



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**  
**FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES ZARAGOZA**  
**CARRERA DE BIOLOGÍA**

**DIAGNÓSTICO DE EROSIÓN EDÁFICA Y COBERTURA VEGETAL  
COMO INDICADORES BIOFÍSICOS DE CALIDAD ECOLÓGICA DE  
SISTEMAS RIBEREÑOS DE LA SUBREGIÓN DEL ALTO BALSAS**

**INFORME DE SERVICIO SOCIAL  
QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:  
BIÓLOGA**

**PRESENTA**

**DAYANA QUITERIO MORALES**

**JURADO DE EXAMEN**

**DIRECTOR: DR. GERARDO CRUZ FLORES**  
**ASESOR: M. EN C. JUAN MANUEL VALDERRÁBANOS GÓMEZ**  
**ASESORA: DRA. ELOISA A. GUERRA HERNÁNDEZ**  
**SINODAL: M. EN C. FAUSTINO LÓPEZ BARRERA**  
**SINODAL: M. EN C. ALMA BELLA LÓPEZ LÓPEZ**

**PROYECTO PAPIME PE-208821**

**CIUDAD DE MÉXICO, 2023**





Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

## **DEDICATORIA**

Dedico con todo mi amor mi investigación a mis seres queridos y familia, que durante mi vida me han apoyado y brindado su cariño, apoyo, consejos y motivación para poder llegar a cumplir este gran logro y los que están por venir.

A mi padre Miguel Quiterio Medel, quien ha sabido formarme con buenos valores, me educó con reglas, que han sido de gran ayuda para alcanzar mis metas, su forma de enfrentar la vida y sus ganas de superarse día con día han sido mi más grande impulso, muchos de mis logros son gracias a él, te amo y gracias por haberme apoyado desde siempre.

A mi madre Alma Delia Morales Prudente, ya que sin la oportunidad que mi brindó no lo habría logrado, su bendición a la distancia a diario de mi vida me protege y me lleva por el camino del bien.

A mis siete tesoros Jessica, Antony, Débora, Tiffany, Valeria, Eneidy† y Ángela, los amo con mi vida. Espero estén orgullosos de su hermana mayor, saben que siempre podrán contar conmigo, gracias a ustedes por ser mi más grande motivación.

A Deyanira Quiterio Medel, que más que prima es una hermana para mí, siempre ha estado en mis peores momentos, con sus sabios consejos me ha ayudado a no darme por vencida y seguir aspirando a más. Te amo.

Mi abuelita Ángela, por su amor, consejos, pero sobre todo por darme esas fuerzas que me impulsa a ser mejor todos los días, gracias mi viejita chula por ser mi gran ancla y por siempre estar para mí, te amo.

A Marux Y. Ayala Espejel, quien con sus consejos y apoyo me ha ayudado a ver la vida desde otra perspectiva, por no dejarme caer a pesar de las adversidades y por tener un papel fundamental en mi formación como persona y como mujer.

## **AGRADECIMIENTOS**

Gracias a la vida y al destino que me puso en el lugar correcto, porque sin ello no estaría ahora cumpliendo este gran logro. La constante persistencia de mi papá y su preocupación por mi avance y desarrollo de esta investigación me impulsó a tener más dedicación y motivación para poder terminarla de manera exitosa.

Gracias a mis padres por creer en mí y en mis expectativas, gracias a mi papá por ser mi motivación, por su apoyo constante, a Marux gracias por esos cafés en noches de estudio, por el apoyo constante cuando ya no podía más y sabios consejos y por cada una de sus palabras que me guiaron durante mi vida.

Agradecida también con mi Asesor el Dr. Gerardo Cruz Flores por haberme brindado la oportunidad de explotar mis conocimientos y capacidades, así como también haberme tenido la paciencia para guiarme durante el desarrollo de esta investigación.

También quiero agradecer a todos los que fueron mis colegas, pero sobre todo mis más grandes amigos durante la gran aventura de la carrera Arzu, Majo, Kasandra, Adrián, Emiliano, Diana y Eli, ya que, gracias a su apoyo constante, palabras de aliento hicieron del camino muy ameno, sin ellos mi experiencia no habría sido la misma.

A la Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de estudios Superiores Zaragoza por brindarme la oportunidad de disfrutar del sistema colegial de profesores que con pasión me transmitieron los conocimientos que hoy en día gozo.

Al proyecto: PAPIME PE 208821 por otorgar el apoyo y los recursos proporcionados para la realización del presente trabajo.

A mi gabinete de Sinodales, por todos sus comentarios y conocimientos proporcionados para hacer de este un proyecto enriquecedor.

# Índice

Resumen .....	1
Introducción.....	2
Marco Teórico .....	4
Suelo y sus componentes.....	5
Erosión del suelo y erosión hídrica .....	6
Ecuación Universal de Erosión Revisada (RUSLE).....	7
Factor erosividad de la lluvia (R) .....	8
Factor de erosionabilidad del suelo (K).....	8
Factor de longitud de la pendiente e inclinación de la pendiente (LS).....	9
Factor de cobertura del suelo (C) .....	9
Factor de las prácticas de manejo (P).....	10
Cobertura vegetal y cambio en el uso de suelo .....	11
Sistemas ribereños .....	12
Estructura de los ambientes ribereños .....	13
Cuencas hidrográficas.....	15
Indicadores de calidad ambiental .....	16
Sistemas de información geográficos (SIG).....	17
Teledetección y su fundamento .....	17
Usos de la teledetección .....	18
Índices de vegetación.....	19
Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI) .....	20
Objetivos.....	22
Objetivo General.....	22
Objetivos específicos.....	22
Hipótesis .....	23
Materiales y Métodos .....	24
Ubicación del Área de estudio.....	24
Descripción del área de estudio .....	25
Hidrología subterránea .....	25
Aguas subterráneas.....	25
Precipitación .....	25
Suelo .....	25
Vegetación .....	26

Disponibilidad de agua .....	26
Trabajo de gabinete .....	26
Recopilación y adecuación de información cartográfica.....	26
Selección de sitios de estudio .....	27
Determinación de la erosión potencial y actual a través de la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo (RUSLE).....	28
Indicador de cobertura natural.....	33
Estimación del Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI) .....	34
Evaluación de la calidad ambiental .....	34
Trabajo de campo .....	36
Resultados.....	39
Descripción de sitios de estudio .....	39
Nealtican.....	39
San Nicolás de los Ranchos.....	40
Xalizintla .....	41
Buenvista .....	42
Vallecito .....	43
Cascada Volkswagen.....	43
Factores de la ecuación Universal de pérdida de suelo revisada (RUSLE).....	45
Factor R .....	45
Factor K.....	49
Factor LS .....	51
Factor C .....	53
Erosión potencial y actual .....	56
Estimación del Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI) .....	61
Indicador de cobertura natural.....	63
Calidad ambiental de la cobertura natural .....	64
Discusión .....	66
Evaluación de calidad ambiental .....	66
Conclusiones.....	72
Referencias .....	73

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Diagrama para generar los factores del modelo RUSLE. ....	8
Figura 2. Franja ribereña de tres zonas.....	13
Figura 3. Estructura jerárquica de la cuenca hidrográfica. ....	16
Figura 4. Comportamiento de los índices de vegetación sobre la reflectancia en diversas longitudes de onda. ....	20
Figura 5. Espectro de absorción de los pigmentos. ....	22
Figura 6. Localización del área de estudio. ....	24
Figura 7. Regionalización nacional de factor R. ....	28
Figura 8. Localización espacial del sitio Nealtican. ....	40
Figura 9. Localización espacial del sitio San Nicolás de los Ranchos. ....	41
Figura 10. Localización espacial del sitio Xalizintla. ....	42
Figura 11. Localización espacial del sitio Buenavista. ....	42
Figura 12. Localización espacial del sitio Vallecito. ....	43
Figura 13. Localización espacial del sitio Cascada VW. ....	44
Figura 14. Localización de las Estaciones climatológica. ....	46
Figura 15. Mapa de erosividad de la lluvia. ....	48
Figura 16. Factor K o erodabilidad del suelo. ....	50
Figura 17. Factor LS longitud y grado de la pendiente. ....	52
Figura 18. Mapa de uso y vegetación. ....	55
Figura 19. Mapa de erosión potencial. ....	59
Figura 20. Mapa de erosión actual. ....	60
Figura 21. Mapa de clasificación del NDVI. ....	62
Figura 22. Mapa de cobertura natural. ....	65
Figura 23. Mapa de calidad ambiental. ....	71

## ÍNDICE DE CUADROS

	4
Cuadro 1. Funciones del suelo. ....	6
Cuadro 2. Valores de P, para el contorno y el cultivo en surcos (Wishmeier y Smith, 1978). ....	10
Cuadro 3. Datos y fuentes utilizadas. ....	27
Cuadro 4. Ecuaciones regionalizadas para la república mexicana. ....	28
Cuadro 5. Tipo de suelo y textura superficial. ....	29
Cuadro 6. Factor para vegetación y/o uso de suelo. ....	31
Cuadro 7. Calidad ambiental para indicador de cobertura natural. ....	34
Cuadro 8. Rangos para la clasificación del indicador erosión. ....	35
Cuadro 9. Rangos para la clasificación del NDVI. ....	35
Cuadro 10. Calidad ambiental final. ....	35
Cuadro 11. Fuentes de información. ....	38
Cuadro 12. Sitios de estudio. ....	39
Cuadro 13. Estaciones climatológicas seleccionadas para la obtención del factor R. ....	45
Cuadro 14. Resultados de erosividad para cada una de las estaciones climatológicas. ....	47
Cuadro 15. Tipo de suelo y valores K. ....	49

Cuadro 16. Cobertura y usos de suelo en la región de estudio.....	53
Cuadro 17. Erosión potencial. ....	56
Cuadro 18. Valores para la clasificación del indicador de erosión potencial.....	56
Cuadro 19. Erosión actual en la Subregión del Alto Balsas.....	57
Cuadro 20. Valores para la clasificación del indicador de erosión actual. ....	57
Cuadro 21. Valores para la clasificación del indicador NDVI.....	61
Cuadro 22. Cobertura en la zona de estudio.....	63
Cuadro 23. Valores para la clasificación del indicador de vegetación.....	64
Cuadro 24. Calidad ambiental de la subregión del Alto Balsas. ....	66
Cuadro 25. Valores finales de Calidad ambiental. ....	67



## **Resumen**

Dada la complejidad de los ecosistemas ribereños. por sus características físicas, químicas y biológicas, impulsa a la toma de acciones hacia la conservación de estos ya que son muy sensibles a los cambios de uso de suelo consecuencia de las actividades antropogénicas que se desarrollan en zonas aledañas. Por tanto, el objetivo de este estudio fue evaluar la calidad ambiental de los ecosistemas ribereños utilizando tres indicadores (Erosión, NDVI y cobertura natural).

La investigación se realizó en 6 localidades ribereñas distribuidas en la subcuenca del Río Nexapa de la cuenca alta del Rio Balsas entre 2260 m y 4010 m de la Reserva de la Biosfera de los volcanes. Se trabajó con Sistemas de Información Geográficas y una validación de la información obtenida en el trabajo de campo. Se evaluaron tres indicadores para tener como resultado final la sumatoria de estos y establecer la calidad ambiental de los sistemas ribereños. Los resultados arrojaron que, el valor de erosión es de 0-10 ton/ha/año, la vegetación analizada con NDVI, mostró promedios diferentes 0.81 valor más alto y 0.20 como el valor más bajo, finalmente el valor predominante de la cobertura natural fue el 65%. De los 6 sitios, 4 presentaron calidad ambiental media y 2 calidad ambiental alta.

## **Abstract**

Due to the complexity of riparian ecosystems for their physical, chemical, and biological characteristics, it encourages to take actions towards the conservation of these since they are very sensitive to changes in land use as a result of the anthropogenic activities that take place in surrounding areas. Therefore, the objective of this study was to evaluate the environmental quality of riparian ecosystems using three indicators (Erosion, NDVI and natural cover).

The research was carried out in 6 riparian localities distributed in the sub-basin of the Nexapa River of the upper basin of the Balsas River between 2260 m and 4010 m of the Biosphere Reserve of the volcanoes. Geographic Information Systems were used, and a validation of the information obtained in the fieldwork. Three indicators were evaluated to have as a result the sum of these and establish the environmental quality of the riparian systems. The results showed that, the erosion value is 0-10 ton / ha / year, the vegetation analyzed with NDVI,

showed different averages 0.81 higher value and 0.20 as the lowest value, finally the predominant value of natural coverage was 65%. Of the 6 sites, 4 presented medium environmental quality and 2 high environmental quality.

## **Introducción**

Los ecosistemas ribereños presentan una estructura compleja y heterogénea (Allan,2004). Son la interface entre los sistemas terrestres y los acuático, por lo que abarcan diferentes gradientes ambientales, comunidades y procesos ecológicos (Vázquez *et al.*, 2015). En todo ecosistema terrestre, los suelos desempeñan importantes funciones gracias a su capacidad para depurar y neutralizar sustancias, brindar variedad de hábitats a la flora y fauna edáficas y proporcionar anclaje (Seybold *et al.*, 1997; Etchevers *et al.*, 2000; Cruz, 2006). Los suelos ribereños son formados por procesos de acumulación a largo plazo de materiales (mineral y orgánico) de lo que conocemos como ribera de arroyos y ríos, son muy importantes ya que un suelo ribereño bien conservado puede infiltrar y almacenar cantidades significativas de agua, mitigando los impactos de eventos climáticos tales como: inundaciones, eventos de sequía y erosión (Campos *et al.*, 2021).

La Vegetación natural aumenta las tasas elevadas de infiltración en comparación con otros tipos de cobertura con la misma base edafológica, de manera que, todo cambio de la vegetación natural para un uso forestal, de plantaciones, pastizales o cultivos puede reducir la capacidad de infiltración y almacenamiento de agua en el suelo (Ceccon, 2003). Varias investigaciones han demostrado que, en los primeros años después del cambio en el uso de la tierra, se producen escorrentía y erosión del suelo en diferentes magnitudes. Este efecto sin embargo puede reducirse con el establecimiento de mejores prácticas de manejo y la restauración de una buena cubierta vegetal (Hamilton, 1987).

Dada la importancia de la vegetación riparia para lograr la disminución en las tasas de erosión, se han realizado estudios haciendo uso de Sistemas de Información Geográficas (SIG) como herramientas a gran escala para el análisis de la vegetación, principalmente haciendo uso de los Índices de vegetación (IV). Los IV utilizan relaciones, diferencias y sumas de datos de bandas espectrales para evitar problemas surgidos en las firmas espectrales

por los diferentes tiempos y condiciones atmosféricas en que se toma la imagen y es el índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI por sus siglas en inglés) (Jensen, 2013).

Es esencial comprender que el incremento de las actividades económicas y sociales tales como la agricultura, la ganadería como el cambio uso de suelo afecta el ciclo del agua, si las precipitaciones son superiores a la tasa de su capacidad de absorber agua, el suelo puede perder la cubierta vegetal y productividad (Linger, 1995). En algunos casos, los daños ocasionados al ecosistema son demasiado severos debido a que los disturbios son demasiado intensos o se prolongan por demasiado tiempo, afectando seriamente los procesos sucesionales naturales, lo cual reduce su habilidad para recuperarse (Bradshaw 1983).

En esta investigación se propuso una metodología con el objetivo de estimar la erosión hídrica en la Subregión del Alto Balsas y evaluar los cambios en la cobertura vegetal por medio de la herramienta de sistemas de información geográficos para establecerlos como indicadores biofísicos de calidad ecológica de sistemas ribereños.

En este sentido se determinó como estudio de caso, la calidad ambiental de sistemas ribereños (CAdeSR), la cual fue expresada aquí como aquella condición ambiental que conjuga: cobertura de vegetación >95%, pérdida de suelo por erosión no mayor a la del intervalo 0 a 10 Mg ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup> y valores de NDVI > 0.81. Valores menores de cobertura, NDVI y mayor pérdida de suelo por erosión, disminuyen la CAdeSR y permiten definir los problemas existentes que se presentan y deben atender en la subregión del Alto Balsas, tales como la sedimentación, eutrofización y contaminación por agentes biológicos (Gómez, 2013).

## Marco Teórico

La erosión de suelos es un proceso natural que, geológicamente es fundamental para su formación pero, por malas prácticas de manejo este proceso puede potenciarse y deteriorar tanto sus propiedades físicas, químicas y biológicas como incrementar la pérdida de nutrientes, reducir la productividad agrícola y elevar los costos de producción (Cotler *et al.*, 2020), lo que puede traducirse en una menor capacidad de soporte, nutrición y disponibilidad de agua hacia las plantas, lo cual merma su productividad y rendimiento, afectando de manera directa la cobertura vegetal.

El término cobertura vegetal puede ser definido fisonómica y estructuralmente como la unidad reconocible y cartografiable de la comunidad vegetal de un sitio que responde a las condiciones ambientales. Como componente natural, la cobertura vegetal, contribuye en la regulación del clima y es la principal forma de suministro de nutrimentos en los ecosistemas y en los sistemas agrícolas. Es importante identificar por medio de indicadores ambientales si se está llevando a cabo una buena productividad.

Los indicadores ambientales (biofísicos) según la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico (1993), es un parámetro o valor derivado de parámetros que proporciona información para describir el estado de un fenómeno, ambiente o área. Al ser un producto de información sintetizada, muestran el panorama sobre las condiciones ambientales, por lo tanto, hacer uso de más de un indicador permite establecer la calidad ambiental de un sitio determinado.

La calidad ambiental, se establece mediante juicios de valores cuantitativos y cualitativos que se adjudican a un estado o condición del ambiente, el estado se refiere a los valores en una situación y momento dado (Cabrera *et al.*, 2002). Es fundamental conocer los procesos desarrollados para la conservación de los recursos naturales. Uno de los ambientes más alterados son los ecosistemas ribereños, debido a las actividades antropogénicas que se desarrollan a lo largo de los sistemas fluviales.

Los sistemas ribereños, son ecotonos donde coexisten fuertes gradientes biofísicos entre las zonas terrestres y acuáticas (Naiman *et al.*, 2010). Por su carácter transicional presentan una infinidad de interacciones entre los elementos del paisaje, lo cual les confiere características

ecológicas de gran relevancia para la conservación de los recursos hídricos, edáficos, flora y fauna (Guerra, 2020).

### **Suelo y sus componentes**

La palabra suelo proviene del latín “*Solum*” que significa suelo, tierra o parcela (Pedraza, 2015). Es un cuerpo natural, porque posee, tanto límites laterales como inferiores y superiores; es complejo y heterogéneo porque está formado por material mineral y orgánico no consolidado en distintas proporciones y es disperso y trifásico pues en él se presenta, una fase sólida, líquida y una gaseosa (Cruz, 2006). El suelo, se forma, a una tasa de 1 cm por cada 100 a 400 años, a partir de material mineral y orgánico sometido, bajo la influencia del tiempo geológico, a los efectos de clima, topografía, vegetación y fauna y la acción del hombre (Doran y Parkin, 1994). Es el medio natural en el cual las plantas superiores extraen el agua y nutrimentos necesarios para su crecimiento y desarrollo, además es utilizado como sustrato para obtener anclaje y soporte.

El suelo es considerado como un recurso natural constituido por una mezcla de material mineral orgánica, agua y aire, el porcentaje que ocupan cada uno de estos componentes en condiciones ideales para el desarrollo de la vegetación, en el suelo superficial con textura franca aproximadamente es el siguiente; Material mineral: 45%, Materia orgánica 5%, Agua 25% y Aire 25%. De igual modo, las proporciones de estos componentes varían de tiempo en tiempo y de lugar en lugar. El volumen de agua y aire componen una relación proporcional uno con el otro. El agua al ser removida por el drenaje, evaporación o por la absorción que ejecutan las plantas en desarrollo, permite que el espacio poroso llegue a ocuparse de aire (Ortiz, 1990).

De acuerdo con Porta y López (2005), definir calidad del suelo y por consecuencia la ambiental está en función de su uso, sus condiciones ambientales o características inherentes de tipos biológicas o hidrológicas tal cual se muestran en el (Cuadro 1). De modo que, es importante establecer que un buen estado de este conlleva a evitar en gran parte la erosión, ya que la erosión del suelo es uno de los principales problemas ambientales, incrementando el deterioro de la calidad de este. La causa más común de la degradación edifica en el mundo representado por más del 80% de superficie terrestre con algún grado de afectación (Oldeman, 1994).

Cuadro 1. Funciones del suelo.

<b>FUNCIONES DEL SUELO</b>	
<b>Económicas</b>	Producción de alimentos, fibras, energía, minerales, biocombustibles, masas forestales vías de comunicación y fuente de materias primas.
<b>Ecológicas</b>	Suministro de nutrientes, reciclaje de materia orgánica, ciclo del agua, filtro de contaminantes.
<b>Biológicas</b>	Hábitat para la fauna y microorganismos, banco de genes, reserva de biodiversidad.
<b>Hidrológicas</b>	Almacén de agua, control de escorrentía, suministro de para las plantas, al controlar la entrada de agua en el suelo (infiltración), el almacenamiento y transferencia de agua.
<b>Control de la contaminación</b>	Fuente de sumidero para contaminantes, reciclaje residuos. Capacidad filtrante, fuente y depósito de gases invernadero.
<b>Paisaje y patrimonio</b>	Indicador de la evolución del paisaje, preservación material paleontológico.

**Fuente:** Modificado a partir de (Bullock *et al.*, 1999; Pedraza, 2015; Porta *et al.*, 2019).

### **Erosión del suelo y erosión hídrica**

La erosión del suelo es la acción de roer, gastar y provocar pérdidas de sustancias del relieve, en consecuencia, origina una disminución del volumen, este proceso está conformado por tres fases principales: la primera es el desprendimiento de partículas; la segunda fase, se da por el transporte o desplazamiento de los materiales desgastados y por último la acumulación o depositación de los materiales transportados, en lagos, océanos o áreas continentales (Montes-León *et al.*, 2011).

La Erosión hídrica. De acuerdo con INEGI (2015) el agua actúa como agente erosivo, manifestándose de forma torrente, lluvia, arroyadas, granizadas, crecidas de río y el efecto de riego, que produce el desprendimiento, transporte y sedimentación de las partículas del suelo (Hudson, 1995).

La erosión acelerada del suelo por acción del agua trae consigo impactos ambientales negativos, tales como la perturbación en la regulación del ciclo hidrológico; bajos rendimientos en la producción agrícola y pecuaria; degradación de la cubierta vegetal; pérdida de la biodiversidad; disminución de la vida útil de las obras hidráulicas por la cantidad de sedimentos que transporta el agua; sedimentación en el lecho de los ríos, y desestabilización de laderas que favorecen las catástrofes, produciendo así pérdidas de seres humanos, daños a viviendas e infraestructura, y disminución de tierras agrícolas (Montes-León *et al.*, 2011). Los efectos interactivos de los factores; precipitación, cobertura vegetal, topografía y las propiedades del suelo determinan la magnitud y la tasa de erosión del suelo (Camargo *et al.*, 2017).

Existe una amplia gama de métodos que permiten evaluar cualitativa o cuantitativamente los procesos de degradación del suelo, particularmente la erosión hídrica. La mayoría de las evaluaciones a diferentes escalas se basan en las ecuaciones o modelos matemáticos, que relacionan las tasas de degradación con variables climáticas, topográficas, del suelo y del uso y manejo de la tierra. Uno de estos métodos es la ampliamente utilizada Ecuación Universal de Pérdida de Suelo o USLE y todas las modificaciones y revisiones que se le han hecho a este modelo, como la MUSLE, la DUSLE y la RUSLE (Camargo *et al.*, 2017).

### **Ecuación Universal de Erosión Revisada (RUSLE)**

De acuerdo con USDA, 2016 La Ecuación Universal de Erosión Revisada proviene de la Ecuación Universal de Pérdida de Suelos (EUPS), es una nueva y avanzada tecnología de predicción de erosión que utiliza la estructura empírica familiar de USLE probada por más de cinco décadas de uso en la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo (USLE) la cual fue desarrollada por el servicio de Conservación de Suelos de Estados Unidos (Renard *et al.*, 1994). Utiliza valores de entrada físicamente significativos que están ampliamente disponibles en las bases de datos existentes o que se pueden obtener fácilmente.

Emplea factores que representan efectos erosivos del clima, topografía, manejo de la cobertura (R, K, L, S, C y P) para calcular la erosión dentro de un programa computacional,

tal como se ilustra en la Figura 1 (McCool *et al.*, 2004). Dichos factores serán ampliamente explicados en la metodología para su mejor comprensión.

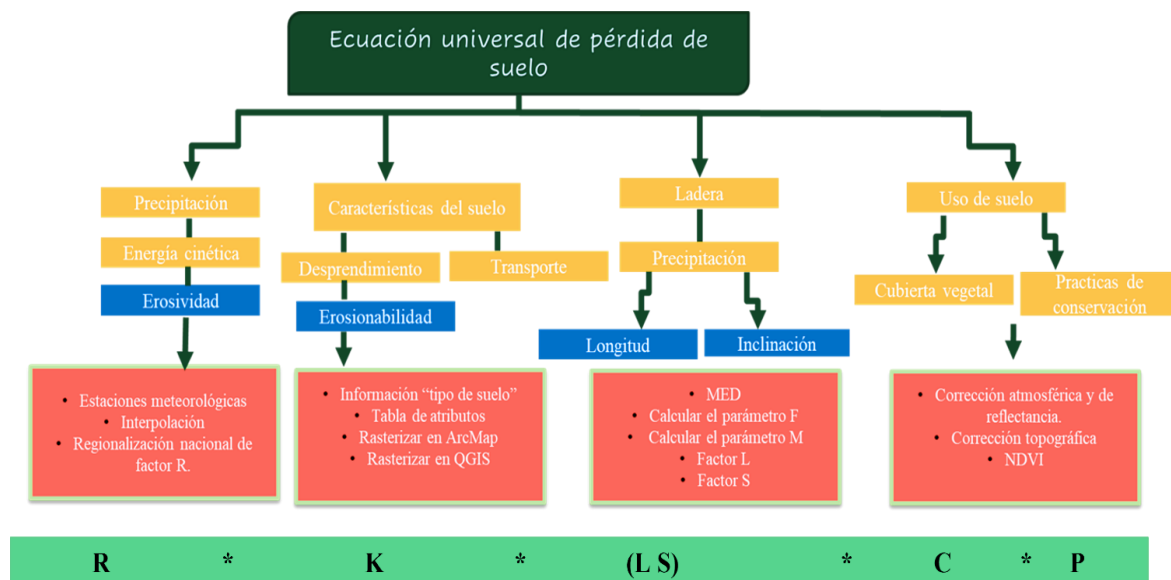


Figura 1. Diagrama para generar los factores del modelo RUSLE.

*Fuente:* Elaboración propia

Asimismo, puede ser usada como guía en la conservación, planeación, estimación de la erosión en superficies extensas y estimar la producción de sedimentos de una cuenca. Puede ser aplicada en cultivos, pastizales, zona de pastoreo, bosques alterados, sitios de construcción, minas y prácticamente en cualquier zona donde el suelo este expuesto a las gotas de lluvia y donde se genere un fujo superficial, el cual es generado cuando la intensidad de la lluvia supera la capacidad de infiltración del suelo (McCool *et al.*, 2004).

### Factor erosividad de la lluvia (R)

Cortes (1991) rediseño una ecuación para correlacionar los datos de la precipitación anual con los valores de R estimados en el país usando la información disponible de la intensidad de la lluvia. De esta manera dividió la República Mexicana en 14 regiones de erosividad de la lluvia.

### Factor de erosionabilidad del suelo (K)

La susceptibilidad de los suelos a erosionarse depende de:

- Tamaño de las partículas del suelo



- Estructura del suelo
- Permeabilidad, con datos de la textura de los suelos y la unidad de suelo se determina el valor de K en base a la metodología de la FAO (2006) utilizando la clasificación de suelos del WRB (World Reference Base for Soil Resources).

### **Factor de longitud de la pendiente e inclinación de la pendiente (LS)**

Factor LS La pendiente se estima como:

$$S = \frac{Ha - Hb}{L}$$

Donde:

S= Pendiente media del terreno (%)

Ha= Altura de la parte alta del terreno (m)

Hb= Altura de la parte baja del terreno (m)

L= Longitud del terreno (m). De acuerdo con Wischmeier y Smith (1965), si conocemos la pendiente y la longitud de la pendiente, el factor LS se calcula como:

$$LS = (\lambda)m (0.0138 + 0.00965 s + 0.00138 s^2)$$

Donde:

LS = Factor de grado y longitud de la pendiente

$\lambda$  = Longitud de la pendiente (m)

S = Pendiente media del terreno (%)

m = Parámetro cuyo valor es de 0.5

### **Factor de cobertura del suelo (C)**

El factor C, representa la cantidad de suelo perdido de un terreno bajo condiciones específicas de uso y vegetación, en comparación con la pérdida de suelo que pudiera presentar el mismo terreno estando desprovisto de vegetación y bajo labranza continua. El valor de C es la unidad y será cada vez menor a medida que haya una cobertura vegetal sobre el terreno, de esta manera los valores de C fluctúan entre 0.01 y 1.0, estos valores correspondientes a un terreno totalmente protegido (0.01) y uno totalmente desprotegido (1.0) (Becerra, 2005).

### Factor de las prácticas de manejo (P)

Se puede definir al factor P como la relación que existe entre la pérdida de suelo con una práctica de conservación a la pérdida correspondiente en un terreno bajo cultivo en el sentido de la pendiente (Wischmeier y Smith, 1978). Su valor es adimensional y se encuentra entre 0 y 1 (Cuadro 2). Cuando P toma valores cercanos a cero esto indica que gracias a las practicas mecánicas de conservación el suelo no está siendo erosionado, en cambio sí tiende al valor de 1, se presenta la erosión máxima debido a que el tipo de prácticas que están siendo empleadas no reducen los efectos de la erosión en pendiente. El surcado en contorno, cultivo en fajas en contorno y las terrazas son las prácticas más convenientes para reducir el escurrimiento de agua, por ende, la erosión del suelo.

Cuadro 2. Valores de P, para el contorno y el cultivo en surcos (Wishmeier y Smith, 1978).

Pendiente del suelo (%)	Contorno		Surdado al contorno			Ancho (m)	Longitud máxima de pendiente (m)
	Valor de P	Longitud máxima de pendiente (m)	Valor de P				
			A	B	C		
1-2	0.60	122	0.30	0.45	0.60	40	243
3-5	0.50	91	0.25	0.38	0.50	30	182
6-8	0.50	61	0.25	0.38	0.50	40	122
9-12	0.60	36	0.30	0.45	0.60	24	74
13-16	0.70	24	0.35	0.52	0.70	24	49
17-20	0.80	18	0.40	0.60	0.80	18	36
20-25	0.90	15	0.45	0.68	0.90	15	30

Fuente: Blanco *et al.*, 2008

### **Erosión potencial y actual**

La erosión potencial refleja la susceptibilidad de una zona a erosionarse, y para estimarla es necesario realizar un estudio de diversos factores que condicionan los procesos de erosión, entre estos factores se encuentran la pendiente, las precipitaciones, la permeabilidad, etc. A partir del estudio y análisis de estas variables se pueden realizar una serie de cartografías básicas que, multiplicadas entre sí, nos permiten estimar el riesgo de erosión potencial ( $R \times K \times LS$ ) (Sanz *et al.*, 2008).

La erosión actual es la pérdida de suelo en un momento real, para estimarlo es preciso conocer factores protectores del suelo existentes en la actualidad, como la cobertura vegetal, usos del suelo y prácticas de conservación ( $C \times P$ ) (Sanz *et al.*, 2008).

### **Cobertura vegetal y cambio en el uso de suelo**

Como resultado de procesos ecológicos y evolutivos la cobertura vegetal cuenta con un arreglo espacial en el plano vertical y horizontal (Durán & Méndez 2010). Cuando el suelo pierde su cobertura natural se presentan una serie de cambios que repercuten de manera negativa en la fertilidad y la productividad natural del suelo, lo que sugiere que la cubierta vegetal es necesaria para la conservación de los suelos (Albalalejo *et al.*, 1998).

Las diferentes formas en que se emplea un terreno y su cubierta vegetal se conocen como usos del suelo (SEMARNAT, 2002). Los cambios del uso del suelo afectan a la cubierta vegetal de manera directa, puesto que, desaparecen ecosistemas completos y la diversidad que en ellos existe cada vez es menor, al aumentar exponencialmente la población, así como los requerimientos de la sociedad, es necesario cubrir la demanda planetaria, por lo que surge la necesidad de cambiar el uso del suelo que permita cubrir esas necesidades (SEMARNAT, 2011).

El aceleramiento del proceso de urbanización global, el crecimiento poblacional y el desarrollo tecnológico son algunos de los principales fenómenos que promueven cambios globales en el uso del suelo. La expansión de las ciudades requiere cada día más productos para abastecer (Molina, 2020).

La deforestación ocurre cuando la cubierta de un lugar es eliminada por completo, acelerando el proceso natural de la erosión hídrica de los suelos, como consecuencia partículas de este son arrastrados con facilidad por escurrimientos y ríos, las cuales son depositadas en zonas bajas o de poca pendiente (Alvarado y Mainato, 2021; Centro Nacional de prevención de desastres, 2020).

### **Sistemas ribereños**

El término zona riparia hace referencia a la región de transición e interacción entre los medios terrestres y acuáticos. Las zonas de transición entre el medio terrestre y los ecosistemas acuáticos poseen un “poder tampón”, es decir, tienen la capacidad de absorber y almacenar elementos (Granados *et al.*, 2006). Actúan como filtros, ya que retienen parte del nitrógeno y el fósforo transportados por la escorrentía. Una banda de vegetación de ribera de 16 m de largo retiene 50 % del nitrógeno y 95 % del fósforo (Granados-Sánchez *et al.*, 2006). Las comunidades vegetales que se desarrollan en las zonas ribereñas se conocen como vegetación ribereña y debido a su proximidad e interacción, el cauce y el régimen de caudales están adaptados a las inundaciones periódicas proveyendo resistencia a la energía de los caudales (Tabacchi *et al.*, 1996). Se trata de una vegetación con ciertas características de estructura y de funcionamiento que la diferencian de la vegetación presente en los bosques aledaños (Naiman *et al.*, 2005). Existe un fuerte consenso de que este tipo de vegetación constituye un componente esencial de los ecosistemas fluviales (Ceccon, 2003; Naiman *et al.*, 2005).

De acuerdo con Cruz & Guerra (2017) los ecosistemas ribereños generalmente son, ambientes típicamente angostos que en una cuenca hidrológica están ubicados inmediatamente a ambos lados de quebradas y ríos en zonas altas, pero en cuenca baja los ecosistemas ribereños incluyen zonas de bancos aluviales, humedales o terrazas de inundación que interactúan con el río en tiempos de crecidas o inundaciones influyendo en el reciclamiento y absorción de los nutrientes para el desarrollo de las plantas. Se caracteriza por una flora y fauna la cual está altamente influenciada por la intensidad luminosa, el contenido de agua y la granulometría del suelo (Granados-Sánchez *et al.*, 2006). De los insectos característicos de esta zona, muchas especies son aladas, que tienen la particularidad de resistir largo tiempo la inmersión, lo que es una adaptación a la supervivencia en un medio

frecuentemente inundado (Granados *et al.*, 2006). Los ambientes ribereños cuentan con una gran importancia ecológica y económica, pero desafortunadamente se cuenta con muy pocas investigaciones que estudien de manera integral las características que los componen.

### Estructura de los ambientes ribereños

De acuerdo con Dufor y Rodríguez-González (2019), la zona ribereña puede ser descrita en cuatro subzonas:

1. Zona inundada permanentemente o zona acuática: esta zona mantiene un flujo de agua constante. Posee una dinámica alta de sedimentos y en ella se encuentran plantas acuáticas tolerantes a la inundación permanente, tal como se muestra en la Figura 2.
2. Zona frecuentemente inundada (zona riparia): esta zona cuenta con una alta erosión de sedimento y deposición de este. Se encuentran plantas acuáticas riparias y emergentes tolerante a la frecuente inundación.
3. Zona regularmente inundada (zona riparia): deposición significativa de sedimento más fino y en ellas se establecen plantas tolerantes a dichas condiciones.
4. Zona ocasionalmente inundada o elevada: en esta zona no existe una significativa dinámica de sedimentos, por lo general se encuentra inundada en temporada de lluvias. Se asientan plantas ribereñas con tolerancia variable a la inundación.

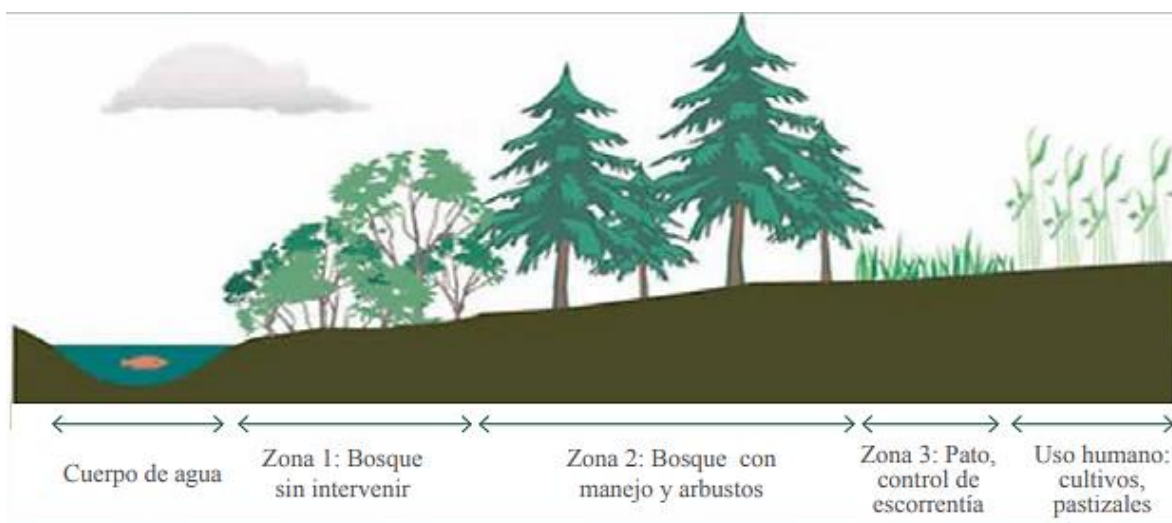


Figura 2. Franja ribereña de tres zonas

Fuente: (RAW, 2014)

En estas zonas de los sistemas ribereños, demarcadas de acuerdo con la geomorfología de estos, se producen impactos generalmente negativos que son generados por los diferentes usos de suelo e intensidad con la que son realizados disminuyendo así su calidad ecológica, la cual ha sido definida para esta investigación con base en afectaciones en la erosión, cobertura y vigor de la vegetación riparia. en consecuencia, evaluar la calidad ecológica se vuelve prioridad y ello requiere de parámetros de físicos, químicos o biológicos que, por su sensibilidad ante cambios ambientales y fácil medición, permitan ser utilizados como indicadores de modificación de la calidad ecológica.

### **Erosión en los sistemas ribereños**

La erosión de los bancos ribereños está determinada por el tamaño del canal, el caudal, la velocidad de la corriente y el régimen de transporte (Simon & Rinaldi 2000, Benda *et al.*, 2004, Couper, 2004); así como por características de los suelos tales como el tamaño de partículas, densidad, contenido y tipo de arcilla, contenido de materia orgánica y porosidad (Grissinger, 1982). Debido a la urbanización y la expansión de zonas habitacionales la deforestación ha incrementado alterando las características del suelo, hay compactación y pérdida de permeabilidad, generando que el agua no pueda infiltrarse o llegar a los causes naturales y fluya por la superficie del suelo, provocando erosión hídrica arrastrando con fuerza todo lo que se encuentra a su paso (Bermúdez, y Rafaelli, 2011).

Las corrientes son receptáculos naturales, tanto de la producción vegetal terrestre como de los subproductos de la erosión natural del suelo dentro de sus cuencas. Desafortunadamente, este último proceso se ha visto exacerbado por la actividad humana hasta el punto en el que muchos cuerpos de agua se han degradado gravemente debido a las aguas turbias y los sedimentos río arriba. Las operaciones silvícolas, esencialmente la construcción de caminos, pueden producir una excesiva erosión, pero si los bosques riparios se dejan intactos, éstos pueden ayudar a amortiguar tales problemas para las corrientes de agua. De esta manera, no solo se reduce el área de erosión continua en el arroyo, sino que los sedimentos transportados desde áreas distantes de erosión pueden infiltrarse antes de llegar al arroyo (Granados *et al.*, 2005).

## **Cuencas hidrográficas**

Las cuencas son territorios definidos naturalmente donde todos los procesos socioecológicos están íntimamente ligados entre sí, otorgan bienes y servicios ambientales invaluableles tales como el suministro de agua dulce, la regulación del caudal de los ríos, el mantenimiento de los regímenes hidrológicos naturales, la regulación de la erosión o la respuesta a eventos naturales extremos. Conforman un complejo mosaico de ecosistemas, donde se reconocen los vínculos entre los territorios de las zonas altas y bajas, cuyas externalidades, transportadas por los cursos de agua, crean una conexión física entre poblaciones alejadas unas de otras (Balvanera y Cotler, 2009; Cotler,2010; SEMARNAT,2013).

Las cuencas hidrográficas están delimitadas por un parteaguas (parte más alta de montañas) donde se concentran todos los escurrimientos (arroyos y/o ríos) que confluyen y desembocan en un punto común llamado también punto de salida de la cuenca. Por su drenaje o descarga de agua se clasifican en: a) cuenca exorreica: cuya corriente principal descargar al mar, b) cuenca endorreica: área de drenaje cuya corriente principal descarga a un lago o laguna; cuenca que puede tener uno o más troncales y que desemboca en un lago, c) cuenca arreica: no es una cuenca en su sentido hidrológico sino una región continental interior sin salida al mar y sin una red de drenaje definida, d) cuenca criptorreica: es una región continental de drenaje subterráneo carente de una red de drenaje definida es decir donde de repente desaparecen las corrientes (SEMARNAT, 2013; Lanza *et al.*, 2015).

Desde el punto de vista hidrológico, México está constituido por 37 cuencas hidrográficas. Éstas se han agrupado en 13 regiones hidrológico-administrativas; las cuencas a su vez se dividen en subcuencas y microcuencas. Los límites político-administrativos obedecen a otras consideraciones, de índole económico, social, cultural o político. Entonces lo que se recomienda es delimitar la cuenca, subcuenca o microcuenca e identificar qué unidades administrativas incluyen. De acuerdo con Sánchez *et al.* 2003, la delimitación de una cuenca se puede basar de acuerdo con el territorio que abarca, una cuenca es un territorio mayor a 50 mil hectáreas; las subcuencas cubren una superficie de cinco mil a 50 mil hectáreas; las microcuencas entre tres mil y cinco mil hectáreas, y cuando las condiciones orográficas lo

permiten, hay microcuencas menores a tres mil hectáreas como se puede observar en la Figura 3.

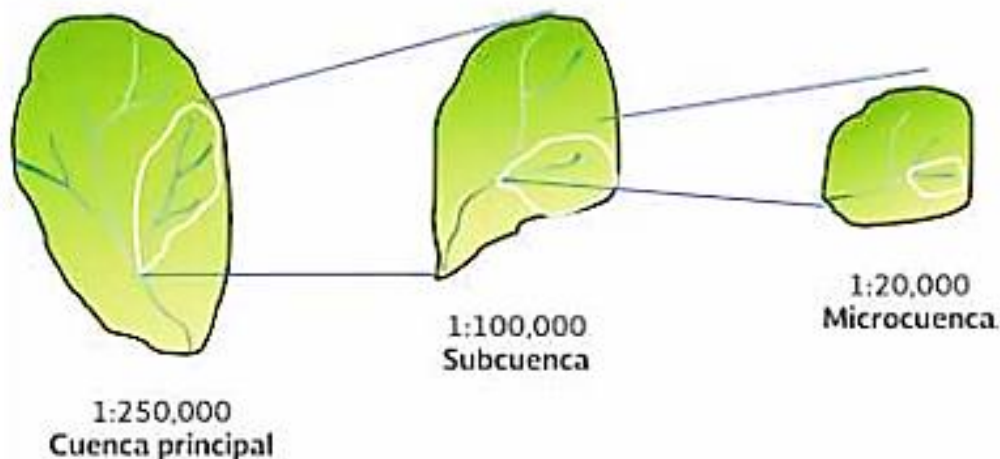


Figura 3. Estructura jerárquica de la cuenca hidrográfica.

Fuente: SEMARNAT, 2013.

## Indicadores de calidad ambiental

La calidad ambiental se define como el estado de las condiciones o características que permiten mantener los elementos y procesos biológicos y ecológicos en el ambiente (Perevochtchikova, 2013). De acuerdo con Rojas (2011), las características propias del medio, que, por acción de la naturaleza y el hombre, preservan sus condiciones en niveles óptimos para la vida armónica de todos los seres vivos, razón por lo cual, deben ser considerados prioridad de conservación para la humanidad.

Los indicadores permiten resumir una gran cantidad de datos para facilitar la comunicación de situaciones ambientales diferentes grupos sociales (MMA, 1996; Segnestam, 2002). Al momento de seleccionar los indicadores, los criterios juegan un papel muy importante cuando se plantea el diseño de un sistema de indicadores simples o la construcción de un indicador sintético, puesto que estos demandan información cuantitativa de múltiples componentes o indicadores que lo explican (Escobar, 2006). Se debe considerar un filtro para resumir una gran cantidad de datos en un número limitado de indicadores por tema. Por otro lado, también deben proporcionar al sistema de indicadores una mayor calidad estadística de información



y un método que delimite el límite del análisis. Para la evaluación de la calidad ecológica, se considerarán sólo algunos indicadores ambientales de estado de tipo general esto dadas las características de la zona, correspondientes a los componentes naturales de: vegetación y suelo:

- Cobertura vegetal: a mayor cobertura vegetal natural (es decir endémica) mayor es la calidad ecológica.
- Erosión natural y potencial: La calidad del suelo se define como la capacidad del suelo para funcionar dentro de los límites de un ecosistema natural o manejado, sostener la productividad de plantas y animales, mantener o mejorar la calidad del aire y del agua, y sostener la salud humana y el hábitat.

### **Sistemas de información geográficos (SIG)**

Un sistema de información geográfica (SIG) es un software específico que permite a los usuarios crear consultas interactivas, integrar, analizar y representar de una forma eficiente cualquier tipo de información geográfica referenciada asociada a un territorio, conectando mapas con bases de datos (Servicio Geológico Mexicano, 2017).

El uso de este tipo de sistemas agiliza la visualización de los datos obtenidos en un mapa, con el objetivo de reflejar y relacionar fenómenos geográficos de cualquier tipo, de igual modo da respuesta a las consultas interactivas de los usuarios, analizando y relacionando diferentes tipos de información con una sola localización geográfica. Los mapas pueden representar carreteras, sistemas de identificación de parcelas o bien la densidad de población (QGIS, 2020; Servicio Geológico Mexicano, 2017).

### **Teledetección y su fundamento**

Según INEGI (1985), la percepción remota ha sido definida como la adquisición de información total o parcial, acerca de los objetos y sus propiedades, sin que exista contacto físico entre estos y el aparato (sensor). Si bien la detección remota no es en sí una técnica nueva, aunque solo en los últimos años su capacidad y la diversificación de sus aplicaciones prácticas han sido aceleradas, alcanzando resultados sorprendentes que muchas veces escapan a nuestro conocimiento.

La teledetección o percepción remota aplicada a los recursos de la tierra, se hace posible en virtud de que cada objeto de la superficie terrestre, cada porción del terreno absorbe, refleja y emite energía electromagnética en diferentes longitudes de onda, la mayoría de las cuales no están en el campo visible, es decir, en aquella pequeña área que ocupa la porción visible del espectro donde el ojo humano es capaz de percibir. Como resultado de poder observar un objeto en diferentes porciones del espectromagnético, se obtiene lo que se denomina firma espectral y en esta forma, podremos diferenciar un objeto de otro y producir la información relacionada con el tamaño, la forma, la densidad y otras propiedades físicas. Algunos tipos de la energía captada por el sensor remoto se ven afectados por las condiciones atmosféricas, la topografía, las variaciones del ángulo solar y la hora en que se efectúa la captura de los datos. Sin embargo, existen modificaciones que pueden aplicarse a los datos obtenidos con el objeto de corregir las distorsiones causadas por los efectos antes mencionados (Martínez *et al.*, 2010).

### **Usos de la teledetección**

El uso de la teledetección espacial facilita un apoyo muy conveniente para reducir los costos y el tiempo invertido en obtener resultados. Se puede decir que esta técnica aporta las siguientes ventajas con respecto a la fotografía aérea (Chuvienco, 1990; Chuvienco, 2008):

- Cobertura global y periódica de la superficie terrestre: por las características orbitales de los satélites se pueden obtener imágenes repetitivas de la mayor parte de la Tierra, incluso de áreas inaccesibles por otros medios (zonas polares o desérticas).
- Visión panorámica: la altura orbital del satélite le permite detectar grandes espacios.
- Homogeneidad en la toma de datos.
- Recepción de información sobre regiones no visibles del espectro: los sensores óptico-electrónicos facilitan imágenes sobre áreas no accesibles con la fotografía convencional: infrarrojo medio y térmico, microondas

## Índices de vegetación

Los índices de vegetación son una combinación de bandas espectrales registradas por medio de un satélite de teledetección, obteniendo el producto de varios valores espectrales los cuales con son sumados, divididos o multiplicados para producir un valor que indique el vigor de la vegetación dentro de un píxel. Cuya finalidad es acrecentar la vegetación de acuerdo con su respuesta espectral, en base a la medición de la radiación que reflejan las plantas y reducir los detalles de otros elementos tales como el suelo, cuerpos de agua e inclusive la iluminación (Díaz, 2015; Hernández, 2017). La observación remota de las cubiertas vegetales puede apoyarse en el gran contraste cromático que presenta la vegetación vigorosa entre las distintas bandas del espectro, y singularmente entre la visible (alta absorción, baja reflectividad) y el NIR (baja absorción, alta reflectividad) como se aprecia en la Figura 4.

De ahí que podemos enunciar, como principio genérico, que cuanto mayor sea el contraste entre esas dos bandas, mayor será la cobertura vegetal y/o el vigor de la vegetación y más clara su discriminación frente a otros tipos de cobertura. Este comportamiento espectral teórico de las coberturas vegetales ha sido la base para obtener una serie de índices de vegetación, que se basan precisamente en el contraste entre las bandas R y NIR del espectro. Se construyen a partir de la combinación de esas dos bandas, cuando disponemos de una imagen multiespectral. Muy variados en su desarrollo, todos ellos tienden a presentar en forma más nítida las características de la vegetación, facilitando su aislamiento de otras coberturas y la detección de su estado vital (Bannari *et al.*, 1995; Curran, 1981; Myneni *et al.*, 1997; Sellers 1989; Chuvieco, 2008).

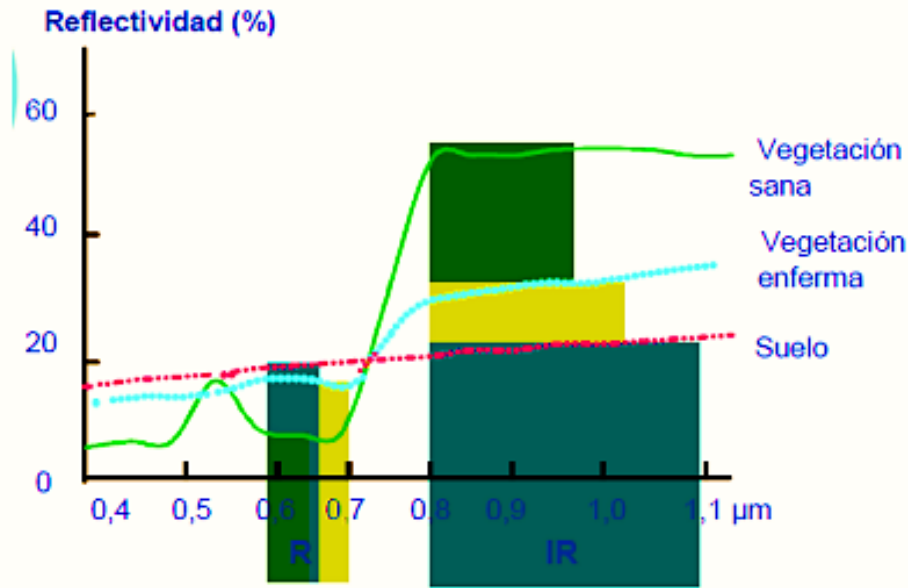


Figura 4. Comportamiento de los índices de vegetación sobre la reflectancia en diversas longitudes de onda.

Fuente: Universidad de Alcalá, 2001.

Los índices de vegetación se utilizan para análisis cualitativos o cuantitativos. Utilizados cualitativamente, pueden establecer rápidamente un estado relativo de la vegetación de la zona. Influenciado directamente por varios factores los cuales afectan directamente a la producción de biomasa, se pueden utilizar indicadores para determinar el impacto estos factores se ubican en un área o momento. Por lo tanto, se pueden utilizar para determinar el efecto sobre la biomasa tales como; sequía, inundación, fuego, devastación, granizo, pestilencia o deficiencia de nutrientes (Towers, 2002).

### Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI)

El índice de vegetación más conocido y usado es el Índice Normalizado Diferencial de Vegetación (NDVI). Este índice fue introducido con el objetivo de separar la vegetación del brillo que produce el suelo (Rouse *et al.*, 1974). Probablemente es el índice más utilizado para evaluar el estado de la vegetación (Hernández, 2015). Se basa en el peculiar comportamiento radiométrico de la vegetación, relacionado con la actividad fotosintética y la estructura foliar de las plantas, permitiendo así determinar la vigorosidad de la planta.

La vegetación verde vigorosa absorbe el componente rojo visible del espectro por la clorofila, reflejando así muy poca energía solar con respecto a otras cubiertas posibles, por otro lado,

la vegetación verde vigorosa tiene una gran reflectancia de la energía solar para el componente infrarrojo cercano del espectro, debido a las paredes de las células llenas de agua de las hojas. La vegetación senescente refleja más energía en el componente rojo visible y menos en el infrarrojo cercano, invirtiendo así la respuesta de vegetación verde vigorosa. El cálculo del NDVI se expresa como una operación de bandas, el infrarrojo cercano y el rojo.

La ecuación indica la relación inversa existente entre el valor de reflectancia de estas bandas. Los valores de este índice fluctúan entre -1 y 1 permitiendo establecer umbrales y comparación entre imágenes (Maruri, 2002; Díaz, 2015). De acuerdo con Muñoz (2013), los valores muy bajos del orden 0.1 corresponden zonas rocosas, arenosas o nevadas, en cambio los valores de 0.2 a 0.3 corresponden a áreas pobres con arbustos o pasturas naturales. El índice tiende a reducir varias fuentes de ruido en la imagen causados por variaciones en la iluminación solar, sombras de las nubes y la topografía (Hernández, 2015).

Las hojas verdes absorben la radiación solar entrante en la región espectral de radiación fotosintéticamente activa, que proporciona la energía necesaria para alimentar la fotosíntesis (Jensen 2007). Específicamente, las hojas verdes absorben la radiación solar incidente con mucha fuerza en las regiones espectrales azul y roja y menos intensamente en las regiones espectrales verdes. La absorción óptima de luz ocurre en diferentes longitudes de onda para distintos pigmentos tal como se muestra en la Figura 5. El fundamento del análisis parte del estudio de las dos bandas multiespectrales en las que la vegetación interacciona de una manera relevante dentro del espectro electromagnético. Por un lado, la parte del espectro visible en el que la vegetación muestra una elevada absorción en la sección del rojo debido a la presencia de clorofila generando imágenes multiespectrales oscuras. Por otro lado, la parte del infrarrojo cercano en el que la vegetación se comporta de manera opuesta generando elevados niveles de reflexión obteniéndose imágenes multiespectrales brillantes.

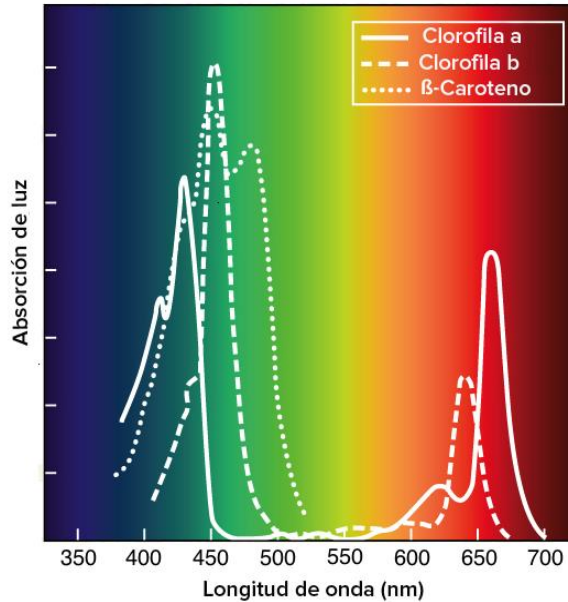


Figura 5. Espectro de absorción de los pigmentos.

*Fuente:* Recuperado de: <https://es.khanacademy.org/science/biology/photosynthesis-in-plants/the-light-dependent-reactions-of-photosynthesis/a/light-and-photosynthetic-pigments>

## Planteamiento del problema

¿Será posible emitir un diagnóstico de la calidad ambiental de sistemas ribereños dentro de la subregión del Alto Balsas? Mediante la utilización del Índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI), la Ecuación Universal Revisada (RUSLE) y con la evaluación de la cobertura natural

## Objetivos

### Objetivo General

Estimar la erosión hídrica, cobertura natural y NDVI en la Subregión del Alto Balsas mediante Sistemas de Información Geográfica para establecerlos como indicadores biofísicos de calidad ecológica de los sistemas ribereños.

### Objetivos específicos

- Estimar la Erosión hídrica por medio de La Ecuación Universal de Erosión Revisada (RUSLE).
- Evaluar el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI)

- Proponer una clasificación de calidad ambiental para la subregión del Alto Balsas.
- Establecer la calidad ambiental en la Subregión del Alto Balsas.

## **Hipótesis**

Los cambios en la cobertura vegetal, pendiente, altitud, precipitación y usos de suelo impactan directamente la erosión hídrica del suelo que representa una reducción de calidad ecológica, por lo tanto, se espera que los indicadores (erosión hídrica del suelo, NDVI y cobertura natural) sean lo suficientemente buenos para clasificar la calidad AMBIENTAL en la Subregión del Alto Balsas.

# Materiales y Métodos

## Ubicación del Área de estudio

### Subregión del Alto Balsas

La subregión del Alto Balsas se ubica dentro de la cuenca del Balsas, cuenta con una distribución de 50 464 km<sup>2</sup>, para el presente estudio, se trabajó con seis sitios (San Nicolás Nealtican, Xalizintla, Buenavista, Vallecito y Cascada la ranita) que se localizan entre los municipios Amecameca, San Nicolas de los Ranchos y Tianguismanalco cubriendo una superficie total de 45,893.23 km<sup>2</sup> (Figura 6).

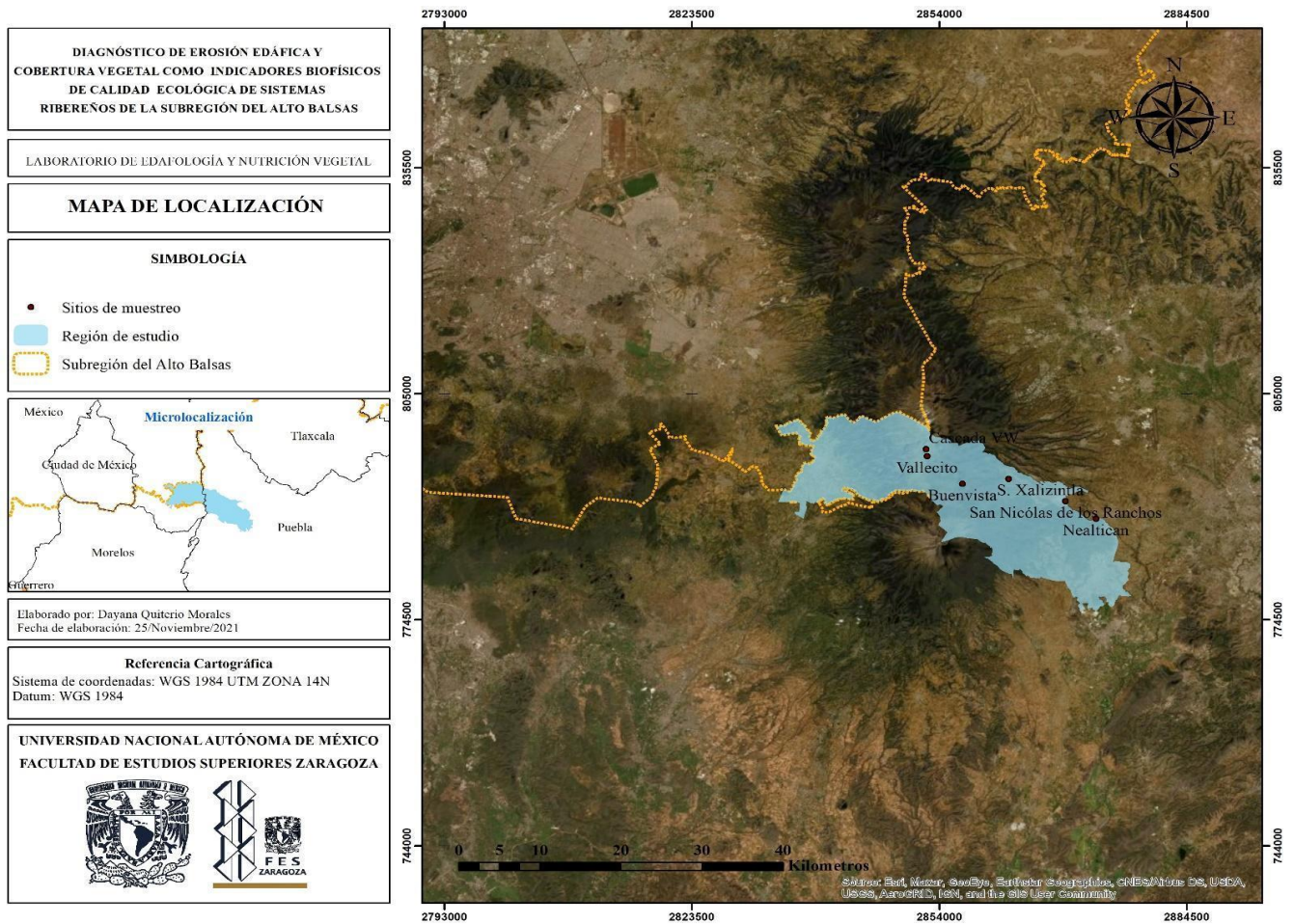


Figura 6. Localización del área de estudio.

Fuente: Elaboración propia



## **Descripción del área de estudio**

### **Hidrología subterránea**

La situación de algunos acuíferos localizados dentro de la región, especialmente aquellos en donde se han asentado y desarrollado ciudades importantes, se puede observar que la escasez de agua subterránea de estos acuíferos es consecuencia del rápido crecimiento de la población, generando una gran demanda de agua. Existen 5 acuíferos en la cuenca sometidos a sobreexplotación, 4 en la subregión Alto Balsas: Tepalcingo-Axochiapan del estado de Morelos y Valle de Tecamachalco, Atlixco-Izúcar de Matamoros y Libres Oriental del estado de Puebla, y 1 en la subregión Medio Balsas: el acuífero Ciudad Hidalgo-Tuxpan del estado de Michoacán de Ocampo. La importancia del agua subterránea en la cuenca del Balsas va de acuerdo con el volumen total concesionado para usos consuntivos, de origen subterráneo el 56% es para uso agrícola, el 32% es para uso público-urbano y el 12% para el resto de los usos consuntivos.

### **Aguas subterráneas**

De acuerdo con la publicación de la disponibilidad media anual de agua subterránea (DOF 17 de septiembre de 2020), para la gestión de las aguas subterráneas se tienen 45 acuíferos, de los cuales 7 se encuentran sin disponibilidad. Actualmente, de acuerdo con dicha publicación, se dispone de 713.94 hm<sup>3</sup> susceptibles de ser concesionados para los diversos usos, mientras que en los siete acuíferos sobreexplotados se tiene un déficit de 69.3723 hm<sup>3</sup> anuales.

### **Precipitación**

En la región hidrológica número 18 Balsas, la precipitación media anual que se presenta es del orden de 991 milímetros, es registrada por 587 estaciones meteorológicas con que cuenta la CONAGUA en la región y se realizó tomando en cuenta los datos obtenidos de las precipitaciones que existen en cada una de las subregiones y para la región en general.

### **Suelo**

Atendiendo al grado de desarrollo del perfil, la naturaleza de la evolución y el tipo de humus, existen básicamente tres tipos de suelos en la región hidrológica número 18 Balsas:

- Los no evolucionados: son suelos muy brutos, próximos a la roca madre.

- Los poco evolucionados: dependen en gran medida de la naturaleza de la roca madre.
- Los muy evolucionados: suelos que tienen perfectamente formados los tres horizontes.

Las condiciones del relieve en la región hidrológica 18 Balsas, al igual que los tipos de suelo, limitan el uso de este, cuando son utilizados en zonas no adecuadas para uso agrícola, propician alteraciones que provocan erosión en grandes zonas, sobre todo en la zona mixteca.

### **Vegetación**

La distribución de la vegetación en la región hidrológica número 18 Balsas, es de gran diversidad y constituye una de las más ricas reservas de bosques y selvas tropicales subhúmedas de México. Su alta diversidad, su riqueza de especies, su enorme biomasa y su complejidad estructural, se encuentran estrechamente ligadas a la heterogeneidad de las condiciones que ofrecen los frágiles suelos y los microclimas de la cuenca.

### **Disponibilidad de agua**

En la región hidrológica número 18 Balsas, se utiliza un total de 47 478.15 millones de metros cúbicos anuales de agua, de los cuales 45 662.86 millones de metros cúbicos anuales corresponden a agua superficial, que equivale al 97% del total y 1 815.28 millones de metros cúbicos anuales se extraen de los acuíferos (agua subterránea), representando el 3.0% restante.

## **Trabajo de gabinete**

### **Recopilación y adecuación de información cartográfica**

En el presente estudio se analizaron 3 indicadores (la erosión hídrica, NDVI y cobertura natural) en la Subregión del Alto Balsas. La metodología implementada consistió en aplicar un modelo geoespacial cuantitativo desarrollado con un Sistema de Información Geográfica, apoyado en la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo Modificada (RUSLE). Se aplicó el modelo RUSLE debido a la ventaja que tiene la integración con un SIG a partir de fuentes de información disponibles. Debido a la escasez de datos para evaluar rigurosamente cada uno de los coeficientes considerados en la RUSLE, se emplearon métodos alternos recomendados por Figueroa *et al.*, 1991 los cuales se describen a lo largo de la metodología.

Se recopiló información cartográfica disponible, la zona de estudio se encuentra entre las cartas con clave E14B41, E14B42 y E14B52 las cuales tuvieron que ser unidas para delimitar la zona de estudio, así mismo se utilizaron las cartas temáticas que en el Cuadro 3 se describen.

*Cuadro 3. Datos y fuentes utilizadas.*

<b>Variables</b>	<b>Fuentes</b>	<b>Año de publicación</b>
<b>Región hidrológica administrativa (IV Balsas)</b>	Geoportal Conabio	2009
<b>División política municipal 1: 250000</b>	Geoportal Conabio	2020
<b>Datos de precipitación</b>	CONAGUA	-
<b>Edafología</b>	Geoportal Conabio	2001
<b>Uso del suelo y vegetación, escala 1:250000, serie VI (continuo nacional)</b>	Geoportal Conabio	2017

**Fuente:** Elaboración propia.

Se trabajó con una superficie total de 458.93 km<sup>2</sup> correspondiente a la región de estudio, se excluyó la superficie de las corrientes de agua (10.19 km<sup>2</sup>), para su obtención se emplearon las regiones hidrológicas (RH) RH18 y RH26. Al considerar que los arroyos, ríos y zonas de ribera próximas a los cauces de esos recursos hídricos (10 m paralelos al río) son zonas federales reconocidas legalmente como “bienes nacionales” (Artículo 113 de la Ley Aguas Nacionales). Después se seleccionaron seis sitios de estudio distribuidos en la subcuenca del Río Nexapa de la Cuenca alta del Río Balsas entre 2260 m y 4010 m en la Reserva de la Biosfera los Volcanes.

### **Selección de sitios de estudio**

Para la selección de los sitios se utilizó la carta topográfica E14B42 Huejotzingo, Puebla, tomando en cuenta la representatividad paisajística común, con parecido geomorfológico y edáfica, en los que la estructura y composición de la vegetación es similar y equiparable con otros sitios de las subcuencas del declive oriental de la RBLV (Cruz *et al.*, 2020).

## Determinación de la erosión potencial y actual a través de la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo (RUSLE).

### Factor R

El factor R representa, para un área específica, la energía potencial de la lluvia y su escurrimiento asociado; es el factor de tipo climático que indica el potencial erosivo de las precipitaciones, Para el cálculo de este factor se utilizó la formula rediseñada por Cortés (1991) como citó Becerra en 1997, a partir de las Precipitaciones Media Anual (PMA) se aplicó la ecuación correspondiente a la región 8 de erosividad asociada con las 14 diferentes regiones de la república mexicana (Figura 7).

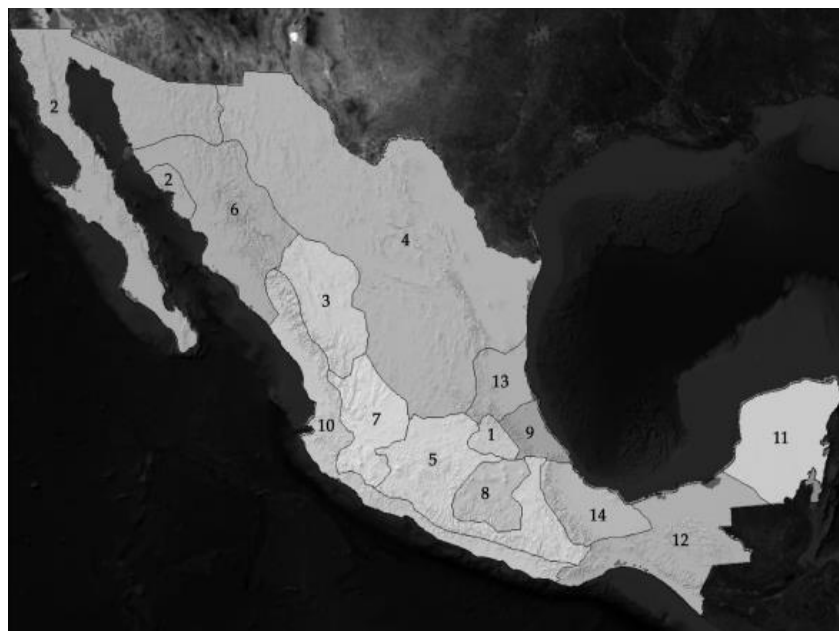


Figura 7. Regionalización nacional de factor R.

Fuente: Becerra, 1997

Cuadro 4. Ecuaciones regionalizadas para la república mexicana.

REGIÓN	ECUACIÓN	r <sup>2</sup>
1	$1.2078 * P + 0.002276 * P^2$	0.92
2	$3.4555 * P + 0.006470 * P^2$	0.93
3	$3.6752 * P - 0.001720 * P^2$	0.94
4	$2.8959 * P + 0.002983 * P^2$	0.92
e5	$3.4880 * P - 0.000188 * P^2$	0.94
6	$6.6847 * P + 0.001680 * P^2$	0.90
7	$(-0.0334) * P + 0.0061 * P^2$	0.98

REGIÓN	ECUACIÓN	r <sup>2</sup>
8	$1.9967*P + 0.003270*P^2$	0.98
9	$7.0458*P - 0.002096*P^2$	0.97
10	$6.8938*P + 0.000442*P^2$	0.95
11	$3.7745*P + 0.004540*P^2$	0.98
12	$2.4619*P + 0.006067*P^2$	0.96
13	$10.7427*P - 0.001008*P^2$	0.97
14	$1.5005*P + 0.002640*P^2$	0.95

Fuente: Becerra, 1997.

### Factor K

El factor K indica el grado de susceptibilidad del suelo a la erosión. Para el presente estudio, debido a que no se cuenta con la información detallada y completa para el empleo de la metodología tradicional propuesta por Wischmeir y Smith, se aplicó la metodología de la FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación). Para la determinación de este factor fue utilizada la información edafológica más reciente (2001) de Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO), Escala: 1:250000 y 1:1000000. Las características que se obtuvieron del Geoportal son tipo de suelo y textura. De acuerdo con la clasificación del tipo de suelo y de su textura superficial, se le asigna el factor K, el cual está representado en el siguiente Cuadro 5:

Cuadro 5. Tipo de suelo y textura superficial

Orden	Textura			Orden	Textura		
	G	M	F		G	M	F
A	0.026	0.040	0.013	lo	0.026	0.040	0.013
af	0.013	0.020	0.007	Ip	0.053	0.079	0.026
ag	0.026	0.030	0.013	Iv	0.053	0.079	0.026
Ab	0.013	0.020	0.007	M(a,g)	0.26	0.040	0.013
Ao	0.026	0.040	0.013	N(d,e,b)	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	Pi	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,I)	0.013	0.020	0.007
bv	0.026	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)	0.013	0.020	0.007	S	0.053	0.079	0.026
g	0.26	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
ge	0.026	0.040	0.013	I	0.026	0.040	0.013
Gh	0.013	0.020	0.007	Ih	0.013	0.020	0.007
gm	0.013	0.020	0.007	Im	0.013	0.020	0.007
gp	0.053	0.079	0.026	Io	0.026	0.040	0.013
gx	0.053	0.079	0.026	Iv	0.026	0.040	0.013
gv	0.053	0.079	0.026	U	0.013	0.020	0.007
h (c,g,h,i)	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	W	0.053	0.079	0.026
jp	0.053	0.079	0.026	Wx	0.053	0.079	0.026
k (h,k,i)	0.026	0.040	0.013	X (b,k,l,y)	0.053	0.079	0.026
l	0.026	0.040	0.013	Y (h,k,l,y,t)	0.053	0.079	0.026
l	0.053	0.79	0.026	Z	0.026	0.040	0.013
lc	0.026	0.040	0.013	Zg	0.026	0.040	0.013
lf	0.013	0.020	0.007	Zm	0.013	0.020	0.007
lg	0.026	0.040	0.013	Zc	0.026	0.040	0.013
lk	0.026	0.040	0.013	Zt	0.053	0.079	0.026

Fuente: (FAO, 1980)

### Factor L\*S (pendiente)

El efecto de la topografía sobre la erosión está representado por los factores longitud (L) y grado de pendiente (S). La longitud se define como la distancia desde el punto de origen de un escurrimiento hasta el punto donde decrece la pendiente, al grado de que ocurre una sedimentación o bien hasta el punto donde el escurrimiento, una vez concentrado, encuentra un canal de salida bien definido. El factor de grado de pendiente (S) refleja la influencia del

ángulo de esta en la erosión. Para calcular los factores se usó un MDE conocido como Modelo Digital de Elevación, se descargó del sitio web de INEGI, 2013 en formato TIFF (Tagged Image File Format) con una resolución de 15 m × 15 m. Las tres claves de las cartas descargadas que cubren el ámbito de la subregión son (E14B41, E14B42, E14B52).

La información obtenida se importó al software libre, ArcGIS10.8 uniendo así las tres escenas en un mosaico, para luego extraer solo el área de la subregión del Alto Balsas, posteriormente se realizó la estimación de los factores. En el cálculo del factor L, se aplicó la herramienta *fill*, del software Arcgis para evitar vacíos en el ráster del MDE. Con el ráster resultante se crea el ráster de pendiente “SLOPE”. En ArcMap con la herramienta *Spatial Analyst Tools>Map algebra>Raster calculator*, colocar la fórmula:

$$(\text{Sin} (“\text{Slope}” * 0.01745) / 0.0896) / (3 * \text{power} (\text{Sin} (“\text{Slope}” * 0.01745, 0.8) + 0.56))$$

Una vez que son calculados cada uno, con las herramientas: *Spatial Analyst Tools>Map algebra>Raster calculator*, se coloca la siguiente fórmula:

$$(\text{Factor}_L * \text{Factor}_S)$$

### Factor C

El factor C representa la cantidad de suelo perdido de un terreno bajo condiciones específicas de uso y vegetación. El coeficiente asociado con este factor será asignado de acuerdo con Renard, 1997; Montes, 2002; Becerra 1997, entre otras y asociado con la información más reciente de CONABIO de uso de suelo y vegetación, correspondiente a la Carta de Uso del Suelo y Vegetación (2017) 1:250,000 Serie VI. Cada uno de sus conjuntos de datos digitales contiene información de la cubierta vegetal y uso agrícola. En el Cuadro 6 se presenta la relación del valor C para cada tipo de vegetación y/o uso de suelo.

Cuadro 6. Factor para vegetación y/o uso de suelo.

VEGETACIÓN Y/O USO DE SUELO	C
BOSQUE DE AYARIN	0.01
BOSQUE DE CEDRO	0.01
BOSQUE DE ENCINO	0.10
BOSQUE DE ENCINO-PINO	0.01
BOSQUE DE GALERÍA	0.10

<b>VEGETACIÓN Y/O USO DE SUELO</b>	<b>C</b>
BOSQUE DE OYAMEL	0.01
BOSQUE DE PINO	0.01
BOSQUE DE PINO-ENCINO	0.01
BOSQUE DE TÁSCATE	0.01
BOSQUE DE MESÓFILO DE MONTAÑA	0.01
CHAPARRAL	0.65
MANGLAR	0.10
MATORRAL CRASICAULE	0.65
MATORRAL DE CONÍFERAS	0.20
MATORRAL DESÉRTICO MICRÓFILO	0.25
MATORRAL DESÉRTICO ROSETÓFILO	0.25
MATORRAL ESPINOSO TAMAULIPECO	0.45
MATORRAL ROSETÓFILO COSTERO	0.25
MATORRAL SARCOCAULE	0.25
MATORRAL SARCO-CRASICAULE	0.25
MATORRAL SACRO-CRASICAULE DE NEBLINA	0.25
MATORRAL SUBMONTANO	0.35
MATORRAL SUBTROPICAL	0.12
MEZQUITAL	0.65
PALMAR INDUCIDO	0.75
PALMAR NATURAL	0.75
PASTIZAL GIPSÓFILO	0.25
PASTIZAL HALÓFILO	0.25
PASTIZAL INDUCIDO	0.02
POPAL	0.07
PRADERA DE ALTA MONTAÑA	0.85
SABANA	0.05
SABANOIDE	0.54
SELVA ALTA PERENNIFOLIA	0.45
SELVA ALTA SUBPERENNIFOLIA	0.45
SELVA BAJA CADUCIFOLIA	0.50
SELVA BAJA ESPINOSA CADUCIFOLIA	0.50
SELVA BAJA ESPINOSA SUBPERENNIFOLIA	0.50
SELVA MEDIANA CADUCIFOLIA	0.45
SELVA MEDIANA PERENNIFOLIA	0.45
SELVA MEDIANA SUBCADUCIFOLIA	0.45
TULAR	0.10



<b>VEGETACIÓN Y/O USO DE SUELO</b>	<b>C</b>
VEGETACIÓN DE DESIERTOS ARENOSOS	0.85
VEGETACIÓN DE DUNAS COSTERAS	0.85
VEGETACIÓN DE GALERÍA	0.85
VEGETACIÓN HALÓFILA	0.85
ZONA URBANA	0.005
CUERPOS DE AGUA	1.0
AGRICULTURA EN RIEGO	0.55
AGRICULTURA DE TEMPORAL	0.75
AGRICULTURA D HUMEDAD	0.25

**Fuente:** (Renard, 1997; Montes, 2002 y Becerra 1997, como se citó en Montes *et al.*, 2011).

### **Factor P**

Este último factor reúne la influencia que tienen las prácticas de conservación de suelo sobre las tasas de erosión. De acuerdo con la revisión bibliográfica no se detectó algún área significativa en donde se lleve a cabo algún tipo de práctica de conservación, por lo que el factor P se consideró igual a 1, pues no se desarrollan practicas mecánicas.

### **Determinación de la erosión potencial y actual de pérdida de suelo**

Para la obtención de la erosión potencial se multiplicaron los factores  $R$ ,  $K$ ,  $LS$ , sin incluir el factor  $C$ . El estado actual de la erosión se obtiene al considerar todos los factores calculados anteriormente, por lo tanto, se multiplicaron los planos de  $R$ ;  $K$   $LS$   $K$  y  $C$  en formato ráster. Al considerar la calidad ambiental actual dentro de la zona de estudio, la erosión actual es el que se tomará en cuenta para la suma de los indicadores.

### **Indicador de cobertura natural**

La cobertura natural de la zona hace referencia a la extensión en hectáreas de vegetación natural, el porcentaje de la extensión total de la zona de estudio que presenta vegetación natural. A mayor cobertura vegetal natural, mayor es la calidad ambiental. Aprovechando los valores del factor  $C$  dentro de la Ecuación Universal de Pérdida de suelo se procede a dar valores de calidad ambiental a la vegetación natural de acuerdo con la metodología establecida en el Programa de ordenamiento ecológico local del municipio de Cabo Corrientes, Jalisco, 2018 (Cuadro 7).

Cuadro 7. Calidad ambiental para indicador de cobertura natural.

Rango	Calidad ambiental	Valor
>95%	Muy alta	5
85-95%	Alta	4
75-85%	Media	3
65-75%	Baja	2
<65%	Muy baja	1

Fuente:(Estado de Jalisco, 2018).

De esta manera desde el ArcMap 10.8 ya se puede agregar el valor para cada uno de la vegetación correspondiente generando *shape* con información correspondiente.

### Estimación del Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI)

Las imágenes utilizadas se adquirieron directa y gratuitamente del servidor de la USGS (United States Geological Survey), el cual permite seleccionar la región de interés y visualizar las imágenes disponibles para descargar. Las imágenes seleccionadas son de plataforma Landat 8, por lo que se utilizaron las bandas 4 y 5 para calcular el NDVI, con fecha de 02/enero/2021, lo más libre de nubosidad posible. Se le aplicaron las correcciones de reflectancia, atmosféricas y topográficas en QGis.

La ecuación 1. Muestra la forma de calcular el valor de NDVI para cada píxel.

$$NDVI = \frac{\text{Infrarrojo cercano} - \text{Rojo}}{\text{Infrarrojo cercano} + \text{Rojo}}$$

$$NDVI_{L8} = \frac{\text{Banda5} - \text{Banda4}}{\text{Banda5} + \text{Banda4}}$$

### Evaluación de la calidad ambiental

Para poder llevar a cabo la evaluación de la Calidad Ecológica se proponen diferentes clasificaciones para los indicadores ambientales (Cobertura natural y erosión), metodología aplicada en el Programa de ordenamiento ecológico local del municipio de Cabo Corrientes, Jalisco, 2018. La relación entre estos determinará la Calidad Ecológica, la cual se define como el estado de las condiciones o características que permitan mantener los elementos y procesos biológicos y ecológicos en la zona de estudio:

✚ Para la cobertura vegetal natural, se propone la escala mostrada anteriormente en el Cuadro 7.

✚ Para la erosión se propone la escala en el Cuadro 8.

*Cuadro 8. Rangos para la clasificación del indicador erosión.*

Rango	Calidad ambiental	Valor
0-10 Mg ha <sup>-1</sup> año <sup>-1</sup>	Muy alta	5
11-25 Mg ha <sup>-1</sup> año <sup>-1</sup>	Alta	4
26-50 Mg ha <sup>-1</sup> año <sup>-1</sup>	Media	3
51-100 Mg ha <sup>-1</sup> año <sup>-1</sup>	Baja	2
> 100 Mg ha <sup>-1</sup> año <sup>-1</sup>	Muy baja	1

**Fuente:**(Estado de Jalisco, 2018).

✚ Para el NDVI se propone la escala en el Cuadro 9:

*Cuadro 9. Rangos para la clasificación del NDVI.*

Rango	Calidad ambiental	Valor
>0.81	Muy alta	5
0.61-0.80	Alta	4
0.41-0.60	Media	3
0.21-0.40	Baja	2
<0.20	Muy baja	1

(Modificado y adaptado de Estado de Jalisco, 2018).

Una vez obtenidos los valores de los indicadores establecidos, se procede a realizar una sumatoria dentro de ArcMap con la finalidad de determinar la Calidad Ecológica final (Cuadro 10).

*Cuadro 10. Calidad ambiental final.*

Rango del puntaje	Calidad ambiental
13-15	Muy alta
10-12	Alta
7-9	Media
4-6	Baja
1-3	Muy baja

**Fuente:** (Estado de Jalisco, 2018).

Para asignar la Calidad Ecológica por lo que se establece un rango de valores para cada

clase de calidad, estableciendo así cinco niveles:

**-Muy alta.** Mantiene todos los elementos y procesos naturales, con una mínima perturbación humana que no se manifiesta en la información utilizada. Presenta su cobertura natural en un muy buen estado de conservación, con poca o nada de vegetación secundaria, y no existen procesos de erosión erosivos.

**-Alta.** Mantiene sus elementos y procesos naturales en buen estado; sin embargo, tiene algunos problemas leves que reducen ligeramente la calidad, como la presencia de vegetación secundaria y/o escurrimientos con algunas evidencias de deterioro, pocos significativos; no existen problemas de erosión severa.

**-Media.** Logra compensar la presión ejercida por el hombre. Existen cambios importantes dentro de la estructura y algunos procesos naturales se ven afectados; sin embargo, en muchos casos son posibles los procesos de reversibilidad y con acciones de mejoramiento se puede incrementar el nivel de calidad. Algunas zonas con esta categoría pueden presentar erosión severa.

**-Baja.** Los procesos de deterioro son agudos y se requiere de fuertes insumos (humanos, técnico y financieros). Para su rehabilitación. Presentan alteraciones estructurales importantes y es posible la desaparición absoluta de algún elemento (suelo, biota o agua). Al mismo tiempo se presentan alteraciones en los ciclos regulares del sistema, lo que provoca reacciones negativas en cadena sobre otros elementos dentro o fuera del área. Las áreas con esta categoría pueden presentar erosión severa y deterioro de escurrimientos y ríos por contaminación y asolvamiento de cauces.

**-Muy baja.** Se presentan alteraciones de sus elementos naturales o algunos de estos han sido eliminados en su totalidad. Los procesos biogeoquímicos han sido gravemente modificados y ocasionan reacciones negativas en cadena que tiene repercusiones dentro y fuera de sus límites. En la mayoría de las veces, la condición del área es irreversible, y para restaurarla se requiere insumos muy costosos, además de que se reducen las posibilidades inmediatas de aprovechamiento. Estas zonas presentan un deterioro significativo en todos sus recursos naturales.

### **Trabajo de campo**

Debido a las limitaciones derivadas del confinamiento causado por las sucesivas olas de contagio del COVID-19 en el periodo 2019-2021 se ejecutó una salida a campo (noviembre-

diciembre 2021) verificando los datos obtenidos en SIG, estudios efectuados entre los años 2016 y 2020 complementaron la información de la investigación, las cuales se enlistan en el Cuadro 11.

Cuadro 11. Fuentes de información.

<b>Autor</b>	<b>Referencia</b>	<b>Título</b>	<b>Tipo</b>
Sandoval Aparicio Juan Carlos	(Sandoval, 2016)	Caracterización y Clasificación de suelos Sistemas Ribereños del Parque Nacional Izta-Popo	Tesis de licenciatura
Mena Bailon Beatriz Carolina	(Mena, 2018)	Infiltración de agua en suelos ribereños con distintos tipos de vegetación sobre un sistema fluvial en el Parque Nacional Izta-Popo y zonas de influencia.	Tesis de licenciatura
Santiago Aguilar Inyasid	(Santiago, 2018)	Contenidos de carbono orgánico y su compartimiento en sistemas ribereños adyacentes a cuatro biotopos del Parque Nacional Izta-Popo y zonas de influencia.	Tesis de licenciatura
Santiago Aguilar Inyasid	(Santiago, 2023)	Calidad ambiental de sistemas ribereños del Parque Nacional Iztaccíhuatl- Popocatepetl y su zona de influencia	Tesis de maestría
Hernández Salgado Guillermo Othokani	(Hernández, 2020)	Abundancia de bacterias de los géneros Azospirillum y Azotobacter en suelos ribereños y su relación con sus contenidos de nitrógeno total en un gradiente altitudinal de la Reserva de la Biósfera los Volcanes	Tesis de licenciatura
Monfil Hernández Luis Fernando	(Monfil, 2020)	Calidad ecológica de dos sistemas ribereños de montaña y su relación con el uso de suelo.	Tesis de licenciatura

**Fuente:** Elaboración propia.

## Resultados

En el presente apartado se presentan y desglosan los resultados obtenidos para cada uno de los indicadores, mostrando así los productos (mapas) derivados de los procesos llevados a cabo dentro del Sistema de Información geográfica para posteriormente llevar a cabo la discusión y conclusiones sobre la calidad ambiental.

### Descripción de sitios de estudio

En el Cuadro 12 se observa la diferencia altitudinal que existe entre los sitios de estudio (2260-4010 m s.n.m), está estrechamente relacionada con diferentes aspectos como el uso y tipo de suelo, la vegetación dominante, tiempo de desarrollo, topografía y el clima (Montero, 2002).

Cuadro 12. Sitios de estudio.

Sitio	Altitud (m s.n.m)	Coordenadas UTM	
		X	Y
Nealtican	2260	558446	2106140
San Nicolás	2419	554726	2108585
Xalizintla	2680	547778	2111758
Buenavista	3315	542037	2111204
Vallecito	3840	537750	2115023
Cascada Volkswagen	4010	537650	2115807

Fuente: Elaboración propia.

Con información obtenida de las referencias citadas en el Cuadro 11 y con las salidas a campo realizadas entre noviembre y diciembre del 2021, se obtuvo la información necesaria para realizar la descripción ecológica de los sitios los cuales se presentan a continuación:

### Nealtican

Nealtican se ubicó a 2260 m s.n.m, es el sitio más bajo altitudinalmente. Tiene una pendiente del 9% y una temperatura ambiental de 19°C. Se encuentra en una zona de fácil acceso, por lo que el entorno del cauce del río se utiliza para actividades agrícolas, introducción de especies y construcción de viviendas o asentamientos urbanos. La vegetación presente en el sitio de estudio es secundaria con presencia de pinos (*Pinus teocote*, y *P. pseudostrobus*), al igual que individuos de *Buddleja*, *Ricinus communis* (higuerilla), *Prunus serótina*, *Wigandia urens* (Monfil, 2020). Existe un abundante cultivo de chilacayote (*Curcubita ficifolia*), presencia de árboles de limón (*Citrus limon*), cedro (*Cupressus*) y *Alnus*. A los alrededores

del sitio de estudio existencia de cultivo (Monfil, 2020). El tipo de suelo es de tipo Regosol eútrico (Santiago, 2023).



*Figura 8. Localización espacial del sitio Nealtican.*

*Fuente: (Google Earth, 2022).*

### **San Nicolás de los Ranchos**

San Nicolás de los Ranchos ubicado a los 2419 m s.n.m, en la parte baja de la subcuenca, el relieve es de tipo cóncavo, con una pendiente de 2-5%. La temperatura ambiental promedio es de 21°C. El suelo presenta una textura arenosa, de tipo Fluvisol háplico (Santiago, 2018). La vegetación establecida con relicto de bosque de encino y la vegetación secundaria dominante son las especies oportunistas e indicadores de perturbación ambiental como *Alnus* sp., también se puede encontrar *Salix* sp., *Buddleia* sp., *Cestrum* sp., *Senecio* sp., y diversos árboles frutales; como durazno (*Prunus persica*), tejocote (*Crataegus mexicana*), pera (*Pyrus communis*), manzana (*Malus domestica*), capulín (*Prunus* sp.), nogal (*Juglans regia*) (Mena, 2018). Adyacente al sitio se encuentra una zona donde se cultiva *Zea mayz* (maíz), *Vicia faba* (haba) y *Medicago sativa* (alfalfa) (Santiago, 2018).





Figura 9. Localización espacial del sitio San Nicolás de los Ranchos.

Fuente: (Google Earth, 2022).

### **Xalizintla**

Xalizintla está ubicado a una altitud de 2600 m s.n.m, la forma del relieve es convexa, con una pendiente 4-7%, ligeramente inclinado y la erosión laminar con arrastre de hojarasca, presenta una temperatura ambiental promedio de 13 °C. En esta zona se llevan a cabo actividades económicas como la producción piscícola, aprovechamiento forestal, pero esta destina principalmente al cultivo de maíz (cultivo de temporal), en consecuencia, la vegetación natural fue eliminada a ambos lados del río para poder establecer áreas de cultivo de maíz, situación que intensifica los fenómenos de erosión hídrica y eólica en la zona. En el estrato arbóreo se registraron *Pinus teocote*, *P. ayacahita*, *P. pseudostrobus*, *Quercus sp.*, *Arbutus xalapensis*, se puede encontrar una gran densidad de especies vegetales tales como *Salvia elegans*, *Senecion sp.*, *Salix sp.*, *Geranium sp.*, *Alchemilla sp.*, algunos helechos del género *Asplenium* y *Cheilanthes*. El suelo de este sitio de estudio se clasificó como Fluvisol mólico (Sandoval, 2016; Mena, 2018; Santiago, 2018; Hernández, 2020; Monfil, 2020).

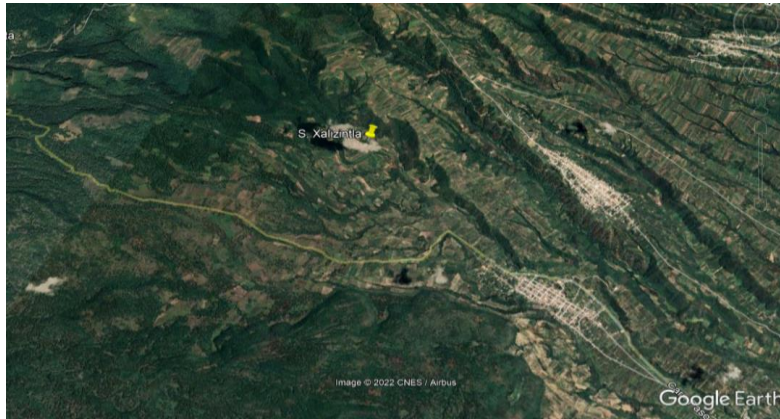


Figura 10. Localización espacial del sitio Xalizintla.

Fuente: (Google Earth, 2022).

### Buenavista

Buenavista está ubicado en media montaña a 3300 m s.n.m, la forma del relieve es convexa, moderadamente ondulado. Las pendientes del terreno son muy pronunciadas (8-20%) y presenta una temperatura ambiental de 12°C. A pesar de la pendiente encontrada, el suelo de las laderas no presenta signos de erosión puesto que está protegido por una gran cantidad de herbáceas, césped de gramíneas, mantillo de pino y la capa de hojarasca dispuesta en el suelo. Se observa una alta densidad de especies de coníferas con una gran abundancia y diversidad de arbustos, donde predominan las especies *Pinus hartwegii*, que superan fácilmente los 20, de altura y algunos individuos de *Abies religiosa* y alta densidad de zacatonal, aunque en menor proporción que sitios con mayor altitud. El suelo dominante en este sistema ribereño es Andosol vítrico úmbrico, con una textura arenosa franca (Sandoval, 2016; Mena, 2018; Santiago, 2018; Hernández, 2020; Monfil, 2020).



Figura 11. Localización espacial del sitio Buenavista.

Fuente: (Google Earth, 2022).

## Vallecito

Vallecito se ubica a los 3840 m s.n.m, con un relieve que tiende a ser plano, pero con una forma cóncava, la pendiente del terreno fue de 1.8° y la temperatura de 12.5°C, tipo de suelo Regosol dístico y Andosol vítrico con una textura franco-arenosa. La vegetación compuesta de pastizal montano (*Festuca spp.*, y *Muhlenbergia spp.*) y *Pinus hartwegii* (Santiago, 2023).

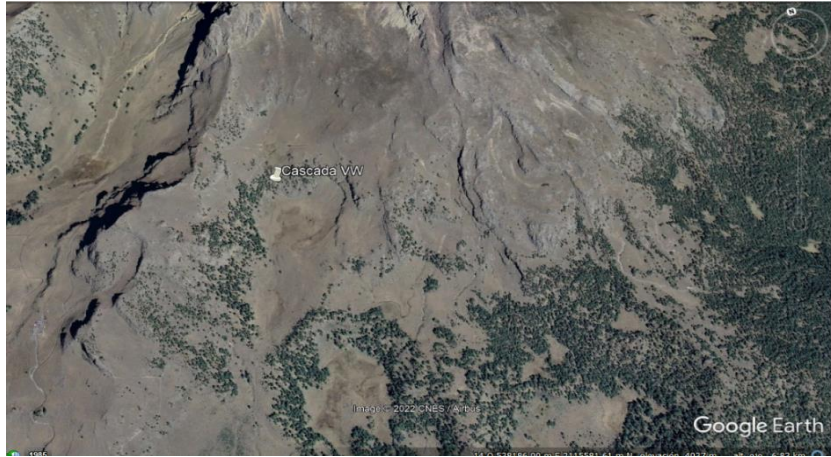


Figura 12. Localización espacial del sitio Vallecito.

Fuente: (Google Earth, 2022)

## Cascada Volkswagen

Cascada Volkswagen se ubica a 4010 m s.n.m, el sitio es un micro valle de relieve cóncavo-convexo y pendiente de 2 a 5%, por lo que el suelo tiene una ligera inclinación, rodeado de colinas con pendientes de 15 a 30% escarpadas. La temperatura ambiental promedio es de 8 a 10°C. Dada las condiciones físicas del sitio, se encuentra en alto grado de conservación y su única perturbación es un sendero aparente. El suelo se clasificó como Andosol vítrico úmbrico, está protegido por una densa vegetación compuesta por gramíneas amacolladas, con presencia de especies de los géneros *Festuca sp.* y *Muhlenbergia sp.* El sitio esta bordeado por algunos individuos de pino de alta montaña (*Pinus hartwegii*) y otras especies como *Lupinus sp.*, *Cirsium sp.*, *Eryngium sp* (Sandoval, 2016; Mena, 2018; Santiago, 2018; Hernández, 2020; Monfil, 2020).



*Figura 13. Localización espacial del sitio Cascada VW.*

*Fuente: (Google Earth, 2022).*

### Factores de la ecuación Universal de pérdida de suelo revisada (RUSLE)

A continuación, se presentan los resultados para cada uno de los factores de la ecuación Universal de Pérdida de Suelo.

#### Factor R

Para obtener el factor *R*, se seleccionaron 17 estaciones climatológicas ubicadas dentro y fuera de la zona de estudio, como se muestra en el Cuadro 13 y Figura 14, donde se reportan los datos de cada una de las estaciones.

Cuadro 13. Estaciones climatológicas seleccionadas para la obtención del factor *R*.

<i>Estación</i>	<i>Coordenadas</i>		<b>Altitud</b> (m s.n.m)
SAN RAFAEL, TLALMANALCO	19°12'28" N	098°45'30" W	2,530.0
TLALMANALCO, TLALMANALCO	19°12'14" N	098°48'12" W	2,410.0
HUEJOTZINGO, HUEJOTZINGO	19°09'43" N	098°24'23" W	2,454.0
AMECAMECA DE JUÁREZ,	19°08'26" N	098°46'20" W	2,470.0
SAN ANDRES CALPAN	19°06'20" N	098°27'49" W	2,317.0
JUCHITEPEC, JUCHITEPEC	19°05'13" N	098°53'05" W	2,543.0
S. PEDRO NEXAPA, AMECAMECA	19°05'01" N	098°44'18" W	2,620.0
ATLAUTLA E-9, ATLAUTLA	19°01'37" N	098°46'47" W	2,350.0
ECHEVERRIA, PUEBLA	18°57'20"N	098°16'31" W	2,066.0
ACHICHIPICO D-4,	18°56'50" N	098°49'45" W	2,117.0
ATLIXCO, ATLIXCO	18°55'18" N	098°27'15" W	1,904.0
SAN PEDRO B. JUAREZ E-1,	18°55'19" N	098°33'05" W	2,143.0
HUECAUASCO E-7, OCUITUCO	18°54'43" N	098°45'11" W	2,305.0
HUEYAPAN E-4, TETELA D V.	18°53'06" N	098°41'25" W	2,285.0
PUENTE DE OCUITUCO E-5,	18°52'41" N	098°46'31" W	1,941.0
YECAPIXTLA E.T.A. 118,	18°53'30" N	098°51'30" W	1,600.0
YECAPIXTLA, YECAPIXTLA	18°53'00" N	098°51'54" W	1,590.0

Fuente: CNA, (2021)

**DIAGNÓSTICO DE EROSIÓN EDÁFICA Y COBERTURA VEGETAL COMO INDICADORES BIOFÍSICOS DE CALIDAD ECOLÓGICA DE SISTEMAS RIBEREÑOS DE LA SUBREGIÓN DEL ALTO BALSAS**


LABORATORIO DE EDAFOLOGÍA Y NUTRICIÓN VEGETAL

**MAPA DE ESTACIONES METEOROLÓGICAS**

**SIMBOLOGÍA**

- Región de estudio
- Subregión del Alto Balsas
- Estaciones Meteorológicas

**Microlocalización**





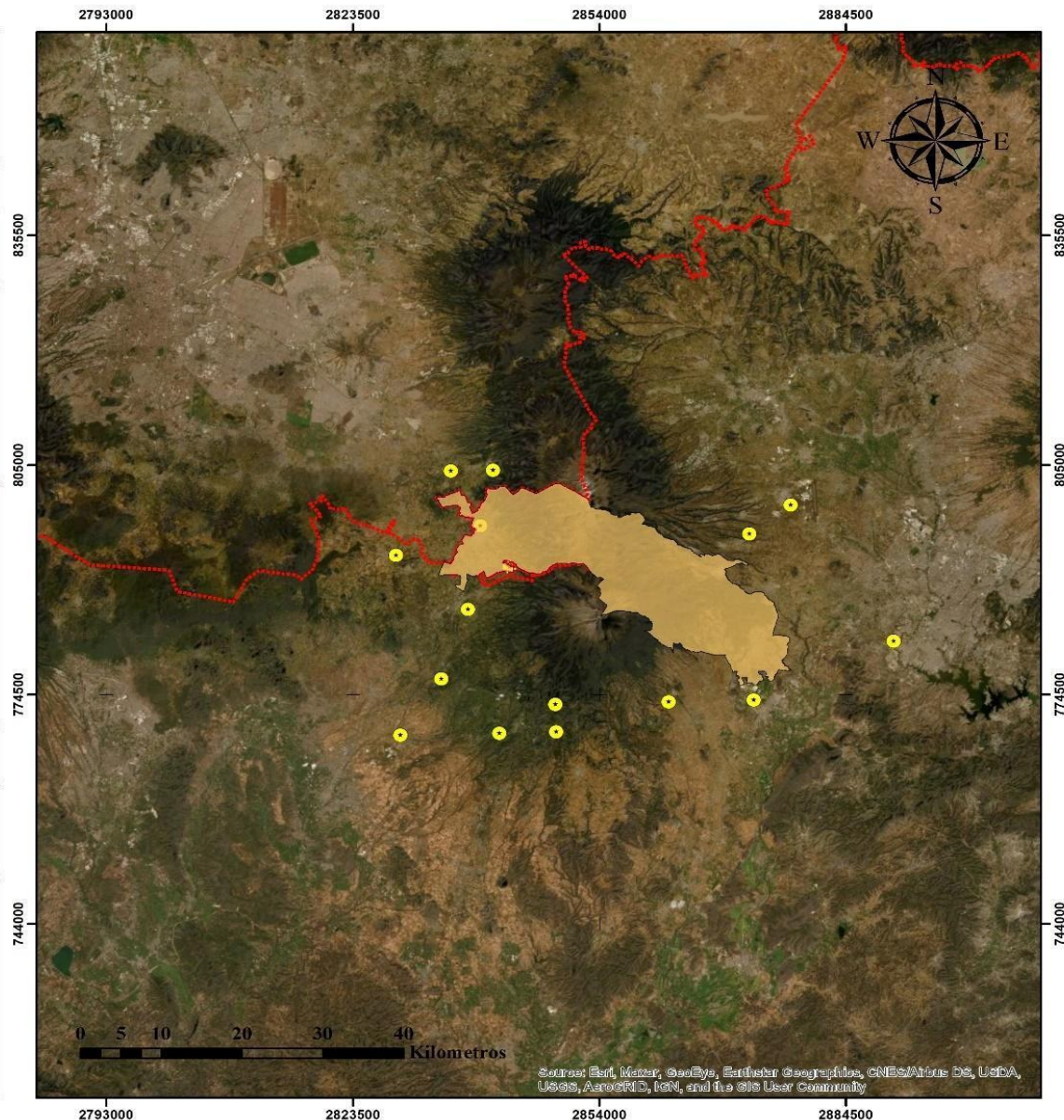
Elaborado por: Dayana Quitar Morales  
Fecha de elaboración: 25/Noviembre/2021

**Referencia Cartográfica**

Sistema de coordenadas: WGS 1984 UTM ZONA 14N  
Datum: WGS 1984

**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO  
FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES ZARAGOZA**



*Figura 14. Localización de las Estaciones climatólogica*

Ya calculado el factor R para cada una de las estaciones climatológicas, como se muestra en el Cuadro 14 la información fue capturada en una base de datos de Excel la cual fue exportada en el software libre, haciendo una interpolación de los valores.

*Cuadro 14. Resultados de erosividad para cada una de las estaciones climatológicas.*

<i>Estación climática</i>	<i>Altitud</i>	<i>Precipitación media anual (mm)</i>	<i>Erosividad (Mj/h/ha/año)</i>
<i>SAN RAFAEL, TLALMANALCO</i>	2,530.0	1034.3	
<i>TLALMANANCO, TLALMANANCO</i>	2,410.0	765.2	
<i>HUEJOTZINGO, HUEJOTZINGO</i>	2,454.0	759.6	
<i>AMECAMECA DE JUÁREZ,</i>	2,470.0	804.7	1606.74
<i>SAN ANDRES CALPAN</i>	2,317.0	833	
<i>JUCHITEPEC, JUCHITEPEC</i>	2,543.0	749.2	
<i>S. PEDRO NEXAPA, AMECAMECA</i>	2,620.0	838.1	1673.43
<i>ATLAUTLA E-9, ATLAUTLA</i>	2,350.0	943.6	
<i>ECHEVERRIA, PUEBLA</i>	2,066.0	873.5	
<i>ACHICHIPICO D-4,</i>	2,117.0	1118	
<i>ATLIXCO, ATLIXCO</i>	1,904.0	859.8	
<i>SAN PEDRO B. JUAREZ E-1,</i>	2,143.0	938.6	
<i>HUECAUASCO E-7, OCUITUCO</i>	2,305.0	995.4	
<i>HUEYAPAN E-4, TETELA D V.</i>	2,285.0	1108.3	
<i>PUENTE DE OCUITUCO E-5,</i>	1,941.0	1104.8	
<i>YECAPIXTLA E.T.A. 118,</i>	1,600.0	1064.8	
<i>YECAPIXTLA, YECAPIXTLA</i>	1,590.0	1011.6	





## Factor K

Una vez identificadas las unidades, subunidades y texturas que presenta la zona de estudio, se les asignaron los valores correspondientes propuesto por la FAO (Cuadro 15). Los valores mínimos exteriorizan baja susceptibilidad a la erosión del suelo. Se puede observar que el valor K que más abunda es 0.026 debido a que está área presenta características semejantes de textura. En la Figura 16 se presenta el mapa del factor K.

Cuadro 15. Tipo de suelo y valores K.

	Orden	Descripción	Textura	k
0	Rd	Regosol dístico	media	0.04
1	Re	Regosol eútrico	gruesa	0.026
2	Re	Regosol eútrico	gruesa	0.026
3	I	Litosol	gruesa	0.026
4	Jd	Fluvisol dístico	gruesa	0.026
5	Th	Andosol húmico	media	0.04
6	Rd	Regosol dístico	gruesa	0.026
7	I	Litosol	media	0.04
8	Re	Regosol eútrico	gruesa	0.026
9	Id	Fluvisol dístico	gruesa	0.026
10	Re	Regosol eútrico	gruesa	0.026
11	Th	Andosol húmico	media	0.04
12	Rd	Regosol dístico	gruesa	0.026
13	Re	Regosol eútrico	media	0.04
14	Rd	Regosol dístico	gruesa	0.026
15	I	Litosol	gruesa	0.026
16	I	Litosol	gruesa	0.026
17	Re	Regosol eútrico	gruesa	0.026
18	Bv	Cambisol vertico	media	0.079
19	Hh	Feozem háplico	media	0.02
20	Je	Fluvisol eútrico	gruesa	0.026

Fuente: CONABIO, (2001)

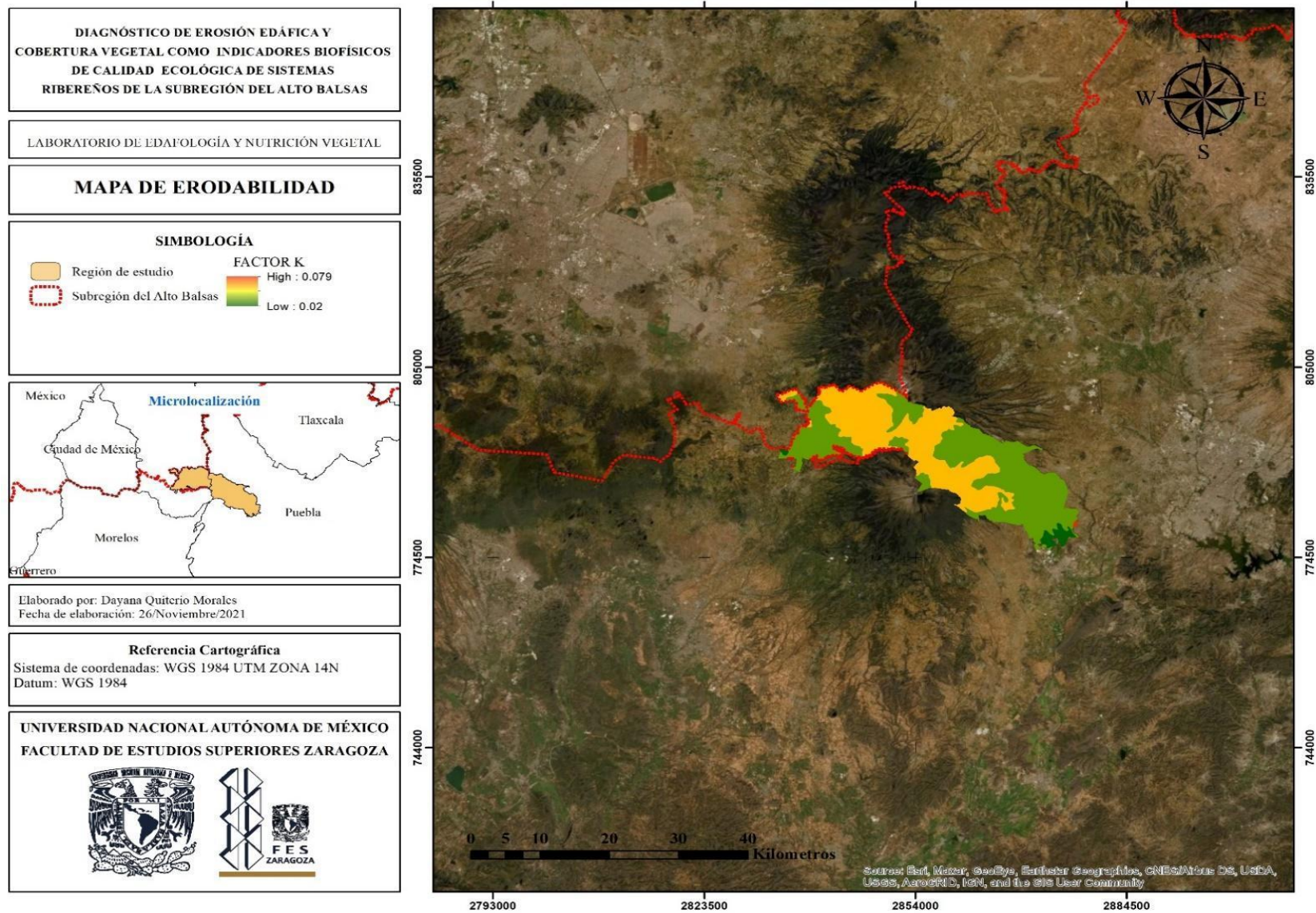


Figura 16. Factor K o erodabilidad del suelo.

### **Factor LS**

En la Figura 17 se muestra la distribución del factor LS que presenta valor máximo de 2599.33 en las partes altas y accidentadas y un mínimo de 0.03 en las zonas planas y no tan accidentadas, se observó que en la medida que la longitud ( $L$ ) y el grado ( $S$ ) se incrementan, su efecto en la pérdida de suelo es mayor. Siempre y cuando el sitio carezca de cobertura vegetal o ésta sea limitada.


**DIAGNÓSTICO DE EROSIÓN EDÁFICA Y COBERTURA VEGETAL COMO INDICADORES BIOFÍSICOS DE CALIDAD ECOLÓGICA DE SISTEMAS RIBEREÑOS DE LA SUBREGIÓN DEL ALTO BALSAS**

LABORATORIO DE EDAFOLOGÍA Y NUTRICIÓN VEGETAL

**MAPA DE LONGITUD Y PENDIENTE**

**SIMBOLOGÍA**

<p>Región de estudio</p> <p>Subregión del Alto Balsas</p>	<p><b>FACTOR LS</b></p> <p>High : 2599.33</p> <p>Low : 0.03</p>
---	---



Elaborado por: Dayana Quiterio Morales  
Fecha de elaboración: 27/Noviembre/2021

**Referencia Cartográfica**

Sistema de coordenadas: WGS 1984 UTM ZONA 14N  
Datum: WGS 1984

**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**  
**FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES ZARAGOZA**


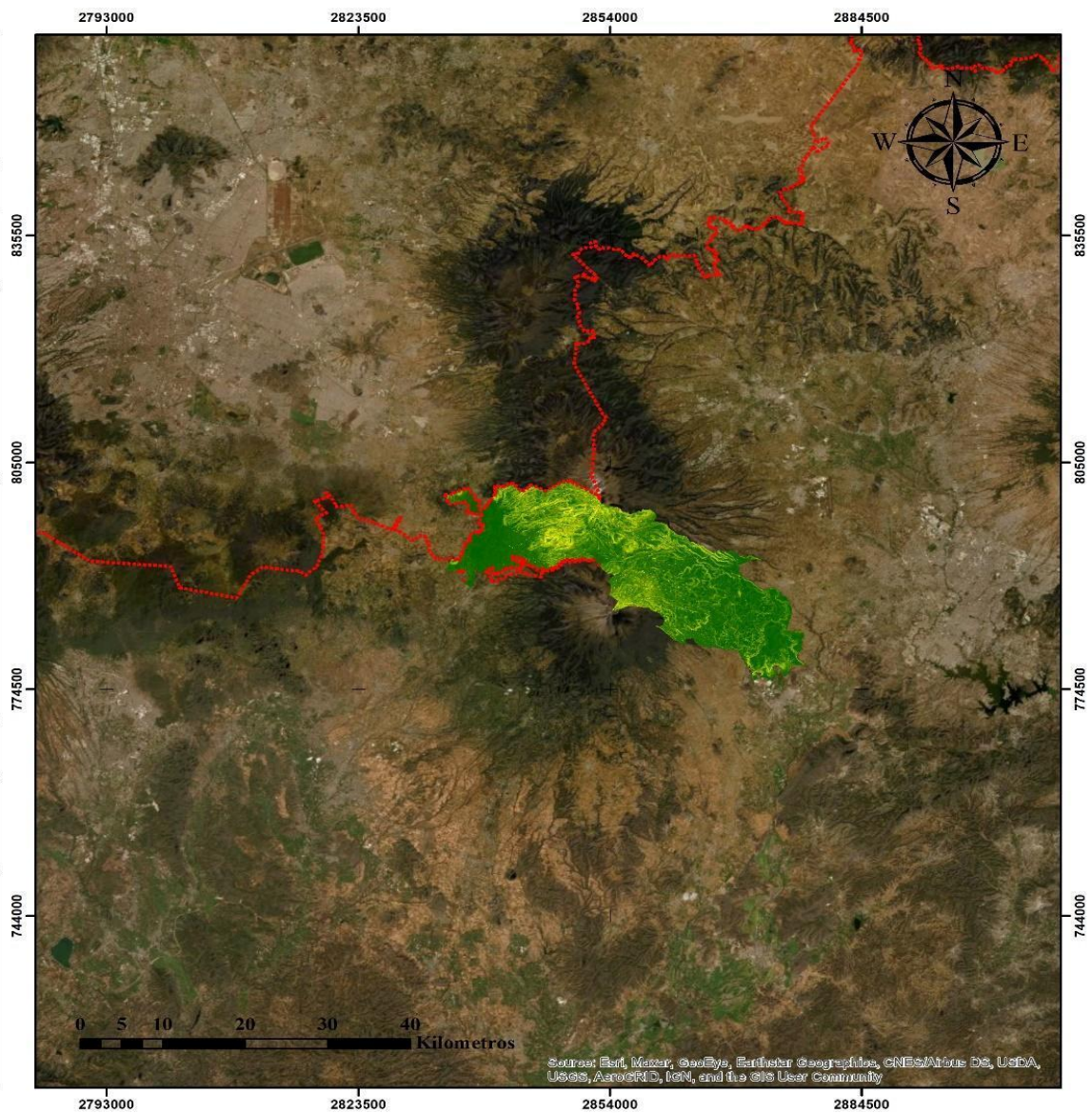



Figura 17. Factor LS longitud y grado de la pendiente.

## Factor C

En relación con la cobertura y usos de suelo, se cuenta con una superficie total de 46, 949.97 ha. Para este documento se consideraron los diferentes tipos de agricultura, bosque, pastizal, pradera, etc.

La agricultura de temporal anual cubre 11, 607.72 ha equivalente al 24.72 % de la superficie total, seguido por el bosque de pino con un total de 10, 680.63 ha equivalente al 22.75 % de la superficie. La vegetación menos predominante es vegetación secundaria arbustiva de bosque de encino-pino con una superficie de 32.13 ha correspondiente al 0.07% de la superficie como se presenta en el Cuadro 16.

*Cuadro 16. Cobertura y usos de suelo en la región de estudio.*

<i>Cobertura y uso de suelo</i>	<i>Área (ha)</i>	<i>Porcentaje</i>
Agricultura de riego anual y semipermanente	2412,83	5.14
Agricultura de temporal anual	11,607.72	24.72
Agricultura de temporal anual y permanente	950,99	2.03
Bosque de encino	1,224.93	2.61
Bosque de encino-pino	527,42	1.12
Bosque de oyamel	2,874.27	6.12
Bosque de pino	10,680.63	22.75
Bosque de pino-encino	791,39	1.69
Pastizal inducido	774,43	1.65
Pradera de alta montaña	2,728.39	5.81
Sin vegetación aparente	1,129.01	2.40
Urbano construido	1,263.22	2.69
Vegetación secundaria Arbórea de bosque de encino	105,36	0.22

<i>Cobertura y uso de suelo</i>	<i>Área (ha)</i>	<i>Porcentaje</i>
Vegetación secundaria arbórea de bosque de pino	1,489.58	3.17
Vegetación secundaria arbórea de bosque de pino-encino	1,781.14	3.79
Vegetación secundaria arbustiva de bosque de encino	4,893.77	10.42
Vegetación secundaria arbustiva de bosque de encino-pino	32,13	0.07
Vegetación secundaria arbustiva de bosque de pino	396,86	0.85
Vegetación secundaria arbustiva de bosque de pino-encino	1,285.91	2.74
Total	46949.97	100

Fuente: CONABIO, (2017).

En el Cuadro 6 se muestra la distribución del factor C, cuyos valores oscilan de 0.005 a 0.8. El valor más alto 0.8 representa el área sin vegetación aparente, seguido por el valor 0.75 correspondiente al área agrícola, los valores medios corresponden a los bosques, pastizal y vegetación secundaria y el valor más bajo 0.005 corresponde al área de urbano construido.

En el caso del Factor P se obtiene un valor de 1 para toda la zona, por lo que se considera como una constante, debido a que no se llevan a cabo prácticas de manejo.

**DIAGNÓSTICO DE EROSIÓN EDÁFICA Y COBERTURA VEGETAL COMO INDICADORES BIOFÍSICOS DE CALIDAD ECOLÓGICA DE SISTEMAS RIBEREÑOS DE LA SUBREGIÓN DEL ALTO BALSAS**

LABORATORIO DE EDAFOLOGÍA Y NUTRICIÓN VEGETAL

**MAPA DE USO Y VEGETACIÓN**

**SIMBOLOGÍA**

 Región de estudio	<b>Factor C</b>
 Subregión del Alto Balsas	 High: 0.6
	 Low: 0.005



Elaborado por: Dayana Quintanero Morales  
Fecha de elaboración: 28/Noviembre/2021

**Referencia Cartográfica**  
Sistema de coordenadas: WGS 1984 UTM ZONA 14N  
Datum: WGS 1984

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO  
FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES ZARAGOZA

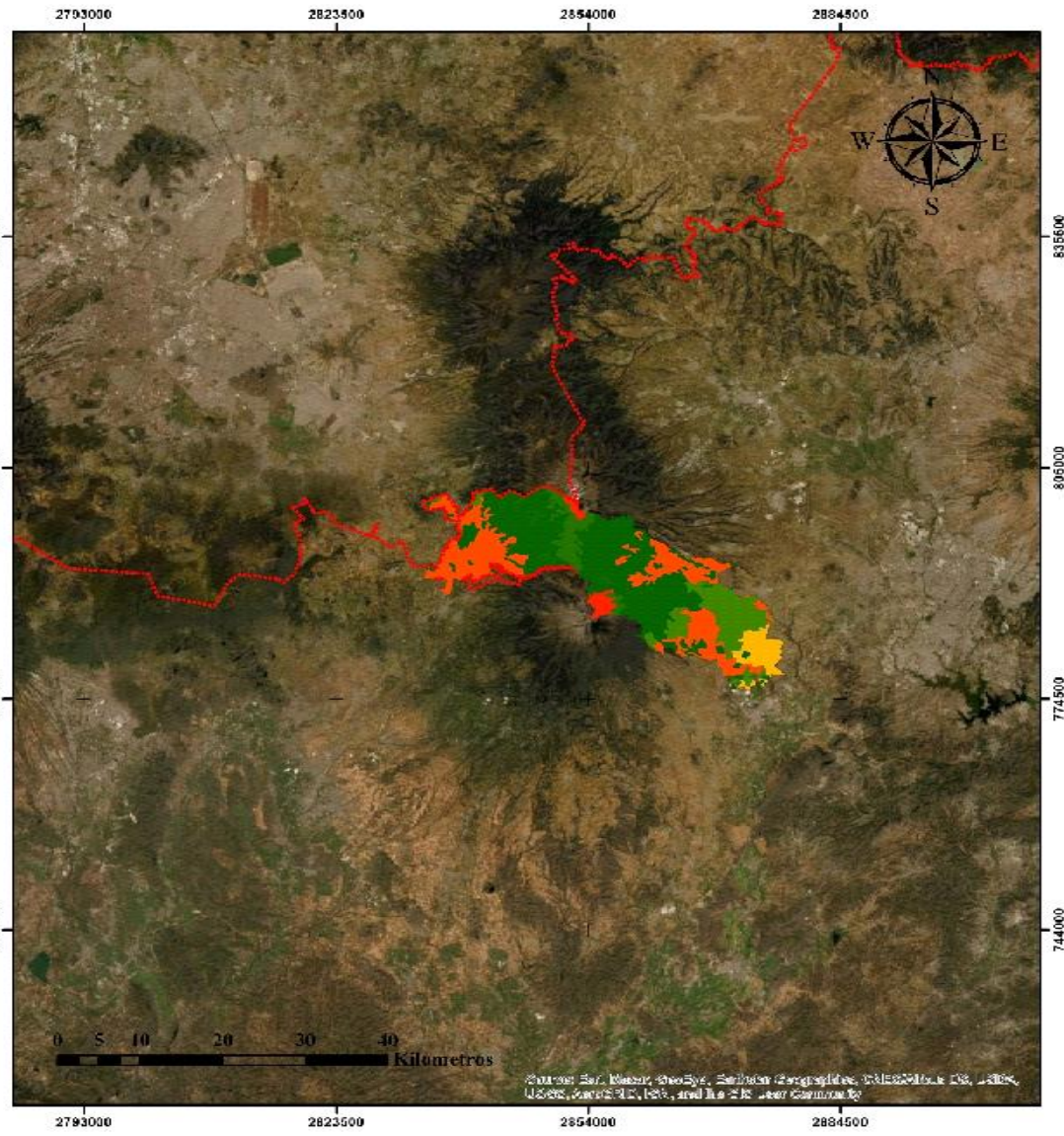



Figura 18. Mapa de uso y vegetación.

### Erosión potencial y actual

En primer lugar, se calculó la erosión potencial, la cual nos permite ver los grados de erosión que estarían presentes si el suelo estuviera desprovisto de cobertura vegetal, resultado de la multiplicación de los factores *R*, *K* y *LS*, dando como lugar el mapa de erosión potencial (Figura 19). Se puede observar en el Cuadro 17 que la clase de erosión predominante es el intervalo 0 - 10 ton/ha/año con una extensión de 44,342.48 ha, cubriendo el 94.56% de la zona.

Cuadro 17. Erosión potencial.

Clase de erosión	Área (ha)	porcentaje
>100	45.64	0.10
51-100	88.41	0.19
26-50	168.75	0.36
11-25	2,247.65	4.79
<b>0-10</b>	<b>44,342.48</b>	<b>94.56</b>
<i>Total</i>	46,892.93	100

Fuente: Elaboración propia.

Se detectó que el único sitio que presenta una calidad ambiental baja es Cascada VW (Cuadro 18), ya que por lo general las clases de erosión son altas o muy altas en las zonas montañosas, lo cual se asocia con la alta erosividad de la lluvia y el relieve accidentado que presenta el terreno.

Cuadro 18. Valores para la clasificación del indicador de erosión potencial.

Sitio	Valor	Calidad ambiental
Nealtican	5	Muy alta
San Nicolás de los ranchos	5	Muy alta
Xalizintla	5	Muy alta
Buнавista	5	Muy alta
Vallecito	5	Muy alta
Cascada VW	2	Baja

Fuente: Elaboración propia.

En cuanto a la erosión actual en la Subregión del Alto Balsas, resultado de la multiplicación de los factores *R*, *K*, *LS* y *C*, generando el mapa de erosión actual (Figura 20), se puede



observar la clase de erosión predominante es el intervalo 0 - 10 ton/ha/año con una extensión de 45,865.09 ha, cubriendo un 99.93% de la zona. La erosión es muy baja, sin embargo. se requiere conservar principalmente las zonas altas, y lugares desprovistos de vegetación tanto de primaria como secundaria y relieve accidentado.

La erosión actual es el tipo de erosión de principal interés en esta investigación, por ello los resultados de este son los tomados en cuenta para la calidad ecológica, el mapa de erosión actual obtenido constituye un indicador importante de métodos sustentables para las autoridades responsables de la planificación, gestión y protección de territorios.

*Cuadro 19. Erosión actual en la Subregión del Alto Balsas.*

<b>Clases de erosión</b>	<b>Área (ha)</b>	<b>Porcentaje</b>
>100	0.13	0.0003
51-100	0.39	0.0008
26-50	1.30	0.0028
11-25	26.32	0.0574
<b>0-10</b>	<b>45,865.09</b>	<b>99.9387</b>
<i>Total</i>	45893.23	100

Fuente: Elaboración propia.

Dentro de la zona de estudio no se presenta un grado alto de erosión en el suelo, ya que 99.9387 % de la superficie presenta una erosión ligera como se muestra en el Cuadro 19.

*Cuadro 20. Valores para la clasificación del indicador de erosión actual.*

<b>Sitio</b>	<b>Valor</b>	<b>Calidad ambiental</b>
Nealtican	5	Muy alta
San Nicolás de los ranchos	5	Muy alta
Xalizintla	5	Muy alta
Buнавista	5	Muy alta
Vallecito	5	Muy alta
Cascada VW	5	Muy alta

Fuente: Elaboración propia.

Los sitios Nealtican, San Nicolás de los ranchos, Xalizintla, Buenavista, Vallecito y Cascada VW, cuentan con una calidad ambiental muy alta ya que se encuentran en el intervalo 0 -10 ton/ha año, obteniendo un valor de 5 respectivamente (Cuadro 20).



LABORATORIO DE EDAFOLOGÍA Y NUTRICIÓN VEGETAL

MAPA DE EROSIÓN POTENCIAL

**SIMBOLOGÍA**

**Erosión potencial (ton/ha/año)**

0-10	Subregión del Alto Balsas
11-25	Sitios de estudio
26-50	
51-100	
>100	



Elaborado por: Dayana Quiterio Morales  
Fecha de elaboración: 25/Marzo/2022

**Referencia Cartográfica**  
Sistema de coordenadas: WGS 1984 UTM ZONA 14N  
Datum: WGS 1984

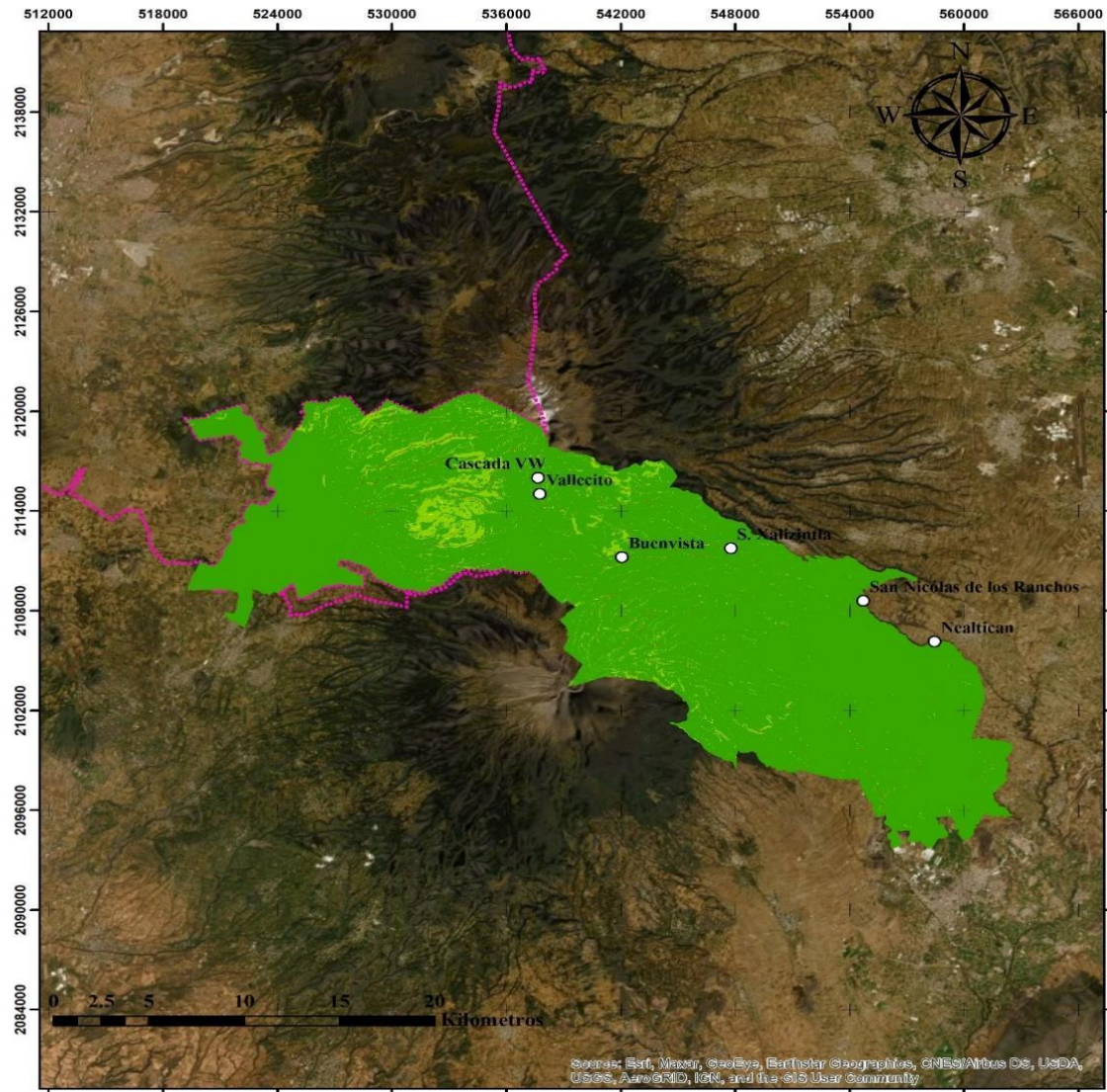
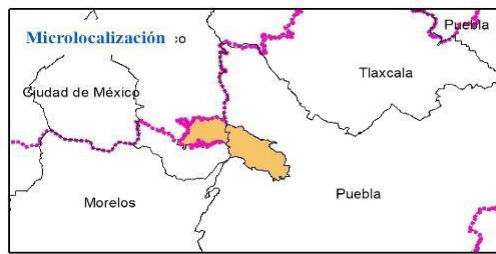


Figura 19. Mapa de erosión potencial.



LABORATORIO DE EDAFOLOGÍA Y NUTRICIÓN VEGETAL

MAPA DE EROSIÓN ACTUAL



Elaborado por: Dayana Quiterio Morales  
Fecha de elaboración: 25/Marzo/2022

**Referencia Cartográfica**  
Sistema de coordenadas: WGS 1984 UTM ZONA 14N  
Datum: WGS 1984

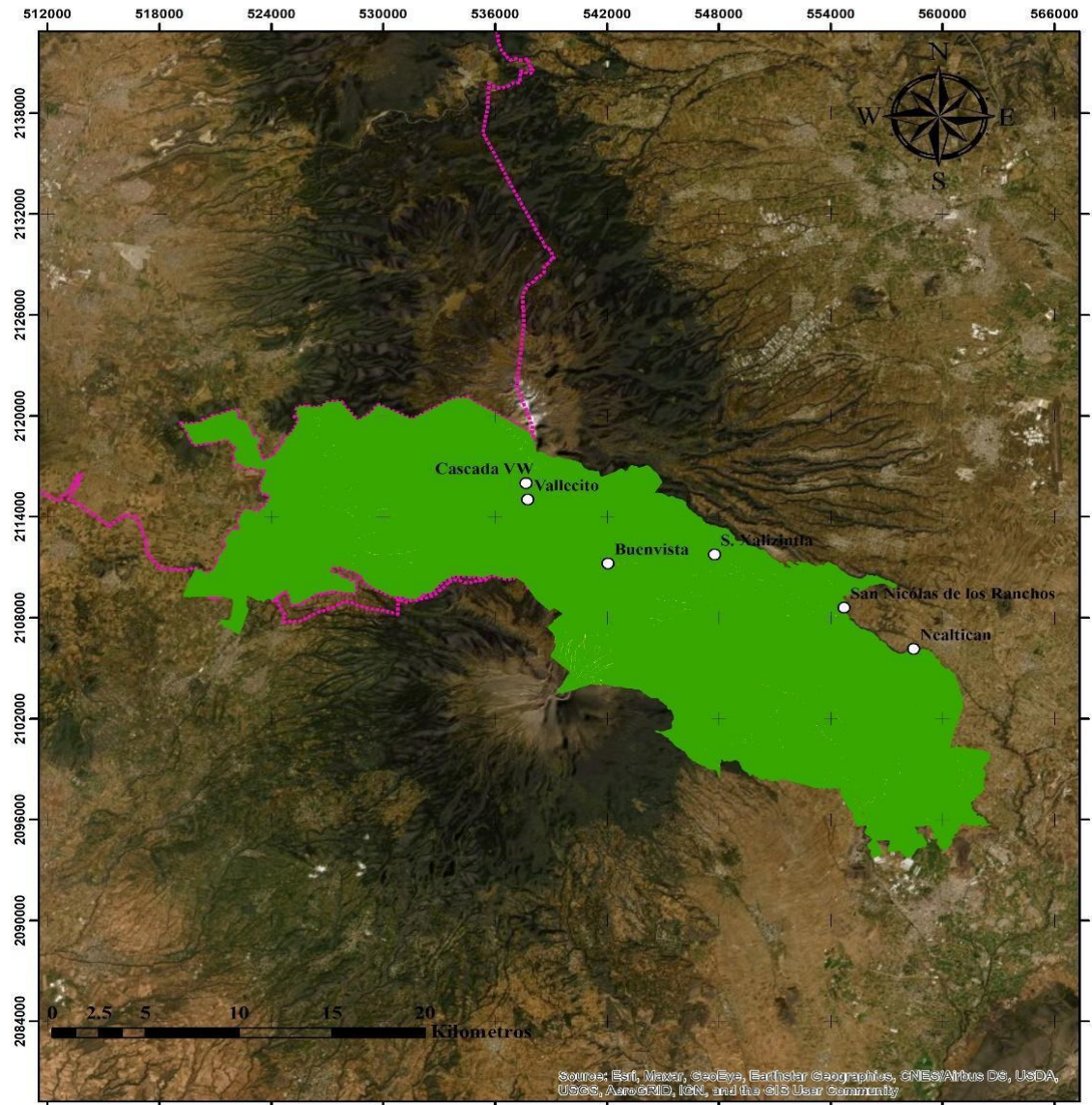


Figura 20. Mapa de erosión actual.

### **Estimación del Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI)**

Los valores promedio del NDVI en la zona de estudio en la fecha 02/enero/2021, muestran que existe una alta heterogeneidad espacial en la cobertura vegetal. Específicamente, se observó que en los sitios de estudio presenta valores de entre 0.3 y 0.7, debido que son zonas con vegetación de bosques (pino y encino) y otros tipos de vegetación con alta densidad foliar.

De acuerdo con el Cuadro 21, los intervalos establecidos los sitios que presentan calidad ambiental media son San Nicolás de los ranchos, Nealtican y Cascada VW, ya que están cerca de la zona urbana como la falda volcánica. Mientras que Xalizintla y Vallecito la calidad es baja, debido que hubo cambio de uso de suelo, por lo tanto, se intensifica la erosión hídrica, por último, el sitio Buenavista con alta densidad de especies de coníferas y diversidad de arbustos, donde predominan las especies *Pinus hartwegii*, *Abies religiosa* y zacatonal definiendo a la calidad ambiental como alta representada en la Figura 21.

*Cuadro 21. Valores para la clasificación del indicador NDVI.*

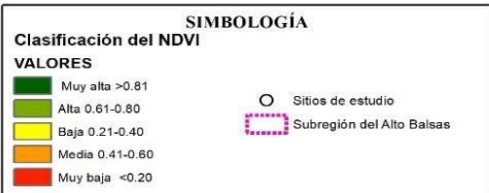
<b>Sitio</b>	<b>Valor</b>	<b>Calidad ambiental</b>
Nealtican	3	Media
San Nicolás de los ranchos	3	Media
Xalizintla	2	Baja
Buenavista	4	Alta
Vallecito	2	baja
Cascada VW	3	Media

Fuente: Elaboración propia.



LABORATORIO DE EDAFOLOGÍA Y NUTRICIÓN VEGETAL

MAPA DE CLASIFICACIÓN DEL NDVI



Elaborado por: Dayana Quiterio Morales  
Fecha de elaboración: 30/Noviembre/2021

**Referencia Cartográfica**  
Sistema de coordenadas: WGS 1984 UTM ZONA 14N  
Datum: WGS 1984

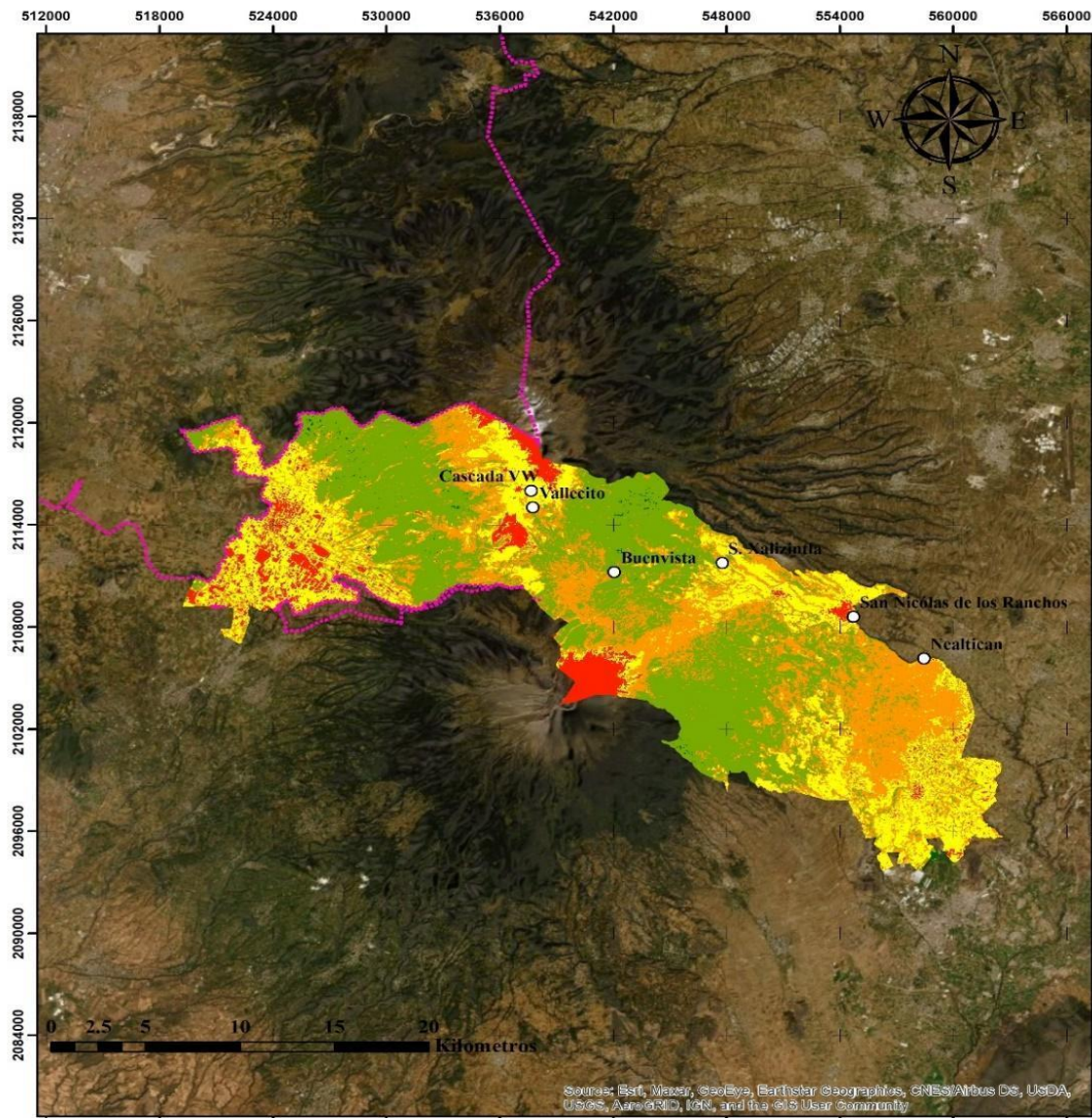


Figura 21. Mapa de clasificación del NDVI.

### Indicador de cobertura natural

De acuerdo con el Cuadro 22, la superficie cubierta por bosque de pino corresponde a 10,680.63 ha, bosque de oyamel con un total de 2,874.26 ha, bosque de encino con 1,224.92 ha y por último el bosque de encino-pino con 527.41 ha. La vegetación secundaria, cubre mayor superficie del terreno, sobre todo la agricultura de temporal anual, con una superficie total de 11,607.72 ha, seguido por la vegetación secundaria arbustiva de bosque de encino con 4893.76 ha y en último lugar la vegetación secundaria arbustiva de bosque de encino-pino con un total de 32.12 ha.

*Cuadro 22. Cobertura en la zona de estudio.*

<b>Tipo de vegetación</b>	<b>C_A*</b>	<b>Área ha</b>
Agricultura de temporal anual	1	11607,72
Bosque de pino	4	10680,63
Vegetación secundaria arbustiva de bosque de encino	1	4893,76
Bosque de oyamel	4	2874,26
Pradera de alta montaña	2	2728,38
Agricultura de riego anual y semipermanente	1	2412,83
Vegetación secundaria arbórea de bosque de pino-encino	1	1781,14
Vegetación secundaria arbórea de bosque de pino	1	1489,57
Vegetación secundaria arbustiva de bosque de pino-encino	1	1285,91
Urbano construido	1	1263,21
Bosque de encino	4	1224,92
Sin vegetación aparente	1	1129,01
Agricultura de temporal anual y permanente	1	950,98
Bosque de pino-encino	4	791,38
Pastizal inducido	1	774,42
Bosque de encino-pino	3	527,41
Vegetación secundaria arbustiva de bosque de pino	1	396,86
Vegetación secundaria arbórea de bosque de encino	1	105,36
Vegetación secundaria arbustiva de bosque de encino-pino	1	32,12

Fuente: Elaboración propia.

### **Calidad ambiental de la cobertura natural**

La calidad ambiental de acuerdo con el indicador cobertura natural va de muy baja a baja (Cuadro 23, Figura 22), en consecuencia, de que domina la vegetación secundaria, donde predominan las especies oportunistas e indicadores de perturbación ambiental desplazando a la vegetación primaria.

*Cuadro 23. Valores para la clasificación del indicador de vegetación.*

<b>Sitio</b>	<b>Valor</b>	<b>Calidad ambiental</b>
Nealtican	1	Muy baja
San Nicolás de los ranchos	1	Muy baja
Xalizintla	1	Muy baja
Buenavista	1	Muy baja
Vallecito	2	baja
Cascada VW	2	baja

Fuente: Elaboración propia.

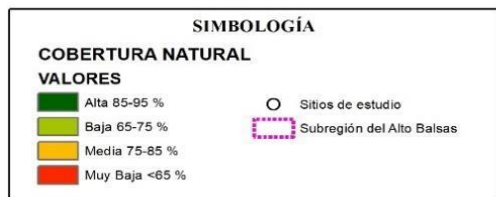
En la región del estudio, la cual se encuentra en el Parque Nacional Iztaccíhuatl-Popocatepetl y su área de influencia, no está libre de la extracción y aprovechamiento provocando una degradación en el lugar. La agricultura y ganadería establecidas en las comunidades, las cuales son de tipo extensivo. Las actividades intensivas comerciales y depredadoras de los recursos forestales sin un control establecido, generando un gran impacto por deforestación y alteración del hábitat (Granados y Hernández, 2006).





LABORATORIO DE EDAFOLOGÍA Y NUTRICIÓN VEGETAL

MAPA DE COBERTURA NATURAL



Elaborado por: Dayana Quiterio Morales  
Fecha de elaboración: 30/Noviembre/2021

**Referencia Cartográfica**  
Sistema de coordenadas: WGS 1984 UTM ZONA 14N  
Datum: WGS 1984

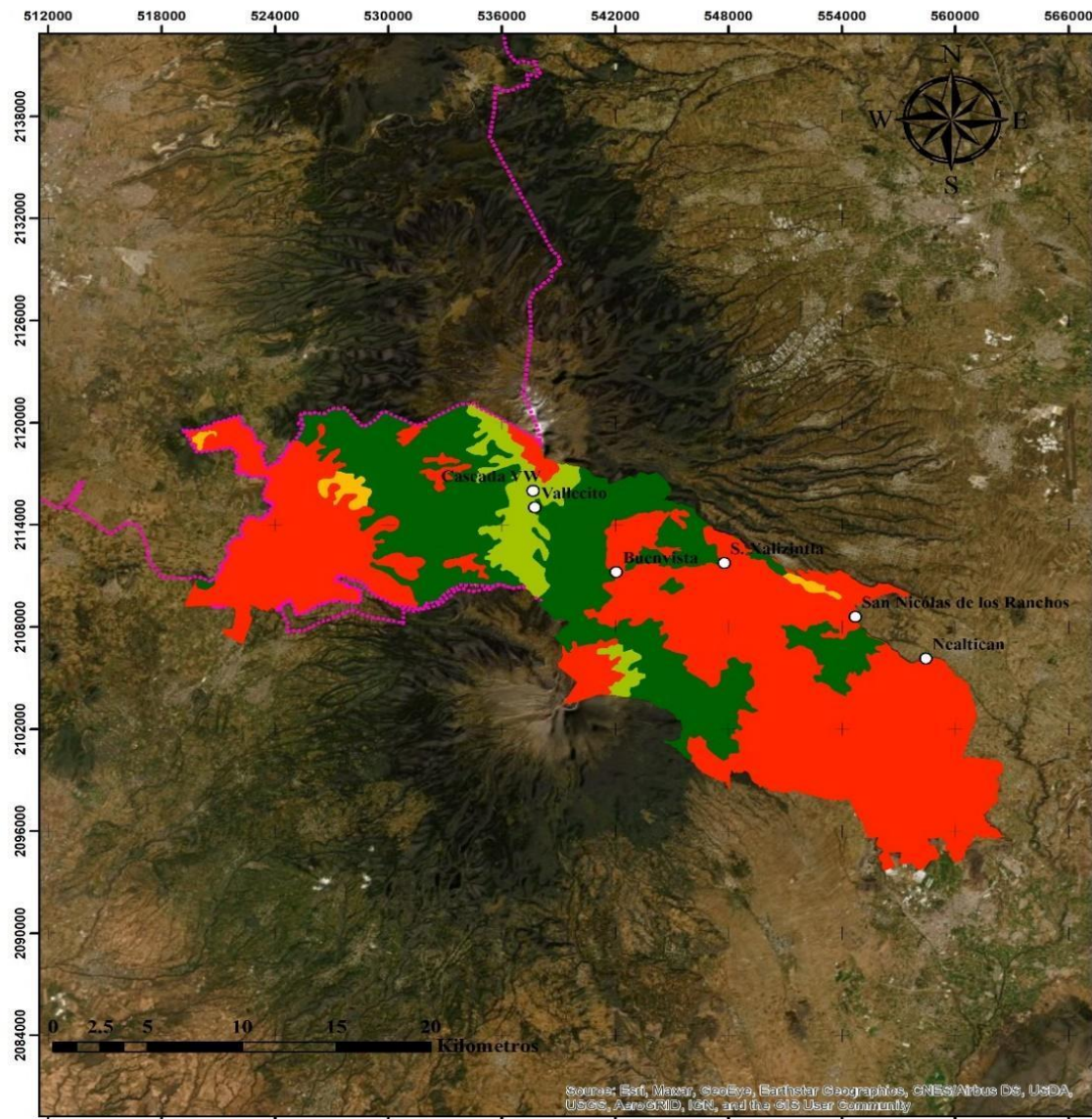


Figura 22. Mapa de cobertura natural

## Discusión

A partir de los resultados de los indicadores evaluados, en el siguiente apartado se discuten cada uno de los rangos obtenidos, permitiendo así llevar a cabo la evaluación de la calidad ambiental de la zona de estudio.

### Evaluación de calidad ambiental

De acuerdo con los valores mostrados en el Cuadro 24, la calidad ambiental que destaca es la MEDIA, abarcando un total de 57.94% de la superficie total en el que solo se observaron ligeras perturbaciones. El 3.16% representa una calidad ambiental MUY BAJA, a pesar de ser un valor relativamente bajo, es necesario considerar que el porcentaje de la calidad media podría ir en aumento ya que la transformación de la vegetación y las modificaciones al entorno pueden impactar de manera positiva o negativa en las propiedades del suelo, y posteriormente afectar la calidad de los sistemas ribereños haciéndolos más vulnerables.

Cuadro 24. Calidad ambiental de la subregión del Alto Balsas.

Calidad ambiental	Superficie (ha)	Porcentaje (%)
Alta	179,692,976.74	38.90
<b>Media</b>	<b>267,628,724.40</b>	<b>57.94</b>
Muy baja	14,592,412.82	3.16
Total	461,914,113.96	100.00

Fuente: Elaboración propia.

En el Cuadro 25 se puede observar que en el intervalo altitudinal entre 2200 y 2700 m s.n.m se ubican sitios con calidad ambiental media, sin embargo, vallecito el cual corresponde a un sitio de mayor altitud también entra dentro de esta categoría, en cambio Buenavista y Cascada VW los cuales se encuentra entre 3300 y 4020 m s.n.m cuentan con una calidad ambiental Alta. De acuerdo con otros estudios el factor altitudinal es considerado como uno de los más importantes en la determinación de la calidad de las riberas (Jacobsen et al.,1997; Lujan *et al.*,2013; Villamarín *et al.*,2014; Posada y Arroyave, 2015; Rodríguez-Téllez *et al.*,2016; Almarales *et al.*,2017), puesto que de ello depende la accesibilidad y su cercanía a asentamientos humanos, los hace más vulnerables al desarrollo de actividades primarias.

Cuadro 25. Valores finales de Calidad ambiental.

Sitio	Altitud	Valor			Total	Calidad ambiental
		Erosión	NDVI	Vegetación natural		
Nealtican	2260	5	3	1	9	Media
San Nicolás de los Ranchos	2419	5	3	1	9	Media
Xalizintla	2680	5	2	1	8	Media
Buenavista	3315	5	4	1	10	Alta
Vallecito	3840	5	2	2	9	Media
Cascada VW	4010	5	3	2	10	Alta

Fuente: Elaboración propia.

Se puede observar que la calidad ambiental va de media a alta, el indicador que afecta más a la sumatoria es el de vegetación natural, siendo el que recibe los valores más bajo debido al aumento de las actividades antrópicas que se desarrollan en tanto dentro y fuera de los sitios, de igual manera de debe al crecimiento de las especies invasoras que llegan o bien son introducidas.

San Nicolás de los Ranchos es el sitio más cercano a los a los asentamientos urbanos, en vista de que está ubicado en la parte baja de la subcuenca. Posee una pendiente de 2-5%, aun cuando no es muy pronunciada, es importante considerar que la longitud y la inclinación de la pendiente del terreno afectan sustancialmente la tasa de erosión del suelo por el agua. La velocidad de flujo de la escorrentía aumenta cuando la cantidad de flujo concentrado o la

inclinación de la pendiente aumentan. Por lo tanto, el potencial erosivo de la escorrentía aumenta sustancialmente, si aumentan la longitud o la inclinación de la pendiente.

El suelo presenta una textura arenosa de tipo Fluvisol (suelo de río) háplico de material aluviales (aluvión activo). Los suelos con este tipo de textura son de escasa fertilidad y poca capacidad de retener agua; provocando que se inunden fácilmente, se caracteriza por estar formado de material transportado por agua, presentando capas alternadas de arena con piedras o gravas redondeadas, como efecto de la corriente y crecidas del agua en los ríos (Flores, 2016). Son suelos muy poco desarrollados, relativamente profundos y presentan generalmente estructura débil o suelta. Se sitúan en todos los climas y regiones de México siempre cerca a los lechos de los ríos.

La agricultura de temporal anual y permanente se lleva a cabo en suelos de texturas gruesas. Dentro del sitio de estudio Sandoval (2016) reporta que San Nicolás tiene un bajo contenido de materia orgánica causando baja retención de agua para las plantas, alto grado de pedregosidad y susceptibilidad a la erosión. Al estar tan cerca de la zona urbana, las distintas actividades antrópicas han provocado una pérdida de la estabilidad de los agregados y la porosidad, compactación superficial del suelo, disminución de infiltración y aumenta la escorrentía y erosión del suelo.

Nealtican está situado en una zona urbanizada, brindando un fácil acceso al desarrollo de actividades agropecuarias (agricultura, ganadería y minería) dando paso a la introducción de especies, paso de maquinaria, establecimiento de viviendas. Presenta una pendiente de 9%, no obstante, no presenta un grado de erosión significativo puesto que no está desprovisto de vegetación impidiendo así el golpe directo de la lluvia al suelo, de igual modo las raíces sujetan el suelo y de esta manera actúan como una barrera contra la escorrentía. Desafortunadamente la vegetación encontrada en este sitio de estudio no es la natural, por lo que es muy evidente el desplazamiento de la vegetación nativa del sitio, a pesar de contrarrestar el grado de erosión, con el paso del tiempo no quedará huella de la vegetación original, ocasionando con ello también la expulsión de la fauna nativa del sitio.

Xalizintla sufre el mayor impacto por cambio de uso de suelo, en vista de que pierde la cubierta vegetal nativa y es sustituida por monocultivos o plantas de huertos, por lo que el

suelo esta suelto y disperso, provocando que las lluvias deslaven el suelo (Mena, 2018), llegando hasta perder el 50% de la MOS (Zavala *et al.*, 2011; Muñoz *et al.*, 2013). De acuerdo con Salgado (2020), el sitio cuenta con un porcentaje de 1.4% debido a lo antes mencionado. La disminución de la materia orgánica tiene efectos significantes sobre las propiedades físicas y mecánicas del suelo, sobre todo por la disminución en la capacidad de retención de humedad, (Cuevas, 2006). Evidenciando así el mal manejo de este, la labranza excesiva y la no aportación de MOS.

Al ser un suelo de tipo Fluvisol, no tiene la capacidad de absorción y retención de agua (Mena, 2018), por lo que se degradan las partículas de limo y arcilla aumentando la porción de arena.

Buenavista es un sitio ecoturístico con suelo conservado, debido a que está protegido por una cantidad importante de herbáceas, césped de gramíneas, mantillo de pino-encino (que funciona como aislante hídrico en la superficie manteniendo los contenidos de humedad estables) y hojarasca dispuesta en el suelo siendo un aporte continuo de MOS al suelo con un porcentaje de 6.45% (Mena, 2018) no presenta grandes signos de erosión aun cuando las pendientes encontradas en las laderas son muy pronunciadas de 8 a 21% reportado Sandoval (2016), Mena (2018), Santiago (2018) y Hernández (2020).

El suelo predominante en este sistema ribereño es Andosol Víttrico úmbrico, presenta una textura más gruesa que la limosa (franco arenoso), es considerado de los suelos más fértiles en este estudio.

Vallecito se localiza en el descenso de una ladera, cuenta con un relieve bastante irregular, con una pendiente del 3%. Sin embargo, la vegetación dominante en el sitio son el zacatonal y una población abundante de *P. hartwegii*, Gracias a ello la calidad ambiental del sitio media, ya que al no estar presente la vegetación, el suelo sufriría mayor pérdida y desgaste de su capa superficial.

Por otra parte, Cascada VW no presenta alteraciones de su estado natural, dadas las condiciones físicas del sitio, se encuentra en alto grado de conservación y su única perturbación es un sendero aparente, está protegido por una densa vegetación compuesta por

gramíneas amacolladas por lo que no hay presencia de erosión a pesar de contar con una pendiente bastante inclinada de 15 a 30%, de acuerdo con Sandoval (2020).

El suelo se clasificó como Andosol vítrico úmbrico (dístrico, tixotrópico, endoarénico) y se ha formado a partir de depósitos de caída de pómez de 5000 años. El tipo de suelo Andosol es de origen volcánico, constituido principalmente de ceniza. Normalmente tienen bajos rendimientos agrícolas ya que retienen el fósforo y éste no puede ser absorbido por las plantas. Este tipo de suelo es muy susceptible a la erosión eólica, para la conservación de estos suelos la práctica más adecuada es la de tipo forestal (Flores, 2016).



LABORATORIO DE EDAFOLOGÍA Y NUTRICIÓN VEGETAL

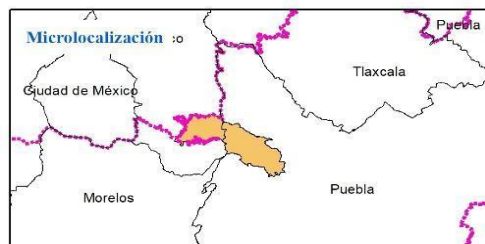
MAPA DE CALIDAD AMBIENTAL

**SIMBOLOGÍA**

**Calidad ambiental**

- Alta
- Media
- Muy baja

- Sitios de estudio
- Subregión del Alto Balsas



Elaborado por: Dayana Quiterio Morales  
Fecha de elaboración: 30/Abril/2022

**Referencia Cartográfica**  
Sistema de coordenadas: WGS 1984 UTM ZONA 14N  
Datum: WGS 1984

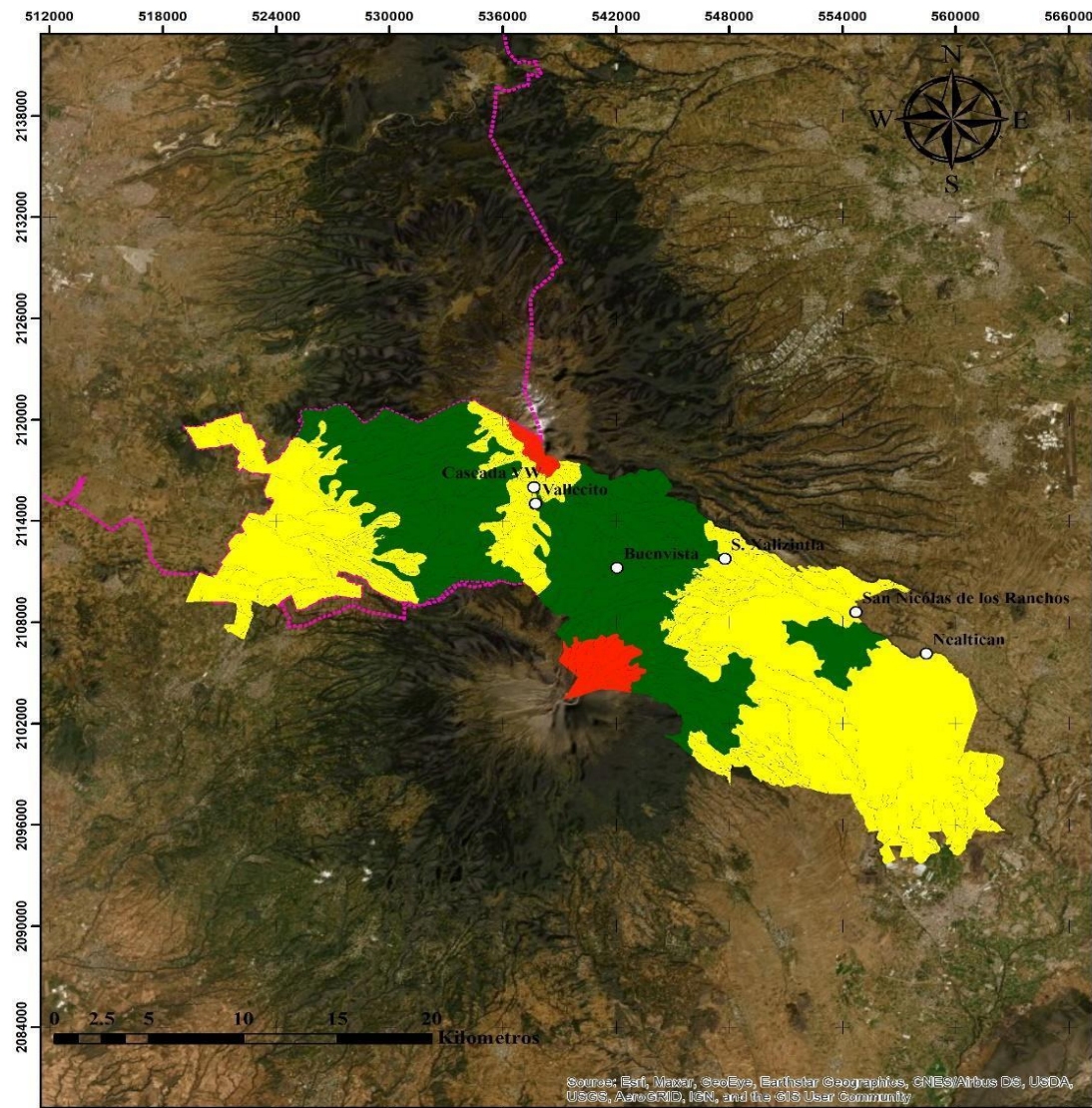


Figura 23. Mapa de calidad ambiental.

## Conclusiones

En el presente trabajo de investigación, el objetivo general planteado se cumplió de manera satisfactoria, debido al uso de la herramienta SIG se logró calcular la erosión hídrica presente en la subregión del Alto Balsas donde se demostró que es baja, de igual manera se evaluaron los cambios en la cobertura vegetal demostrando que hay invasión de otras especies en las zonas ribereñas, siendo que estas ayudan a la protección del suelo, asimismo estableciéndolos como indicadores biofísicos.

La hipótesis se acepta dado que como se mostró en los resultados aquellas zonas donde se presenta mayor cubierta vegetal y mayores altitudes los valores de erosión son bajos, en cambio los sitios que no cuentan con una cubierta vegetal abundando y menor altitud presentaron valores altos.

Al aplicar la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo modificada (RUSLE), se demostró que en la erosión potencial en la cual no se considera la vegetación para la mayoría de los sitios la calidad ambiental es muy alta y solo la Cascada VW es baja, por lo tanto, en la erosión actual la calidad ambiental en todos los sitios es muy alta, debido a la presencia de la vegetación arbustiva (vegetación secundaria).

Dentro de la cobertura natural, la calidad ambiental en la mayoría de los sitios, con excepción de Vallecito y Cascada VW, entra en muy baja, debido a que la mayor parte de su vegetación es secundaria arbustiva. Con apoyo del Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI), se observó que la vigorosidad fue de alta a baja, contribuyendo que la vegetación es sana ya que en estas fechas 02/enero/2021 la disposición del agua pluvial.

Los resultados obtenidos de acuerdo con los indicadores biofísicos nos demuestran que la calidad ambiental de la subregión del Alto Balsas es de media a alta, con una superficie 267,628,724.40 ha en la categoría media, esto se debe a la presencia de zonas recreativas cercanas al Parque Nacional Iztaccíhuatl Popocatépetl que se encuentra en lugar con mayor altitud y para la categoría muy baja con una superficie de 14,592,412.82 ha zona donde se encuentra el sector agrícola y pecuario.



El emplear indicadores edáficos, posibilita la toma de decisiones a corto plazo para evitar el deterioro de los ecosistemas ribereños, haciendo de estos una herramienta muy útil de valoración y diagnóstico permitiendo el planteamiento de métodos que ayudarían a reestablecer las condiciones originales de algún sitio, actuando a tiempo y no hasta que sea demasiado tarde.

## Referencias

- Acevedo, O. (2014). Identificación de las principales variables asociadas a condiciones de humedad. Recuperado de <http://repository.humboldt.org.co/bitstream/handle/20.500.11761/9613/14-13-014-017PS.pdf?sequence=1>
- Allan, J.D. (2004) Landscapes and Riverscapes: The influence of the land Use on stream ecosystems. *Annu. Rev. Ecol. Syst.* 35:257-284.
- Albaladejo, M. J., R. Martínez-MenayV. Castillo. 1998. Soil degradation and desertification induced by vegetation removal in a semiarid environment. *Soil Use Manage.* 14: 1-5
- Almarales, A., Castell, M, Fornaris, E., Portyondo, E. & Revilla, Y. (2017). Evaluación de la calidad ecológica de los hábitats de rivera de la cuenca del Río San Juan, Santiago de Cuba, Cuba. *Ciencia en su PC.* 2: 1-22.
- Alvarado, N. & Mainato, F. (2021). Trabajo experimental: Herramientas SIG para el estudio de la cobertura vegetal y cambio de uso de suelo en el Cantón Chunchi, Provincia de Chimborazo [Tesis de pregrado] Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.
- Balvanera, P. & Cotler, H. (2009). Estado y tendencias de los servicios ecosistémicos, En: CONABIO, Capital Natural de México, Vol. II: Estado de conservación y tendencias de cambio, México.
- Bannari, A., Morin, D., Bonn, F., and Huete, A. (1995). A review of vegetation indices. *Remote Sensing Reviews.*
- Becerra, A. (2005). Erosión de suelos. Apuntes de la primera parte del curso de Conservación de Suelos, México, Universidad Autónoma Chapingo. Departamento de Suelos. Área de Recursos Naturales.

- Benda, L., N.L. Poff, D. Miller, T. Dunne, G. Reeves, G. Pess & M. Pollock. (2004). The network dynamics hypothesis: how channel networks structure riverine habitats. *BioScience* 54: 413-427
- Bermúdez, F. L., y Rafaelli, S. (2011). La degradación de los suelos por erosión hídrica. *Métodos de estimación (Vol. 4)*. Editum.
- Blanco, H., Lal, R. (2008). *Principles of soil conservation and management*. Springer, USA.
- Cabrera Carranza, C., Maldonado Dongo, M., Arévalo Gómez, W., Pacheco Abad, R., Giraldo Vega, A., & Loayza Cárdenas, S. (2002). Relaciones entre calidad ambiental y calidad de vida en Lima Metropolitana. *Revista Del Instituto De investigación De La Facultad De Minas, Metalurgia Y Ciencias geográficas*, 5(9), 47–52. <https://doi.org/10.15381/iigeo.v5i9.664>
- Camargo, C., Pacheco, C., López. R. (2017). Erosión hídrica, fundamentos, evaluación y representación cartográfica: una revisión con énfasis en el uso de sensores remotos y Sistemas de Información Geográfica. *Gestión y Ambiente* 20(2), pp. 265-280.
- Campos, A., Alvarado, S. y Vázquez, G. (2021). Suelos ribereños y su importancia para el bien común. Recuperado de: <https://www.inecol.mx/inecol/index.php/es/ct-menu-item-25/ct-menu-item-27/17-ciencia-hoy/1300-suelos-riberenos-y-su-importancia-para-el-bien-comun#:~:text=Los%20suelos%20ribere%C3%B1os%20favorecen%20la,entre%20ellos%20nutrientes%20o%20contaminantes>).
- Castillo, J. & Estrada, Jose. (2016). Determinación de zonas de erosión hídrica a partir de la ecuación universal de la pérdida del suelo (R.U.S.L.E), sistemas de información geográfica y técnicas de teledetección en la ciudad de Bogotá D.C para el año 2013 [Tesis de pregrado]. Universidad distrital francisco José de Caldas, Bogotá D.C.
- Ceccon, E. (2003). Los bosques ribereños y la restauración y conservación de las cuencas hidrográficas. *Ciencias*, 72, 46–53.
- Chuvieco, E. (1990). *Fundamentos de Teledetección espacial*. España, Ediciones RIALP, S.A.
- Chuvieco, E. (2008). *Teledetección ambiental. La observación de la tierra desde el espacio*. (3.<sup>a</sup> ed.). Barcelona: Editorial Ariel, S.A.

- Colli, C. (2015). Actividades arilsulfatasa y ureasa en la fertilidad de suelo ribereños del Parque Nacional Izta-Popo y su zona de influencia. [Tesis de pregrado]. FES Zaragoza, UNAM. México.
- CONANP (2022). <http://iztapopo.conanp.gob.mx/>. Consultado el 21 de marzo del 2022
- Cotler, Helena (2020). Manual para evaluar la erosión de los suelos en zonas forestales. Fondo Mexicano para la Conservación de la Naturaleza, México.
- Cotler, H. (Coord). (2010). Las cuencas en México. Diagnóstico y priorización. Pluraria, México.
- Cortés T. (1991). “Caracterización de la erosividad de la lluvia en México utilizando métodos multivariados”. Tesis de Maestría en Ciencias. Colegio de Postgraduados, pp 168, México.
- Cruz, F. G. (2006). Ecología del suelo. Un enfoque hacia la nutrición mineral de plantas superiores. Universidad Nacional Autónoma de México. México, D.F.
- Cruz-Flores, G. (2017). Introducción a los sistemas ribereños de montaña. En G. Cruz-Flores, E. A. Guerra Hernández, G. Cruz-Flores, & E. A. Guerra-Hernández (Edits.), Ecosistemas Ribereños de Montaña. Descripción y estudio (págs. 1-8). México ISBN: 978-607-02-9875-2: UNAM-FES ZARAGOZA.
- Cuevas, B. J. (2006). Efecto de la materia orgánica y el manejo sobre la hidrofobicidad de suelos volcánicos. R.C. Suelo de Nutrición Vegetal 6(2): 13-27
- Curran, P.J. (1981). Multispectral remote sensing of vegetation amount, Progress in Physical Geography, 4, 315-34.
- Couper, P.R. (2004). Space and time in riverbank erosion research: A review. Area 36: 387-103.
- Díaz, J. (2015). Estudio de Índices de vegetación a partir de imágenes aéreas tomadas desde UAS/RPAS y aplicaciones de estos a la agricultura de precisión [Tesis de maestría] Universidad Complutense de Madrid, Madrid.
- Del Río, J. (2010). Introducción al tratamiento de datos espaciales en la hidrología. Ed Bubok.
- Doran, J. W., and T. B. Parkin. (1994). Defining and Assessing Soil Quality. pp. 3-22. In: J. Doran, Coleman D, Bezdicek D. y Stewart B. (ed.). Defining Soil Quality for a Sustainable Environment SSSA Special Publication No. 35. Wisconsin, U.S.A.

- Dufour S. & Rodríguez-González P. (2019). Riparian zone / riparian vegetation definition: principles and recommendations. Report, COST Action CA16208 CONVERGES, 20 p.
- Durán, R., & Méndez, M. E. (2010). Bioiversidad y Desarrollo Humano en Yucatán, CICY, PPD-FMAM, CONABIO, SEDUMA.
- Escobar, L. (2006). Indicadores sintéticos de calidad ambiental: un modelo general para grandes zonas urbanas. *Revista eure*. Volumen (32), pp. 73-98
- Etchevers, J. D., M. A. Bautista y M. A. Vergara. (2000). Calidad del suelo, indicadores de calidad y captura de carbono. Pp.507-520. In: R. Quintero - Lizaola, T. Reyna - Trujillo, L. Corlay Chee. A. Ibáñez - Huerta y N. E. García - Calderón. (ed.). *La Edafología y sus perspectivas al siglo XXI*. Tomo II. Colegio de Postgraduados, UNAM, UACH. México.
- FAO (Food and Agriculture Organization of the United Nations). (2015). Chapter 6: Global soil status, processes, and trends. In: FAO. *Status of the World's Soil Resources*. Rome, Italy. ISBN 978-92-5-109004-6
- FAO. (2006). *Guidelines for soil description*. 4th edition. Rome.
- 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 de pregrado]. Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad de México.
- Gama, C., Carreón, F., Palacios, M. y Solleiro, R. (1999). Génesis, identificación y uso de los suelos de México: Distribución, propiedades, clasificación y manejo de suelo residuales y transportados con aplicaciones a la Ingeniería Civil. Instituto Mexicano del Transporte e Instituto de Geología. UNAM. México.
- Gardi, C., M. Angelini, S. Barceló. (2014). *Atlas de suelo de América Latina y el Caribe*. Comisión Europea. Oficina de Publicaciones de la Unión Europea, Luxemburgo
- Geler, T., Penteado, C. & Perez, A. (s.f.). Análisis del factor-LS en diferentes modelos de predicción de la erosión hídrica del suelo. Consultado 22 de marzo del 2022
- Granados-Sánchez D., Hernández-García M. A. & López-Ríos G. (2006). Ecología de las Zonas Ribereñas. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*. 12(1): 55-69

- Grissinger, E.H. (1982). Bank erosion of cohesive materials, p. 273-287. En R.D. Hey, J.C. Bathurst, C.R. Thorne (eds). *Gravel-bed Rivers*. Wiley, Nueva York.
- Hamilton, L.S. (1987). What are the impacts of Himalayan deforestation on the Ganges-Brahmaputra lowlands and the delta? Assumptions and facts. *Mountain Research and Development*, 7: 3.
- Hernández, C. (2017). Estimación de la presencia de algas en cuerpos de agua mediante de Índices de vegetación [Tesis de pregrado] Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad de México.
- Ibáñez, S., Moreno, H. (s.f.). Procesos formadores de suelos: argiluvación. Recuperado de <https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/122818/Iba%C3%B1ez?sequence=1>
- INEGI. (2014). Diccionario de datos de uso de suelo y vegetación Escala 1: 250,000. En I. N. Geografía. México
- INEGI (2014). Erosión de suelos en México.
- INEGI (Instituto Nacional de Estadística y Geografía). (2014). Guía para la interpretación de la cartografía de erosión del suelo escala 1: 250 000 Serie I. INEGI, Aguascalientes, México. ISBN 978-607-739-013-8
- INEGI (Instituto Nacional de Estadística y Geografía). (1985). Las técnicas de la Teledetección en el Instituto Nacional de Estadística, Geografía e informática. México, D.F. ISBN 968-809-494-3
- IUSS Working Group WRB. 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.
- Jaramillo, J. (2014). El suelo: origen, propiedades, espacialidad, 2ª ed. Universidad Nacional de Colombia, Medellín, Colombia.
- Jacobsen, D., R. Schultz & A.C. Encalada. (1997). Structure and diversity of stream invertebrate assemblages: the influence of temperature with altitude and latitude. *Freshwater Biol.*38(2): 247-261. DOI: <https://doi.org/10.1046/j.1365-2427.1997.00210.x>
- Jensen JR (2007) *Remote sensing of the environment: an earth resource perspective*, 2nd edn. Prentice Hall, Upper Saddle River, NJ

- Jensen, J. (2013). Remote sensing of the environment: An Earth Resource Perspective (2nd Edition). Upper Saddle River, NJ: Pearson Prentice Hall. 608 p.
- Lantada, N. & Núñez, M. (2002). Recuperado de: <https://books.google.com.mx/books?id=gZR1xLUBRxxC&pg=PA15&dq=modelo+raster+y+vectorial&hl=es-419&sa=X&ved=2ahUKEwi2m4jxpb2AhV7IUQIHRloBQUQ6AF6BAgLEAI#v=onepage&q=modelo%20raster%20y%20vectorial&f=true>
- Lanza, G., Cáceres, C., Adame, D. & Hernández S. (2015). Diccionario de hidrología y ciencias afines. Recuperado de <https://books.google.com.mx/books?id=My27250twg0C&pg=PA93&dq=cuenca+endorreica+y+exorreica&hl=es-419&sa=X&ved=2ahUKEwjP0pCExpT2AhVmI0QIHRcRBEC06AF6BAgDEAI#v=onepage&q=cuenca%20endorreica%20y%20exorreica&f=true>
- Lujan, N.K., K.A. Roach, D. Jacobsen, K.O. Winemiller, V.M. Vargas, V.R. Ching & J.A. Maestre. (2013). Aquatic community structure across an Andes-toAmazon fluvial gradient. *Journal of Biogeography*, 40 (9): 1715-1728. DOI: <https://doi.org/10.1111/jbi.12131>
- Maruri, J. (2002). Índice de Vegetación (NDVI). Secretaria de Desarrollo Agropecuario, México, Querétaro, Qro.
- McCool, D.K.; Foster, G.R. y Yoder, D.C. The Revised Universal Soil Loss Equation, Version 2. ISCO 2004 – 13th International Soil Conservation Organisation Conference – Brisbane, July.
- Mena, B. (2018). Infiltración de agua en suelos ribereños con distintos tipos de vegetación sobre un sistema fluvial en el Parque Nacional Izta-popo y zonas de influencia [Tesis de pregrado] Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad de México.
- MMA (1996). Indicadores ambientales. Una propuesta para España. Madrid: Dirección General de Calidad y Evaluación Ambiental, Ministerio de Medio Ambiente.
- Montes-León, María Alejandrina Leticia, Edgar Misael Uribe-Alcántara, y Efraín García-Celis. (2011). “Mapa nacional de erosión potencial”. *Tecnología y ciencias del agua* 2(1):05–17.

- Molina, J. (2020). CONFIABILIDAD DEL MAPA DE CAMBIO DE USO DE SUELO Y COBERTURA VEGETAL ESTIMADO POR MÚLTIPLES SENSORES: APLICACIÓN A LA ZONA NÚCLEO DE LA RESERVA DE LA BIOSFERA DE LA MARIPOSA MONARCA EN EL PERIODO DE 2003-2011 [Tesis de maestría]. Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad de México.
- Muñoz, P. (2013). Índices de vegetación [archivo PDF]. Recuperado de <http://bibliotecadigital.ciren.cl/bitstream/handle/123456789/26389/Tema%20Indice%20de%20vegetaci%C3%B3n%20Pedro%20Mu%C3%B1oz%20A.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Myneni, R. B., Keeling, C. D., Tanser, C. J., Asrar, G., and Nemani, R. R. (1997). Increased plant growth in the northern high latitudes from 1981 to 1991. *Nature* 386, 698–702. doi: 10.1038/386698a0
- Naiman, R. y H. Décamps y M. McClain (2010). *Riparia: Ecology, Conservation and Management of Streamside Communities*. Elsevier Academic Press. 440p.
- Naiman, R. J, Décamps, H. y McClain, M. E. (2005). *Riparia: ecology, conservation, and management of streamside communities*. London: Academic Press.
- OCDE. *Indicators for the Integration of Environmental Concerns into Energy Policies*. Environment Monographs 79. France. 1993.
- Olaya, V. (2014). *Sistemas de Información Geográfica*. Recuperada de: [https://www.icog.es/TyT/files/Libro\\_SIG.pdf#page108](https://www.icog.es/TyT/files/Libro_SIG.pdf#page108)
- Oldeman, L. R., D. J. Greenland, and I. Szabolcs. 1994. The global extent of soil degradation. pp. 99-118. In: D. J. Greenland and I. Szabolcs (eds.). *Soil resilience and sustainable land use*. CAB International. Wallingford, CT, USA.
- Ortiz B., Ortiz C., (1990). *Edafología*. Universidad Autónoma Chapingo. Editorial V.A Gómez Cuevas, México. Pág. 21-24.
- Parra, M., Fernández, R., Navarro, C. & Arquero, O. (2003). *LOS SUELOS Y LA FERTILIZACIÓN DEL OLIVAR CULTIVADO EN ZONAS CALCÁREAS*. Madrid: Mundi-Prensa.
- Pedraza, A. (2015). *ESTIMACIÓN DE LA EROSIÓN HÍDRICA MEDIANTE DOS MÉTODOS DE LA ECUACIÓN UNIVERSAL DE PÉRDIDA DE SUELO (EUPS)*

- EN LA CUENCA DEL RÍO CHAPINGO, TEXCOCO [Tesis de pregrado].  
Universidad Autónoma del Estado de México, Toluca de Lerdo.
- Peña, R: (2013). Dinámica de la calidad de sitio a través de una crono secuencia volcánica y sus implicaciones para la productividad forestal. [Tesis de doctorado]. Posgrado en Ciencia Biológicas, UNAM, México.
- Perevochtchikova, M. (2013). La Evaluación del impacto ambiental y la importancia de los indicadores ambientales. *Gestión y Política Pública*, Vol. 22, Núm. 2. Pp 283-312
- Porta, J y López, M. (2005). *Agenda de campo de suelos, Información de suelos para la agricultura y el medio ambiente*. Ediciones Mundiprensa, México.
- Porta, J., López-Acevedo, M., Poch, R. (2019) *Edafología. Uso y protección de suelos*. Madrid: Mundi-Prensa.
- Posada M. & Arroyave, M. (2015). Análisis de la calidad del retiroribereño para el diseño de estrategias de restauración ecológica en el Río La Miel, Caldas, Colombia. *Revista EIA*. 12 (23): 117-128.
- Renard, KG y Freimund, JR (1994) Uso de datos de precipitación mensual para estimar el factor R en el USLE revisado. *Revista de hidrología*, 157, 287-306.
- Rodríguez-Téllez E., García-De-Jalón, D., Pérez-López, M., Torres-Herrera, S., Ortiz-Carrasco, R., Pompa-García, M., Morales-Montes, M., García-García, D., Zamudio-Castillo, E. & Vázquez-Vázquez, E. (2016). Caracterización de la calidad ecológica del bosque de galería del río La Saucedá, Durango, México. *Hidrobiológica*. 26 (1): 35-40.
- Rojas, A. (2011). Calidad de vida, calidad ambiental y sustentabilidad como conceptos urbanos complementarios. *Fermentum. Revista Venezolana de Sociología y Antropología*, 21(61), 176-207
- Rouse, J.W., R.H. Haas, J.A. Schell, and D.W. Deering. (1974). Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS, In: S.C. Freden, E.P. Mercanti, and M. Becker (eds) *Third Earth Resources Technology Satellite-1 Symposium. Volume I: Technical Presentations*, NASA SP-351, NASA, Washington, D.C., pp. 309-317
- Rucks, L., García, F., Kaplán, A., Ponce de León, J. & Hill, M. (2004). *Propiedades físicas del suelo*. Universidad de la Republica. Montevideo-Uruguay.



- Salgado, G. (2020). Abundancia de bacterias de los géneros *Azospirillum* y *Azotobacter* en suelos ribereños y su relación con sus contenidos de nitrógeno total en un gradiente altitudinal de la Reserva de la Biosfera los Volcanes. [Tesis de pregrado]. Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad de México.
- Sánchez, F. (2011). APLICACIÓN DE SENSORES ACTIVOS Y PASIVOS EN LA CIRCULACIÓN SUPERFICIAL DE MESOESCALA EN LA PARTE SUR DEL GOLFO DE MÉXICO (BAHÍA DE CAMPECHE). [Tesis de maestría]. Instituto politécnico Nacional, La Paz, B.C.S.
- Sanz, J., Bustamante, I., Goy, J., Graña, A., Barrera, I., González, F. & Forteza, J. (2008). Erosión actual y potencial en el Paisaje Protegido de El Rebollar (Sierra de Gata – Salamanca).
- Segnestam, L. (2002). “Indicators of environment and sustainable development: Theories and practical experience”. Environmental Economics Series. 89, The World Bank Environment Department.
- Sellers, P. (1989). Vegetation – Canopy Spectral reflectance and Biophysical processes, en Theory and applications of optical Remote Sensing, ED. G Asrar, Wiley, New York, 297-335.
- SEMARNAT. (2002). Informe de la situación del medio ambiente en México. Compendio de estadísticas ambientales 2002. Obtenido de [http://www.paot.org.mx/centro/ine-semarnat/informe02/estadisticas\\_2000/informe\\_2000/02\\_Vegetacion/2.1\\_Vegetacion/index.htm](http://www.paot.org.mx/centro/ine-semarnat/informe02/estadisticas_2000/informe_2000/02_Vegetacion/2.1_Vegetacion/index.htm)
- SEMARNAT. (2011). ¿Qué amenaza a la biodiversidad? En SEMARNAT, Serie ¿Y el medio ambiente? Biodiversidad. Conocer para conservar (pág. 189). México: Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales.
- SEMARNAT (2012). Informe de la Situación del Medio Ambiente en México. Compendio de Estadísticas Ambientales. Indicadores Clave y de Desempeño Ambiental.
- SEMARNAT (2018) Informe de la Situación del Medio Ambiente en México.
- Seybold, C.A., M.J. Mausbach, D.L. Karlen y H.H. Rogers, 1997. Quantification of soil quality. pp. 387-404. In: Rattan, L., J.M. Kimble, R. F. Follett. B.A. Stewart. (ed.). Soil processes and the carbon cycle. CRC. U.S.A.

- S.G.M. (2017). Introducción Sistemas de información geográfica. Gobierno de México.  
<https://www.sgm.gob.mx/Web/MuseoVirtual/SIG/Introduccion-SIG.html>
- Simon, A. & M. Rinaldi. (2000). Channel evolution in the loess area of the Midwestern United States. *J. Am. Water. Resour. As.* 36: 133-150.
- Sturm T. W. (2001). *Open Channel Hydraulics*. McGraw Hill. New York, USA. 364 pp.
- Tabacchi, E., Planty-Tabacchi, A. M., Salinas, M. J. y Décamps, H. (1996). Landscape structure and diversity in riparian plant communities: a longitudinal comparative study. *Rivers Research and Applications*, 12, 367–390. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1099-1646\(199607\)12:4/53.0.CO;2-X](https://doi.org/10.1002/(SICI)1099-1646(199607)12:4/53.0.CO;2-X)
- Tarbuck, E., & Lutgens, F. (2005), *Ciencias de la tierra una introducción a la geología física*, Madrid, PEARSON EDUCACIÓN S.A.
- Towers, P. (2002). *Conceptos Iniciales sobre Teledetección y su Aplicación al Agro*. Buenos Aires, 138 p
- U.S. DEPARTMENT OF AGRICULTURE (2016). Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE) - Welcome to RUSLE 1 and RUSLE 2. Agricultural Research Service.  
<https://www.ars.usda.gov/southeast-area/oxford-ms/national-sedimentation-laboratory/watershed-physical-processes-research/docs/revised-universal-soil-loss-equation-rusle-welcome-to-rusle-1-and-rusle-2/>
- Vázquez G., J. G. Garcia Franco, G. Castillo, F. Escobar, A. Guillén, M. L. Martínez, K. Mehlreter, R. Novelo, E. Pineda, V. Sosa, C., Valdepino, A. Campos C., R. Landgrave, E. Montes de Oca, A. Ramírez, J. Galindo. (2015). Ecosistemas ribereños: un paisaje fragmentado. *CONABIO. Biodiversitas*, 119:7-1
- Villamarín, C., Prat, N. & Rieradevall, M. (2014). Caracterización física, química e hidromorfológica de los ríos altoandinos tropicales de Ecuador y Perú. *Latin American Journal of Aquatic Research*.42 (5): 1072-1086. DOI: <http://dx.doi.org/10.3856/vol42-issue5-fulltext-12>
- Wischmeier, W. H. and Smith D.D. (1965). “Predicting rainfall erosion losses. A guide to conservation planning”. U.S. Department of Agriculture Handbook, No. 537.