El municipio con mayor porcentaje de erosión se registró para Metzquititlán con 27.24%. Una explicación para el elevado porcentaje de potencialidad de erosión deriva de las pendientes abruptas de la zona y el alto porcentaje de uso de suelo agrícola (13%). Demostrando la relación directa con las pendientes ya que, el valor más bajo para el porcentaje de potencialidad de erosión fue de 7.6% para el municipio San Agustín Metzquititlán. En parte, esto se debe a las pendientes planas que predominan en este territorio.

CAPÍTULO III DESCRIPCIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO

3.1 Localización

Metztitlán se ubica en la región este del estado de Hidalgo, dentro de la zona conocida como la Sierra Baja. Sus coordenadas geográficas aproximadas son 20° 37' 36" de latitud norte y 98° 40' 07" de longitud oeste (INEGI, 2010). Las principales vías de acceso son la Carretera Federal 105, que conecta la ciudad de Pachuca, capital del estado, con el municipio de Metztitlán, y posteriormente la carretera estatal 37, que enlaza con otros municipios cercanos. Esta localización puede visualizarse en la figura 5.

Colinda al norte con los municipios de Eloxochitlán, Molango de Escamilla, Xochicoatlán y Zacualtipán de Ángeles; al este con los municipios de Zacualtipán de Ángeles, San Agustín Metzquititlán y Atotonilco el Grande; al sur con los municipios de Atotonilco el Grande, Actopan y Santiago de Anaya; al oeste con los municipios de Santiago de Anaya y Cardonal (Figura 5). El municipio se encuentra ubicado en su totalidad en la Sierra Madre Oriental, en su mayor parte formado por sierra. En menor proporción, se conforma de cañones, lomeríos y mesetas. Una pequeña parte se localiza en el eje neovolcánico, formado por llanuras; donde el 60 % está formado por pendientes mayores al 15 %. En lo que respecta a su hidrografía cuenta con el río Pánuco, la cuenca del río Moctezuma y el río Metztitlán, que cruza el Municipio, desembocando en la laguna de Metztitlán, la que se encuentra rodeada por montañas y altos árboles de nogales (INEGI, 2010).

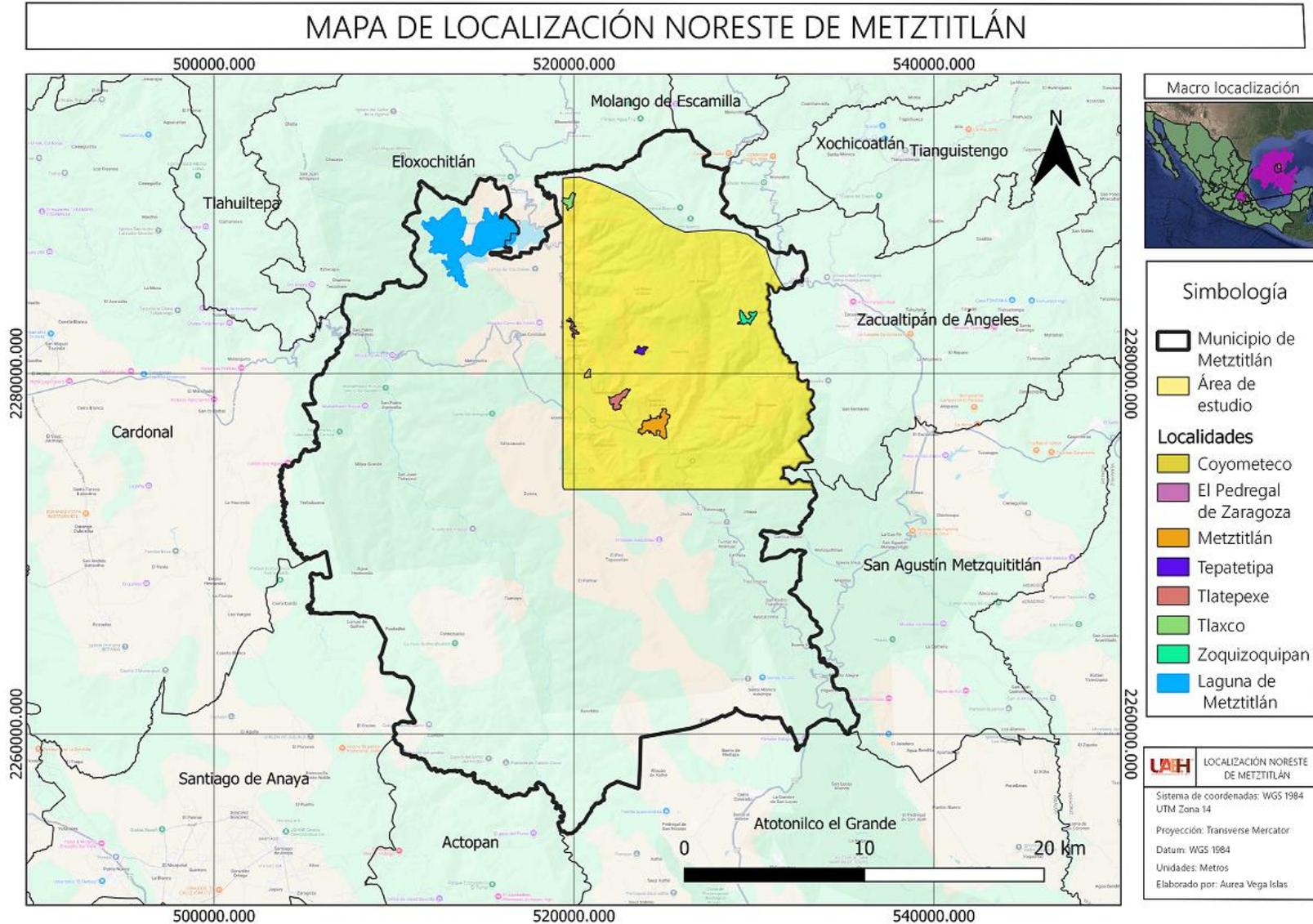


Figura 5. Mapa de localización de la zona de estudio, Noreste de Metztlán.

3.2 Clima

Se caracteriza principalmente por condiciones secas y cálidas semisecas, influenciadas por el efecto de sombra de lluvia generado por la Sierra Madre Oriental. Durante la temporada de lluvias en verano, los vientos alisios descargan gran parte de su humedad en las laderas orientales y las zonas altas de esta cadena montañosa, donde predominan bosques de pino y encino, entre otras especies de vegetación propia de climas templados. Al llegar a la barranca de Metztlán, estos vientos arriban con menor humedad, reforzando el carácter semiseco de la región, en las montañas más altas situadas al oeste de la región se libera humedad retenida en la nubosidad presente (CONANP, 2003).

De acuerdo con el Servicio Meteorológico Nacional los poblados de Metztlán y San Cristóbal cuentan con estación meteorológica (coordenadas 20°36' latitud Norte, 98°46' longitud Oeste, a una altitud de 1,253 msnm; y coordenadas 20°38' latitud Norte, 98°49' longitud Oeste, a una altitud de 1,350 msnm).

La temporada de lluvias normalmente varía de junio a septiembre. Los veranos suelen ser cálidos, con temperaturas que pueden alcanzar los 30°C durante el día, mientras que las noches suelen ser frescas. Los inviernos son más fríos, con temperaturas que pueden descender hasta los 5°C, especialmente durante la noche y en las primeras horas de la mañana. La humedad relativa puede variar significativamente durante el año, siendo más alta durante la temporada de lluvias. De acuerdo con la clasificación climática de INEGI y el compendio de información geográfica municipal INEGI (2010) se encuentran cinco tipos de climas en la zona de estudio.

El clima seco semicálido predomina en la zona central del municipio. Se caracteriza por temperaturas elevadas la mayor parte del año y escasa precipitación. Durante el día, las temperaturas pueden superar los 30 °C, mientras que por la noche bajan debido a la poca

nubosidad. Esta condición provoca ambientes áridos con vegetación y fauna adaptadas a la escasez hídrica (Ayuntamiento de Metztlán, 2024).

El clima semiseco semicálido se presenta en el norte del municipio. Se distingue por temperaturas cálidas durante casi todo el año, una temporada seca prolongada y una estación de lluvias corta. En la estación seca, la humedad ambiental disminuye considerablemente, y las precipitaciones son mínimas. Las lluvias de verano son irregulares, con tormentas breves pero intensas (Ayuntamiento de Metztlán, 2024).

En las regiones sureste y suroeste de Metztlán se encuentra el clima semiseco templado. Este presenta temperaturas moderadas y una temporada de lluvias más definida. La estación seca suele extenderse por la mayor parte del año, con días cálidos y noches frescas, y precipitaciones casi nulas. Las lluvias ocurren principalmente en verano u otoño, lo que favorece el desarrollo vegetal y agrícola (CONANP, 2003).

El clima templado húmedo aparece en una pequeña zona del noreste del municipio. Se caracteriza por temperaturas templadas a cálidas y elevada humedad atmosférica. Las lluvias son regulares y se distribuyen durante todo el año, con mayor intensidad en verano. Este clima favorece la formación de neblinas y nubosidad densa, sin temperaturas invernales extremas (Ayuntamiento de Metztlán, 2024.).

Por último, el clima templado subhúmedo se presenta en áreas del norte y sur del municipio. Se distingue por temperaturas moderadas y precipitaciones de nivel medio. Los veranos suelen ser cálidos y los inviernos frescos. La mayor parte de las lluvias ocurre en los meses cálidos, permitiendo el desarrollo de una vegetación densa, aunque no tan exuberante como en climas tropicales (Mendoza Cariño et al., 2018).

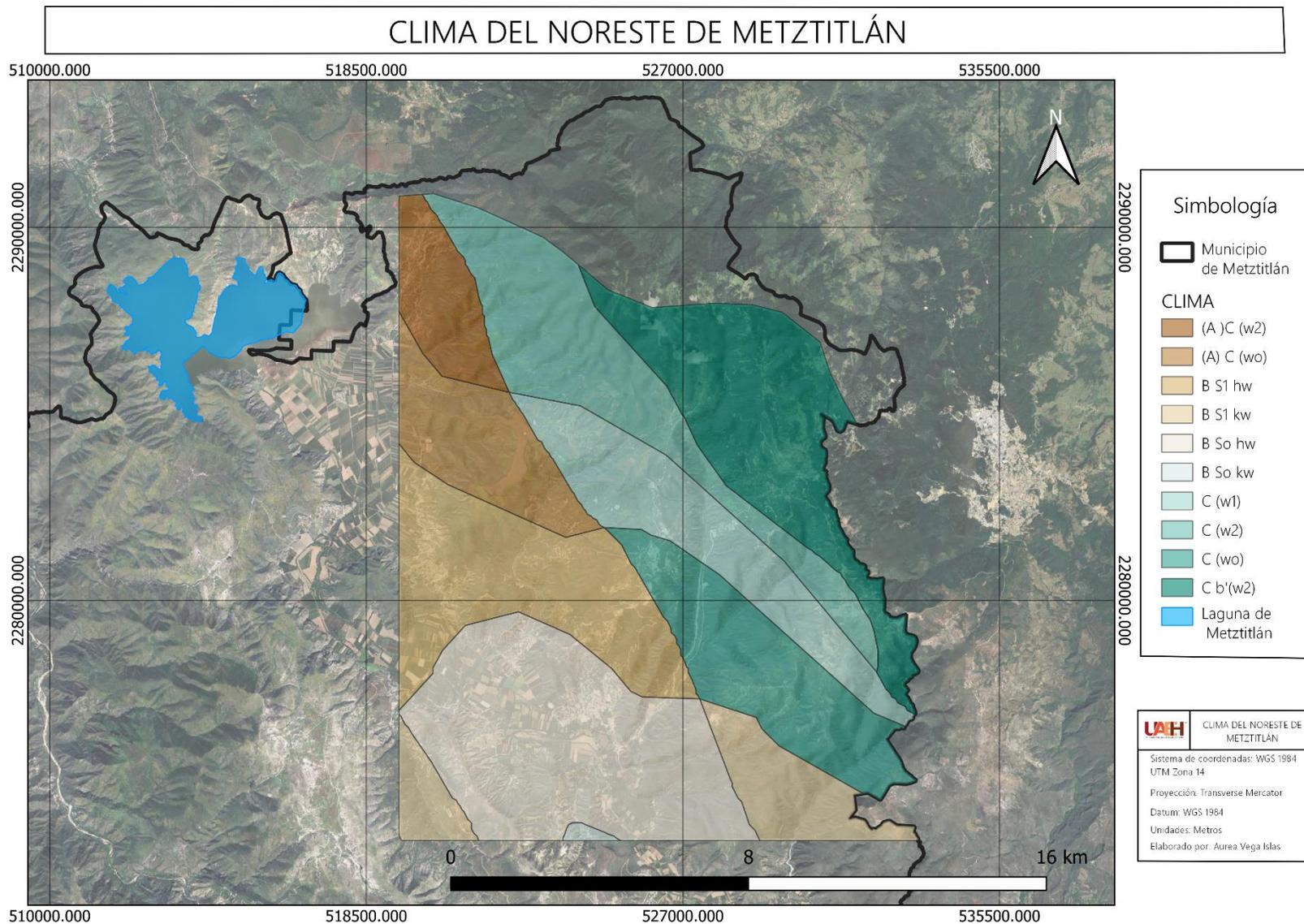


Figura 6. Mapa de unidades climáticas de la región Noreste de Metztlán.

3.3 Fisiografía

El Estado de Hidalgo se encuentra mayormente delineado por tres distintas provincias fisiográficas. En la región norte del estado, predomina la presencia de la provincia fisiográfica del Eje Neovolcánico, la cual abarca la extensión preponderante del territorio hidalguense. De manera complementaria, la provincia Sierra Madre Oriental también configura una parte considerable del paisaje, mientras que solamente algunos municipios comparten su demarcación territorial con la provincia de la Llanura Costera del Golfo Norte (INEGI, 1992).

El territorio del Municipio de Metztitlán, se encuentra delineado por dos provincias fisiográficas la Sierra Madre Oriental, Subprovincia Carso Huasteco y el Eje Neovolcánico. Subprovincia Llanuras y Sierras de Querétaro e Hidalgo.

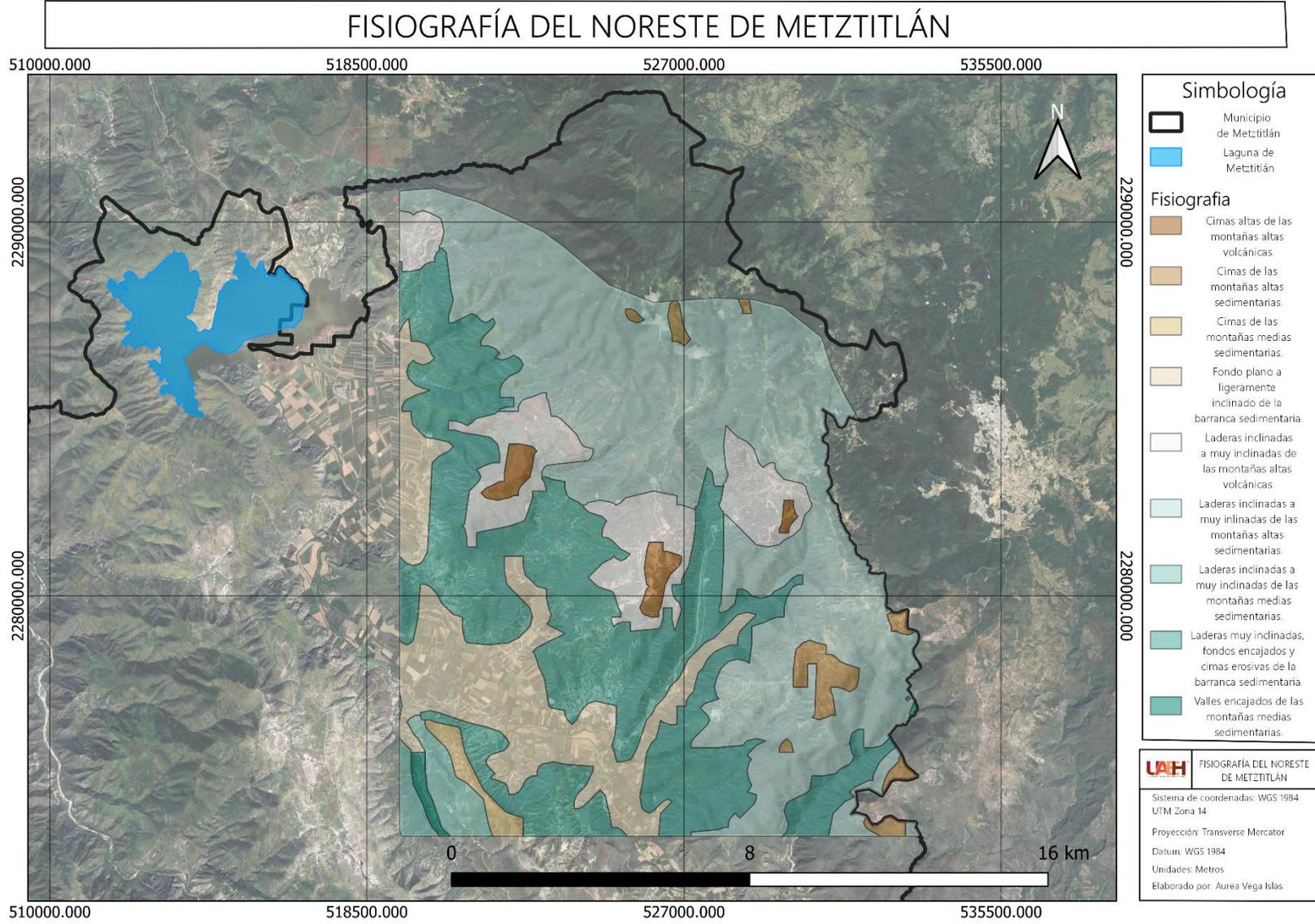


Figura 7. Mapa fisiográfico del Noreste de Metztlán.

3.4 Geología de Metztlán

La región de Metztlán forma parte de la sierra Madre Oriental, es una cordillera cuyo relieve se debe a la deformación de rocas mesozoicas y de su complejo basal, que fueron levantados, comprimidos y transportados hacia el noreste, formando pliegues y cabalgaduras durante la Orogenia Laramide (Eguiluz et al, 2000), conformada por rocas sedimentarias marinas evaporíticas, clásticas y calcáreas, en parte a la Plataforma Valle San Luis (López-Doncel, 2003) y un extremo del municipio con la Faja Volcánica Transmexicana conformada por materiales de origen volcánico y presenta diversidad de formaciones geológicas que incluyen rocas sedimentarias y rocas ígneas extrusivas (Figura 8).

La región de Metztlán tiene una geología relativamente diversa, la cual incluye un conjunto de rocas paleozoicas, mesozoicas y cenozoicas, que testifican los últimos 290 millones de años de la historia geológica de esta región (Esquivel-Macías et al 2008).

Paleozoico

Formación Tuzancoa

La geología de Metztlán es diversa su basamento se caracteriza por lutitas, limolitas y areniscas pertenecientes a la formación Tuzancoa (Sour-Tovar *et al*, 2005).

Formación Huizachal

El mesozoico se caracteriza por unidades líticas del Triásico, Jurásico y Cretácico. Las rocas Triásicas son escasas y se encuentran expuestas solo en una parte nororiental y consisten en lutitas, lutitas arenosas y conglomerados de color rojo de la (Imlay *et al.*, 1948).

Formación Huayacocotla

Los sedimentos jurásicos consisten en una secuencia de lutitas negras bandeadas, apizarradas y fracturadas del Jurásico temprano (Imlay *et al.*, 1948).

Formación Tamán

Se reconocen paquetes de calizas con alto contenido de manganeso y estructura bandeada del Jurásico tardío (Heim, 1940).

Formación el Abra, El Doctor, y Tamaulipas, otates, Cuesta del Cura y Tamabra

Las unidades del cretácico medio forman una amplia faja de sedimentos que se exponen en sentido noroeste-sureste e incluyen bancos calizos masivos, calizas biomicríticas con intercalaciones de pedernal y calizas micríticas alternadas con lutitas bandeadas, que evidencian desde ambientes arrecifales hasta de cuenca abierta, pasando por pie de talud (Carrillo- Martínez y Suter, 1982).

Formaciones Zumate, Tarango y Atotonilco el Grande.

La formación Tarango está constituida por brecha-toba, depósitos fluviales, clastos de origen volcánico y capas delgadas de pumicita (Bryan, 1948).

La Formación Atotonilco El Grande posee una composición litológica muy variada compuesta por rocas clásticas (conglomerado, arenisca, limonita y lutita), con intercalaciones de cenizas volcánicas in situ y piroclastos retrabajados. Cubre mediante una discordancia angular a las formaciones El Abra, Soyatal, Conglomerado Amajac y a la secuencia volcánica del Grupo Pachuca. Está coronada por derrames basálticos y cenizas volcánicas (Arellano-Gil *et al.*, 2005).

Carrasco-Velázquez en 2008, define una unidad litoestratigráfica para los afloramientos de rocas continentales en esta región denominada Formación Metztlán, la formación está compuesta por

conglomerados que en su base contienen fragmentos de rocas ígneas extrusivas (basalto) y, hacia la cima, clastos derivados de rocas sedimentarias cretácicas. Estos conglomerados descansan de manera discordante sobre rocas marinas del Albiano-Cenomaniano. Se destaca la sedimentación inicial influenciada por ríos que transportaron clastos volcánicos del Plioceno desde la región de Zacualtipán.

Posteriormente, se formaron abanicos aluviales que transportaron clastos de rocas cretácicas cercanas. Los análisis palinológicos y radiométricos confirman una edad del Plioceno para esta formación, vinculándola con eventos magmáticos del Eje Neovolcánico Transmexicano (Carrasco-Velázquez *et al.*, 2008).

El cenozoico

Se presenta depósitos cuaternarios, depósitos volcanosedimentarios pleistocénicos y cuerpos volcánicos (Esquivel-Macías *et al.*, 2008).

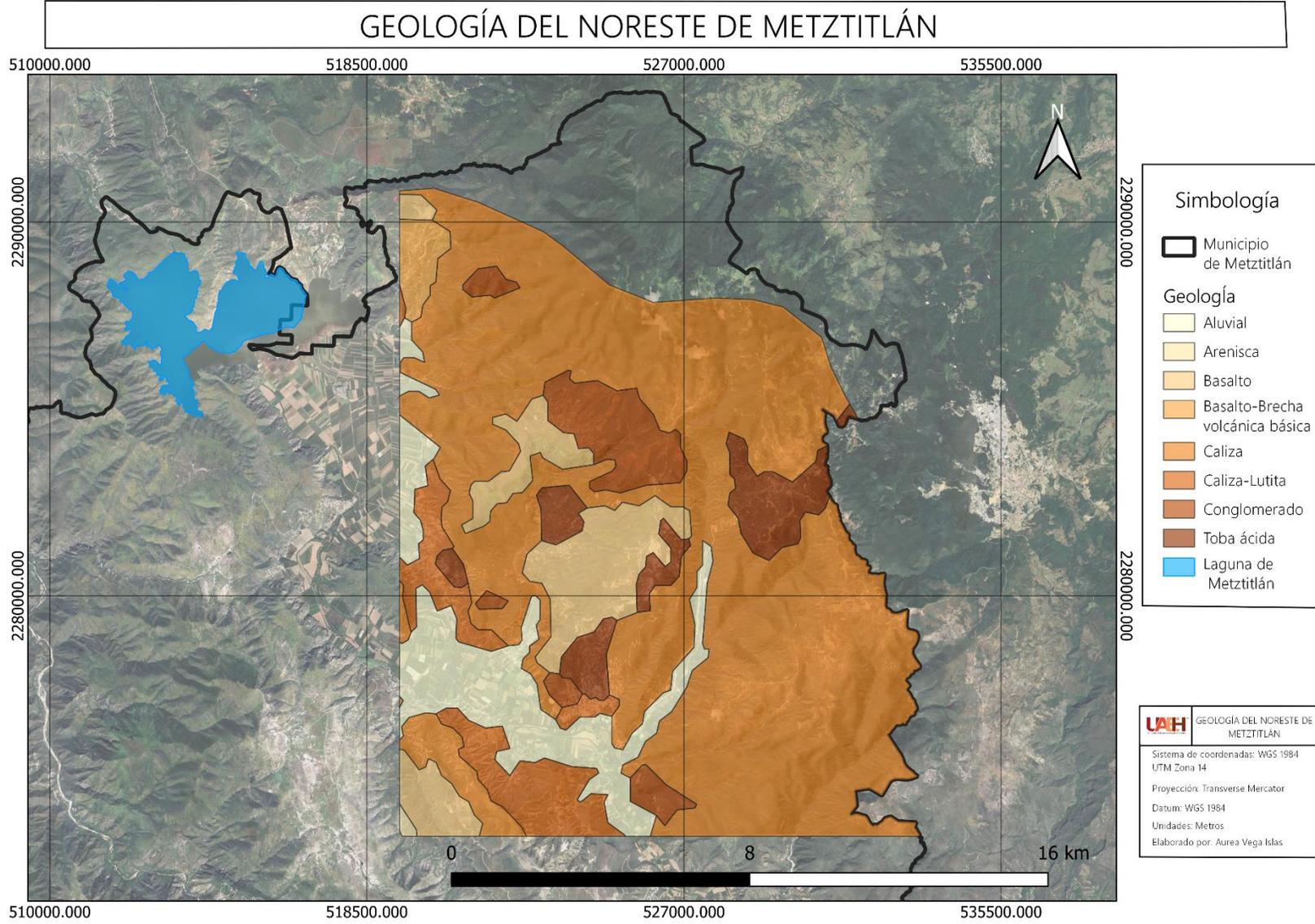


Figura 8. Mapa geológico de la región Noreste de Metztlán.

3.5 Geología Estructural

Se reconocen dos discordancias principales, los rasgos estructurales de la región tienen un rumbo general Noreste-Sudeste. Se identifica una estructura que puede corresponder con la cabalgadura de la Franja de pliegues y cabalgaduras de la SMO, de tal forma las secuencias propias de la Plataforma Valles San Luis están yuxtapuestas sobre las unidades del Anticlinorio de Huayacocotla, con base a estos rasgos estructurales (Hernández y Hernández, 1991) proponen las siguientes fases de deformación:

Una fase compresiva Permo-Triásica asociada a la integración de Pangea posterior a esto, una fase distensiva tipo Rift que fragmentó la corteza continental triásica y generó el Aulacogeno de Huayacocotla hacia el triásico tardío dominio en el que se estableció primero sedimentación continental y posteriormente marina, continuando con una fase tectónica distensiva que provoco una dislocación y posteriormente su denudación.

Continuando una fase tectónica que disloco la región en fallas normales y desplazamiento lateral, después una fase compresiva del paleógeno que generó pliegues y cabalgaduras y finalmente una fase distensiva que disloco las estructuras laramidicas con un campo de esfuerzos en sentido sudeste-noreste ocurrido en el neógeno. Así como la acumulación de rocas volcánicas de diversos tipos.

3.6 Hidrografía

Metztitlán es un municipio que se caracteriza por su riqueza natural y sus rasgos hidrográficos. Pertenece a la región hidrológica Panuco, a la cuenca del Río Moctezuma, a la subcuenca del Río Metztitlán, Río Amajac, con múltiples corrientes de agua perennes e intermitentes y cuerpos de agua principalmente la Laguna de Metztitlán (INEGI, 2010) a continuación, se mencionan los principales ríos y presas que se encuentran en la región:

El Río Metztitlán constituye el eje fluvial más relevante de la región, su origen se localiza en la Sierra Madre Oriental, desde donde atraviesa de manera significativa el territorio municipal, hasta su confluencia con el Río Moctezuma, afluente principal de la cuenca del Río Pánuco. Este cuerpo de agua desempeña un papel crucial en el desarrollo agrícola y en la sustentación de los ecosistemas locales (Ayuntamiento de Metztitlán, 2024).

El Río San Juan, también originado en la Sierra Madre Oriental, recorre parte del municipio y cumple funciones esenciales relacionadas con el suministro de agua para uso humano y agrícola, así como en los sistemas de riego destinados a la producción agropecuaria (López-Herrera *et al.*, 2010).

Dentro del territorio municipal, se identifican múltiples arroyos y afluentes menores, muchos de los cuales presentan un régimen intermitente, condicionado principalmente por las precipitaciones estacionales. A pesar de su variabilidad, estos cauces constituyen un componente fundamental para el abastecimiento hídrico, en particular durante los periodos de estiaje. (López-Herrera *et al.*, 2010).

Infraestructura Hidráulica: a lo largo del cauce del Río Metztitlán y sus tributarios, se han construido diversas presas con finalidades múltiples, incluyendo la generación de energía hidroeléctrica, el abastecimiento de agua potable y para riego, el control de avenidas pluviales, así como la conservación del entorno ecológico (Ayuntamiento de Metztitlán, 2024).

Entre las principales infraestructuras hidráulicas destacan las Presas Santa Teresa y Vicente Aguirre: localizadas dentro de la cuenca del Río Metztlán, están orientadas primordialmente a la regulación del caudal y a la producción de energía hidroeléctrica.

Presas San Antonio y Los Frailes: integradas al sistema hidroeléctrico regional, contribuyen de manera significativa al suministro energético tanto del municipio como de las localidades colindantes.

Se identifican otras obras hidráulicas de menor escala distribuidas en diferentes puntos del territorio, cuya función principal es el almacenamiento de agua para fines agrícolas, domésticos y de control hidráulico en temporada de lluvias (Ayuntamiento de Metztlán, 2024).

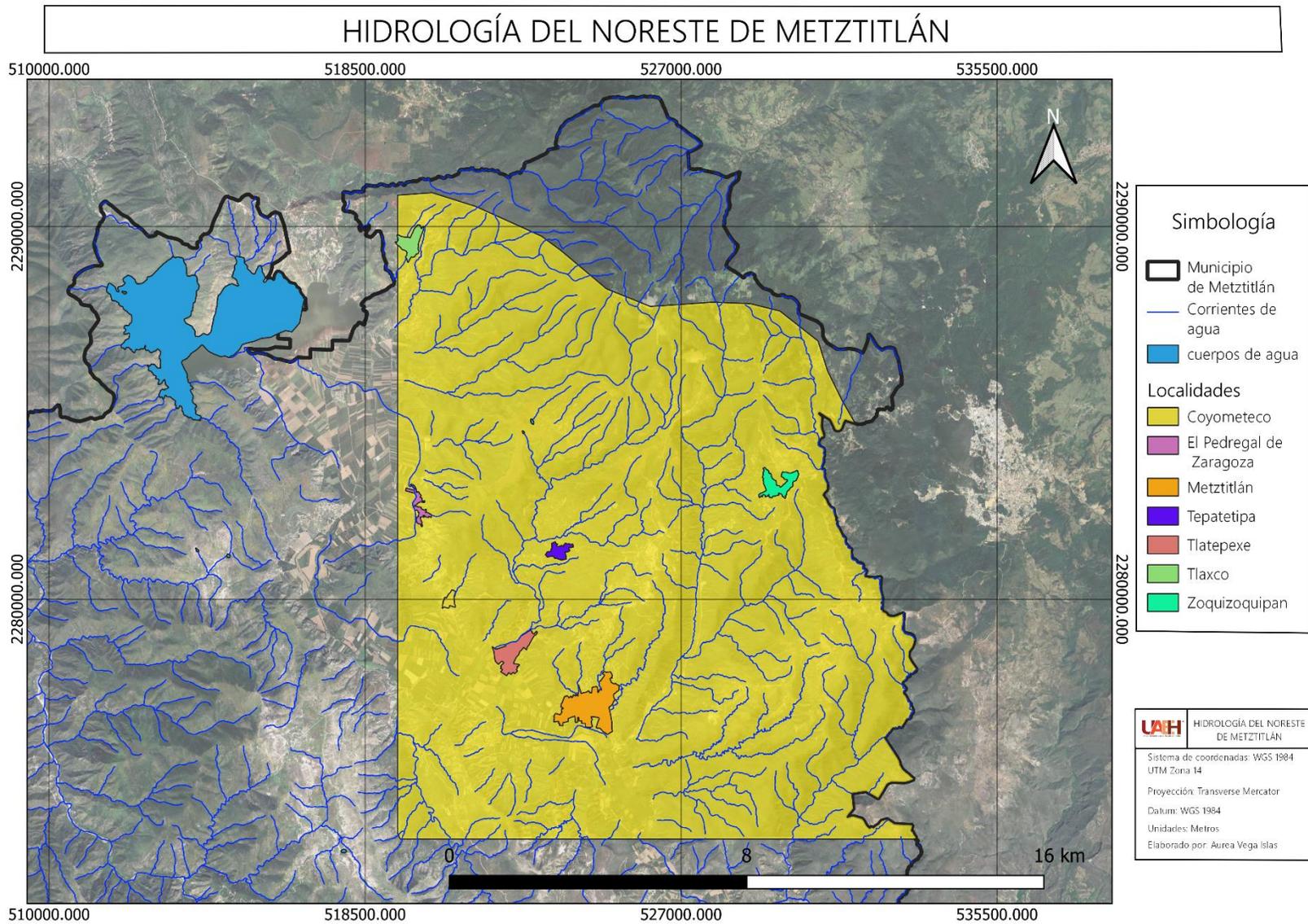


Figura 9. Mapa de hidrología de la región Noreste de Metztlán.

3.7 Edafología

En el municipio de Metztlán y de acuerdo con la carta Edafológica F14-11, escala 1:250000 elaborada por INEGI, 2007, se presentan ocho grupos de suelos dominantes que son descritos a continuación: Rendzina, Regosol, Fluvisol, Phaeozems, Vertisol, Cambisol, Luvisol, Leptosoles de acuerdo a la WRB Así, en las márgenes del río Venados y en áreas de aluvión se localizan suelos clasificados como Fluvisoles calcáricos y Phaeozems calcáricos. En el sector noreste destacan los Leptosoles, seguidos por Rendzinas y Luvisoles; mientras que, en la parte sur, próxima al curso del río, se observan regosoles tanto calcáricos como éutricos. Por otra parte, en la zona este-central se presentan algunas Rendzinas y, en el sureste, predominan Phaeozems háplicos y Vertisoles. En las áreas más elevadas del noreste de la RBBM se encuentran Luvisoles vérticos y Cambisoles vérticos (INEGI, 2007).

La siguiente descripción se hace en base a la guía para la interpretación edafológica por INEGI 2004, se puede decir que los Leptosoles son suelos poco desarrollados, con un espesor inferior a 10 cm, que pueden aparecer de forma aislada o mezclados con otras unidades como la Rendzina, el Regosol éutrico o el Regosol calcárico.

Las Rendzinas se caracterizan por disponer de una capa superficial muy rica en humus que descansa sobre una base de roca caliza. Su profundidad puede alcanzar hasta 50 cm, presentan textura mayormente arcillosa y muestran un grado moderado de desarrollo.

Los Regosoles, por su parte, carecen de horizontes definidos y se asemejan mucho al material del que se originaron. Su fertilidad y su susceptibilidad a la erosión varían notablemente. En la región se distinguen dos subtipos: uno de ellos, la variante calcárica, resulta rica en cal y especialmente fértil dentro de este grupo, mientras que la variante éutrica muestra una fertilidad que va de media a moderada.

En cuanto a los Fluvisoles, estos se conforman por capas alternas de arena, arcilla y grava, producto del transporte de materiales mediante inundaciones o crecidas. Se encuentran en las

proximidades de cuerpos de agua, tanto permanentes como temporales, o en cauces, y su espesor oscila entre 0,5 y 1 metro. Al aportar nutrientes y una elevada cantidad de material calcareo, se integran en la subunidad calcárica. Es además el caso de los Fluvisoles calcáricos que, en conjunto con los Phaeozems calcáricos, no solo son ricos en nutrientes, sino que también presentan profundidades superiores a 50 cm y una permeabilidad moderada; características que, sumadas al caudal del río Metztitlán, contribuyen a que la vega de Metztitlán sea altamente fértil. Los suelos Paheozems se distinguen por una capa superficial oscura, abundante en materia orgánica y nutrientes, con profundidades que sobrepasan los 50 cm y que evidencian un desarrollo avanzado (INEGI,2004).

Finalmente, los vertisoles son característicos de áreas que experimentan estaciones bien diferenciadas de sequía y lluvias. Aunque son suelos muy fértiles, tienden a agrietarse durante la sequía y presentan problemas de drenaje, llegando a endurecerse notablemente una vez que se secan. En la parte sur de la Región se ha identificado la presencia de un vertisol de tipo pélico, que se encuentra asociado con la Rendzina (INEGI,2004).

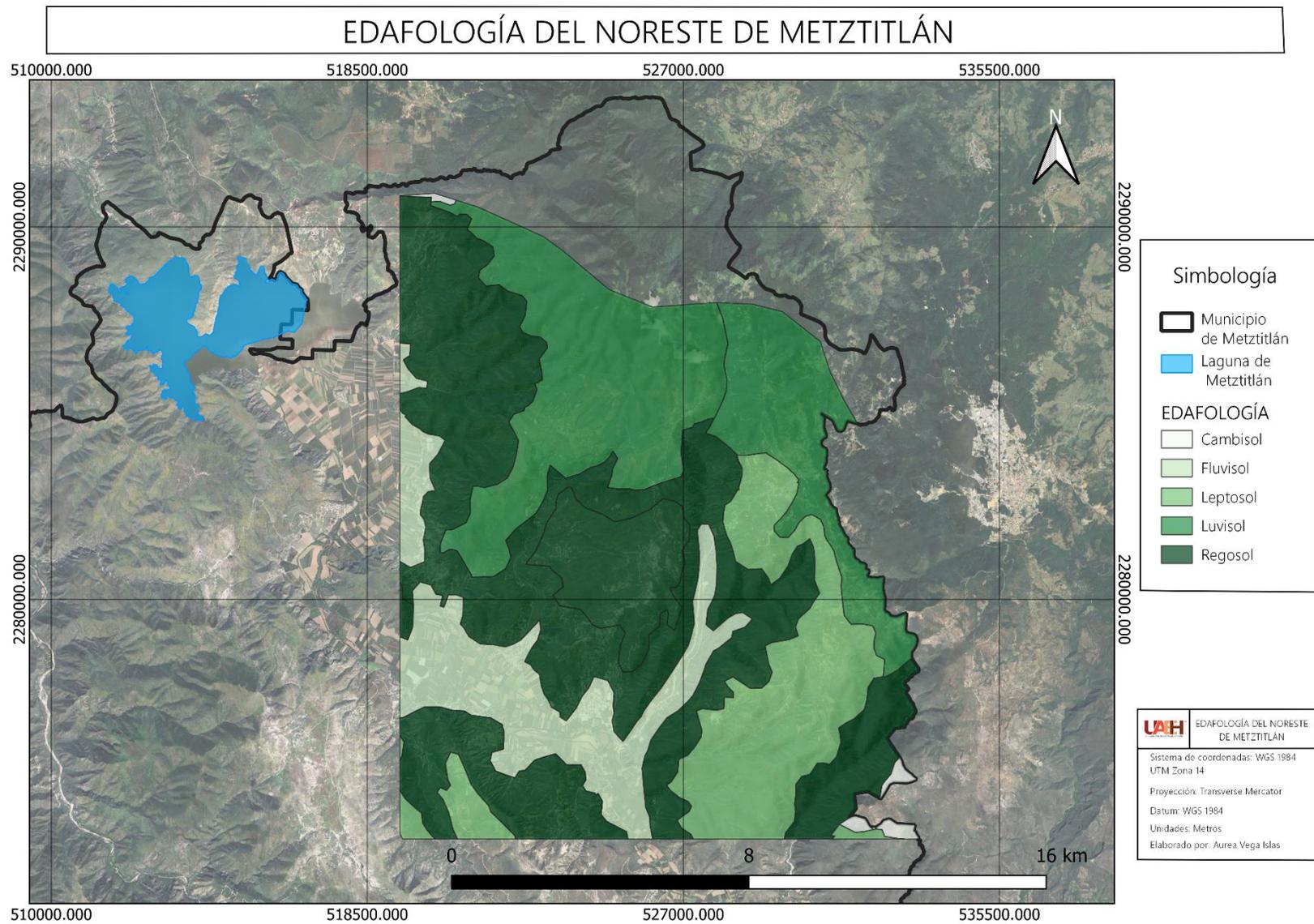


Figura 10. Mapa edafológico de la región Noreste de Metztlán (INEGI, 2007).

3.8 Reserva de la Biosfera Barranca de Metztitlán

Los efectos del daño sobre el suelo, el agua, el aire y la biodiversidad ocasionados por causas de origen social, económico y tecnológico requiere de acciones específicas que actúen sobre los procesos de degradación en un espacio y tiempo, de mejorar las condiciones de calidad y cantidad de los recursos ambientales, implementar una relación de armonía entre los recursos naturales y la sociedad, es necesaria la instauración de las áreas naturales protegidas y su manejo, asegurando la conservación de la biodiversidad y el manejo sustentable de los recursos naturales de una zona (CONANP,2003).

El área de estudio se encuentra dentro de la zona denominada Barranca de Metztitlán, en el estado de Hidalgo, fue decretada como Área Natural Protegida con la categoría de Reserva de la Biosfera el 27 de noviembre del 2000. Esta área reúne una serie de características sobresalientes, como conjuntar en un mismo espacio, varios ecosistemas que representan un corredor biológico entre la vegetación neártica de la zona norte del país y la vegetación tropical ubicada en el altiplano central de México, que incluye los municipios de Acatlán, Atotonilco el Grande, Eloxochitlán, Huasca de Ocampo, Metepec, Metztitlán, San Agustín Metzquititlán y Zacualtipán de Ángeles; se ubica en la región hidrológica número 26 del río Pánuco, presenta gradientes altitudinales que van desde los 1000 hasta los 2000 msnm y es hábitat de un conjunto de ecosistemas frágiles de zonas áridas que contienen una gran riqueza en flora y fauna silvestre de importancia biológica, científica, económica, social y cultural. Así mismo sobresale la presencia de corrientes superficiales de agua (ríos) y la Laguna de Metztitlán; todo este aspecto se conjuga para dar al visitante un paisaje único que muestra contrastes de vegetación y topografía, característicos del cañón que forma la Barranca de Metztitlán (CONANP, 2003).

La Reserva es considerada como refugio pleistocénico de la biota desértica mexicana, ya que presenta afinidades que muestran la intensa relación que existió en el pasado con el desierto de Chihuahua y Sonora, funcionando actualmente como corredor biológico de las zonas áridas en

el altiplano central del país. Su diversidad de ecosistemas se encuentra representada por: matorrales xerófilos, bosque tropical caducifolio, matorral submontano, bosque de coníferas, pastizales y vegetación ribereña (CONANP, 2003).

CAPÍTULO IV MÉTODO DE TRABAJO

4.1 Muestreo de Suelo

Una vez que se ha planteado los objetivos de la investigación, la siguiente etapa es el diseño del muestreo, la sección estadística del muestreo es crucial para la recolección de datos en campo, un muestreo que no tenga la representación de las características del material de estudio dificulta la confiabilidad de los datos, aun cuando en las etapas siguientes se empleen métodos de análisis avanzados (Bautista *et al.*, 2011).

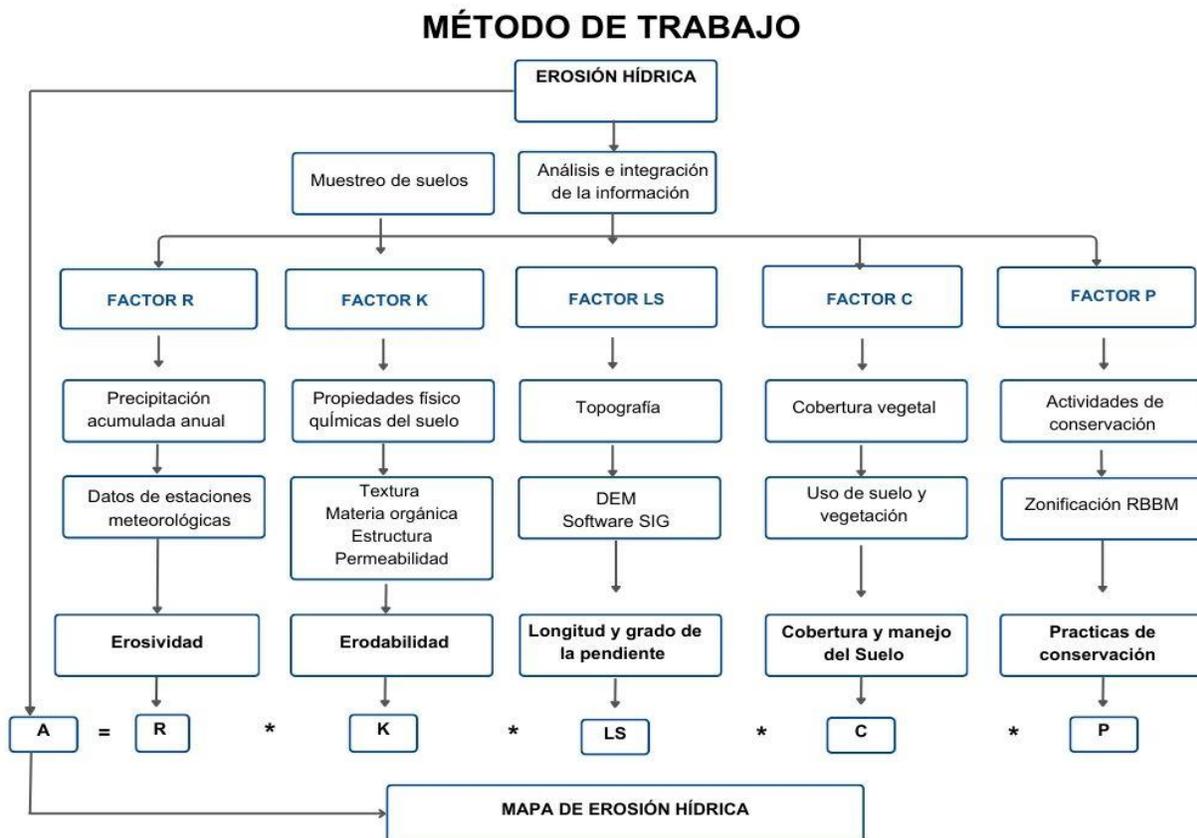


Figura 11. Método de trabajo de la investigación, elaboración propia.

Como se muestra en la figura 11, inicialmente se integró y analizó información bibliográfica y cartográfica, impresa y en formato digital. Posteriormente se llevaron a cabo trabajos de campo integrando la información en un SIG, para integrarlos en un mapa con distintas regionalizaciones en función de los tipos de unidades edafológicas las condiciones naturales del área de estudio.

Cada uno de los puntos de muestreo de suelo fue georreferenciado e identificado con base en la clave asignada, coordenadas en sistema UTM y localidad correspondiente dentro del área de estudio. Asimismo, se registraron datos técnicos asociados al grado de erodabilidad del sitio, como la medición con penetrómetro y el tipo y cobertura de vegetación. Para complementar la base de datos, se llevó un registro fotográfico sistemático de cada punto de muestreo.

La prospección en campo se definió en función de la fisiografía regional, la influencia de factores antropogénicos, las condiciones del terreno y la disponibilidad de vías de comunicación. Las actividades se apoyaron en la carta edafológica del INEGI con clave F-1411, escala 1:250,000. A partir de esta cartografía, se verificaron y delimitaron 32 puntos de muestreo por vía terrestre en la zona noreste del municipio, considerando criterios como el relieve, unidades de paisaje, características edafológicas, pendiente, litología, precipitación y tipo de clima (Figura 12).



Figura 12. Verificación de puntos de muestreo.

La toma de muestras en cada punto comenzó con la delimitación de un área representativa mediante el trazado de un cuadrante de aproximadamente 1 m², procurando evitar zonas

alteradas por actividades humanas, erosión superficial evidente o acumulación de material orgánico en exceso. Posteriormente, se realizó la excavación manual del perfil edáfico de 0 cm hasta 60 cm de profundidad dependiendo de las condiciones del terreno, utilizando herramientas limpias como barrenos y palas, con el fin de evitar la contaminación de la muestra (Figura 13).



Figura 13. Toma de muestras de suelo en terrenos agrícolas.

Del volumen excavado se extrajeron varias submuestras distribuidas de forma aleatoria dentro del cuadrante. Estas submuestras fueron mezcladas homogéneamente en campo sobre una superficie limpia de plástico para obtener una muestra compuesta, representativa de las condiciones del punto de muestreo. Se eliminó cualquier material grueso (raíces, piedras mayores a 2 cm, restos vegetales) y se procedió a tomar entre 2 y 2.5 kg de la mezcla, la cual se almacenó en bolsas plásticas limpias y etiquetadas con código de identificación, fecha, coordenadas y observaciones relevantes. Paralelamente, se registraron características in situ como color del suelo, textura aparente, estructura, humedad y compactación, así como la pendiente del terreno, el tipo de cobertura vegetal y su densidad. Este procedimiento permitió

asegurar la calidad y representatividad de las muestras para los análisis físico-químicos requeridos en laboratorio (Figura 14).



Figura 14. Toma de muestras representativas.

Las muestras se consideran porciones representativas del material edáfico bajo estudio, conservando las propiedades y características del conjunto del que provienen. Estas fueron utilizadas para su caracterización en laboratorio, en concordancia con los objetivos planteados en la investigación. La metodología de muestreo se definió en función de las condiciones edáficas, meteorológicas, geológicas e hidrogeológicas presentes en el área de estudio, así como con base en la profundidad y accesibilidad del terreno. Además, se consideraron los requerimientos analíticos relacionados con la cantidad y calidad necesarias para una adecuada caracterización físico-química del suelo. La selección de los equipos, herramientas e instrumentos para la recolección estuvo condicionada por la profundidad máxima del muestreo, el tipo de cultivo o uso del suelo y la accesibilidad al punto de muestreo. Asimismo, los recipientes y herramientas empleadas para la toma de muestras en campo fueron seleccionados por ser

fáciles de limpiar, resistentes al desgaste y libres de sustancias que pudieran contaminar o modificar las muestras (Mendoza y Espinoza, 2017).

En una segunda etapa los datos que se obtuvieron de laboratorio como: porcentaje de arenas, limos y arcillas, carbono orgánico, materia orgánica y porosidad, sirvieron para caracterizar la zona y saber el grado de erosión hídrica, por medio de la Ecuación Universal de Pérdida de suelos USLE, la cual se describe más adelante.

4.2 Evaluación del grado de erosión

La erosión hídrica se determina a través del análisis de campo, observación y modelos predictivos basados en criterios cualitativos y cuantitativos para el presente trabajo se consultaron diversas metodologías ya probadas y se adecuaron a la información recabada, así como a las herramientas disponibles.

4.2.1 Ecuación universal de la pérdida de suelo (USLE)

Para poder determinar cuántas toneladas de suelo por hectárea se pierden anualmente por erosión hídrica se tomaron en cuenta factores naturales como la edafología del lugar, la vegetación, precipitación, pendiente y longitud de pendiente a través de la implementación de la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo (USLE) de Wischmeier y Smith (1978).

Los seis factores de la ecuación hacen que el modelo tenga una validez universal; sin embargo, su aplicación se limita a estados y países donde la información está disponible para evaluaciones de los factores individuales de la ecuación (Rivera *et al.*, 2010).

Esta ecuación estima las pérdidas de suelo anuales que se producen en una superficie determinada debidas a la erosión superficial laminar y de riego, ante determinadas condiciones de clima, suelo, relieve, vegetación y usos de suelo. Se centra en considerar las precipitaciones como el principal agente activo de esta erosión superficial y así establece que las pérdidas de suelos anuales son directamente proporcionales al índice de erosividad de lluvias, según las características del suelo sobre el que actúan. Así se reconocen una serie de características del

propio suelo que determinan su erosividad o vulnerabilidad a la erosión, relacionadas con su textura, estructura, contenido de materia orgánica y permeabilidad (González, 1991).

La expresión más conocida de esta ecuación de Wischmeier y Smith (1978).

es:

$$A = (R)(K)(LS)(C)(P)$$

Ec. 1

A - Pérdida de suelo en t/ha. Año

R - Factor de erosividad de la lluvia mm/ha. año

K - Factor de erodabilidad del suelo en t.ha.h/Mj.mm

L - Factor de longitud del terreno

S - Factor pendiente del terreno.

C - Factor de cobertura y manejo de la vegetación

P - Factor prácticas de conservación

RUSLE

En 1985 se acordó realizar una revisión de la USLE con el objetivo de incorporar avances científicos y tecnológicos posteriores a la publicación original del libro en 1978. Esta revisión se inició de manera formal después de 1987, dando como resultado la publicación de un nuevo manual técnico, el Handbook 703, y el desarrollo de una tecnología actualizada conocida como RUSLE, basada en la revisión de la USLE.

La RUSLE conserva los seis factores para calcular la A a partir de una ladera. Se ha modificado la tecnología para evaluar los valores de estos factores y se han añadido nuevos datos, esta tecnología se ha informatizado para facilitar los cálculos. De este modo, se pueden realizar evaluaciones de pérdida de suelo para condiciones no incluidas en la USLE (Renard *et al.*, 1997).

Estos dos modelos antes mencionados USLE Y RUSLE son herramientas utilizadas para estimar la pérdida del suelo por erosión hídrica principalmente causada por la precipitación y escurrimiento superficial, en el caso del presente trabajo se aplicó el modelo USLE con excepción del factor LS debido a que la fórmula de RUSLE para este factor se adecua a terrenos inclinados o con topografías variable, la fórmula para este factor es más precisa al considerar elementos reales del terreno y pendiente variable, que no son consideradas con USLE por ser un modelo que asume que la pendiente es uniforme a lo largo de todo el terreno por lo tanto es menos adecuada para áreas con topografías compleja.

4.2.1.1 Factor R

El factor R representa el índice de erosión pluvial para un área específica, la energía potencial de la lluvia y su escurrimiento asociado.

Para el cálculo de este factor se requiere información detallada de las precipitaciones, con un registro continuo de las variaciones de intensidad de lluvia durante el aguacero, información suministrada por pluviógrafos (González, 1991).

Normalmente este factor es determinado con los datos de lluvia, es decir, se obtiene la intensidad máxima de lluvia en treinta minutos consecutivos (I_{30}) y se determina la energía cinética asociada (E_c). El producto de ambas es la erosividad de la lluvia (Montes-León, 2011).

En nuestro país debido a la carencia de información relativa a la intensidad en periodos de tiempo tan cortos de las precipitaciones se optó por la metodología propuesta por Cortes (1991), citada por Flores (2016) que a partir de la Precipitación Media Anual (PMA) se aplicaron las ecuaciones de erosividad asociadas con las 14 diferentes regiones determinadas de la República Mexicana (Figura 15), de las cual generó un mapa de isoerosividad de la lluvia de la República Mexicana con datos de 53 estaciones meteorológicas con periodos que varían de 1 a 11 años tomando como la generalidad cuatro años.

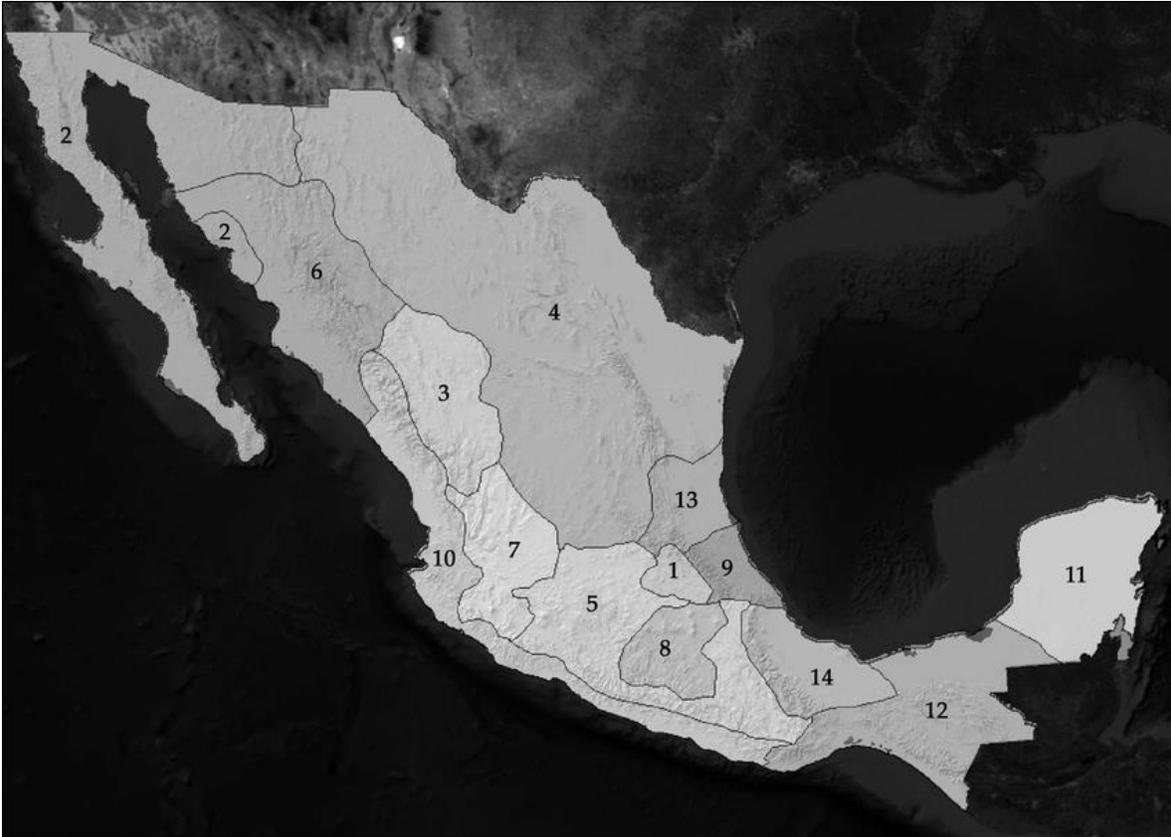


Figura 15. Regionalización Nacional de factor R, utilizada por (Montes-León, 2011).

Para la zona de estudio se aplicó la ecuación correspondiente a la región 1

$$R= 1.2078 * P + 0.002276 * P^2$$

Ec. 2

P= precipitación media anual

La precipitación anual media calculada a partir de los datos mensuales consultados de la estación de Metztitlán, San Cristóbal y Zacualtipán, tomada de los mapas mensuales de lluvia del Servicio Meteorológico Nacional (SMN, 2025).

4.2.1.2 Factor K

El factor K indica la erodabilidad del suelo que es la susceptibilidad de este a ser erosionado, el cual está influenciado por diferentes propiedades, tales como la textura, estabilidad estructural, contenido de materia orgánica, mineralogía de arcillas y constituyentes químicos (Ramírez, 2009).

De acuerdo a Wischmeier y Smith (1978) para estimar el valor de K en función de la textura, contenido de materia orgánica, estructura y permeabilidad del suelo determinan la erosionabilidad de cada suelo, y comprueban que los suelos más erosionables corresponden a las texturas intermedias, considerando que los suelos con un porcentaje de arcillas superior al 30% son poco erosionables. En este sentido la disminución de la fracción de limos aumenta la resistencia a la erosión, ya sea por el aumento de las arcillas que aumentan la cohesión del suelo o por un aumento del porcentaje de las arenas con los que se mejoran las condiciones de infiltración y retrasa la aparición de escorrentía superficial (González, 1991).

En cuanto al contenido de materia orgánica González (1991) indica que suministra estabilidad a los agregados del suelo y mejora su estructura y resistencia a la erosión, determinando así que es el factor después de la textura quien determina la erosionabilidad del suelo, la estructura y la permeabilidad también influyen en la susceptibilidad del suelo a ser erosionado.

Por tanto, las propiedades físicas, químicas y mineralógicas del suelo, así como sus interacciones, son diversas y afectan los valores de erodibilidad del suelo (K) y existen múltiples mecanismos de erosión que interactúan de diferentes maneras con las propiedades del suelo, lo que hace difícil describir con precisión los valores de K solo con unas pocas características del suelo (Renard *et al.*, 1997).

Se han realizado varios estudios para relacionar los valores de K medidos con las propiedades del suelo, destacando el nomograma de erodibilidad del suelo Wischmeier y Smith (1978) como la relación más utilizada y citada. Este nomograma que se muestra en la figura 16 incluye cinco

parámetros del suelo y del perfil del suelo, y se basa en clasificaciones de estructura y permeabilidad (Renard *et al.*, 1997).

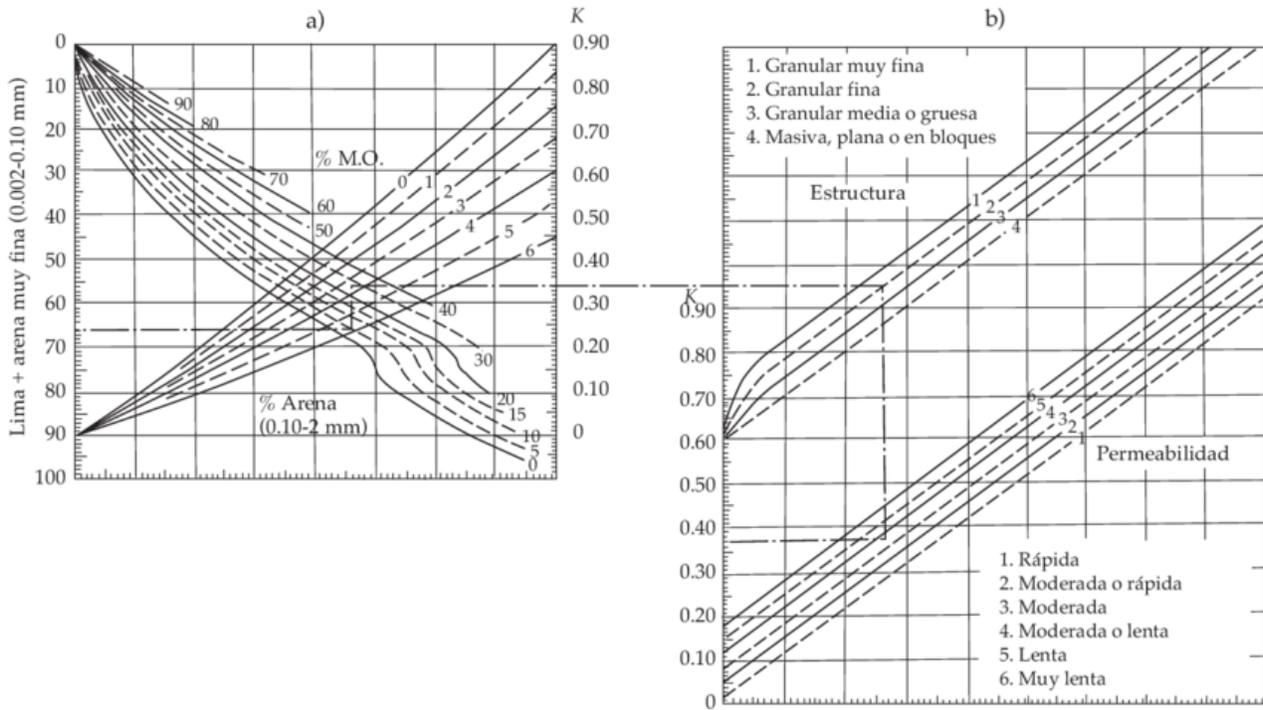


Figura 16. Nomograma de erosionabilidad del suelo (Renard, 1997).

- **Método de la ecuación**

En suelos con limos y arenas muy finas iguales o menores al 70% el factor K se estima a partir de la siguiente ecuación según Wischmeier y Smith, (1978).

$$100 K = 2.1 (M^{1.14}) (10^{-4})(12 - a) + 3.25 (b - 2) + 2.5 (c - 3)$$

Ec. 3

M - es el parámetro de granulometría, definido como el producto entre el porcentaje de limos y arenas muy finas y 100 veces el porcentaje de arcillas.

a – es el porcentaje de materia orgánica

b – es el código correspondiente a la clase de estructura definida

c – es el código de clase de permeabilidad del suelo.

El factor en el SI de unidades es expresado en ton.ha.h/ MJmm que expresa la resistencia del suelo en superficie y tiempo, respecto a la energía de la lluvia.

- **Determinación de la textura**

Para obtener los parámetros requeridos para el factor k, se aplicó la metodología de acuerdo a lo descrito en la Norma Oficial Mexicana (NOM-021-RECNAT- 2000) 2002.

Determinación de la textura el suelo por el procedimiento de Bouyoucos

Donde define la textura del suelo como la porción relativa de grupos dimensionales de partículas.

Proporciona una idea general de las propiedades físicas del suelo.

El procedimiento fue realizado en el laboratorio de Geología Ambiental del Área de Ciencias de la Tierra y Materiales de la UAEH.

De cada muestra de suelo se pesaron 80 g se agregó aprox. 40 ml de peróxido de hidrogeno y se puso a evaporar hasta la sequedad esto con la finalidad de eliminar el contenido de materia orgánica. Se pesaron 50 g de este suelo (Figura 17).



Figura 17. Clasificación y pesado de muestras de suelo para determinación de la textura

Se depositó en un vaso de metal donde se le adicionaron 10 ml de hexametáfosfato de sodio y agua destilada para la dispersión química de las partículas del suelo, posterior a esto se colocó el vaso de metal con la mezcla en el agitador eléctrico (tipo batidora de malteadas) durante 10 min. Pasando la mezcla a una probeta de 1000 ml agregar agua destilada hasta completar el nivel (Figura 18).



Figura 18. Agitación y llenado de probetas con muestras de suelo

El densímetro de Bouyoucos calibrado es un instrumento de vidrio graduado utilizado para determinar la textura del suelo mediante el método hidrométrico. Está calibrado para medir la concentración de partículas en suspensión (g/L) a una temperatura estándar de 20 °C. Su escala, generalmente de 0 a 60 g/L, permite estimar el contenido relativo de arena, limo y arcilla tras la dispersión de la muestra en una solución de hexametáfosfato de sodio (Bouyoucos, 1962).

Una vez pasada la muestra a la probeta se agitó vigorosamente para dispersar las partículas, se introdujo el densímetro dentro de la suspensión y se midió la densidad, la primera lectura a los 40 segundos, así como la temperatura, después de dos horas se volvió a leer el valor en la escala del hidrómetro y la temperatura, anotando los valores finales (Figura 19).



Figura 19. Medición de la densidad de la suspensión y temperatura a diferentes tiempos

Se procedió al cálculo de los porcentajes de las distintas fracciones texturales del suelo (arena, limo y arcilla) a partir de las lecturas obtenidas con el hidrómetro, empleando el método de Bouyoucos. Este procedimiento se basa en la diferencia de velocidad de sedimentación de las partículas según su tamaño, permitiendo calcular la proporción relativa de cada fracción en una muestra de suelo.

Las lecturas del hidrómetro fueron corregidas por temperatura con base en la diferencia respecto a la temperatura estándar de referencia ($19.5\text{ }^{\circ}\text{C}$), aplicando una corrección de ± 0.36 unidades por cada grado centígrado de diferencia (tabla 2). Estas lecturas corregidas se utilizan en las siguientes fórmulas:

$$\% \text{ de arena} = 100 - \frac{L_{\text{inicial}} + (FC + T_{\text{inicial}})}{P} * 100$$

$$\% \text{ de arcilla} = \frac{L_{\text{final}} + (FC * T_{\text{final}})}{P} * 100$$

$$\% \text{ de limo} = 100 - (\% \text{ arena} + \% \text{ arcilla})$$

Ec. 4

Donde:

L_{inicial} : Lectura inicial del hidrómetro

L_{final} : Lectura final

T_{inicial} : Temperatura inicial

T_{final} : Temperatura final

P: peso de la muestra

FC: Factor de corrección de temperatura

Donde el peso seco de la muestra generalmente se estandariza a 50 gramos.

Estas fórmulas permiten obtener los porcentajes de cada fracción en función de la densidad de partículas suspendidas en distintos momentos del proceso de sedimentación. Los resultados obtenidos fueron empleados posteriormente para la clasificación textural del suelo mediante el triángulo textural del USDA (Figura 20).

Tabla 2. Corrección por temperatura

TEM °C	Corrección	TEM °C	Corrección		
15.0	-	1.62	21.5	+	0.18
15.5	-	1.44	22.0	+	0.90
16	-	1.26	22.5	+	1.08
16.5	-	1.08	23.0	+	1.26
17	-	0.90	23.5	+	1.44
17.5	-	0.72	24.0	+	1.62
18	-	0.54	24.5	+	1.80
18.5	-	0.36	25.0	+	1.98
19	-	0.18	25.5	+	2.15
19.5	-	0	26.0	+	2.34
20	+	0.18	26.5	+	2.52
20.5	+	0.36	27.0	+	2.70
21	+	0.54	27.5	+	2.858
			28.0	+	3.06

Fuente: DOF, 2002

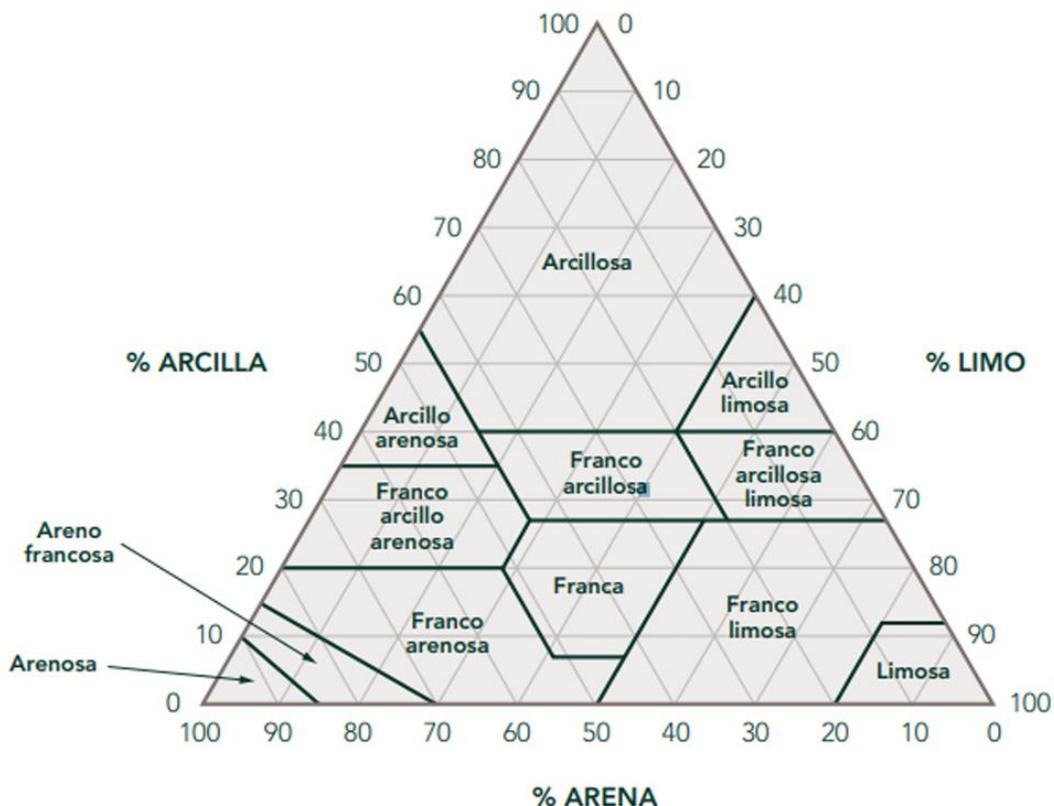


Figura 20. Triángulo de texturas (Fuente: U.S.D.A., 1993).

Tabla 3. Clases texturales de suelo USDA

Textura general	Arenoso	Limoso	Arcilloso	Clase textural
Textura gruesa	86-100	0-14	0-10	Arenoso
	70-86	0-30	0-15	Areno francosa
Textura moderadamente gruesa	50-70	0-50	0-20	Franco arenosa
	23-52	28-50	7-27	Franco arcillosa
Textura mediana	20-50	74-88	0-27	Franco limosa
	0-20	88-100	0-12	Limosa
	20-45	15-52	27-40	Franco arcillosa limosa
Textura moderadamente fina	45-80	0-28	20-35	Franco arcillo arenosa
	0-20	40-73	27-40	Franco arcillosa limosa
	45-65	0-20	35-55	Arcillo arenosa
Textura fina	0-20	40-60	40-60	Arcillo limosa
	0-45	0-40	40-100	Arcillosa

Fuente: Departamento de Agricultura de los Estados Unidos (USDA)

- **Materia orgánica**

Si la cantidad de muestra que se necesita supera el peso recomendado para el análisis en este caso solo se requirió de una cantidad de 0.5 g y 0.2 g, ésta se debe reducir mediante el procedimiento de cuarteo que consiste en esparcir la muestra, previamente mezclada, sobre una superficie limpia. Posteriormente se divide en 4 partes y se conservan dos cuartos diagonales, alternando las diagonales, conservando los cuartos contrarios en cada reducción de muestra; se debe repetir el procedimiento hasta reducir al mínimo para de ahí pesar los gramos necesarios para el análisis (Figura 21).



Figura 21. Cuarteo y pesado de muestras en laboratorio para determinar % de materia orgánica

La determinación de la materia orgánica se llevó a cabo en el laboratorio de geología ambiental del área de Ciencias de la Tierra de la UAEH por el método de Walkley y Black, procedimiento

que cuantifica la materia orgánica del suelo mediante la oxidación del carbono orgánico. Se basa en la reacción del carbono orgánico con una solución de dicromato de potasio en presencia de ácido sulfúrico (Domínguez y Aguilera, 1989).

Inicialmente, se procedió a pesar cada una de las muestras de suelo. En aquellos casos donde el suelo presentaba una coloración muy oscura, se utilizó una cantidad de 0.2 g, debido a su probable alto contenido de materia orgánica. Se colocó en un matraz Erlenmeyer de 250 ml, se agregó con bureta 5ml de dicromato de potasio $K_2Cr_2O_7$ en disolución, se agregó lentamente 10 ml de ácido sulfúrico H_2SO_4 se agitó por un minuto y se dejó reposar por 30 minutos sobre una superficie de madera (Figura 22).



Figura 22. Oxidación de suelo en solución de dicromato de potasio y ácido sulfúrico

Posteriormente se agregaron 100 ml de agua, se adicionaron 5 ml de ácido fosfórico H_3PO_4 , se añadieron 5 gotas de indicador bariosulfonato de difenilamina.

Finalmente se tituló la muestra con la disolución de sulfato ferroso $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ gota a gota hasta un punto final de verde claro (Figura 23).

De esta manera la determinación se realizó valorando por retroceso la cantidad de dicromato que no fue reducido por la MO, con una solución de sulfato ferroso, utilizando como indicador difenilamina, y también se determinó por colorimetría, cuantificando el color verde del ácido crómico reducido.

Para la comparación previamente se hicieron dos blancos para determinar la normalidad del sulfato ferroso, así como para el comparativo de la coloración.

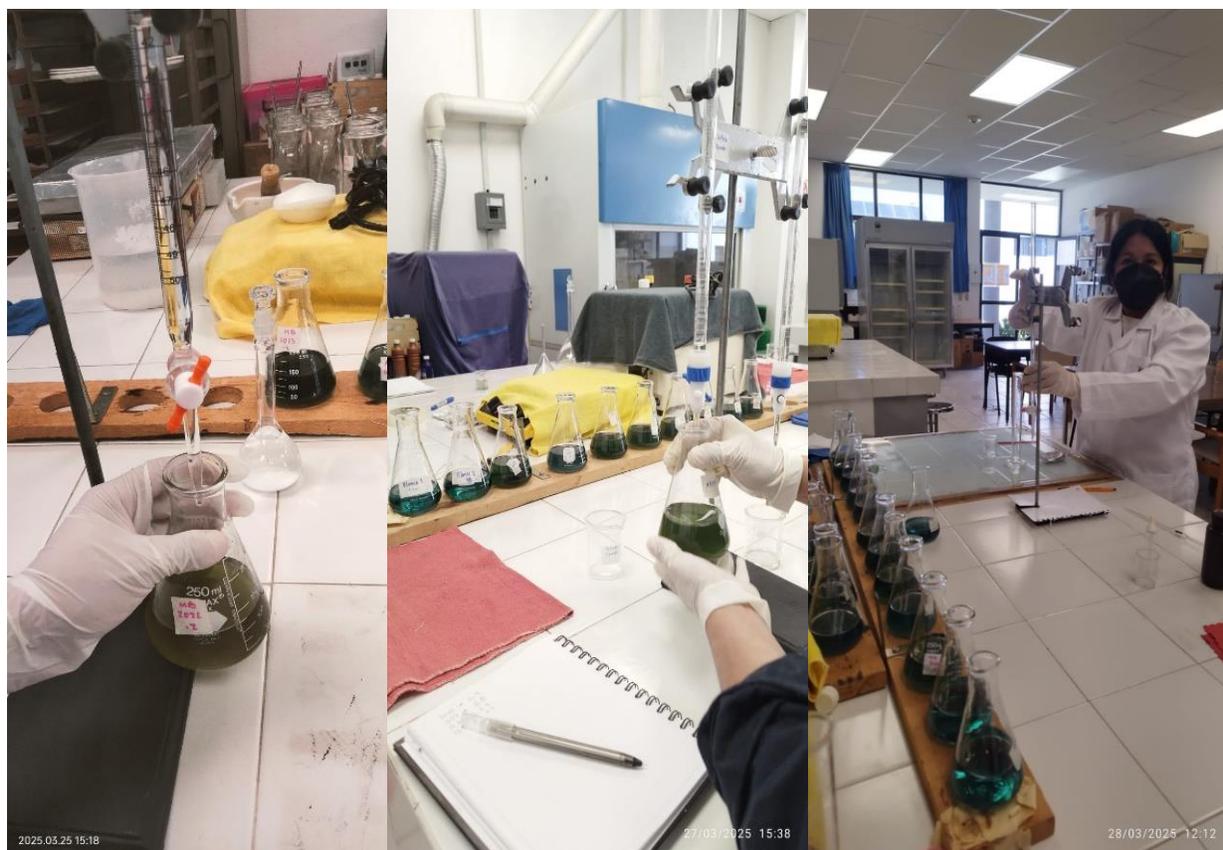


Figura 23. Titulación de las muestras con sulfato ferroso

Cálculos:

$$\% \text{ de } M.O = \frac{5 - (\text{ml. de } \text{FeSO}_4 * N \text{ real})}{\text{gr de muestra}} * 0.69$$

Donde:

- 5: dicromato agregado
- N: normalidad real del sulfato ferroso
- $N \text{ real} = \frac{10 * 0.5}{ml \text{ de } FeSO_4 \text{ (gastados en el blanco)}}$

Ec. 6

- 10 = volumen teórico
- 0.5 normalidad teórica

Para encontrar el porcentaje de carbono se utilizan los siguientes cálculos

$$\% \text{ de Carbono} = \frac{\% M.O}{1.724} \quad \text{ó} \quad \text{Ec. 7}$$

$$\% C = \% M.O * 0.58 \quad \text{Ec. 8}$$

Interpretación de resultados de materia orgánica

Los valores de referencia para clasificar la concentración de la materia orgánica en los suelos se presentan en el siguiente cuadro:

Tabla 4. Clasificación de la materia orgánica

Clase	Materia orgánica (%) Suelos volcánicos	Suelos no volcánicos
Muy bajo	< 4.0	< 5.0
Bajo	4.1 – 6.0	0.6 – 1.5
Medio	6.1 – 10.9	1.6 – 3.5
Alto	11.0 – 16.0	3.6 – 6.0
Muy alto	> 16.1	> 6.0

Fuente: DOF (2002)

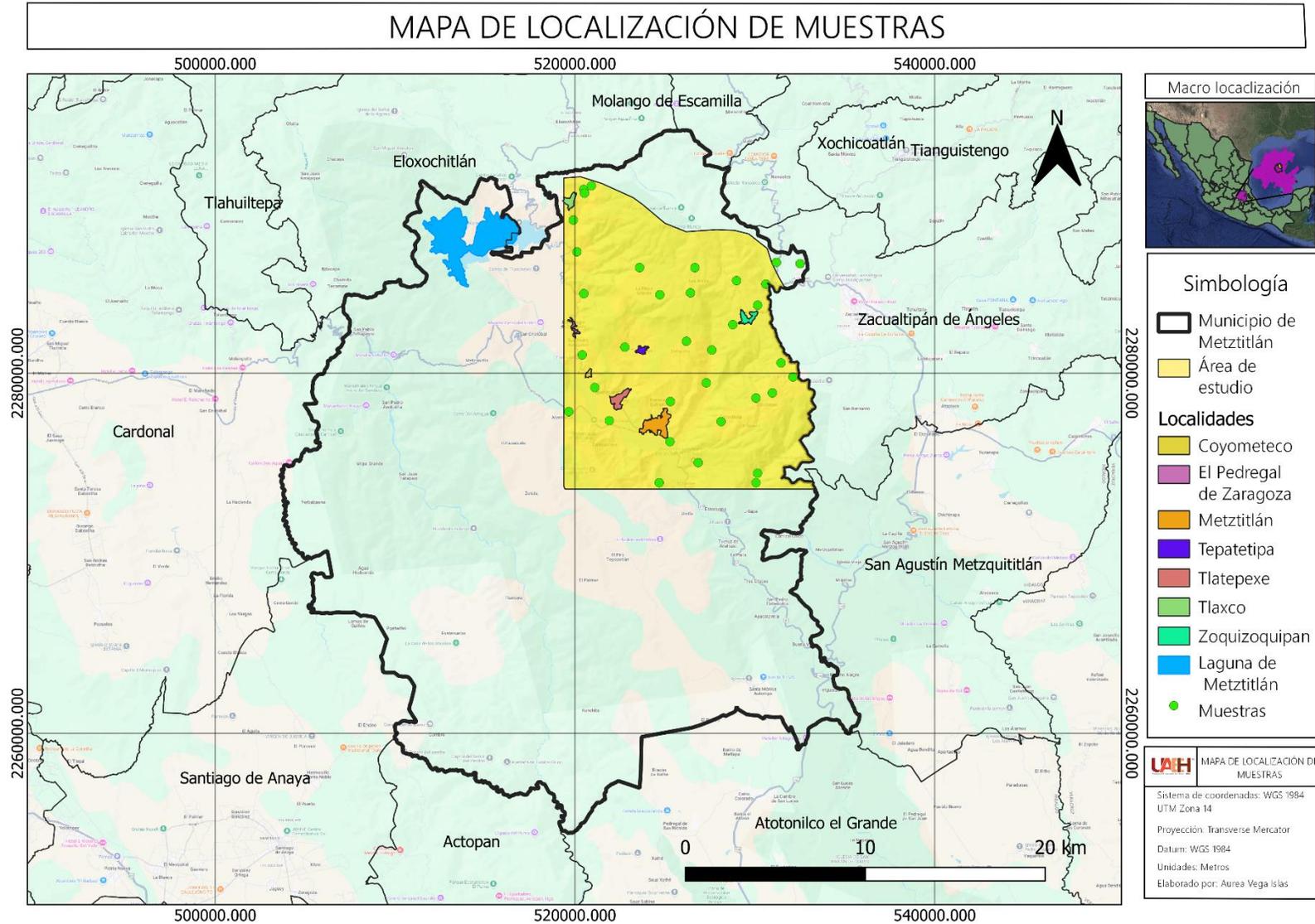


Figura 24. Mapa de localización de puntos de muestreo

Tabla 5. Coordenadas de puntos de muestreo

puntos	Coordenadas			Localidad	puntos	Coordenadas			Localidad
	X	Y	Z			X	Y	Z	
MB1006	519908	2288258	1366	Huayateno	MB2038	527607	2281044	1456	San Juan-Zoquizoquipan
MB1007	520491	2289958	1785	Tlaxco	MB2039	526194	2281527	1805	Itztayatlá
MB1013	520528	2289745	1783	Tlaxco	MB2040	527300	2279220	1394	San Juan
MB1014	520910	2290154	1829	Tlaxco	MB3042	521103	2278957	1270	Pueblo Nuevo
MB1019	520104	2286495	1280	Exhacienda Chilaco	MB3043	519651	2277620	1259	Atzolcintla
MB2022	523593	2285614	2033	La Mesa	MB4061	531454	2280324	2095	Olotla
MB2023	526666	2285612	2190	Los Arcos	MB4062	532120	2279543	2113	Zoquiteno
MB2024	524717	2284108	2066	La Mesa	MB4063	530972	2278660	2089	Zotoltepec
MB2025	520490	2284169	1256	Macuila	MB4064	530059	2278378	2028	Tezochuca
MB2028	526418	2284213	2103	Los Arcos	MB4065	525303	2278182	1494	Metztitlán
MB2030	522777	2281200	1383	Tepatetipa	MB4066	521909	2277118	1266	Tecruz Cozapa
MB2031	520403	2280772	1311	Tlamaxia	MB4067	528122	2277066	1776	Tezochuca
MB2032	531199	2285906	2090	Cumbre de Alumbres	MB4068	525273	2275953	1268	San Juan Metztitlán
MB2033	528979	2284890	2194	Camino los Arcos-Zoquizoquipan	MB4069	526849	2274787	1363	El Salitre
MB2034	532513	2285833	2058	Alumbres	MB4070	530148	2274202	1399	Rio Papaxtla
MB2035	530614	2284703	2061	El Pozo (Zoquizoquipan)	MB4071	530064	2273672	1367	Rio Papaxtla Camino a San Bernardo
MB2036	530150	2283526	2107	Zoquizoquipan	MB4074	524683	2273670	1619	La Joya de Analco
MB2037	528771	2282450	1897	Zoquizoquipan					

Estructura definida

La estructura del suelo se refiere a la organización natural de las partículas del suelo en unidades de suelo discretas agregados o peds que resultan de procesos pedogenéticos. Los agregados están separados entre sí mediante poros o vacíos. Es preferible describir la estructura del suelo cuando se encuentre en condición seca o ligeramente húmeda (FAO, 2025).

La resistencia a la penetración del suelo es un indicador clave para evaluar su estructura, ya que permite estimar el grado de compactación. Valores elevados suelen asociarse con una mayor densidad, lo cual puede limitar el crecimiento de las raíces y reducir la infiltración de agua. Asimismo, esta medida proporciona información sobre la presencia y estabilidad de agregados, ya que los suelos bien estructurados tienden a presentar menor resistencia. Evaluar esta propiedad a diferentes profundidades permite identificar variaciones dentro del perfil edáfico.

Además, la resistencia está influenciada por la textura y el contenido de materia orgánica; suelos con alta proporción de materia orgánica suelen mostrar una menor compactación. En conjunto, esta medición resulta valiosa para comprender las condiciones físicas del suelo y complementar otros métodos de análisis (Klopp y Bly, 2023).

De acuerdo con la FAO en relación con el tipo de estructura del suelo de donde proceden los agregados y a las categorías usadas en la ecuación de la USLE se clasifican del 1 al 4 de la siguiente forma:

Tabla 6. Tipo de estructura

Código USLE	Tipo de estructura
1	Estructura granular muy fina
2	Estructura granular fina
3	Estructura granular media
4	Estructura bloques
	Estructura laminar
	Estructura masiva

- **Permeabilidad**

La permeabilidad del suelo es la propiedad de transmitir el agua y el aire y la velocidad con la que el agua penetra en el suelo a través de su superficie, en función del tamaño de los poros que guardan relación directa con la textura, estructura del suelo y materia orgánica, mientras más fina sea la textura del suelo, más lenta será la permeabilidad (FAO, 2025).

Tabla 7. Permeabilidad del suelo USDA según textura del suelo

Textura	Código permeabilidad	de Saturación hidráulica Saturada in/ hr
Arcillosa, arcillo limosa	6	< 0.004
Franco arcillo limosa arcillo arenosa	5	0.04 – 0.08
Franco arcillo arenosa Franco arcillosa	4	0.08 – 0.2
Franca, franco limosa	3	0.2 – 0.8
Arenosa franca Franco arenosa	2	0.8 - 2.4

Arenosa	1	> 2.4
---------	---	-------

Fuente: (Renard et al., 1997).

Tabla 8. Clase de permeabilidad

Código de permeabilidad	Clase de permeabilidad
1	Rápida
2	Moderada a rápida
3	Moderada
4	Lenta a moderada
5	Lenta
6	Muy lenta

Fuente: (FAO, 2025).

Factor K por el método de la FAO

Comparativamente con el método de la FAO (1980), para la determinación del factor K, utiliza el cálculo a partir de la textura superficial (fina, media y gruesa), con la unidad de suelo a que pertenece según la FAO/UNESCO y la edafología de la carta del lugar, que de acuerdo con la clasificación del tipo de suelo y a la textura superficial se le asigna el factor K presentado en la siguiente tabla.

Tabla 9. Valores de K en función de su textura FAO (1980).

Orden	Textura			Orden	Textura		
	Gruesa	Media	Fina		Gruesa	Media	Fina
A	0.026	0.04	0.013	Lo	0.026	0.040	0.013
Af	0.013	0.020	0.007	Lp	0.053	0.079	0.026
Ag	0.026	0.030	0.013	Lv	0.053	0.079	0.026
Ab	0.013	0.020	0.007	M(g,a)	0.026	0.40	0.013
Ao	0.026	0.040	0.013	N(d,e,x)	0.013	0.020	0.007
Ap	0.053	0.079	0.026	O(d,e,x,)	0.013	0.020	0.007
B	0.026	0.040	0.013	P	0.053	0.079	0.026
Bc	0.026	0.040	0.013	Pf	0.053	0.079	0.026
Bd	0.026	0.040	0.013	Pg	0.053	0.079	0.026
Be	0.026	0.040	0.013	Ph	0.026	0.040	0.013
Bf	0.013	0.020	0.007	Pl	0.026	0.040	0.013
Bg	0.026	0.040	0.013	Po	0.053	0.079	0.026
Bh	0.013	0.020	0.007	Pp	0.053	0.079	0.026
Bk	0.026	0.040	0.013	Q(a,c,f,l)	0.013	0.020	0.007
Bv	0.053	0.079	0.026	R	0.026	0.040	0.013
Bx	0.053	0.079	0.026	Re	0.026	0.040	0.013

C(g,h,b,l)	0.013	0.020	0.007	Rc	0.013	0.020	0.007
D (d,e,g)	0.053	0.079	0.026	Rd	0.026	0.040	0.013
E	0.013	0.020	0.007	Rx	0.053	0.079	0.026
F(a,b,o,p,r)	0.053	0.079	0.026	S	0.053	0.079	0.026
G	0.026	0.040	0.013	Sg	0.053	0.079	0.026
Gc	0.013	0.020	0.007	Sm	0.026	0.040	0.013
Gd	0.026	0.040	0.013	So	0.053	0.079	0.026
Gh	0.013	0.020	0.007	T	0.026	0.040	0.013
Gm	0.013	0.020	0.007	Th	0.013	0.020	0.007
Gp	0.053	0.079	0.026	Tm	0.013	0.020	0.007
Gx	0.053	0.079	0.026	To	0.026	0.040	0.013
Gv	0.053	0.079	0.026	Tv	0.026	0.040	0.013
H(c,g,h,l)	0.013	0.020	0.007	V(c,p)	0.053	0.079	0.026
I	0.013	0.020	0.007	W	0.053	0.079	0.026
J	0.026	0.040	0.013	Wd	0.053	0.079	0.026
Jc	0.013	0.020	0.007	We	0.053	0.079	0.026
Jd	0.026	0.040	0.013	Wh	0.026	0.040	0.013
Je	0.026	0.040	0.013	Wm	0.026	0.040	0.013
Jt	0.053	0.079	0.026	Wx	0.053	0.079	0.026
Jp	0.053	0.079	0.026	X(b,k,l,y)	0.053	0.079	0.026
K(h,k,l)	0.026	0.040	0.013	Y(h,k,l,y,t)	0.053	0.079	0.026
L	0.026	0.040	0.013	Z	0.026	0.040	0.013
La	0.053	0.079	0.026	Zg	0.026	0.040	0.013
Lc	0.026	0.040	0.013	Zm	0.013	0.020	0.007
Lf	0.013	0.020	0.007	Zc	0.026	0.040	0.013
Lg	0.026	0.040	0.013	Zt	0.053	0.079	0.026
Lk	0.026	0.040	0.013				

4.2.1.3 Factor L S

El factor conjunto LS responde al efecto combinado de la longitud y el ángulo de inclinación de la ladera sobre la que se están estimando las pérdidas del suelo (Ibáñez et al., 2012).

L y S representan las condiciones topográficas de la zona de estudio. Donde L es la distancia horizontal desde donde se origina el flujo superficial al punto donde comienza la deposición o donde el escurrimiento encuentra un canal de salida bien definido, con respecto a una longitud estándar de 22.13 m.

S es la inclinación de dicha pendiente, normalizada con respecto a una inclinación estándar de 5.1° (Puente, 2011).

Para el cálculo de LS propusieron las siguientes ecuaciones Wischmeier y Smith (1978).

$$L = \left[\frac{\lambda}{22.13} \right] m$$

Ec. 9

$$S = 65.41 \text{ Sen}^2 \theta + \text{Sen} \theta + 0.065$$

Ec. 10

L: Es el factor longitud de la pendiente (adimensional).

λ : Es la longitud uniforme del terreno (metros).

m: Es el exponente cuyo valor varía entre 0,2 y 0,5 de acuerdo al valor en la inclinación de la pendiente entre < 1 y > 5 %.

S: Es el subfactor inclinación de la pendiente (adimensional).

θ : Es el ángulo de inclinación del terreno uniforme en grados.

Esta expresión fue desarrollada de manera experimental y con datos de parcelas uniformes, con pendientes entre 3 y 18% y longitudes entre 10 y 100 m. La aplicación fuera de este rango experimental podría ser hipotético, ya que hay terrenos donde las superficies no son uniformes y tienden a presentar pendientes mayores.

El factor LS es la representación numérica del efecto de la topografía sobre la erosión, considerando la longitud y el grado de pendiente. Para determinar el valor de este factor se utilizó la fórmula de RUSLE por Renard 1997, en la cual:

$$L = \left[\frac{\lambda}{22.13} \right] m$$

Donde:

Ec. 11

$$m = \frac{\beta}{1+\beta}$$

Ec. 12

$$\beta = \frac{\frac{\text{sen } \theta}{0.0896}}{[3(\text{sen}\theta)^{0.8}+0.56]} \quad \text{Ec. 13}$$

θ es la pendiente del terreno

Para estimar S se calcula de acuerdo al grado de pendiente que presente

$$S = 10.8 \text{ sen}\theta + 0.03 \quad \theta \leq 9\% \quad \text{Ec. 14}$$

$$S = 16.8 \text{ sen}\theta - 0.50 \quad \theta > 9\% \quad \text{Ec. 15}$$

El valor de LS se obtiene de la multiplicación de L y S obtenidos.

Teniendo en cuenta lo anterior la utilización de Sistemas de información geográfica con la aplicación de las diferentes herramientas facilita el cálculo de los valores del grado de la pendiente y longitud de pendiente.

4.2.1.4 Factor C

Representa el grado de protección que la cubierta vegetal ofrece al suelo frente a la fuerza de erosión de la precipitación mitigando tanto la energía de impacto de las gotas de lluvia al suelo como la velocidad de la escorrentía superficial (Flores, 2016).

El valor de C está determinado no solo al tipo de vegetación existente interactúa también el manejo y disposición de los residuos que produce el produce sobre el suelo, que para los suelos con cultivos agrícolas tiene en cuenta la forma y el tipo de cultivo.

Para el caso de la vegetación permanente los valores de C propuestos por Wischmeier y Smith (1978) están relacionados al porcentaje de la cobertura de las copas y parte aérea de la vegetación y los de la vegetación en contacto con el suelo.

A medida que la cobertura vegetal sea mayor, el valor de C es cada vez menor, por lo que el rango para este parámetro va de 0 (correspondiente a un terreno totalmente protegido) a 1.0 (para terrenos sin ninguna protección) (Bailon, 2022).

Para obtener los valores del factor C se consultaron los mapas de uso de suelo y vegetación disponibles por INEGI (2015) y se asigna un valor comparando los resultados de la tabla 10, que presenta la relación del valor C para cada tipo de vegetación y uso de suelo propuesta por Becerra, 1997 en Montes-León et al., 2011.

Tabla 10 . Factor C para vegetación y uso de suelo

Vegetación y/o uso de suelo	C	Vegetación y/o uso de suelo	C
Bosque de ayarin	0.01	Pastizal gipsofilo	0.25
Bosque de cedro	0.01	Pastizal halófilo	0.25
Bosque de encino	0.10	Pastizal inducido	0.02
Bosque de encino-pino	0.01	Pastizal natural	0.07
Bosque de galería	0.10	Nopal	0.85
Bosque de oyamel	0.01	Pradera de alta montaña	0.05
Bosque de pino	0.01	Sabana	0.54
Bosque de pino-encino	0.01	Sabanoide	0.54
Bosque de táscate	0.01	Selva alta perennifolia	0.45
Bosque de mesofilo de montaña	0.01	Selva alta subperennifolia	0.45
Chaparral	0.65	Selva baja caducifolia	0.50
Manglar	0.10	Selva baja espinosa caducifolia	0.50
Matorral crasicaule	0.65	Selva baja espinosa subperennifolia	0.50
Matorral de coníferas	0.20	Selva mediana caducifolia	0.45
Matorral desértico microfilo	0.25	Selva mediana perennifolia	0.45
Matorral desértico roetofilo	0.25	Selva mediana subcaducifolia	0.45
Matorral espinoso tamaulipeco	0.45	Tular	0.10
Matorral rosetofilo costero	0.25	Vegetación de desiertos arenosos	0.85
Matorral sarcocaulle	0.25	Vegetación de dunas costeras	0.85
Matorral sarco-crasicaule	0.25	Vegetación de galería	0.85
Matorral sarco-crasicaule de neblina	0.25	Vegetación halófila	0.85
Matorral submontano	0.35	Zona urbana	0.005
Matorral subtropical	0.12	Cuerpos de agua	1.0
Mezquital	0.65	Agricultura en riego	0.55
Palmar inducido	0.75	Agricultura de temporal	0.75
Palmar natural	0.75	Agricultura de humedad	0.25

Fuente: Montes-León et al., (2011).

4.2.1.5 Factor P

El factor de prácticas de conservación (P), se define como la relación entre la pérdida de suelo con una práctica de conservación específica y la pérdida asociada con la labranza convencional. Los valores de la siguiente tabla 11, propuestos por Wischmeier y Smith (1978) para deducir el valor de P según las prácticas de conservación, se refieren al porcentaje de las pérdidas del suelo que se tiene, frente a las que tendría sin la práctica de conservación (González, 1991).

Tabla 11. Valores del factor P

Trabajos a nivel			Trabajos en fajas			Trabajos en terrazas	
Pendiente %	factor	Máx. Long de declive (m)	Factor P	Anchura de faja (m)	Máx. Long de declive (m)	Desagües en canales encespedados	Desagüe subterráneo en contrapendiente
1-2	0.60	130	0.30-0.60	43	260	0.12	0.05
3-5	0.50	100	0.25-0.50	33	200	0.10	0.05
6-8	0.50	65	0.25-0.50	33	130	0.10	0.05
9-12	0.60	40	0.30-0.60	26	80	0.12	0.05
13-16	0.70	26	0.35-0.70	26	55	0.14	0.05
17-20	0.80	20	0.40-0.80	20	40	0.16	0.06
21-25	0.90	16	0.45-0.90	16	33	0.18	0.06

El valor que se obtiene varía de 0 a 1. Si el valor de P es cercano a 0, entonces hay una gran eficiencia en la obra o práctica seleccionada y si el valor es cercano a 1, entonces la eficiencia de la obra es muy baja para reducir la erosión (Bailon, 2022).

4.3 Los SIG en el análisis de la erosión hídrica

Un sistema de información geográfica (SIG) es un conjunto de herramientas compuestas por hardware, software, datos y usuarios, que permite capturar, almacenar, administrar y analizar información digital, así como realizar gráficos y mapas representando datos alfanuméricos (López, 2015). Los datos son el principal recurso de un SIG la eficiencia y funcionalidad se miden por el tipo, la calidad y la vigencia de los datos con los que opera (Barbosa, 2011).

Dentro del presente trabajo se conjuntaron e integraron datos de cada factor permitiendo crear un mapa que muestra las áreas susceptibles a la erosión hídrica.

Esto se obtuvo integrando datos sobre la erosividad de la lluvia, las características físico-químicas del suelo, la erodabilidad del suelo, la topografía; Así mismo se analizaron diferentes factores que contribuyen a la erosión, como la pendiente del terreno, el tipo de suelo y la cobertura vegetal, las prácticas de conservación ayudando a identificar las áreas más susceptibles. Finalmente integrando la información para comprender, analizar y gestionar la erosión hídrica del suelo proporcionando datos relevantes para la toma de decisiones en la conservación y manejo sostenible de los recursos naturales.

Para el cálculo del factor R se estimó a partir de los datos de las estaciones climáticas y la aplicación de la Ecuación (2), una vez teniendo los valores de R se interpolaron espacialmente utilizando QGIS es un software de libre acceso y código abierto para el análisis y visualización de información geográfica

Para el factor K derivado del mapa de suelos y sus características edafológicas se interpolaron los datos.

El factor LS se calculó a partir del MDE a 50 m, permitiendo cuantificar la pendiente y la longitud de las laderas. Aplicando las Ecuaciones (11, 12 y 13), con álgebra de mapas para obtener los valores de λ , β , exponente m a para obtener el valor de L. Correspondientes a los parámetros de la fórmula para determinar L.

El valor de S con álgebra de mapas y las ecuaciones (14 y 15), condicionantes de S, la utilización del mapa de pendientes previamente generado se obtiene el resultado final.

El factor C a partir del uso de suelo y vegetación y la reclasificación de valores basados en la literatura presentados en la tabla 10.

En el Factor P Según la función de cada zona en conservación, se asignaron los valores de P según el grado de protección, por prácticas de restricción e implementación de actividades de recuperación, dando valores unitarios a las zonas que se encuentran fuera de la RBBM.

Para finalmente aplicar la fórmula USLE (Ecuación 1) y generar el mapa que muestra la pérdida del suelo estimada en toneladas por hectárea por año.

CAPÍTULO V RESULTADOS Y DISCUSIÓN

5.1 Factor R

Para la zona de estudio se aplicó la ecuación correspondiente a la región 1. Véase figura 12.

$$R= 1.2078*P+0.002276*P^2$$

P= precipitación anual

La precipitación anual acumulada calculada a partir de los datos consultados en Comisión Nacional del Agua, Coordinación General del Servicio Meteorológico Nacional en la base de datos Climatológica Nacional, tomando en cuenta la subcuenca del río Tulancingo que integran las estaciones de Metztlán, San Cristóbal, Magdalena, Zacualtipán, Santa María Amajac, Encino y San Agustín Metzquititlán. Se tomó datos de la estación de Tlanchinol, con estos datos disponibles se calculó el factor R para cada estación.

Tabla 12. Factor R

Factor de Erosividad de la lluvia R	
Estación	FACTOR R (MJ.mm/ha.h)
Metztlán	1271.76136
San Cristobal	1454.647
Zacualtipán	8128.36
Magdalena	3251.47
Santa María Amajac	2202.30
Encino	2051.73
San Agustín Metzquititlán	571.30
Tlanchinol	15419.44728

Fuente: elaboración propia con datos del SMN (2014)

El factor R expresa cuan erosiva puede ser la lluvia en la zona, se puede determinar que con lluvias intensas el valor de R será más alto, lo que implica una mayor susceptibilidad a la erosión, conocer este valor nos permitirá aplicar la ecuación USLE para estimar la erosión hídrica de la zona de estudio véase figura 25.

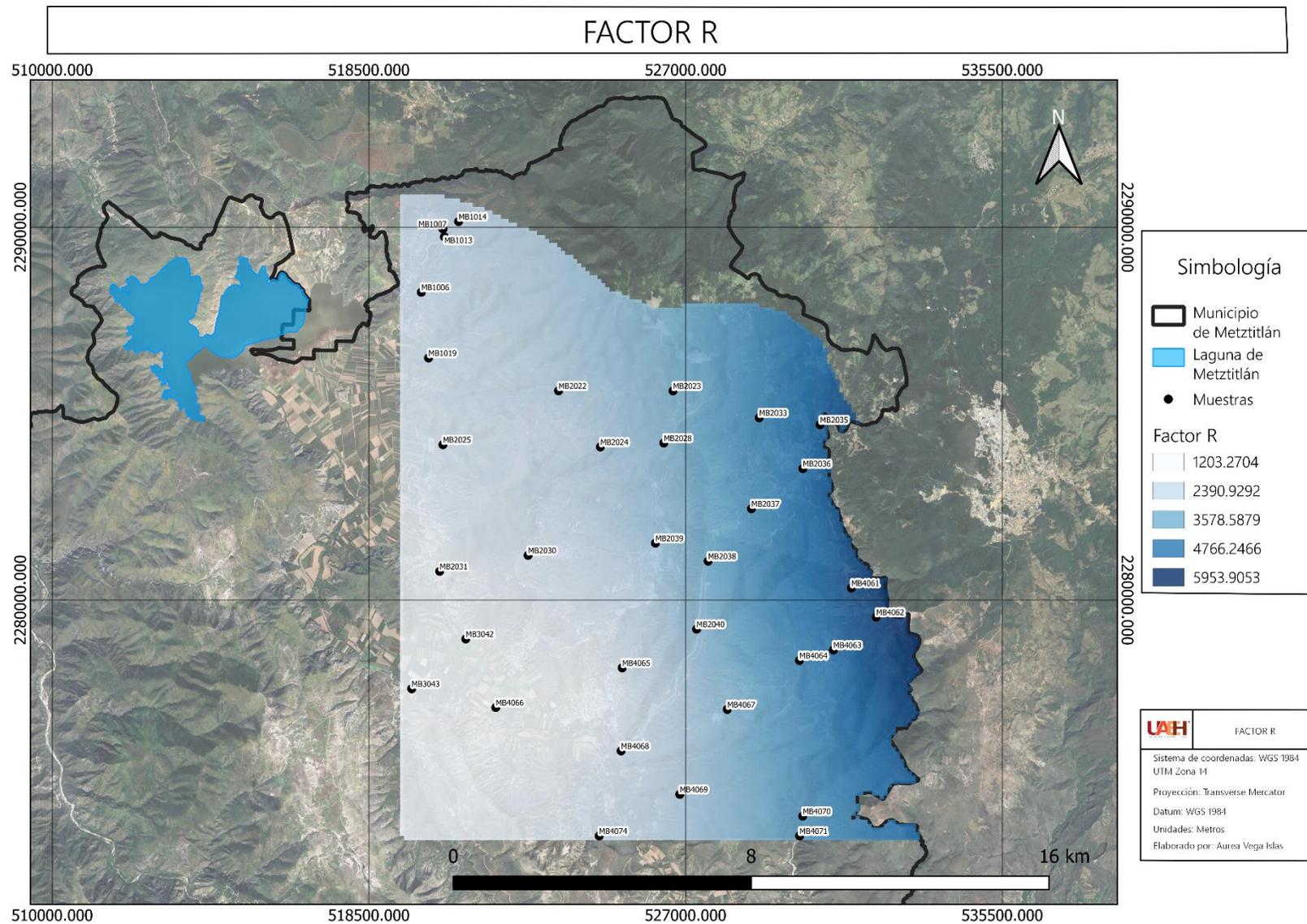


Figura 25. Mapa de factor de erosividad de lluvia (Factor R) del NE de Metztlán.

5.2 Factor K

El cálculo del factor K de acuerdo a la USLE requiere de datos del sobre el porcentaje de contenido en limos, arcilla, arenas, contenido de materia orgánica, estructura y permeabilidad.

Tabla 13. Valores de los parámetros utilizados para el cálculo del factor K y los valores de K obtenidos

Muestra	Arena %	Arcilla %	Limo %	Clase Textural	Textura	MO %	Estructura clase	código	Permeabilidad Clase	código	K	Categoría
MB1006	49.2	4.8	46	Franco Arenosa	Gruesa	5.05	Granular fina	2	Moderada a rápida	2	0.449	Alta erodabilidad
MB1007	53.2	4.8	42	Franco Arenosa	Gruesa	4.79	Granular fina	2	Moderada a rápida	2	0.466	Alta erodabilidad
MB1013	52.8	7.2	40	Franco Arenosa	Gruesa	1.72	Granular fina	2	Moderada a rápida	2	0.636	Muy alta erodabilidad
MB1014	62.8	5.2	32	Franco Arenosa	Gruesa	8.12	Granular fina	2	Moderada a rápida	2	0.237	Baja erodabilidad
MB1019	60.8	3.2	36	Franco Arenosa	Gruesa	4.40	Granular fina	2	Moderada a rápida	2	0.513	Alta erodabilidad
MB2022	47.2	6.8	46	Franco Arenosa	Gruesa	14.44	Granular fina	2	Moderada a rápida	2	0.040	Muy baja erodabilidad
MB2023	31.2	4.8	64	Franco Limosa	Mediana	6.86	Granular muy fina	1	Moderada	3	0.318	Moderada erodabilidad
MB2024	29.2	4.8	66	Franco Limosa	Mediana	4.96	Granular fina	2	Moderada	3	0.480	Alta erodabilidad
MB2025	42.8	5.2	52	Franco Limosa	Mediana	8.73	Granular fina	2	Moderada	3	0.221	Baja erodabilidad
MB2030	50.8	5.2	44	Franco Arenosa	Gruesa	4.69	Granular muy fina	1	Moderada a rápida	2	0.436	Alta erodabilidad
MB2032	40.8	17.2	42	Franco Arenosa	Gruesa	9.00	Granular fina	2	Moderada	3	0.149	Baja erodabilidad
MB2033	30.8	17.2	52	Franco Limosa	Mediana	4.20	Granular muy fina	1	Moderada	3	0.354	Moderada erodabilidad
MB2034	56.8	17.2	26	Franco Arenosa	Gruesa	10.77	Granular fina	2	Moderada a rápida	2	0.036	Muy baja erodabilidad
MB2035	44.8	21.2	34	Franco Arenosa	Gruesa	4.11	Granular fina	2	Moderada	3	0.349	Moderada erodabilidad
MB2037	52.8	3.2	44	Franco Arenosa	Gruesa	5.42	Granular muy fina	1	Moderada a rápida	2	0.408	Alta erodabilidad

MB2038	44.8	7.2	48	Francosa	Gruesa	7.34	Granular fina	2	Moderada	3	0.300	Moderada erodabilidad
MB2039	62.8	5.2	32	Franco Arenosa	Gruesa	2.08	Granular muy fina	1	Moderada a	2	0.612	Muy alta erodabilidad
MB2040	52.8	5.2	42	Franco Arenosa	Gruesa	4.20	Granular muy fina	1	Moderada a	2	0.469	Alta erodabilidad
MB3042	19.2	4.8	76	Franco Limosa	Mediana	1.15	Subangular en bloques	4	Moderada	3	0.805	Muy alta erodabilidad
MB3043	11.2	4.8	84	Limosa	Mediana	3.74	Granular fina	2	Moderada	3	0.563	Muy alta erodabilidad
MB4061	35.2	18.8	46	Francosa	Gruesa	1.89	Subangular en bloques	4	Moderada	3	0.544	Alta erodabilidad
MB4062	41.2	30.8	28	Franco Arcillosa	Mediana	5.95	Subangular en bloques	4	Lenta a moderada	4	0.289	Moderada erodabilidad
MB4063	45.2	4.8	50	Franco Limosa	Mediana	3.83	Subangular en bloques	4	Moderada	3	0.622	Muy alta erodabilidad
MB4064	39.2	6.8	54	Franco Limosa	Mediana	3.01	Granular media	3	Moderada	3	0.616	Muy alta erodabilidad
MB4065	59.2	4.8	36	Franco Arenosa	Gruesa	6.80	Subangular en bloques	4	Moderada a	2	0.394	Moderada erodabilidad
MB4066	35.2	4.8	60	Franco Limosa	Mediana	4.75	Subangular en bloques	4	Moderada	3	0.559	Muy alta erodabilidad
MB4067	65.2	4.8	30	Franco Arenosa	Gruesa	9.84	Subangular en bloques	4	Moderada a	2	0.187	Baja erodabilidad
MB4068	25.2	2.8	72	Franco Limosa	Mediana	3.47	Subangular en bloques	4	Moderada	3	0.675	Muy alta erodabilidad
MB4069	31.2	2.8	66	Franco Limosa	Mediana	1.58	Subangular en bloques	4	Moderada	3	0.810	Muy alta erodabilidad
MB4070	63.2	2.8	34	Franco Arenosa	Gruesa	6.97	Subangular en bloques	4	Moderada a	2	0.399	Moderada erodabilidad
MB4071	59.2	2.8	38	Franco Arenosa	Gruesa	9.41	Subangular en bloques	4	Moderada a	2	0.225	Baja erodabilidad
MB4074	19.2	6.8	74	Franco Limosa	Mediana	4.20	Subangular en bloques	4	Moderada	3	0.572	Muy alta erodabilidad

Aunque la erodabilidad del suelo está influenciada por diversas características físicas y químicas, el contenido de materia orgánica se destaca como uno de los factores más relevantes. Esto se debe a su conexión directa con la cohesión del suelo, la estabilidad de sus agregados y su permeabilidad, aspectos que inciden en la facilidad o dificultad para desprender las partículas del suelo.

A partir de la ecuación utilizada para determinar el factor K según la metodología USLE (Ecuación 1), es posible establecer cinco categorías que permiten identificar de forma rápida y sistemática la susceptibilidad del suelo a la erosión (véase Tabla 14). Esta clasificación se basa en las propiedades intrínsecas del suelo, tales como la textura, el contenido de materia orgánica, la estructura y la permeabilidad. Dentro del rango de valores del factor K, un valor próximo a 0.69 indica una alta susceptibilidad a la pérdida de suelo, mientras que valores cercanos a 0.03 representan suelos relativamente más resistentes a los procesos erosivos.

Tabla 14. Clasificación de la erodabilidad de acuerdo con el factor K,

Clasificación	Valor K (t ha MJ⁻¹mm⁻¹)
Muy baja erodabilidad	0.03 – 0.10
Baja erodabilidad	0.10 – 0.25
Moderada erodabilidad	0.25 – 0.40
Alta erodabilidad	0.40 – 0.55
Muy alta erodabilidad	>0.55

En el análisis del factor K utilizando la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo (USLE), se obtuvieron valores que oscilan entre 0.40 y 0.81, lo que evidencia una notable variabilidad en la susceptibilidad de los suelos a la erosión dentro del área de estudio. Los valores más bajos se asocian con suelos de textura más gruesa o con mayor contenido de materia orgánica, condiciones que favorecen la estabilidad estructural del suelo, mejoran la agregación y aumentan su resistencia al impacto de las gotas de lluvia, reduciendo así el desprendimiento y transporte

de partículas. En contraste, los valores más altos corresponden a suelos con texturas más finas, bajo contenido de materia orgánica o estructuras poco estables, características que incrementan la vulnerabilidad a los procesos erosivos.

Factor K por el método de la FAO

En comparación con la metodología de propuesta por la FAO (1980) donde el factor k es calculado de acuerdo a la textura y la clasificación de tipo de suelo determinado en campo con apoyo de las cartas edafológicas. Los valores obtenidos muestran una variación entre el 0.013 y 0.053 ton/MJ.mm (ver tabla 15).

Para ambas metodologías; la aplicación de USLE y la identificación por método FAO se llevó a cabo la determinación de los porcentajes de las partículas contenida en cada muestra de suelo.

Tabla 15. Valores del factor K por el método de la FAO (1980)

Muestra	Arena %	Arcilla %	Limo %	Clase Textural	Textura	Factor K (FAO)
MB1006	49.2	4.8	46	Franco Arenosa	Gruesa	0.053
MB1007	53.2	4.8	42	Franco Arenosa	Gruesa	0.053
MB1013	52.8	7.2	40	Franco Arenosa	Gruesa	0.053
MB1014	62.8	5.2	32	Franco Arenosa	Gruesa	0.053
MB1019	60.8	3.2	36	Franco Arenosa	Gruesa	0.026
MB2022	47.2	6.8	46	Franco Arenosa	Gruesa	0.013
MB2023	31.2	4.8	64	Franco Limosa	Mediana	0.04
MB2024	29.2	4.8	66	Franco Limosa	Mediana	0.04
MB2025	42.8	5.2	52	Franco Limosa	Mediana	0.04
MB2030	50.8	5.2	44	Franco Arenosa	Gruesa	0.013
MB2032	40.8	17.2	42	Francosa	Gruesa	0.026
MB2033	30.8	17.2	52	Franco Limosa	Mediana	0.04
MB2034	56.8	17.2	26	Franco Arenosa	Gruesa	0.026
MB2035	44.8	21.2	34	Francosa	Gruesa	0.026
MB2037	52.8	3.2	44	Franco Arenosa	Gruesa	0.013
MB2038	44.8	7.2	48	Francosa	Gruesa	0.026
MB2039	62.8	5.2	32	Franco Arenosa	Gruesa	0.013

MB2040	52.8	5.2	42	Franco Arenosa	Gruesa	0.013
MB3042	19.2	4.8	76	Franco Limosa	Mediana	0.04
MB3043	11.2	4.8	84	Limosa	Mediana	0.02
MB4061	35.2	18.8	46	Franco Arcillosa	Gruesa	0.026
MB4062	41.2	30.8	28	Franco Arcillosa	Mediana	0.04
MB4063	45.2	4.8	50	Franco Limosa	Mediana	0.04
MB4064	39.2	6.8	54	Franco Limosa	Mediana	0.04
MB4065	59.2	4.8	36	Franco Arenosa	Gruesa	0.026
MB4066	35.2	4.8	60	Franco Limosa	Mediana	0.04
MB4067	65.2	4.8	30	Franco Arenosa	Gruesa	0.013
MB4068	25.2	2.8	72	Franco Limosa	Mediana	0.04
MB4069	31.2	2.8	66	Franco Limosa	Mediana	0.02
MB4070	63.2	2.8	34	Franco Arenosa	Gruesa	0.013
MB4071	59.2	2.8	38	Franco Arenosa	Gruesa	0.013
MB4074	19.2	6.8	74	Franco Limosa	Mediana	0.02

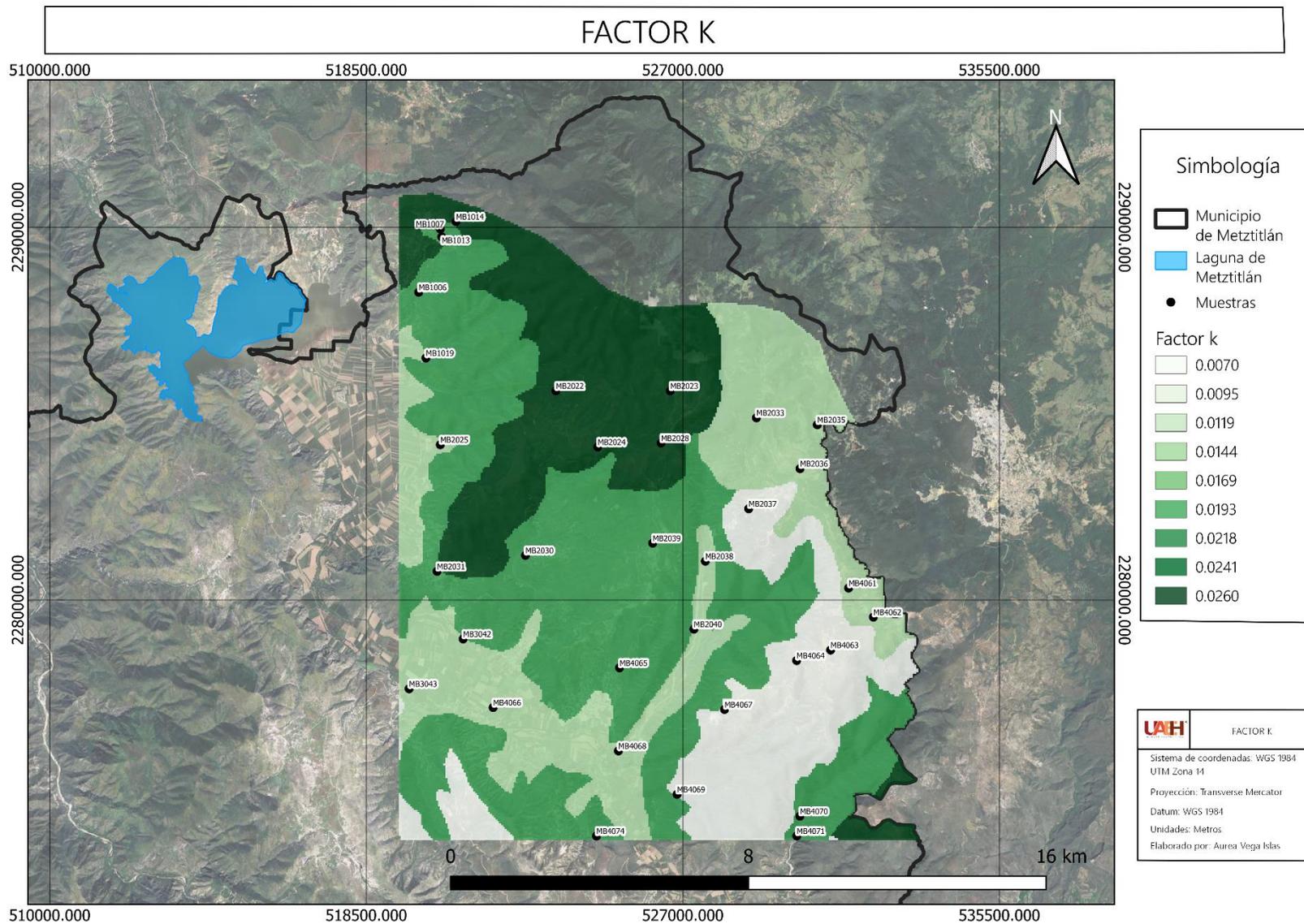


Figura 26. Mapa del factor de erodabilidad con metodología (Factor K) del NE de Metztlán.

5.3 Factor LS

El factor topográfico (LS) influye directamente en la cantidad de suelo que puede ser erosionado. Este factor depende tanto de la longitud como de la inclinación de la pendiente, ya que ambas variables afectan la velocidad del escurrimiento superficial y, por lo tanto, el potencial de arrastre de partículas del suelo. En general, terrenos más extensos y con pendientes pronunciadas presentan valores más altos del factor LS, lo cual se traduce en un mayor riesgo de erosión. Por el contrario, valores bajos de LS suelen encontrarse en valles o zonas bajas, donde tiende a ocurrir la acumulación de sedimentos.

Para este estudio, se realizó una reclasificación del terreno en cinco rangos de pendiente, expresados en grados (véase Tabla 16), con el objetivo de facilitar la interpretación del comportamiento del factor LS dentro del modelo RUSLE.

Tabla 16. Clasificación de pendientes

Rango de pendiente en grados	Categorización	Descripción general	Riesgo de erosión
0 – 5	Muy ligera	Terrenos casi planos	Muy bajo
5- 15	Ligera a moderada	Laderas suaves	Bajo a medio
15 – 25	Moderada a fuerte	Pendientes bien marcadas	Medio a alto
25 – 45	Fuerte a muy fuerte	Laderas empinadas	Alto
>45	Extremadamente fuerte	Pendientes abruptas o escarpadas	Muy alto a extremo

En el presente estudio, el cálculo del grado de pendiente y la longitud de pendiente se realizó utilizando herramientas de SIG, específicamente mediante el software QGIS, a partir del Modelo Digital de Elevación (MDE) correspondiente a la hoja topográfica F14D61, publicada por el INEGI en el año 2018. Para la estimación del factor LS, se aplicó la ecuación desarrollada por RUSLE, en lugar de la versión original propuesta por la USLE, debido a su mayor precisión en la modelación conjunta de la longitud y el ángulo de pendiente en áreas con topografía variable.

La versión RUSLE del factor LS introduce ajustes sustanciales que permiten representar de forma más realista la influencia de la gravedad sobre el movimiento del agua en laderas, especialmente en pendientes suaves, donde la fórmula de la USLE presenta limitaciones. Además, esta formulación resulta más adecuada para su aplicación en entornos geoespaciales, ya que mejora la precisión de los análisis cuando se utilizan modelos digitales de elevación, como los generados y procesados en plataformas SIG como QGIS.

La representación espacial del grado de pendiente, base para el cálculo del factor LS, se muestra en la Figura 27. Posteriormente, la distribución del factor LS derivado de esta información se presenta en la Figura 28, donde se identifican las zonas con mayor susceptibilidad a procesos erosivos.

Conocer el valor de LS permite identificar las áreas topográficamente planas o con pendientes cortas y suaves tienden a tener valores bajos de LS, indicando menor riesgo de erosión por pendiente, en cambio las zonas escarpadas y de mayor extensión tendrán valores de LS altos y presentando un mayor riesgo de pérdida de suelo, Figura 28.

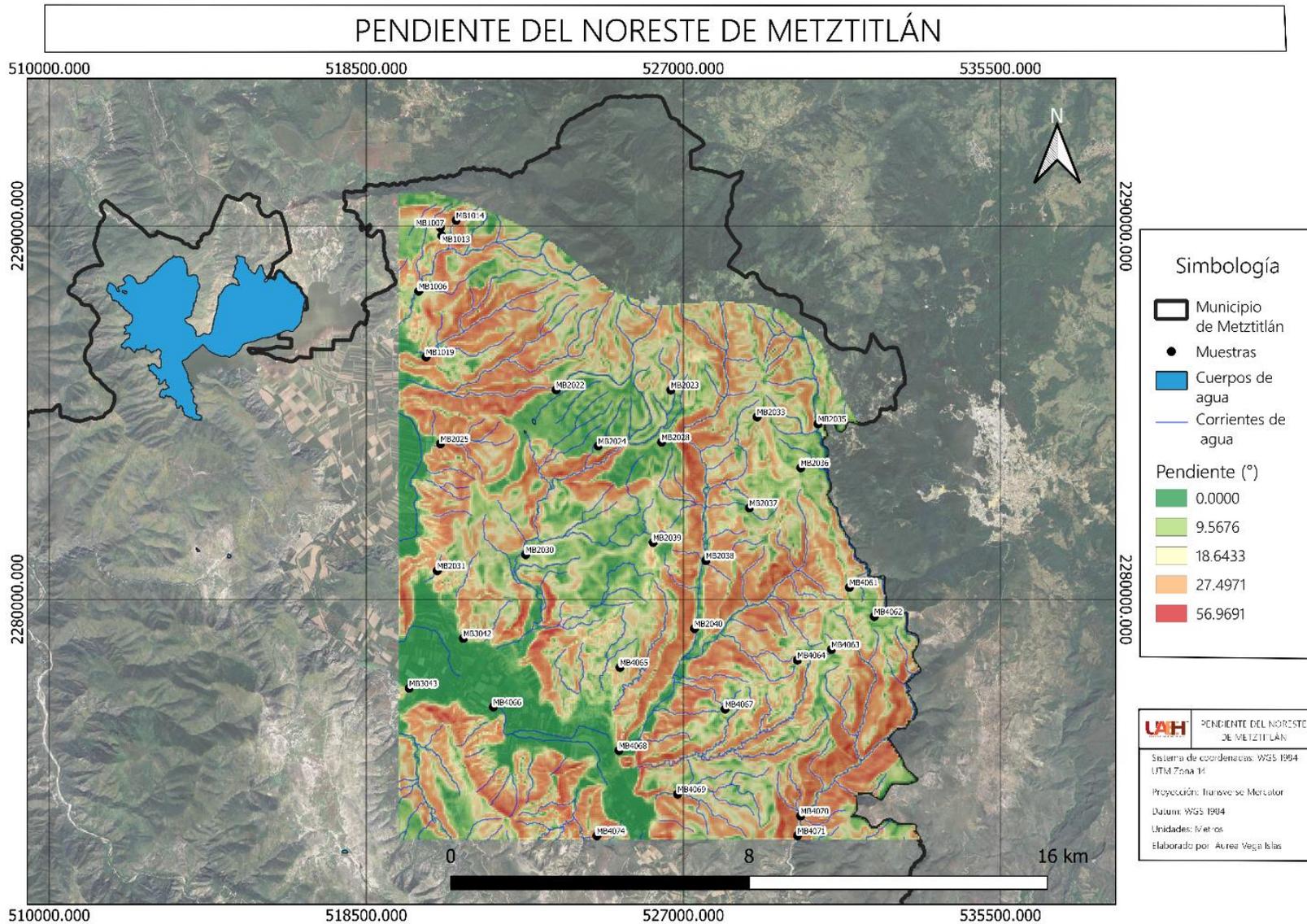


Figura 27. Mapa de pendientes, NE de Metztlán.

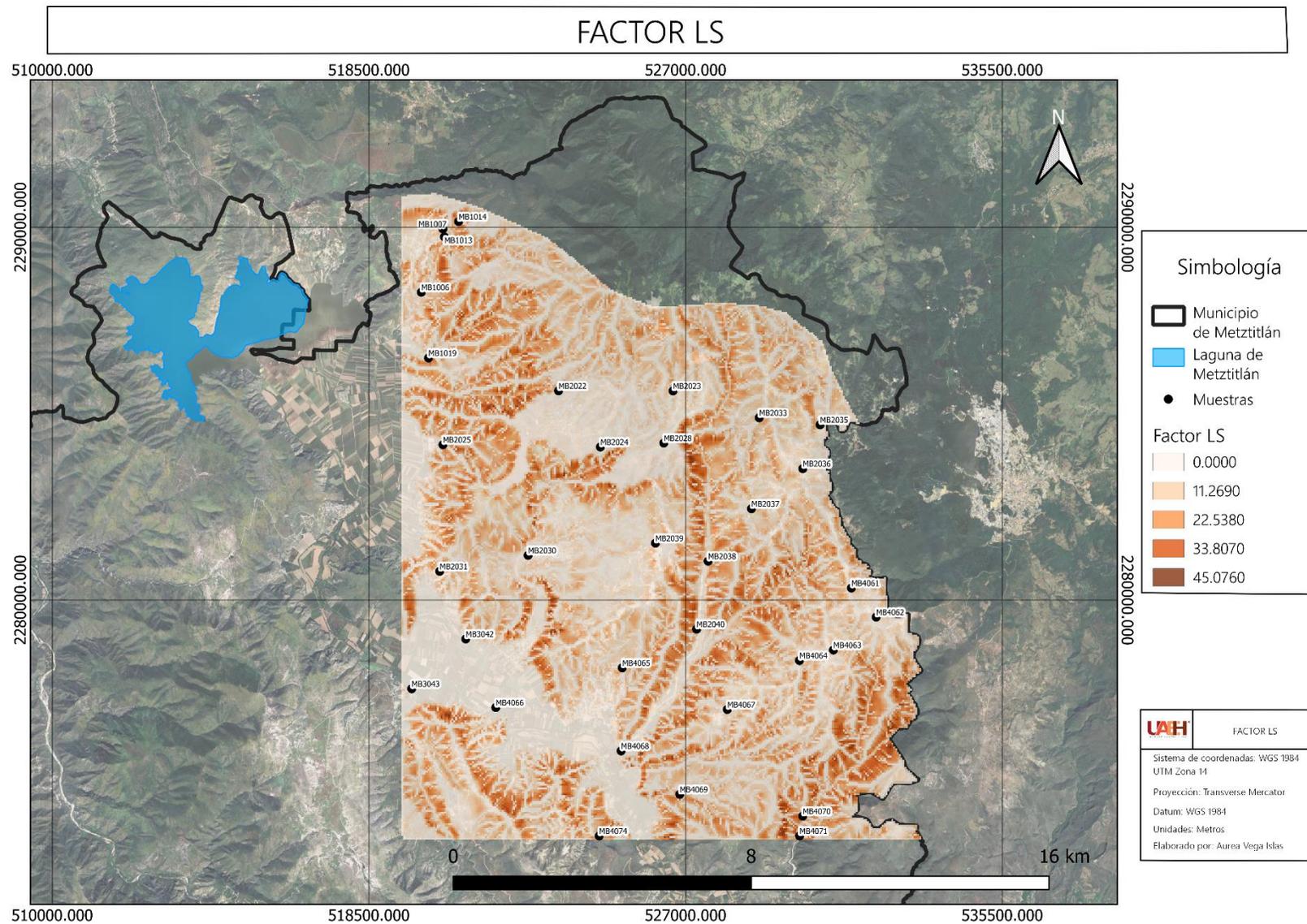


Figura 28. Mapa del factor topográfico (Factor LS) del NE de Metztlán.

5.4 Factor C

El factor C en la ecuación USLE representa el efecto de la cobertura vegetal y las prácticas de manejo del cultivo sobre la erosión del suelo. Se trata de un coeficiente adimensional cuyo valor oscila entre 0, que indica una protección total del suelo, y 1, que corresponde a la ausencia de cobertura y, por tanto, sin protección frente a la erosión (ver Tabla 17).

Este factor permite evaluar el impacto de distintos tipos de uso del suelo, vegetación y prácticas agrícolas sobre la pérdida de suelo por erosión.

Tabla 17. Interpretación del Factor C

Cobertura vegetal	Resultados factor C	Reclasificación
Muy alta	0.01 - 0.20	1
Alta	0.21 – 0.40	2
Moderada	0.41 - 0.60	3
Baja	0.61 – 0.80	4
Muy baja	0.81 - 1.0	5

Las prácticas de conservación del suelo incluyen técnicas como la siembra en curvas de nivel, barreras vegetativas, terrazas agrícolas, rotación de cultivos, agricultura de conservación y el establecimiento de cultivos de cobertura. Estas prácticas están orientadas a reducir la velocidad del escurrimiento, mejorar la infiltración del agua y minimizar la pérdida de suelo por erosión hídrica.

Según Panagos *et al.* (2015), la implementación de prácticas de manejo conservacionista, como la labranza reducida o nula, el uso de cultivos de cobertura y la incorporación de residuos vegetales, puede reducir el factor C en un promedio del 19.1% en tierras agrícolas.

En el área de estudio se distribuyen 12 tipos de suelo y vegetación los que fueron asociados al factor C que van de 0.01 a 0.75 como se muestra en la tabla 18, bosque de pino encino, bosque mesófilo de montaña son los que presentan valores más bajos 0.01 por su mayor cobertura

vegetal, en comparación con la agricultura con valores más altos de 0.75 lo cual indica una menor protección.

Tabla 18. Valores del Factor C de cobertura vegetal

Punto	Tipo de Vegetación y/o Uso De Suelo	Factor C
MB1006	Vegetación secundaria arbustiva de selva baja caducifolia	0.5
MB1007	Vegetación secundaria arbustiva de selva baja caducifolia	0.5
MB1013	Vegetación secundaria arbustiva de selva baja caducifolia	0.5
MB1014	bosque de pino encino	0.01
MB1019	Vegetación secundaria arbustiva de selva baja caducifolia	0.5
MB2022	Agricultura de temporal y semipermanente	0.75
MB2023	Agricultura de temporal y semipermanente	0.75
MB2024	Agricultura de temporal y semipermanente	0.75
MB2025	Vegetación secundaria arbustiva de selva baja caducifolia	0.5
MB2028	Agricultura de temporal y permanente	0.75
MB2030	matorral crasicaule	0.65
MB2031	vegetación secundaria arbustiva de matorral crasicaule	0.65
MB2032	Agricultura de temporal anual	0.75
MB2033	Bosque de encino	0.1
MB2034	Bosque mesofilo de montaña	0.01
MB2035	Agricultura de temporal anual	0.75
MB2036	Agricultura de temporal anual y permanente	0.75
MB2037	Matorral submontano	0.35
MB2038	Matorral submontano	0.35
MB2039	Pastizal inducido	0.02
MB2040	Vegetación secundaria arbustiva de matorral crasicaule	0.65
MB3042	Agricultura de riego anual	0.55
MB3043	Vegetación secundaria arbustiva de matorral crasicaule	0.65
MB4061	Agricultura de temporal anual	0.75
MB4062	Agricultura de temporal anual	0.75
MB4063	Agricultura de temporal anual	0.75
MB4064	Agricultura de temporal anual	0.75
MB4065	Vegetación secundaria arbustiva de matorral crasicaule	0.65
MB4066	Agricultura de riego anual	0.55

MB4067	Vegetación secundaria arbustiva de bosque encino	0.1
MB4068	Agricultura de riego anual	0.55
MB4069	Selva baja caducifolia	0.5
MB4070	Matorral submontano	0.35
MB4071	Matorral submontano	0.35
MB4074	Vegetación secundaria arbustiva de matorral crasicaule	0.65

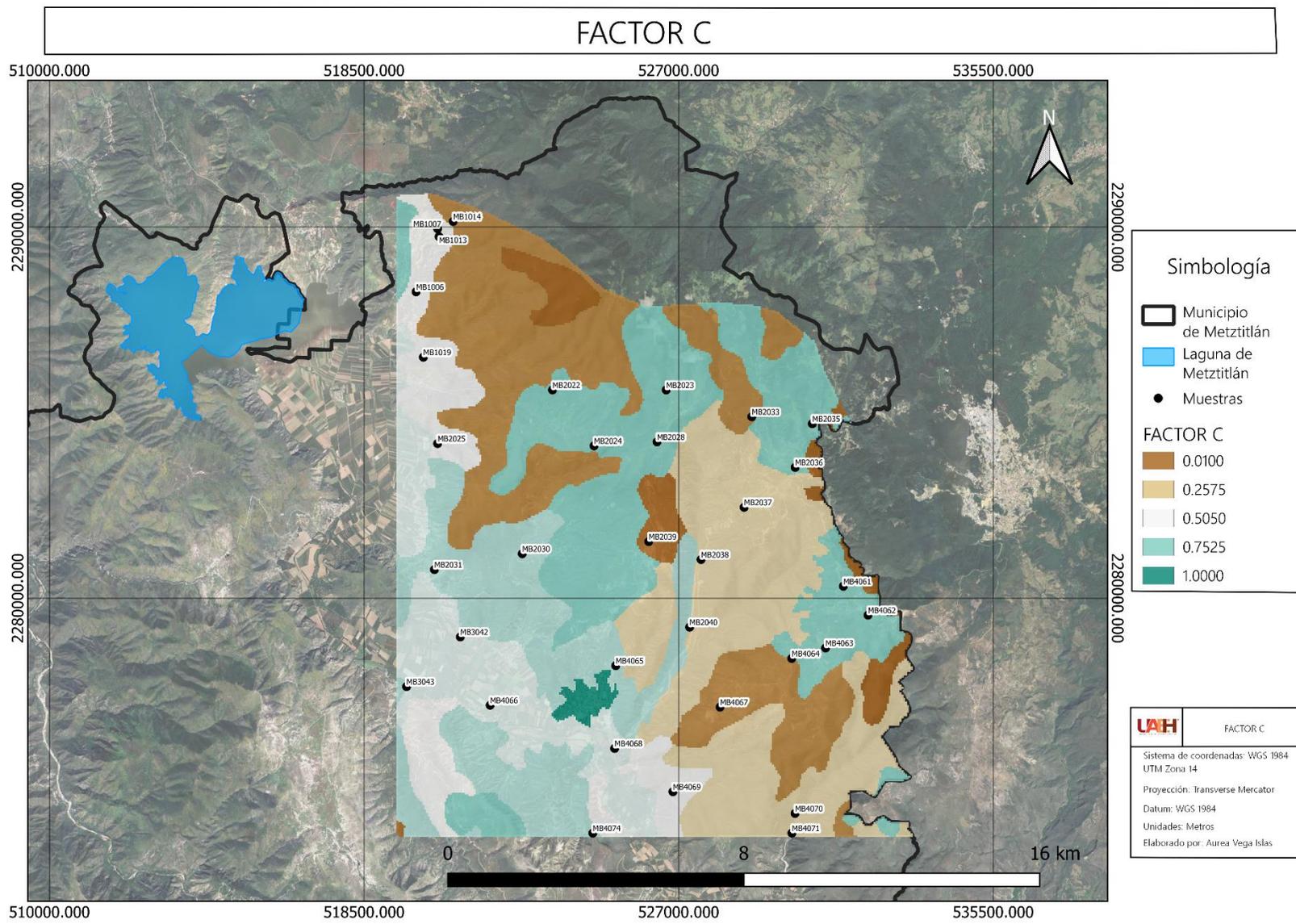


Figura 29. Mapa de Factor de cobertura vegetal, (Factor C) del NE de Metztlán.

5.5 Factor P

El factor P representa la eficiencia de prácticas de conservación del suelo para reducir la erosión.

$P = 1$, No hay prácticas de conservación; $P < 1$, existen prácticas que reducen la erosión.

Para determinar el factor P del área de estudio se tomó el mapa de zonificación de la Reserva de la Biosfera Barranca de Metztitlán como base para asignar valores del factor P (Figura 30), ya que cada tipo de zona suele tener diferentes niveles de intervención humana y, por tanto, distintas prácticas de conservación o su ausencia.

Las Áreas Naturales Protegidas suelen estar divididas en polígonos de las zonas núcleo, zonas de amortiguamiento, zonas de uso, según su manejo y restricciones y reconociendo en cada una de ellas las actividades permitidas compatibles con la conservación de los recursos naturales y el desarrollo socioeconómico de las poblaciones, así como las prácticas para la conservación que se proponen para cada zona.

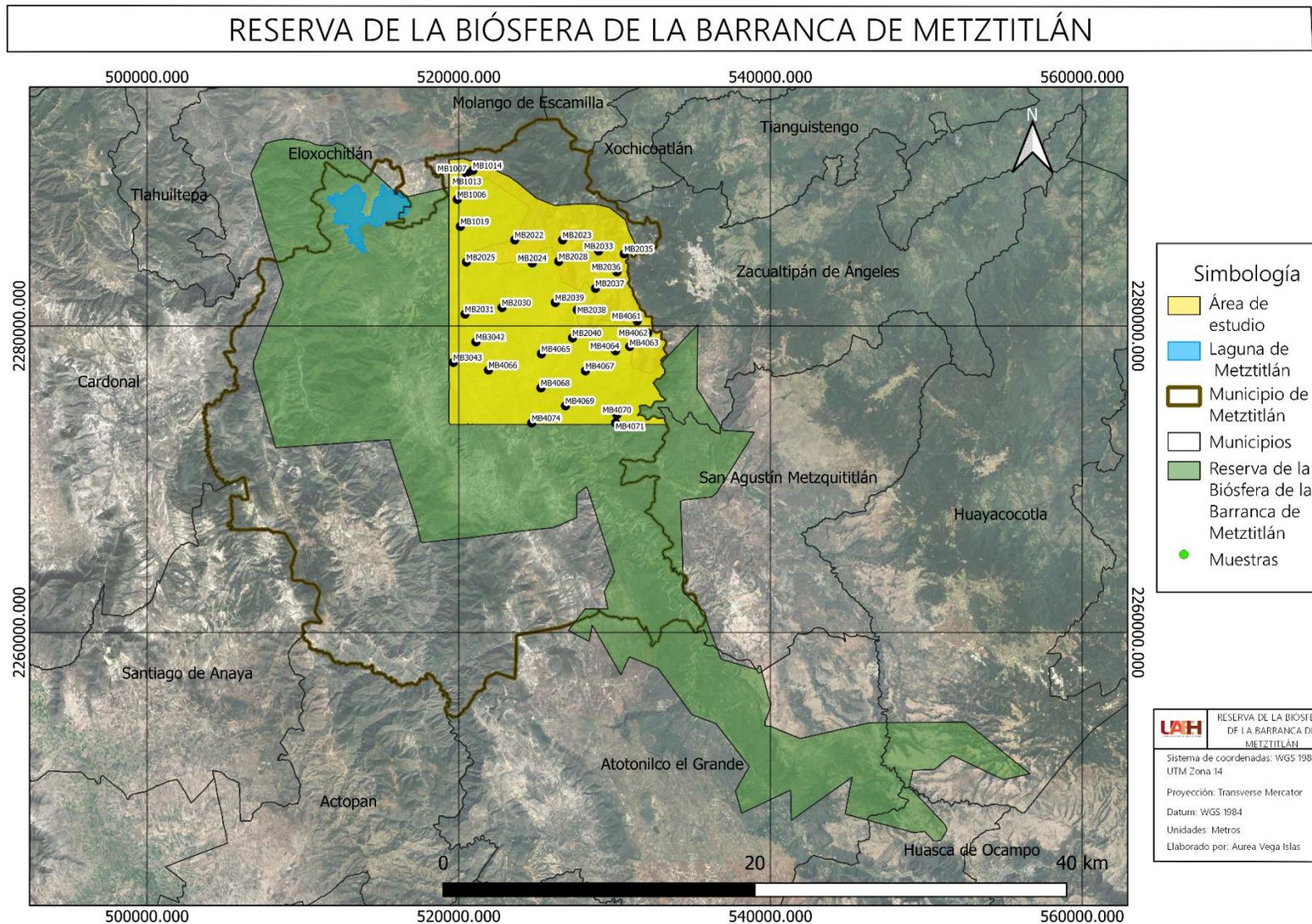


Figura 30. Mapa de Reserva de la Biosfera Barranca de Metztitlán (CONANP, 2003).

Tabla 19. Valores referenciales del Factor P según zonificación ANP

Zonificación del ANP	Descripción	Valor propuesto Factor P
Zonas Núcleo	Ecosistemas no alterados significativamente, investigación científica y saneamiento forestal	0.01-0.16
Zona de recuperación	Restauración ecológica, reforestación, cobertura vegetal	0.16-0.3
Uso público	Actividades autorizadas, investigación, monitoreo, educación ambiental	0.3-0.44
Uso tradicional	Investigación científica, educación ambiental, turismo bajo impacto, aprovechamiento de los recursos naturales autoconsumo con prácticas sustentables.	0.44-0.58
Aprovechamiento sustentable de Recursos Naturales	Actividades limitadas, con manejo ambiental, educación ambiental, tecnologías sustentables, restauración inspección y vigilancia	0.58-0.72
Aprovechamiento sustentable de Agrosistemas	Agricultura o ganadería bajo prácticas tradicionales, tecnologías de bajo impacto ambiental	0.72-0.86
Asentamientos humanos	Mayor intervención (cultivo, caminos, extracción)	0.86-1.0

Los valores de P se encuentran entre 0.16 y 1 (Tabla 20) indicando la presencia de las prácticas de conservación en las diferentes áreas de zonificación pertenecientes al ANP teniendo los valores más bajos en la zona núcleo 0.16 en comparación con los puntos que se encuentran fuera del ANP con valores de 1 que son en las que no se reportan propuestas ni prácticas de conservación.

Tabla 20. Valores del Factor P

Punto	Zonificación	Factor P
MB1006	Aprovechamiento sustentable de los recursos Naturales	0.72
MB1007	Aprovechamiento sustentable de los recursos Naturales	0.72
MB1013	Aprovechamiento sustentable de los recursos Naturales	0.72
MB1014	Aprovechamiento sustentable de los recursos Naturales	0.72
MB1019	Zona Núcleo	0.16
MB2022	Aprovechamiento sustentable de los recursos naturales	0.72

MB2023	Fuera de la reserva	1
MB2024	Fuera de la reserva	1
MB2025	Aprovechamiento sustentable de los recursos naturales	0.72
MB2031	Zona de Recuperación	0.3
MB2030	Aprovechamiento sustentable de los agrosistemas	0.86
MB2032	Fuera de la reserva	1
MB2033	Fuera de la reserva	1
MB2034	Fuera de la reserva	1
MB2035	Fuera de la reserva	1
MB2036	Fuera de la reserva	1
MB2037	Fuera de la reserva	1
MB2038	Aprovechamiento sustentable de los Agrosistemas	0.86
MB2039	Aprovechamiento sustentable de los agrosistemas	0.86
MB2040	Aprovechamiento sustentable de los recursos naturales	0.72
MB3042	Aprovechamiento sustentable de los recursos naturales	0.72
MB3043	Aprovechamiento sustentable de los agrosistemas	0.86
MB4061	Fuera de la reserva	1
MB4062	Fuera de la reserva	1
MB4063	Fuera de la reserva	1
MB4064	Aprovechamiento sustentable de los recursos naturales	0.72
MB4065	Aprovechamiento sustentable de los recursos naturales	0.72
MB4066	Aprovechamiento sustentable de los agrosistemas	0.86
MB4067	Aprovechamiento sustentable de los agrosistemas	0.86
MB4068	Aprovechamiento sustentable de los agrosistemas	0.86
MB4069	Aprovechamiento sustentable de los recursos naturales	0.72
MB4070	Aprovechamiento sustentable de los recursos naturales	0.72
MB4071	Aprovechamiento sustentable de los recursos naturales	0.72
MB4074	Aprovechamiento sustentable de los recursos naturales	0.72

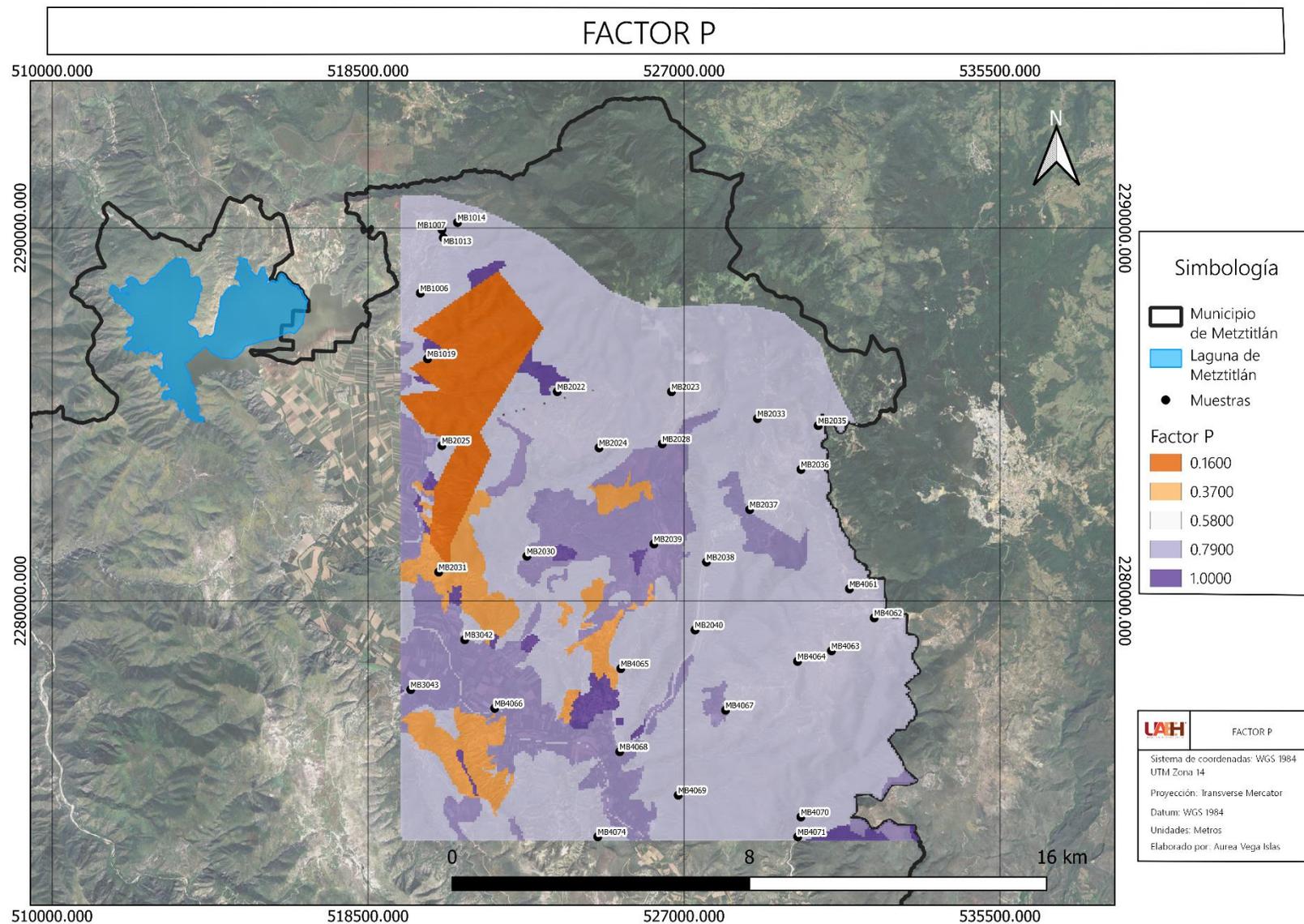


Figura 31. Mapa de Factor de prácticas de conservación, (Factor P) en el NE de Metztlán.

5.6 Erosión hídrica

Como resultado de la aplicación de la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo (USLE), y considerando valores representativos y actualizados para cada uno de sus factores, se obtuvo una pérdida media anual de suelo estimada en t/ha/año.

El valor de pérdida de suelo anual (A) se obtuvo mediante la multiplicación de los factores R, K, LS, C y P, conforme a la metodología establecida en la USLE. Este cálculo se basó en datos específicos del área de estudio, derivados de mediciones de campo, análisis cartográficos y registros climatológicos (Tabla 21).

Tabla 21. Valores de factores de erosión por muestra

Punto de Muestreo	Factor R	Factor K	Factor LS	Factor C	Factor P	Erosión hídrica (t/ha año)	Grado de erosión
MB1006	2305.06	0.053	0.010	0.5	0.72	0.44	Muy Ligera
MB1007	2502.67	0.053	0.010	0.5	0.72	0.48	Muy Ligera
MB1013	2487.53	0.053	2.300	0.5	0.72	109.16	Alta
MB1014	2548.75	0.053	1.750	0.01	0.72	1.70	Ligera
MB1019	2142.76	0.026	0.010	0.5	0.16	0.04	Muy ligera
MB2022	2606.93	0.013	0.010	0.75	0.72	0.18	Muy ligera
MB2023	3466.30	0.04	0.010	0.75	1	1.04	Ligera
MB2024	2725.59	0.04	0.010	0.75	1	0.82	Muy Ligera
MB2025	1908.15	0.04	3.620	0.5	0.72	99.47	Alta
MB2028	3265.58	0.04	1.310	0.75	1	128.34	Alta
MB2030	1821.31	0.013	3.500	0.65	0.86	46.32	Moderada
MB2031	1457.38	0.04	0.010	0.65	0.3	0.11	Muy ligera
MB2032	5322.33	0.026	0.513	0.75	1	53.24	Alta
MB2033	4323.14	0.04	2.720	0.1	1	47.04	Moderada

MB2034	5948.03	0.026	0.010	0.01	1	0.02	Muy ligera
MB2035	5079.00	0.026	1.490	0.75	1	147.57	Alta
MB2036	4783.86	0.04	0.010	0.75	1	1.44	Ligera
MB2037	3976.02	0.013	0.010	0.35	1	0.18	Muy ligera
MB2038	3199.28	0.026	0.115	0.35	0.86	2.88	Ligera
MB2039	2769.35	0.013	0.329	0.02	0.86	0.20	Muy Ligera
MB2040	2635.96	0.013	0.010	0.65	0.72	0.16	Muy ligera
MB3042	1278.34	0.04	0.044	0.55	0.72	0.89	Muy ligera
MB3043	1099.68	0.02	0.587	0.65	0.86	7.22	Ligera
MB4061	4748.44	0.026	0.010	0.75	1	0.93	Muy ligera
MB4062	4763.82	0.04	1.166	0.75	1	166.64	Alta
MB4063	1271.76	0.04	3.260	0.75	1	124.38	Alta
MB4064	3447.62	0.04	2.400	0.75	0.72	178.72	Alta
MB4065	1690.87	0.026	2.160	0.65	0.72	44.44	Moderada
MB4066	1102.01	0.04	0.030	0.55	0.86	0.63	Muy ligera
MB4067	2362.42	0.013	1.260	0.1	0.86	3.33	Ligera
MB4068	1363.20	0.04	0.010	0.55	0.86	0.26	Muy ligera
MB4069	1541.25	0.02	4.462	0.5	0.72	49.51	Moderada
MB4070	2053.71	0.013	0.010	0.35	0.72	0.07	Muy ligera
MB4071	1879.69	0.13	1.457	0.35	0.72	89.72	Alta
MB4074	1087.25	0.02	4.810	0.65	0.72	48.95	Moderada

La magnitud resultante de pérdida de suelo permite clasificar el grado de erosión en el terreno como (ligero/moderado/alto/muy alto/extremo) véase tabla 22, de acuerdo con los rangos establecidos en la literatura técnica especializada.

Tabla 22. Clasificación de erosión hídrica

Perdida de suelo (t/ha)	Grado de erosión hídrica
< 2	Muy ligera
2- 10	Ligera
10-50	Moderada
50-200	alta
>200	Muy alta o extrema

La equivalencia entre la pérdida de suelo en toneladas por hectárea por año (t/ha/año) y el espesor de suelo perdido en milímetros es una herramienta útil para visualizar la gravedad de la erosión. Aunque no existe una fuente única que establezca esta equivalencia de manera oficial, diversos estudios y publicaciones técnicas han utilizado estas comparaciones para el impacto de la erosión. Di Stefano et al, (2023) discute la tolerancia a la pérdida de suelo y se menciona que una pérdida de suelo de 1 mm por año es significativa en términos de sostenibilidad agrícola.

En relación con lo antes mencionado, la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos (OCDE) ha sugerido que una tasa de erosión del suelo inferior a 6 t/ha/año es tolerable, mientras que Bazzoffi (2009) propuso un valor de tolerancia a la pérdida de suelo que no superan las 3 t/ha/año que es la mitad de lo propuesto por la OCDE, para garantizar la sostenibilidad del uso agrícola del suelo.

Por consiguiente, si el valor de A supera el límite de tolerancia podemos considerar que hay un riesgo de erosión severo si no se toman medidas de conservación. En algunos casos 2 t/ha pueden parecer menores, pero es equivalente a perder una capa de 1 mm de suelo fértil al año, Aunque parezca poco, esta es la capa más rica en nutrientes y materia orgánica.

En consecuencia, una pérdida de 50 t/ha/año representa una remoción mucho más grave e implica la pérdida de varios centímetros de suelo al año, lo cual compromete la productividad agrícola, la capacidad de infiltración del agua y la salud ecológica de la zona.

Los valores de erosión hídrica del suelo en el área de estudio mostraron una amplia variación, con un valor mínimo de 0.04 t/ha·año en el punto MB 1019 y un máximo de 178 t/ha·año en el punto MB4064. Esta variabilidad refleja las marcadas diferencias en las características topográficas, edafológicas y de cobertura del suelo presentes en el territorio analizado. Los valores extremos mencionados se encuentran detallados en la Tabla 21 y representados visualmente en la Figura 32.

Al analizar la erosión en relación a la pendiente, se observa que las zonas con pendientes suaves registraron valores bajos debido a una menor velocidad de escurrimiento superficial, en comparación con las zonas con pendientes abruptas y prolongadas mostraron valores considerablemente más altos.

En relación con el contenido de materia orgánica, se observa que los puntos con niveles elevados presentan menores tasas de erosión hídrica. Esto se debe a que la materia orgánica contribuye a mejorar la estructura del suelo y su capacidad de infiltración, lo que disminuye el escurrimiento superficial. En contraste, los suelos con bajo contenido de materia orgánica muestran una mayor susceptibilidad a la erosión, registrando niveles más altos de pérdida de suelo.

Respecto a la cobertura vegetal se evidencio una clara relación inversa a la erosión hídrica, las áreas densamente cubiertas por vegetación ya sea natural o inducida, presentan una protección significativa contra el impacto de la lluvia y la pérdida del suelo, en cambio las zonas con escasa o nula cobertura vegetal presentan los valores más altos de erosión, quedando más expuestas a los efectos de la precipitación directa y al escurrimiento superficial.

Estos resultados resaltan la importancia de considerar la topografía, las características físicas del suelo, el manejo de la vegetación en las estrategias de conservación en zonas más susceptibles.

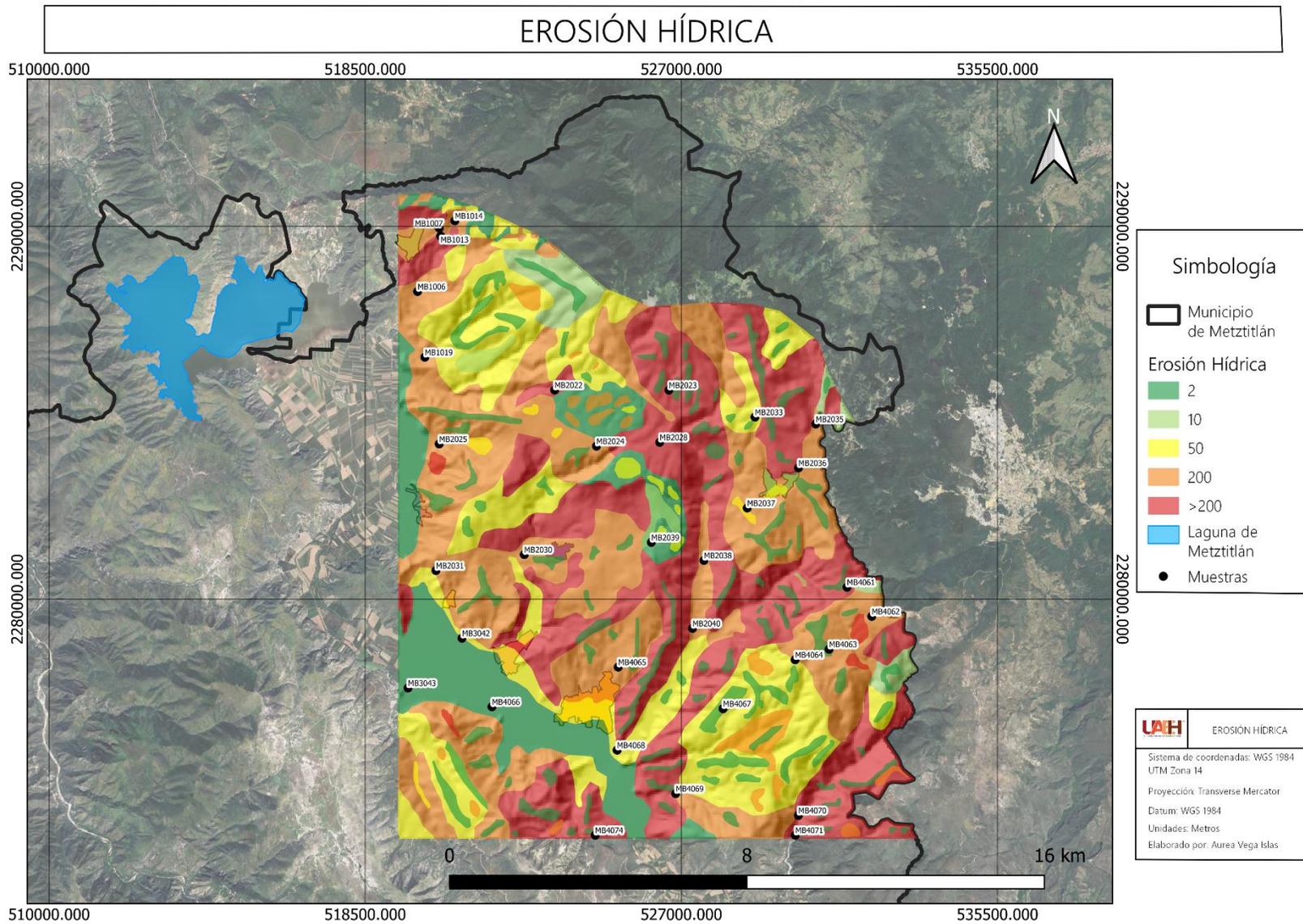


Figura 32. Mapa de erosión hídrica en la región NE de Metztlán.

La tasa de erosión hídrica promedio para la zona de estudio es de 38.76 ton/ha/año, lo que corresponde a un grado de erosión moderada.

Al compararla con las tasas reportadas por Ruiz et al. (2024) para el municipio de Metztlán, quienes reportan un promedio de 123.08 ton/ha/año para todo el municipio, se observa una diferencia. Esta diferencia puede deberse principalmente a que, en el estudio antes mencionado, el factor de prácticas de conservación (P) se asignó el valor unitario, en el presente estudio se tomaron datos respecto a la zonificación de ANP ya que la mayor parte del área de estudio se encuentra dentro de la RBBM. Así como el promedio de todo el municipio y es este caso solo se basó en datos pertenecientes al NE donde la cobertura vegetal actúa como barrera natural a la erosión hídrica.

Asimismo, al comparar con los datos reportados en la actualización del Ordenamiento Ecológico Territorial Hídrico (OETH), etapa de diagnóstico (2019), donde se informa que el 33.93 % del municipio de Metztlán presenta erosión de moderada a fuerte, se puede observar que este alto porcentaje se relaciona con las pendientes escarpadas y el extenso uso agrícola del suelo. Cabe señalar que en dicho estudio no se consideró el Factor R, correspondiente a la erosividad de la precipitación, ni el factor P prácticas de conservación, lo que influye significativamente en los resultados. Aunque se mencionan datos de precipitación pluvial, la modificación del método USLE empleada no integró explícitamente dicho factor.

Con base en los análisis realizados en este trabajo, se identificaron variaciones significativas en las tasas de pérdida de suelo por erosión hídrica entre las distintas unidades edafológicas presentes en el área de estudio. Cada tipo de suelo mostró un comportamiento distinto según sus características físicas, uso actual y condiciones topográficas. Estas diferencias se expresan en un rango amplio de pérdidas, desde valores muy bajos en zonas con vegetación natural hasta cifras alarmantes en áreas con agricultura intensiva en laderas pronunciadas. La Figura 33

presenta de manera comparativa las pérdidas promedio estimadas por unidad de suelo, lo cual permite visualizar de forma clara las unidades más vulnerables y priorizar acciones de conservación.

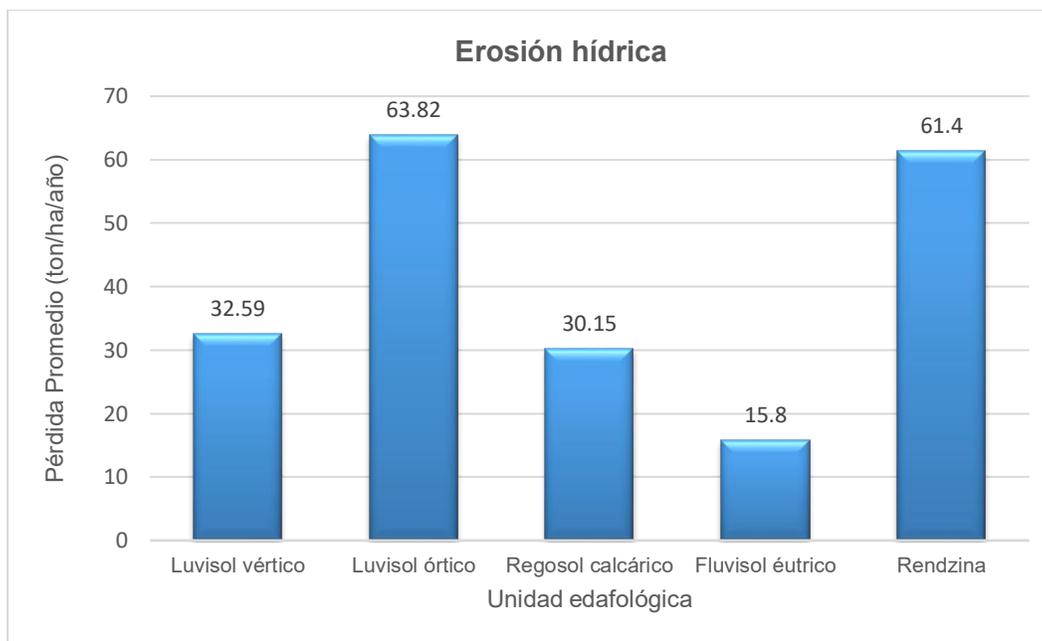


Figura 33. Perdida promedio de suelo por unidad edafológica

En los Luvisoles vérticos, que ocupan una superficie de 5,835 hectáreas, se ha estimado una pérdida promedio de suelo de 32.59 ton/ha/año. En esta unidad, se determinó un grado de erosión hídrica muy ligera en las zonas bajas, casi planas, utilizadas para agricultura de temporal y cultivos semipermanentes cercanos a la zona boscosa. Sin embargo, también se observaron niveles de erosión alta de 128.34 ton/ha/año, presente en el punto MB 2028, especialmente en las áreas con pendientes muy prolongadas, dedicadas a la agricultura intensiva, donde la remoción constante de suelo y la escasa cobertura vegetal favorecen la erosión continua.

En los Luvisoles órticos, que abarcan 2,710 hectáreas, se identificó una pérdida de suelo por erosión hídrica que varía entre 1.44 y 166.64 ton/ha/año, con un promedio de 63.82 ton/ha/año. Esta unidad presenta una susceptibilidad ligera a grado alto a la erosión, especialmente bajo

condiciones de pendientes prolongadas y prácticas agrícolas no planificadas. Aunque estos suelos son fértiles en condiciones naturales, su estructura es vulnerable al desprendimiento y arrastre de partículas finas, en especial en zonas con poca cobertura vegetal.

La unidad de Regosol calcárico, con una superficie de 7,889 hectáreas, presenta una pérdida promedio de 30.15 ton/ha/año. El grado de erosión va de muy ligero (con valores mínimos de hasta 0.11 ton/ha/año, en zonas de vegetación arbustiva y matorrales) hasta grado alto de 109.6 ton/ha/año, especialmente en áreas muy escarpadas con actividad agrícola.

En el caso del Fluvisol éutrico, presente en 2,576 hectáreas, la pérdida promedio es de 15.80 ton/ha/año. El grado de erosión se considera muy ligero en áreas con mayor cobertura de matorral crasicaule y arbustivo, y se incrementa a extremo en pendientes abruptas sometidas a prácticas agrícolas.

Por último, el suelo Rendzina, que cubre 2,873 hectáreas, muestra una pérdida promedio de 61.40 ton/ha/año. Este tipo de suelo presenta un grado de erosión que va de muy ligero grado alto, especialmente en zonas con pendientes abruptas y asociadas a actividades agrícolas.

CAPÍTULO VI CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

El presente estudio permitió identificar y cuantificar los niveles de erosión hídrica en el noreste del municipio de Metztlán, Hidalgo, mediante la aplicación de la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo (USLE), integrada con herramientas de Sistemas de Información Geográfica (SIG). Esta metodología demostró ser efectiva para representar espacialmente la variabilidad de los factores que influyen en la erosión, tales como la erosividad de la lluvia (R), la erodabilidad del suelo (K), la topografía (LS), la cobertura y manejo de la vegetación (C), y las prácticas de conservación (P).

Los resultados obtenidos demuestran una amplia variabilidad en las tasas de pérdida de suelo, que oscilan entre valores muy ligeros hasta extremos, como consecuencia de las condiciones topográficas abruptas, la baja cobertura vegetal, el tipo de uso de suelo y las condiciones edafológicas.

Se calculó una tasa promedio de erosión de 38.76 t/ha·año en la zona de estudio, clasificada como erosión moderada, aunque se registraron puntos con pérdidas superiores a 100 t/ha·año, lo cual representa un riesgo significativo para la sustentabilidad del suelo y la productividad agrícola local.

Este análisis también señala el papel fundamental de la cobertura vegetal y la materia orgánica en la mitigación de la erosión. Las zonas con vegetación densa o suelos ricos en materia orgánica mostraron valores considerablemente más bajos de pérdida de suelo, reforzando la importancia de estas variables como estrategias naturales de conservación.

La importancia del estudio radica en proporcionar una base técnica y cartográfica para la toma de decisiones orientadas a la conservación del suelo, especialmente en un territorio que forma parte de un área natural protegida como la Reserva de la Biosfera Barranca de Metztlán, donde la integridad del ecosistema es crucial para la biodiversidad, la regulación hídrica y el bienestar de las comunidades locales.

Finalmente se recomienda: Fortalecer las prácticas de manejo sostenible del suelo, especialmente en zonas agrícolas de alta pendiente, mediante la implementación de terrazas, barreras vivas, cultivos de cobertura y rotación de cultivos.

Fomentar la reforestación y restauración ecológica en áreas con baja cobertura vegetal, priorizando especies nativas adaptadas a condiciones de aridez y topografía escarpada.

Establecer zonas de conservación prioritarias dentro del área de estudio, basadas en los resultados cartográficos, para evitar la expansión de actividades agrícolas hacia áreas con alta susceptibilidad a la erosión.

Realizar monitoreos periódicos de la erosión hídrica, con el fin de actualizar los datos y evaluar la efectividad de las estrategias de manejo implementadas.

Promover la educación ambiental en comunidades rurales, sensibilizando sobre la importancia del suelo como recurso vital y sobre las consecuencias de su degradación.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aguirre-Salado, O. T., Pérez-Nieto, J., Aguirre-Salado, C. A., Monterroso-Rivas, A. I., & Gallardo-Lancho, J. F. (2023). Water erosion, soil organic carbon redistribution and soil and water conservation: a review. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, 29(3), 47-60. <https://doi.org/10.5154/r.rchscfa.2022.10.075>.
- Aramayo, V., Nosetto, M., & Cremona M.V. (2024). Análisis de la susceptibilidad a la erosión hídrica en una cuenca de la Patagonia árida bajo distintos escenarios. *Investigaciones Geográficas*, (81), 181-199. <https://doi.org/10.14198/INGEO.25246>.
- Arellano-Gil, J., Velasco-de León P., Silva-Pineda A., Salvador-Flores R., Beltrán Romero, F., (2005) Origen y Características geológicas del paleo-lago de Amajac, Hidalgo., *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, Vol. 22, núm. 2, 199-211.
- Ayuntamiento de Metztlán, (2024). Nomenclatura. <https://www.metztlan.gob.mx/nomenclatura>.
- Bautista, F., Delfín, H., Palacio, J. L. & Delgado, M. D. C. (2011). Técnicas de muestreo para manejadores de recursos naturales. Universidad Nacional Autónoma de México, Centro de Investigaciones en Geografía Ambiental. <https://doi.org/10.22201/ciga.9786070221279p.2011>.
- Bailon, J., (2022). Análisis de las prácticas de conservación de suelos para la evaluación de la erosión hídrica en la subcuenca Presa Jalpan. Tesis de maestría en Gestión Integrada de Cuencas, Facultad de Ciencias Naturales, Universidad Autónoma de Querétaro.
- Barbosa, E., (2011). Desarrollo de herramientas de ArcGIS para el cálculo de indicadores físicos y socioeconómico de cuencas hidrográficas. Tesis de maestría en Gestión Integrada de Cuencas, Facultad de Ciencias Naturales, Universidad Autónoma de Querétaro.
- Bazzoffi, P. (2009). Soil erosion tolerance and water runoff control: minimum environmental standards. *Regional Environmental Change*, 9(3), 169-179. <https://doi.org/10.1007/s10113-008-0046-8>
- Becerra, M.A. (1997). Erosión de suelos. Universidad Autónoma de Chapingo, México.

- Bello, A., (2008). La degradación de suelos en el municipio de Calpulalpan, Estado de Tlaxcala y su impacto en el medio ambiente. Tesis para obtener el grado de maestro en ciencias con especialidad en medio ambiente y desarrollo integrado, Instituto Politécnico Nacional.
- Bryan, K., (1948) Los suelos complejos y fósiles de la altiplanicie de México, en relación a los cambios climáticos, Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana, 13, 1-20.
- Bolaños, M., Paz, F., Cruz, C., Argumedo, J., Romero, V., Cruz, J., (2016). Mapa de erosión de suelos de México y posibles implicaciones en el almacenamiento de carbono orgánico del suelo. Terra Latinoamericana 34: 271-288.
- Bouyoucos, G.J. (1962). Hydrometer Method Improved for Making Particle Size Analysis of Soils. *Agronomy Journal*, 54(5), 464–465.
<https://doi.org/10.2134/agronj1962.00021962005400050028x>.
- Carrasco-Velázquez, B., Martínez-Hernández, E., Ramírez-Arriaga E., Solé-Viñas J., (2008). Estratigrafías de la Formación Metztlán del Plioceno (Estado de Hidalgo, Centro-este de México). Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana, 60 (1).
- Carrillo–Martínez, M., Suter, M., 1982, Tectónica de los alrededores de Zimapán, Hidalgo y Querétaro: México, D.F., Sociedad, Geológica Mexicana, Libro–guía de la excursión geológica a la región de Zimapán y áreas circundantes, p. 1–20.
- Cherlet, M., Hutchinson, C., Reynolds, J., Hill, J., Sommer, S., von Maltitz, G. (2018). (Eds.), Atlas mundial de la desertificación, Oficina de Publicaciones de la Unión Europea, Luxemburgo.
- Cortes, T. (1991). Caracterización de la lluvia en México utilizando métodos multivariados. Tesis de maestría en ciencias. Colegio de Postgraduados pp 168, México.
- Cotler, H., Domínguez, J., Zorrilla, M., Cortina, S., Quiñones, L., (2007). La conservación de suelos: un asunto de interés público, Gaceta Ecológica, núm. 83, abril-junio, 2007, pp. 5-71.
- Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED), (2024). Atlas de Riesgos Metztlán, Hidalgo.

- Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas (CONANP). (2003). Programa de Manejo Reserva de la Biósfera Barranca de Metztitlán. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales.
- Departamento de Agricultura de los Estados Unidos (USDA). (2025). ¿Qué es el suelo? <https://ask.usda.gov/s/>.
- Diario Oficial de la Federación, (2002). NOM-021-RECNAT-2000, Que establece las especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de suelos. Estudios, muestreo y análisis. Recuperado de: <http://www.ordenjuridico.gob.mx/Documentos/Federal/wo69255.pdf>.
- Diario Oficial de la Federación, (2012). Programa de Ordenamiento Ecológico General del Territorio. SEGOB, México. <https://biblioteca.semarnat.gob.mx/janium/Documentos/Ciga/agenda/DOFsr/DO2923.pdf>.
- Di Stefano, C., Nicosia, A., Pampalone, V. & Ferro, V. (2023). Soil loss tolerance in the context of the European Green Deal. *Heliyon*, 9(1), e12869. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e12869>
- Domínguez, R. I. y Aguilera, H. N. (1989). Metodología de análisis físico-químicos de suelos. Facultad de Ciencias. UNAM. México. 35 p.
- Echeverría, N., Vallejos, A., Silenzi, J. (2006). Erodabilidad de suelos del Sur de la Región Semiárida de Argentina, Departamento de Agronomía, Universidad Nacional del Sur.
- Eguiluz, S., Aranda, M., Marrett, R., (2000). Tectónica de la Sierra Madre Oriental, México., *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 53, 1-26
- Espinosa, M., Andrade, E., Rivera, P., Romero, A., (2011). Degradación de suelos por actividades antrópicas en el norte de Tamaulipas, México, *Papeles de Geografía*, núm. 53-53, pp. 77-88 Universidad de Murcia, España. <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=40721572006>.
- Esquivel-Macías, C., Bravo-Cuevas, V., González-Rodríguez K., Cabral-Perdomo, M., Castillo-Cerón J. (2008), Bosquejo Geológico y Potencial Paleontológico de la Reserva Barranca

- de Metztlán. Estudios Biológicos en las áreas naturales del estado de Hidalgo, Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo. Núm. 1, pp 79-86.
- FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura). 1980. Metodología provisional para la Evaluación de la Degradación de los Suelos.
- FAO, (1996), Ecología y enseñanza rural, Nociones ambientales básicas para profesores rurales y extensionistas, Ed. FAO Roma, Italia.
- FAO, (2025). Estructura del Suelo. Food and Agriculture Organization of the United Nations. https://www.fao.org/fishery/static/FAO_Training/FAO_Training/General/x6706s/x6706s07.htm#:~:text=La%20estructura%20del%20suelo%20se,mayores%20y%20se%20denominan%20agregados%20.
- FAO, (2015). Base referencial mundial del recurso suelo 2014, Actualización 2015. Sistema internacional de clasificación de suelos para la nomenclatura de suelos y la creación de leyendas de mapas de suelos. Informes sobre recursos mundiales de suelos 106. FAO, Roma.
- Flores, E. (2016). Estimación de la pérdida de suelo por erosión hídrica en Tres Cuencas de la República Mexicana, utilizando la ecuación universal de pérdida de suelo. Tesis Universidad Nacional Autónoma de México.
- Gobierno de México. (2025). Plan Nacional de Desarrollo 2025-2030. gob.mx <https://www.gob.mx/presidencia/documentos/plan-nacional-de-desarrollo-2025-2030-391771>.
- González, M. (1991). La Ecuación Universal de Pérdidas de Suelo. Pasado, presente y futuro. Ecología. https://www.miteco.gob.es/es/parquesnacionalesapn/publicaciones/ecologia_05_02_tcm30-100846.pdf.
- Heim, A, 1940. The front ranges of the Sierra Madre Oriental, Mexico, from Cd. Victoria to Tamazunchale. *Eclogae Geologicae Helvetica*. 33:314-362.

- Hernández, J., Hernández, M., (1991) Evolución Geológica de la Región de Metztitlán / Zacualtipán, Estados de Hidalgo y Veracruz, Tesis para obtener el título de ingeniero geólogo, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México.
- Hernández, J., (2023) Erosión y erodabilidad en el Municipio Del Mineral Del Monte, México, Servicio Geológico Mexicano; Gerencia de Geología e Hidrogeología Ambiental; Pachuca Hidalgo, México.
- Hernández, O., Ávila, G., García, S., (2021), Situación actual del recurso suelo en México y la incorporación de abonos orgánicos como estrategia para su conservación, Vol. 1, "Recuperación transformadora de los territorios con equidad y sostenibilidad" UNAM-AMECIDER, México.
- Ibañez Asensio, S.; Moreno Ramón, H.; Gisbert Blanquer, JM. (2012). La Ecuación Universal de Pérdidas de Suelo (USLE). <http://hdl.handle.net/10251/16849>.
- Imlay, R., Cepeda E., Álvarez M. Diaz, T., (1948), Stratigraphic Relations of Certain Jurassic formations in eastern Mexico, Bulletin of the American Association of Petroleum Geologists, Vol. 32 No. 9, 1750-1761.
- Instituto Nacional del Suelo Sustentable (INSUS) (2020), Política Nacional de Suelo. México, <http://insus.gob.mx/archivos/PSN/Pol%C3%ADtica%20Nacional%20de%20Suelo.pdf>.
- Jaya-Santillán, J. (2023). Altos niveles de erosión hídrica en una microcuenca tropical calculado mediante el modelo USLE. FIGEMPA: Investigación y Desarrollo, 15(1), 26-39. <https://doi.org/10.29166/revfig.v15i1.4269>.
- Klopp, H. y Bly, A. (2023). Soil penetration resistance as a soil health indicator. <https://extension.sdstate.edu/soil-penetration-resistance-soil-health-indicator>.
- INEGI (2004). Guías para la Interpretación de Cartografía Edafología, https://www.inegi.org.mx/contenidos/productos/prod_serv/contenidos/espanol/bvinegi/productos/historicos/1329/702825231736/702825231736_1.pdf.

- INEGI (2007) Conjunto de Datos Vectorial Edafológico. F14-11 Pachuca. Escala 1:250 000 Serie II Continuo Nacional Pachuca.
- INEGI (2010) Compendio de información geográfica municipal, Metztlán Hgo.
- INEGI (2019) Conjunto de Datos Vectoriales de Información Topográfica F14D71 Actopan escala 1:50 000.
- INEGI (2021) Conjunto de Datos Vectoriales de Información Topográfica F14D61 (Metztlán) Escala 1:50 000.
- INEGI (2022) Conjunto de Datos Vectoriales de Información climática F14D61 (Metztlán) Escala 1:50 000.
- López-Doncel, R., 2003. La formación Tamabra del Cretácico medio en la porción central del margen occidental de la plataforma Valles San Luis Potosí, centro-noroeste de México. Revista Mexicana de Ciencias Geológicas. 20(1):1-19. <https://rmcg.unam.mx/index.php/rmcg/article/view/949>.
- López-Herrera, E., Romero-Bautista, L., Ayala-Sánchez, M., Soria-Mercado, R., Portillo-López, J. (2010). Problemática de contaminación en la zona agrícola de la Reserva de la Biosfera Barranca de Metztlán, Hidalgo, México. Academia.edu. <https://www.academia.edu/96228339>.
- López, L. (2015). Diccionario de Geografía aplicada y profesional. Terminología de análisis, planificación y gestión del territorio. Universidad de León.
- López., R., (2002). Degradación del suelo: causas, evaluación e investigación. Centro Interamericano de desarrollo e investigación ambiental y territorial, Universidad de los Andes.
- Mendoza, R. B., y Espinoza, A. (2017). Guía técnica para muestreo de suelos (primera). Universidad Nacional Agraria y Catholic Relief Services. <https://repositorio.una.edu.ni/3613/1/P33M539.pdf>.

- Mendoza, M., Bautista, A. L., Quevedo, A., Mendoza, D. (2018). Análisis hidrológico de largo plazo en la cuenca del río Metztitlán, Hidalgo, México, y su relación con el cambio climático. *Hidrobiológica*, 28(1). <https://doi.org/10.24275/uam/izt/dcbs/hidro/2018v28n1/Mendoza>.
- Montés-León, M. L., Uribe Alcántara, E. M., & García-Celis, E. (2011). Mapa Nacional de Erosión Potencial. *Tecnología y Ciencias del Agua*, vol. II, núm. 1, enero-marzo de 2011, pp. 5-17.
- Oldeman, L.R. (1998). Guidelines for general assessment of the status of human-induced soil degradation. Working paper 88/4. International Soil Reference and Information Centre (ISRIC). Wageningen.
- 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>
- Pérez-Salinas, J., Rodríguez, F., López-Santos, A., Torres-González J., Mera-Jiménez, A., Díaz-Romo A., Valdivia-Martínez, O., (2019). Erodabilidad y riesgo de erosión de suelos negros del centro de México: estudio de un Phaeozem. *Terra Latinoamericana* 37: 391-400. DOI: <https://doi.org/10.28940/terra.v37i4.531>.
- Piscitelli, M., Varni, M., Sfeir, A., Ares., G., (2010). Valores de erodabilidad (factor K-USLE) para suelos representativos de la cuenca alta del arroyo Azul (partido de Azul- Buenos Aires), *Revista de la Facultad de Agronomía, La Plata* Vol. 109 (1): 17-22.
- Portuguez, D., (2015). Estimación de la pérdida de suelos por erosión hídrica en la cuenca del Río Sigüas utilizando geoinformática, Universidad Nacional Agraria la Molina, Lima-Perú, *Anales Científicos*, 76 (2): 324-329. DOI: <http://dx.doi.org/10.21704/ac.v76i2.797>.
- Puente, C., A., (2011). Estimación de la Erosión de Suelos a Escala Regional Utilizando Sensores Remotos y Técnicas de Inteligencia Artificial, Tesis de Doctorado en Ciencias. Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, Baja California.

- Ramírez-Bautista, A., Sánchez-González, A., Sánchez-Rojas G., Cuevas-Cardona, C., (2017). Biodiversidad del Estado de Hidalgo. Tomo 1. Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo /Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología. Pachuca de Soto Hidalgo., México, 304pp.
- Ramírez, O., F. A., Hincapié, G. E., Sadeghian, K. S.(2009). Erodabilidad de los suelos de la zona central cafetera del departamento de Caldas. *Cenicafe* 60(1) 58-71.
- 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) . U.S. Department of Agriculture, Agriculture Handbook No. 703.
- Rivera, J. H., Lal, R., Amézquita, É., Mesa, O. & Chavez, B. (2010). Predicción De La Erodabilidad En Algunos Suelos De Ladera De La Zona Cafetera Colombiana. *Cenicafé* 61 (4): 344-357. 2010. [https://www.cenicafe.org/es/publications/arc061\(04\)344-357.pdf](https://www.cenicafe.org/es/publications/arc061(04)344-357.pdf).
- Rodrigo-Comino, J., Senciales-González, J. M., & Ruiz-Sinoga, J. D. (2020). The effect of hydrology on soil erosion. *Water*, 12(3), 839. <https://doi.org/10.3390/w12030839>
- Rucks, L., Garcia, F., Kaplán, A., Ponce de León. J., Hill, M., (2004). Propiedades Físicas del suelo, Facultad de Agronomía Universidad de la Republica. Montevideo Uruguay.
- Ruiz, M., Ortiz, J., Valdivia, R., Flores, J., (2024). Erosión hídrica de suelos en Hidalgo: Pérdida económica en maíz grano, pobreza y carencia alimentaria. *Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar*, mayo-junio, 2024, vol. 8, núm. 3 https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v8i3.11723.
- Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural, (2022), Estrategia Nacional de Suelo para la Agricultura Sostenible, https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/754319/Estrategia_Nacional_de_Suelo_para_la_Agricultura_Sostenible.pdf.
- SEMARNAT, (2012). Informe de la Situación del Medio Ambiente en México. https://apps1.semarnat.gob.mx:8443/dgeia/informe_12/03_suelos/cap3_ref.html#inicio.

SEMARNAT, (2018). Suelos sostén de la vida humana. Secretaria del Medio Ambiente y recursos Naturales: <https://www.gob.mx/semarnat/articulos/suelos-de-importancia-crucial-para-la-vida-humana-y-la-biodiversidad>.

Servicio Meteorológico Nacional (2025). <https://smn.conagua.gob.mx/es/climatologia/temperaturas-y-lluvias/resumenes-mensuales-de-temperaturas-y-lluvias>. Consulta marzo 2025

SMN. (s. f.). Resúmenes mensuales de temperaturas y lluvia. Servicio Meteorológico Nacional. Recuperado 2 de abril de 2025.

Soil Survey Division Staff. (1993). Soil Survey Manual. U.S. Department of Agriculture Handbook 18. Washington, D.C.: U.S. Government Printing Office.

Sour-Tovar, F., Pérez-Huerta, A., Quiroz-Barroso, SA, & Centeno-García, E. (2005). Braquiópodos y trilobites del Pérmico Inferior del noroeste del estado de Hidalgo, México. *Revista Mexicana De Ciencias Geológicas*, 22 (1), 24–35. <https://rmcg.unam.mx/index.php/rmcg/article/view/862>.

UNESCO, (2024). Alerta mundial sobre la rápida degradación de los suelos, <https://www.unesco.org/es/articles/alerta-mundial-de-la-unesco-sobre-la-rapida-degradacion-de-los-suelos>. consulta febrero 2025.

Vázquez-Cuevas, G., Roldan, E., (2010). Evaluación de los cambios de cobertura del suelo en la Reserva de la Biosfera Barranca de Metztitlán, Hidalgo, México. *Papeles de Geografía* 51-52 (2010), 307-3116, Universidad de Murcia, <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=40720151027>.

Wischmeier, W. H. y Smith, O. (1978). Predicting Rainfall Erosion Losses a Guide to Conservation Planning. United States Department Of Agriculture, Agriculture Handbook Number 537.

https://www.ars.usda.gov/ARSErrorFiles/60600505/RUSLE/AH_537%20Predicting%20Rainfall%20Soil%20Losses.pdf.

Zaragoza, P. (2021). Análisis multitemporal de la cobertura del terreno y su asociación con las tasas de erosión hídrica en Aocolco, Puebla (Tesis de Maestría), Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada.