



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA CHAPINGO

**DIVISIÓN DE CIENCIAS FORESTALES
MAESTRÍA EN CIENCIAS EN CIENCIAS FORESTALES**

CONTRIBUCIONES DE LA NATURALEZA EN AXTLA DE TERRAZAS, SAN LUIS POTOSÍ

TESIS

**Que como requisito parcial
para obtener el grado de:**

MAESTRA EN CIENCIAS EN CIENCIAS FORESTALES

Presenta:

NANCY PATRICIA MARCOS TERRAZAS

Bajo la supervisión de: DR. GENARO AGUILAR SÁNCHEZ



**Maestría en Ciencias
en Ciencias Forestales**

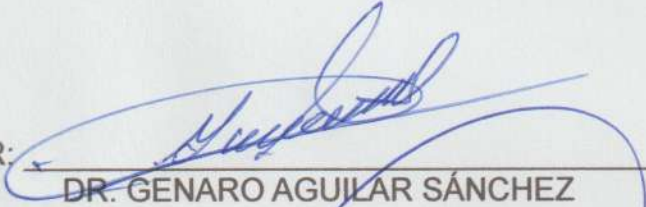
Chapingo, Estado de México, agosto 2025

CONTRIBUCIONES DE LA NATURALEZA EN AXTLA DE TERRAZAS, S.L.P.

Tesis realizada por **NANCY PATRICIA MARCOS TERRAZAS** bajo la supervisión del Comité Asesor indicado, aprobada por el mismo y aceptada como requisito parcial para obtener el grado de:

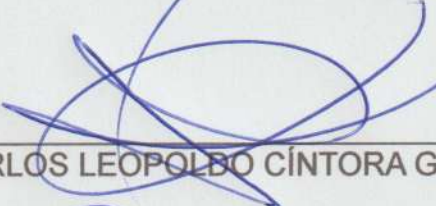
MAESTRA EN CIENCIAS EN CIENCIAS FORESTALES

DIRECTOR:



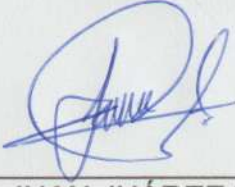
DR. GENARO AGUILAR SÁNCHEZ

ASESOR:



DR. CARLOS LEOPOLDO CÍNTORA GONZÁLEZ

ASESOR:



M.C. JUAN JUÁREZ MENDEZ

CONTENIDO

LISTA DE CUADROS	v
LISTA DE FIGURAS	vi
ABREVIATURAS	vii
DEDICATORIA.....	viii
AGRADECIMIENTOS	ix
DATOS BIOGRÁFICOS	x
RESUMEN GENERAL	xi
CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN GENERAL	1
1.1 Antecedentes.....	1
1.2 Justificación.....	11
1.3 Hipótesis.....	12
1.4 Objetivos	12
1.4.1 Objetivo general.....	12
1.4.2 Objetivos específicos	12
1.5 Contenido capitular del documento de titulación	13
1.6 Literatura citada.....	14
CAPÍTULO 2. REVISIÓN DE LITERATURA	18
2.1 Delimitación de unidades de estudio	18
2.1.1 Método de Hills	18
2.1.2 Método de Mc Harg	21
2.1.3 Método fisiográfico.....	23
2.1.4 Método de microcuencas.....	24
2.2 Vinculación con los Objetivos de Desarrollo Sostenible	26
2.3 Casos de estudio.....	27
2.3.1 Disponibilidad de agua.....	27
2.3.2 Control de la erosión.....	31

2.4 Literatura citada.....	35
CAPÍTULO 3. CONTRIBUCIONES DE LA NATURALEZA EN AXTLA DE TERRAZAS, SAN LUIS POTOSÍ: UNA APROXIMACIÓN MEDIANTE SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA.....	39
CAPÍTULO 4. CONCLUSIONES GENERALES.....	69

LISTA DE CUADROS

Cuadro 1. Tabla 1. Clasificación de las 18 CNP, consideradas por el IPBES. Tomado de Hill et al., 2021.	7
Cuadro 2. Metodología para delimitar microcuencas en ArcGIS. Modificado de Macas Cobeña et al., 2023.	25

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Evolución conceptual del enfoque de contribuciones de la naturaleza. Modificado de (Caro, et al., 2015).....	4
Figura 2. Tendencias globales de la capacidad de las CNP desde 1970 hasta la actualidad. Tomado de (Díaz et al., 2019).....	10
Figura 3. Estructura capitular de la tesis.....	13
Figura 4. Diagrama del método de Hills. Tomado de Gómez Orea & Gómez Villarino, 2013.	20
Figura 5. Secuencia del método de Mc Harg. Tomado de Gómez Orea & Gómez Villarino, 2013	22
Figura 6. Secuencia del método fisiográfico. Tomado de Saavedra Guerrero & López López, 2019.	23

ABREVIATURAS

CNP	Contribuciones de la Naturaleza para las Personas
DEM	Modelo Digital de Elevación
EUPS/USLE/RUSLE	Ecuación Universal de Pérdida de Suelo
FAO	Food and Agriculture Organization of the United Nations / Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura
INEGI	Instituto Nacional de Estadística y Geografía
INIFAP	Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias
IPBES	Plataforma Intergubernamental Científico-Normativa sobre Diversidad Biológica y Servicios de los Ecosistemas
IPCC	Panel Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático
ODS	Objetivos de Desarrollo Sostenible
ONU	Organización de las Naciones Unidas
SE	Servicios ecosistémicos
SIG	Sistemas de Información Geográfica

DEDICATORIA

A Dios, por siempre estar para mí y sostenerme. Porque de Él, por Él y para Él son todas las cosas, a Él sea la gloria por siempre. ¡Gracias! Gracias por los ángeles en forma de personas o animales que envía a mi vida y por lo más importante, mis seres queridos.

A mi hermanita Naomi, por ser mi principal motivación para ser mejor que ayer, por colorear mi vida con los matices más brillantes con su personalidad.

A mi mamá Neli, por su gran ejemplo de resiliencia y fuerza. Mi admiración y amor eternos.

A Benjamín, mi mejor amigo y compañero de vida, por su gran apoyo, su confianza en mí y por supuesto, por su amor.

A mis abuelos José y Sofía. Por la comida deliciosa, pláticas y risas. Por sus ánimos y cariño.

A la memoria de mi bisabuela Benita, mi segunda mamá, por siempre creer en mí, por su gran ejemplo y seguir siendo mi guía, en esencia.

A la memoria de mi tío Marcos, por haber sido el primero de la familia en estudiar una carrera universitaria, sin perder nunca la humildad. Por su apoyo durante mis estudios universitarios.

A mis amigos y familia, que tan sólo con un mensaje alegraban mi día, que confiaron y confían en mí, por sus porras y apoyo emocional.

A Bichi, mi gatito, por sus dulces y sanadores ronroneos.

Finalmente, gracias a las personas que de alguna u otra manera coincidieron conmigo o me ayudaron en esta etapa tan bonita.

Con cariño.

AGRADECIMIENTOS

A la **Universidad Autónoma Chapingo**, mi alma mater, mi más sincero agradecimiento por brindarme la oportunidad de realizar este posgrado y por ser la base sólida de mi formación académica y profesional.

Al la **Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación (SECIHTI)**, gracias por el apoyo otorgado a través de sus becas, que hicieron posible la continuación de mis estudios y el desarrollo de esta investigación.

A la **División de Ciencias Forestales**, por la disposición y accesibilidad al uso de sus instalaciones, así como por el apoyo de su personal académico y administrativo.

A mis asesores de investigación, el **Dr Genaro Aguilar Sánchez**, mi director de tesis, por compartir sus vastos conocimientos, su apoyo y paciencia; al **Dr. Carlos Leopoldo Cántora González** por su acompañamiento en la parte estadística, su accesibilidad y apoyo; al **M.C. Juan Juárez Méndez** por su orientación, tiempo y apoyo en la parte de Sistemas de Información Geográfica.

A la **administración municipal** y a cada una de **las localidades de Axtla de Terrazas** en las que se llevó a cabo levantamiento de datos. Por su accesibilidad.

DATOS BIOGRÁFICOS



Nombre: Nancy Patricia Marcos Terrazas

Lugar y fecha de nacimiento: Ciudad de México, 20 de octubre de 1997

Carrera de licenciatura: Ingeniería en Recursos Naturales Renovables

Institución de egreso: Universidad Autónoma Chapingo

Cedula profesional: 13452108

Vivió su niñez en el municipio de Axtla de Terrazas, San Luis Potosí. Estudió en el Centro de Bachillerato Tecnológico Agropecuario no. 122 la orientación de informática, a nivel preparatoria. Posteriormente estudió la ingeniería en Recursos Naturales Renovables en la Universidad Autónoma Chapingo, titulada por medio del diplomado Evaluación del Impacto Ambiental en el Sector Primario. Realizó su servicio social y estancia preprofesional en Social Tech México, en donde colaboró en la transferencia de tecnología a comunidades indígenas cafetaleras. Profesionalmente, se ha desempeñado como consultora y técnica de campo en los estados de Guerrero, Quintana Roo y Yucatán, en proyectos de compensación ambiental, pago por servicios ambientales y aprovechamiento forestal. Concluyó el diplomado de Educación Ambiental y Conservación de Vida Silvestre en el Instituto Mexicano de Fauna, Flora y Sustentabilidad Social A.C. en el 2024. De 2023 a 2025 cursó la Maestría en Ciencias en Ciencias Forestales en la Universidad Autónoma Chapingo.

RESUMEN GENERAL

Contribuciones de la naturaleza en Axtla de terrazas, S.L.P.

El presente trabajo tuvo como objetivo calcular la erosión y la disponibilidad hídrica en el municipio de Axtla de Terrazas, San Luis Potosí. Se plantearon tres objetivos: (1) delimitar microcuencas como unidades de estudio, (2) estimar tasas de erosión actuales y para el futuro cercano (2026) bajo tres escenarios, y (3) estimar el flujo hídrico presente y proyectado.

Se delimitaron 24 microcuencas mediante SIG, considerando factores como relieve, dirección y acumulación de flujo, y puntos de salida. Los valores faltantes de precipitación y temperatura se imputaron usando el filtro de Kalman. Se utilizaron modelos de series de tiempo (SARIMA y ARIMA) para predecir dichas variables. Se aplicó la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo para estimar la erosión actual y 3 escenarios: (1) empleando prácticas de manejo actuales, (2) sin prácticas y, (3) con prácticas mejoradas.

El 13.46% del territorio municipal (2,572 ha) presentó pérdidas de suelo superiores a 10 ton/ha/año. En el escenario 1, se esperaría una reducción del área afectada al 11.91%. En contraste, el escenario 2 proyecta un aumento al 15.47%, mientras que, el escenario 3 refleja una reducción considerable al 2%.

Se construyó un balance hídrico de acuerdo con el método de Thornthwaite. Se encontró que la escorrentía es continua a lo largo del año, con una distribución espacial del saldo neto del agua anual de 104 mm a 920 mm y de 524 mm a 805 mm, para la línea base y el 2026, respectivamente, y con fluctuaciones entre estaciones. En la condición inicial, el estiaje ocurrió de diciembre a mayo y el excedente de junio a noviembre; para 2026 se espera estiaje de octubre a mayo y superávit de junio a septiembre, con variaciones mensuales.

Se identificaron microcuencas prioritarias para intervención (2, 6, 17, 18, 20 y 21).

Palabras clave: USLE, microcuenca, contribuciones de la naturaleza, balance hídrico

Tesis de Maestría en Ciencias en Ciencias Forestales, Universidad Autónoma Chapingo

Autora: Nancy Patricia Marcos Terrazas

Director de tesis: Genaro Aguilar Sánchez

GENERAL ABSTRACT

Nature's contributions in Axtla de Terrazas, San Luis Potosí

The objective of this work was to calculate erosion and water availability in the municipality of Axtla de Terrazas, San Luis Potosí. Three objectives were established: (1) to delimit micro-watersheds as study units, (2) to estimate current and near-future (2026) erosion rates under three scenarios, and (3) to estimate current and projected water flow. Twenty-four micro-watersheds were delimited using GIS, considering factors such as relief, flow direction and accumulation, and outlet points. Missing precipitation and temperature values were imputed using the Kalman filter. Time series models (SARIMA and ARIMA) were used to predict these variables. The Universal Soil Loss Equation was applied to estimate current erosion and three scenarios: (1) using current management practices, (2) without practices, and (3) with improved practices. 13.46% of the municipal territory (2,572 ha) presented soil losses greater than 10 tons/ha/year. In scenario 1, a reduction of the affected area to 11.91% is expected. In contrast, scenario 2 projects an increase to 15.47%, while scenario 3 shows a considerable reduction to 2%. A water balance was constructed according to Thornthwaite. It was found that runoff is continuous throughout the year, with a spatial distribution of the annual net water balance ranging from 104 mm to 920 mm and from 524 mm to 805 mm, for the baseline and 2026, respectively, with fluctuations between seasons. In the initial condition, the dry season occurred from December to May and the surplus from June to November; for 2026, a dry season is expected from October to May and a surplus from June to September, with monthly variations. Priority micro-watersheds were identified for intervention (2, 6, 17, 18, 20, and 21).

Keywords: USLE, micro-watershed, nature's contributions, water balance

Thesis: Master of Science in Forest Sciences, Universidad Autónoma Chapingo
Author: Nancy Patricia Marcos Terrazas
Advisor: Genaro Aguilar Sánchez

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN GENERAL

1.1 Antecedentes

Las contribuciones que la naturaleza hacia a las personas (CNP) abarcan tanto los beneficios como los efectos negativos que podemos experimentar debido a la diversidad de seres vivos, ecosistemas y procesos ecológicos. Estas contribuciones muestran cómo nuestras vidas se ven influenciadas, de manera positiva o negativa, por nuestra relación con el entorno natural (Alonso et al., 2024)

Existen tres grupos en los que se dividen las CNP: contribuciones materiales, no materiales y contribuciones de regulación o regulatorias, esta última, incluye a la purificación del agua, la regulación del clima, y la protección contra la erosión del suelo, entre muchos otros procesos. Sin embargo enfrentan una serie de amenazas que comprometen su integridad y sostenibilidad. Tal es el caso del cambio de uso de suelo, afectando negativamente la capacidad de los ecosistemas para almacenar agua, aumentando la escorrentía y disminuyendo la infiltración (Campos, et al. 2022).

Todo esto se suma a los estragos del cambio climático global, que incide en las variables climáticas que componen al balance hídrico, como son, la temperatura, precipitación y evapotranspiración. Todo ello afecta, a la par, a la disponibilidad y variabilidad hídrica (Ivanova, 2022).

En este contexto, el cálculo de un balance hídrico y tasas de erosión a nivel cuenca, subcuenca, microcuenca, e incluso a nivel municipal, resulta en una herramienta que permite comprender la dinámica del ecosistema y aporta en la gestión sostenible del territorio y la conservación de las CNP.

Concepto de CNP

A lo largo de la historia, la relación entre los seres humanos y la naturaleza ha sido objeto de profunda reflexión y explicación. En la tradición occidental, la

evolución del concepto de naturaleza se puede rastrear desde las observaciones de Platón en su obra "Critias" (400 a.C.), donde aborda la deforestación y sus consecuencias, hasta las reflexiones de Aristóteles en su filosofía inicial sobre la naturaleza (60 a.C.). Este trayecto abarca desde perspectivas creacionistas hasta los estudios naturalistas y de distribución de especies liderados por figuras notables como Linneo (1788), Humboldt (1807) y Darwin (1872). Desde las primeras reflexiones sobre la deforestación hasta la influencia de la ciencia moderna, la relación entre los humanos y la naturaleza ha sido moldeada por diversas corrientes de pensamiento a lo largo del tiempo. La relevancia de los recursos naturales empezó a recibir reconocimiento a nivel global en el siglo XIX, específicamente en 1830, cuando Malthus abordó la cuestión del crecimiento poblacional. En ese momento, la comprensión de la importancia de los recursos naturales comenzó a ganar terreno, especialmente al examinar las implicaciones del aumento demográfico en la disponibilidad y sostenibilidad de estos recursos, marcando así un hito significativo en la conciencia mundial sobre la relación entre la población y los recursos naturales (Caro et al., 2015)

Posteriormente, se abordó el concepto de capital natural, acuñado inicialmente por Schumacher en 1973 (según lo citado por Gómez-Baggethun et al., 2010). Concepto referido como el conjunto de recursos naturales renovables y no renovables que se combinan para generar un flujo de beneficios para las personas y abarca el suelo, aire, agua y todos los seres vivos (Ahern et al. 2022).

Más adelante surgió un concepto complejo, el de ecosistema, el cual no sólo se centra en su estructura, sino también en los flujos de energía y ciclos biogeoquímicos. Fue Tansley quien en 1935 lo definió como el “complejo de organismos junto con los factores físicos de su medio ambiente” en un lugar determinado, y propuesto además como una de las unidades básicas de la naturaleza. Desde su planteamiento, Tansley resaltó la idea de ecosistema como “unidad básica de la naturaleza”. Algunos años después se refirió al ecosistema como una entidad reconocible autocontenida, al identificarlo como un nivel de organización superior o, en el marco de la teoría de sistemas, una categoría más

entre los sistemas físicos que componen el universo, desde el átomo hasta las galaxias (Caro et al., 2015).

Actualmente, la visión de diversos estudios refiere que un ecosistema puede definirse como el centro de la estructura ecológica, desde el individuo, población, comunidad, ecosistema, paisaje, región, y biosfera, siendo el componente central de la investigación ecológica (Yu et al. 2021).

Dado lo anterior, la biodiversidad se cataloga como un elemento esencial dentro de un ecosistema. En palabras de (Wilson, 1992), "la biodiversidad es el conjunto de todas las formas de vida que existen en un lugar determinado, donde la variabilidad genética, las especies y los ecosistemas interactúan". Este, y su relación con el concepto de las contribuciones de la naturaleza se puede explicar en varios niveles: como soporte para procesos claves, al afectar directamente el suministro de estas contribuciones y al constituir en sí misma un bien valorado (Caro et al., 2015).

La primera vez que se acuñó el término de "servicios ecosistémicos" (SE) fue en 1970, a principios del siglo XXI, fue que ingresó en la agenda política, como en la Evaluación de los Ecosistemas del Milenio en 2005. En este estudio, se determinó el concepto de servicios ecosistémicos como los beneficios que las personas obtienen de los procesos naturales de los ecosistemas, e incluso se dividieron en cuatro grandes categorías: servicios de provisión, considerando bienes tangibles, como agua, alimentos, madera, recursos genéticos, entre otros; servicios de regulación, aquellos relacionados a los procesos naturales que regulan el clima, enfermedades, calidad del aire o el agua; servicios de soporte o de apoyo, los cuales como su nombre lo dice, hacen posible los demás servicios, soportándolos, por ejemplo, la formación de suelo, el ciclaje de nutrientes o la fotosíntesis (Bouwma et al., 2018).

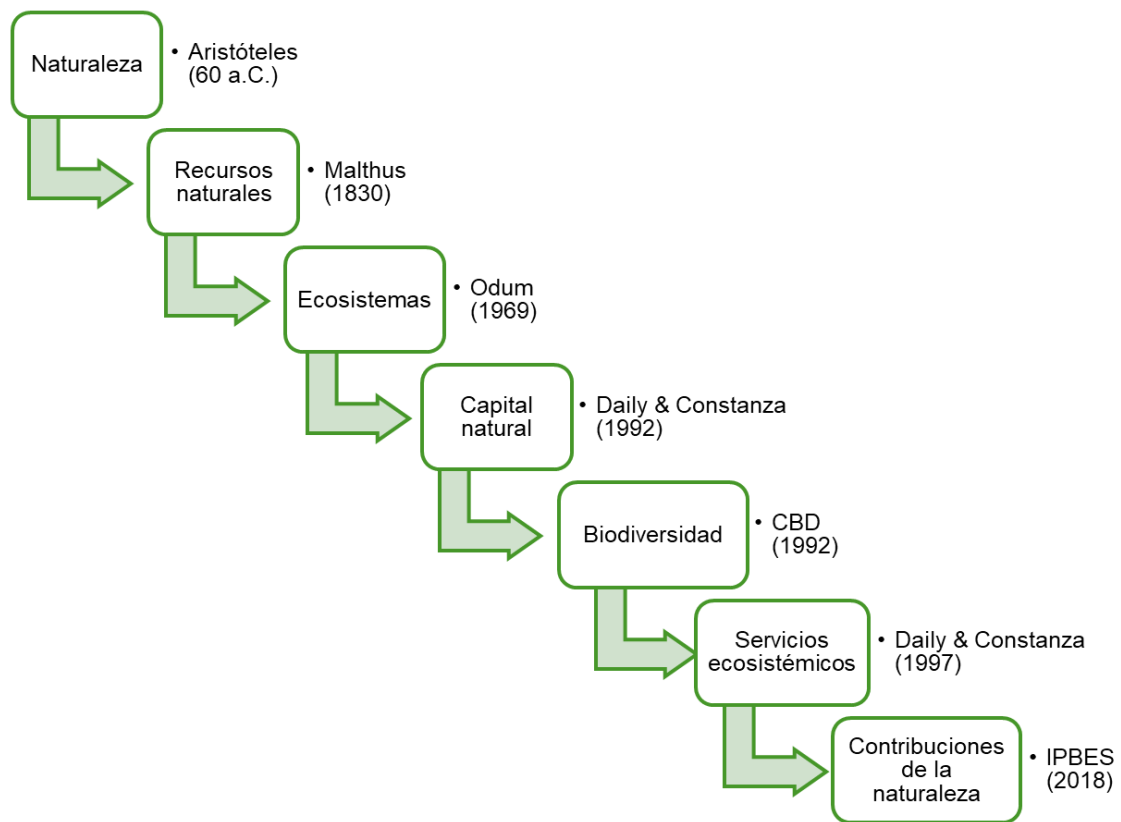


Figura 1. Evolución conceptual del enfoque de contribuciones de la naturaleza. Modificado de (Caro, et al., 2015)

Finalmente, el enfoque de Contribuciones de la Naturaleza para las Personas fue adoptado por la Plataforma Intergubernamental Científico-Normativa sobre Diversidad Biológica y Servicios de los Ecosistemas (IPBES) en el 2018. Diversos autores refieren a los SE y CNP como sinónimos, o con significados similares que representan los beneficios de la naturaleza para las personas y únicamente se trata de semántica. Sin embargo, también existe la discusión sobre las dimensionalidades de cada uno (Pires et al., 2020).

Por su parte, las CNP son todas aquellas contribuciones positivas y negativas, de la naturaleza viva (diversidad de organismos, ecosistemas y sus procesos ecológicos y evolutivos asociados) a la calidad de vida de las personas; se dividen en tres categorías principales: contribuciones reguladoras, materiales y no materiales (Liu et al., 2023).

Esta idea va más allá de la visión tradicional de los "servicios ecosistémicos", pues no sólo considera los beneficios que obtenemos de la naturaleza, sino que también incorpora aspectos culturales y los conocimientos de comunidades locales e indígenas sobre su relación con el entorno natural. Las CNP incluyen todo tipo de interacciones entre la naturaleza y las personas, ya sean positivas o negativas. Esto abarca desde la provisión de alimentos y agua limpia hasta el control de inundaciones y la inspiración artística. Dependiendo del contexto, algunas de estas contribuciones pueden percibirse como favorables o desfavorables, ya que su impacto varía según la cultura, el tiempo y el lugar (Díaz et al., 2018).

Este enfoque reconoce la importancia de la cultura en nuestra relación con la naturaleza, dándole un lugar destacado a otros tipos de conocimiento, como las ciencias naturales, sociales e ingeniería así como las partes interesadas como el de los pueblos indígenas y comunidades locales, empresas, agricultores, entre otros, para abordar los objetivos de la IPBES de desarrollar una comprensión holística de toda la información y el conocimiento sobre las relaciones entre las personas y la naturaleza. Con esta visión más incluyente y equitativa, se busca que las políticas públicas sobre biodiversidad y ecosistemas sean más efectivas y legítimas (Kadykalo et al., 2019).

Adicionalmente, en el caso de México el concepto de contribuciones de la naturaleza y servicios ambientales comprende lo mismo. Según lo establecido en la Ley General de Desarrollo Forestal Sustentable de México, se define a los servicios ambientales como aquellos proporcionados de manera natural por los ecosistemas forestales o a través de la gestión sostenible de los recursos forestales (DOF, 2009). Estos servicios incluyen, entre otros aspectos: la provisión de agua en términos de calidad y cantidad; la captura de carbono, contaminantes y componentes naturales; la generación de oxígeno; la mitigación de impactos derivados de fenómenos naturales; la modulación o regulación climática; la salvaguarda de la biodiversidad, de los ecosistemas y de diversas

formas de vida; la protección y recuperación de suelos; así como la contribución al paisaje y a la recreación.

Clasificación de las CNP

Dentro del marco conceptual del IPBES se vislumbran tres elementos inclusivos en la interacción entre las sociedades humanas y el mundo no humano, entre otros: la naturaleza, los beneficios de la naturaleza para las personas y una buena calidad de vida. Dado lo anterior, se reconocen a las CNP como el conducto entre la naturaleza y una buena calidad de vida y se dividen en tres grandes categorías (Pascual et al., 2017).

- 1) Contribuciones materiales: son sustancias físicas, objetos o materiales de la naturaleza que las personas usan y consumen para vivir, como energía, alimentos, medicinas, materias primas o agua dulce. Son aportes tangibles que pueden ser utilizados, transformados o comercializados.
- 2) Contribuciones no materiales: son los efectos de la naturaleza viva en aspectos subjetivos o psicológicos que sustentan la calidad de vida de las personas, tanto individual como colectivamente que son la base de la identidad cultural de un grupo humano. Son beneficios intangibles, difíciles de medir en términos económicos o físicos.
- 3) Contribuciones reguladoras: también llamadas contribuciones de regulación son las formas en que la naturaleza viva modifica las condiciones ambientales que experimentan las personas y sostiene o regula la generación de contribuciones materiales e inmateriales, por ejemplo, la cobertura vegetal en laderas y cuencas, reducen el arrastre de sedimentos hacia los ríos, es decir, controla la erosión (Hill et al., 2021).

Cuadro 1. Tabla 1. Clasificación de las 18 CNP, consideradas por el IPBES. Tomado de Hill et al., 2021.

[illegible]

Las CNP no se pueden encasillar al cien por ciento en cierta categoría establecida, ya que la misma clasificación está diseñada para abarcar diferentes perspectivas, por lo cual no se pueden aplicar universalmente. Incluso, el marco del CNP incluye enfoques como los que se conectan con la idea de los servicios ecosistémicos, donde la naturaleza puede considerarse esencialmente separada de las personas, a la vez que permite perspectivas de las personas y la naturaleza como inseparables, conectadas a través de procesos espirituales y cosmológicos, donde los animales a veces adoptan formas humanas y viceversa (Hill et al., 2021).

Amenazas a las CNP

La biodiversidad y las CNP guardan una correlación espacial importante, ya que, en las zonas en las que se encuentran mayores niveles de CNP, son regiones con alta biodiversidad y por supuesto, está en función de la cantidad, calidad y distribución espacial del hábitat. Las CNP reguladoras (la regulación de la calidad del aire, el clima, y la disponibilidad de agua dulce), en particular, son las que, actualmente se enfrentan a un declive crítico (Cimatti, Chaplin-Kramer, & Di Marco, 2023).

En los últimos 50 años, la capacidad de la naturaleza para sustentar la calidad de vida ha disminuido para 14 de las 18 categorías de contribuciones de la naturaleza a las personas consideradas por el IPBES (Fig.2) Desde 1970, la población mundial se ha duplicado, el consumo per cápita ha aumentado un 45%, el valor de la actividad económica mundial, medido en producto interno bruto (PIB), ha aumentado más del 300%, el comercio mundial ha aumentado aproximadamente un 900%, y la extracción de materiales vivos de la naturaleza ha aumentado más del 200% (Díaz et al., 2019).

A partir de 1970, las CNP han presentado aceleradas transformaciones debido a diversas causas naturales y antropogénicas, tal es el caso del cambio de uso de suelo, el cambio climático, el crecimiento demográfico y el desarrollo económico (Jiang et al., 2024). Siendo los impulsores directos de la disminución de hasta 60%

de las CNP en los últimos 50 años, el cambio de uso de suelo y el cambio climático de la disminución de las CNP (Adhikari et al., 2022).

En primer lugar, el cambio climático modifica los patrones de precipitación y temperatura, lo que genera afectaciones a la distribución, producción y abundancia de organismos (Li et al., 2021). Prever sus efectos resulta complicado, ya que existen incertidumbre respecto a la rapidez y la magnitud de dichos cambios (Esperon-Rodriguez et al., 2019).

De acuerdo con modelos regionales para México, se espera un aumento de eventos extremos, con incrementos de temperatura de entre 0.5 a 5°C con una variación de -20.3% a 13.5%. También se proyectan déficits de humedad del suelo y estrés hídrico en plantas, lo que recalca la urgencia de adoptar medidas de mitigación y adaptación (Ramírez Sánchez & Fajardo-Montiel, 2024).

Por otro lado, el cambio de uso de suelo afecta a los procesos de los ecosistemas cambiando las propiedades físicas de la superficie terrestre, como la evapotranspiración, la rugosidad de la superficie y el albedo (Li et al., 2021).

Es difícil predecir el cambio de uso de suelo porque hay muchos cambios rápidos y drásticos, difíciles de considerar, como las perturbaciones socioeconómicas (por ejemplo, cambio de políticas y crisis económica). Según la FAO, los bosques han perdido cerca de 100 millones de hectáreas en los últimos 20 años (Ma et al., 2022). De las cuales, alrededor de 3.75 millones de hectáreas corresponden a bosques tropicales (ecosistemas con mayor diversidad biológica del mundo) (Hallaj et al., 2024).

En México, particularmente, hay una gran variación en la dinámica del uso de suelo, ya que en algunas regiones del país la protección o el abandono de predios ha provocado la recuperación de bosques secundarios, mientras que, en otras zonas, las mismas políticas de intensificación agrícola y uso de la tierra han propiciado la pérdida de bosques por medio del cambio de uso de suelo a cultivos (Bonilla-Moheno & Aide, 2020).

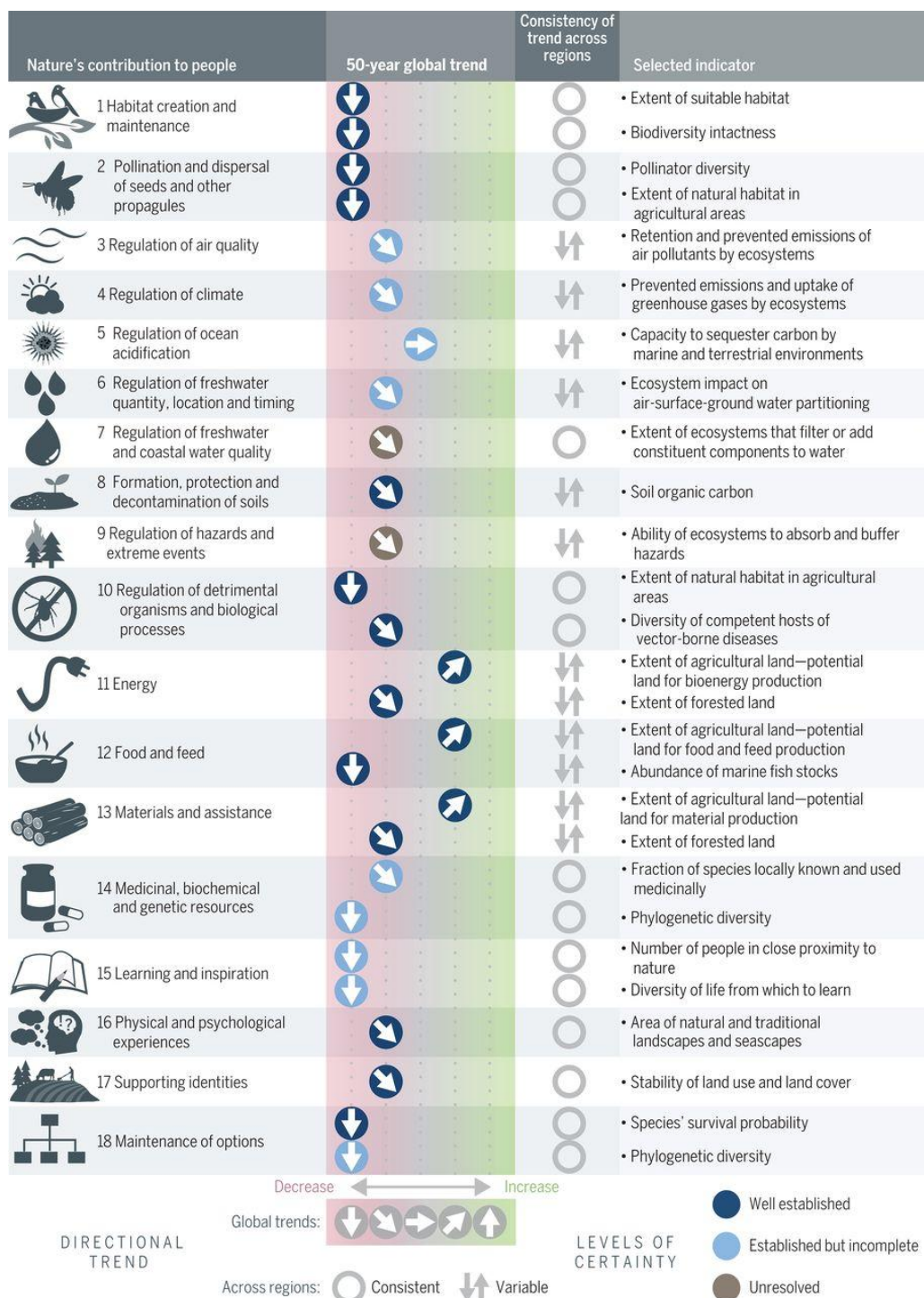


Figura 2. Tendencias globales de la capacidad de las CNP desde 1970 hasta la actualidad. Tomado de (Díaz et al., 2019).

1.2 Justificación

El recurso hídrico es imprescindible para la vida. Compone entre el 80 al 90% de nuestra sangre y el 75% de nuestros músculos (Kılıç, 2020). Aunado a ello, nos ofrecen aportes generados por los ecosistemas acuáticos, tales como la calidad y disponibilidad de agua para diversos usos (agricultura, consumo humano, pesca, protección del suelo, control de inundaciones, entre otros) los cuales son consecuencia de las interacciones entre el clima, formas de la tierra y cobertura vegetal (Gianuca et al., 2024).

La disponibilidad de agua y la capacidad de los ecosistemas de controlar la erosión se ha visto afectada por la expansión urbana, cambio de uso de suelo y cambio climático, generando, a su vez, presión sobre la biodiversidad. Se habla, entonces, de una serie de efectos en cascada dentro de los ecosistemas en cuestión (Kılıç, 2020).

A pesar de que todos los ecosistemas tienen la capacidad de ofertar contribuciones hidrológicas, lo hacen en grados diferentes. Por lo tanto, la disponibilidad de agua y su dinámica varía de acuerdo con las características propias de la zona de estudio (Gianuca et al., 2024).

De ahí la relevancia de esta investigación que se enfocó en modelar el comportamiento de dos CNP (control de la erosión y disponibilidad hídrica) en un municipio que pertenece a una Región Hidrológica Prioritaria a nivel nacional, con el objetivo de informar y respaldar la toma de decisiones para la gestión sostenible de los recursos naturales en la región. Como señalan Galeazzi et al. (2025), la gestión de las CNP requiere intervenciones en los procesos de toma de decisiones que articulen la oferta y la demanda, lo cual se busca precisamente en este estudio, desde el ámbito académico, como parte de los actores involucrados en esta problemática.

Aunado a ello, la economía local depende en buena medida de la actividad turística, siendo el río Axtla el principal atractivo natural. Sin embargo, pese a esta fuerte dependencia económica y ambiental del recurso hídrico, existe una notable carencia de información sistematizada sobre el monitoreo y el estado actual de las contribuciones de la naturaleza relacionadas con el agua y el suelo. Además,

se ha observado de manera empírica una serie de cambios negativos en los patrones de lluvia y en el caudal de los ríos de la zona, lo que podría generar impactos significativos en la disponibilidad y calidad del agua, así como en la salud de los ecosistemas acuáticos y terrestres. En consecuencia, la identificación de puntos críticos de CNP resulta de gran ayuda poder guiar estrategias de manejo por medio de la priorización espacial (Shekar et al., 2025).

1.3 Hipótesis

Los ecosistemas de Axtla de Terrazas tienen una alta capacidad de proveer Contribuciones Hidrológicas de la Naturaleza.

1.4 Objetivos

1.4.1 Objetivo general

Determinar zonas vulnerables a la pérdida de contribuciones de la naturaleza utilizando SIG en Axtla de Terrazas, S.L.P., con la finalidad de contribuir a la toma de decisiones sobre el manejo de recursos naturales de este municipio.

1.4.2 Objetivos específicos

1. Delimitar microcuencas por medio del enfoque de microcuencas y sistemas de información geográfica.
2. Estimar el control de la erosión actual, y en tres escenarios en el futuro cercano (2026) de acuerdo con las prácticas de manejo, mediante la ecuación universal de pérdida de suelo (EUPS), con el fin de determinar las áreas críticas de erosión.
3. Estimar disponibilidad de agua actual y en el futuro cercano (2026) mediante un balance hídrico, para conocer la dinámica hídrica en la zona de estudio.
4. Determinar las microcuencas prioritarias de atención, a través de la normalización de datos, para contribuir en las decisiones de manejo sostenible.

1.5 Contenido capitular del documento de titulación

El presente documento está compuesto por cuatro capítulos, organizados de la siguiente manera: El CAPÍTULO 1 incluye la introducción general, antecedentes justificación del problema, objetivos generales y particulares, e hipótesis. El CAPÍTULO 2 se compone por la revisión bibliográfica sobre metodologías aplicadas por diversos autores para el cumplimiento de los objetivos planteados. El CAPÍTULO 3 presenta el desarrollo de la investigación en formato de artículo científico. Finalmente, el CAPÍTULO 4 presenta las conclusiones generales de la investigación. Los primeros tres capítulos cuentan con la sección de literatura citada correspondiente.

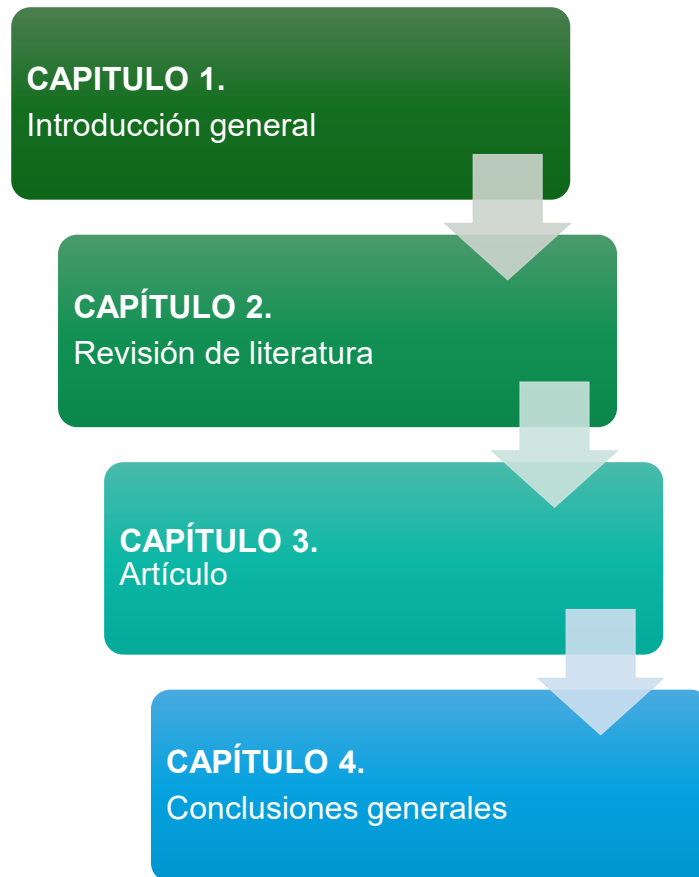


Figura 3. Estructura capitular de la tesis

1.6 Literatura citada

- Adhikari, B., Prescott, G. W., Urbach, D., Chettri, N., & Fischer, M. (2022). Nature's contributions to people and the Sustainable Development Goals in Nepal. *Environmental Research Letters*, 17(9), 093007. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ac8e1e>
- Ahern, M., Craddock-Taylor, R., Darsley, A., Elsum, T., & Martin, A. (2022). Natural capital: An actuarial perspective. *British Actuarial Journal*, 27, E6. <https://doi.org/10.1017/S135732172200006X>
- Pires, A. P. F., Padgurschi, M. C. G., de Castro, P. D., Scarano, F. R., Strassburg, B., Joly, C. A., Watson, R. T., & de Groot, R. (2020). Ecosystem services or nature's contributions? Reasons behind different interpretations in Latin America. *Ecosystem Services*, 42, 101070. <https://doi.org/10.1016/j.ecoser.2020.101070>
- Alonso Roldán, V., Álvarez Manriquez, L., Rius, P., De Tommaso, D., Raguileo, D., Velazquez Barloa, N., & Galván, D. (2024). Contribuciones de la naturaleza a las personas en la Comarca VIRCh-Valdés. *Párrafos Geográficos*, 2(23), 1. Universidad Nacional de la Patagonia San Juan Bosco. <https://portal.amelica.org/ameli/journal/739/7395165007/7395165007.pdf>
- Bonilla-Moheno, M., & Aide, T. M. (2020). Beyond deforestation: Land cover transitions in Mexico. *Agricultural Systems*, 178, 102734. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2019.102734>
- Campos Rojas, G. G., Lacayo Moya, M. F., & Chavarría Fernández, K. L. (2022). Identificación de servicios de los ecosistemas: Reconocimiento y desafíos para la planificación del desarrollo. *Revista ABRA*, 42(65), 1–23. <https://dx.doi.org/10.15359/abra.42-65.1>
- Caro-Caro, C. I., & Torres-Mora, M. A. (2015). Servicios ecosistémicos como soporte para la gestión de sistemas socioecológicos: Aplicación en agroecosistemas. *ORINOQUIA*, 19(2), 237–252. http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0121-37092015000200011&lng=en&tlng=es

- Cimatti, M., Chaplin-Kramer, R., & Di Marco, M. (2023). The role of high-biodiversity regions in preserving Nature's Contributions to People. *Nature Sustainability*, 6(12), 1385–1393. <https://doi.org/10.1038/s41893-023-01179-5>
- Diario Oficial de la Federación. (2009). Ley General de Desarrollo Forestal Sustentable de México. <https://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/pdf/LGDFS.pdf>
- Díaz, S., Pascual, U., Stenseke, M., Martín-López, B., Watson, R. T., Molnár, Z., Hill, R., Chan, K. M. A., Baste, I. A., Brauman, K. A., Polasky, S., Church, A., Lonsdale, M., Larigauderie, A., Leadley, P. W., van Oudenhoven, A. P. E., van der Plaats, F., Schröter, M., Lavorel, S., Aumeeruddy-Thomas, Y., Bukvareva, E., Davies, K., Demissew, S., Erpul, G., Failler, P., Guerra, C. A., Hewitt, C. L., Keune, H., Lindley, S., & Shirayama, Y. (2018). Assessing nature's contributions to people. *Science*, 359(6373), 270–272. <https://doi.org/10.1126/science.aap8826>
- Díaz, S., Settele, J., Brondízio, E. S., Ngo, H. T., Agard, J., Arneth, A., Balvanera, P., Brauman, K. A., Butchart, S. H. M., Chan, K. M. A., Garibaldi, L. A., Ichii, K., Liu, J., Subramanian, S. M., Midgley, G. F., Miloslavich, P., Molnár, Z., Obura, D., Pfaff, A., Polasky, S., Purvis, A., Razzaque, J., Reyers, B., Chowdhury, R. R., Shin, Y.-J., Visseren-Hamakers, I., Willis, K. J., & Zayas, C. N. (2019). Pervasive human-driven decline of life on Earth points to the need for transformative change. *Science*, 366(6471), eaax3100. <https://doi.org/10.1126/science.aax3100>
- Esperon-Rodriguez, M., Beaumont, L. J., Lenoir, J., Baumgartner, J. B., McGowan, J., Correa-Metrio, A., & Camac, J. S. (2019). Climate change threatens the most biodiverse regions of Mexico. *Biological Conservation*, 240, 108215. <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2019.108215>
- Gianuca, K., Silva, T., & Asmus, M. (2024). Ecosystem-based spatial modeling: Assessing the supply of hydrological services in a watershed in Southern Brazil. *Ecological Modelling*, 492, 110723. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2024.110723>

- Yu, G., Piao, S., Zhang, Y., Liu, L., Peng, J., & Niu, S. (2021). Moving toward a new era of ecosystem science. *Geography and Sustainability*. <https://doi.org/10.1016/j.geosus.2021.06.004>
- Hill, R., Díaz, S., Pascual, U., Stenseke, M., Molnár, Z., & Van Velden, J. (2021). Nature's contributions to people: Weaving plural perspectives. *One Earth*, 4(7), 910–915. <https://doi.org/10.1016/j.oneear.2021.06.009>
- Bouwma, I., Schleyer, C., Primmer, E., Winkler, K. J., Berry, P., Young, J., Carmen, E., Špulerová, J., Bezák, P., Preda, E., & Vadineanu, A. (2018). Adoption of the ecosystem services concept in EU policies. *Ecosystem Services*, 29(Part B), 213–222. <https://doi.org/10.1016/j.ecoser.2017.02.014>
- Ivanova, Y. (2022). Afectación de los servicios ecosistémicos hídricos en la cuenca del río Teatinos (páramo Rabanal, Colombia): Efecto del cambio de coberturas de la tierra – producto del cambio climático global. *Investigación e Innovación en Ingenierías*, 10(2), 196–215. <https://doi.org/10.17081/invinno.10.2.5856>
- Kadykalo, A. N., López-Rodriguez, M. D., Ainscough, J., Droste, N., Ryu, H., Ávila-Flores, G., ... Harmáčková, Z. V. (2019). Disentangling 'ecosystem services' and 'nature's contributions to people.' *Ecosystems and People*, 15(1), 269–287. <https://doi.org/10.1080/26395916.2019.1669713>
- Kılıç, Z. (2020). The importance of water and conscious use of water. *International Journal of Hydrology*, 4(5), 239–241. <https://doi.org/10.15406/ijh.2020.04.00250>
- Li, J., Zhang, C., & Zhu, S. (2021). Relative contributions of climate and land-use change to ecosystem services in arid inland basins. *Journal of Cleaner Production*, 298, 126844. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.126844>
- Galeazzi, A. M., Foucat, V. S. Á., & Perevochtchikova, M. (2025). Collaborative management of hydrological ecosystem services: A multilevel social network analysis of a Mexican watershed. *Environmental Management*, 75(5), 961–980. <https://doi.org/10.1007/s00267-024-02101-1>

- Pascual, U., Balvanera, P., Díaz, S., Pataki, G., Roth, E., Stenseke, M., Watson, R. T., Dessane, E. B., Islar, M., Kelemen, E., Maris, V., Quaas, M., Subramanian, S. M., Wittmer, H., Adlan, A., Ahn, S., Al-Hafedh, Y. S., Amankwah, E., Asah, S. T., Berry, P., Bilgin, A., Breslow, S. J., Bullock, C., Cáceres, D., Daly-Hassen, H., Figueroa, E., Golden, C. D., Gómez-Baggethun, E., González-Jiménez, D., Houdet, J., Keune, H., Kumar, R., Ma, K., May, P. H., Mead, A., O'Farrell, P., Pandit, R., Pengue, W., Pichis-Madruga, R., Popa, F., Preston, S., Pacheco-Balanza, D., Saarikoski, H., Strassburg, B. B., van den Belt, M., Verma, M., Wickson, F., & Yagi, N. (2017). Valuing nature's contributions to people: The IPBES approach. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 26–27, 7–16. <https://doi.org/10.1016/j.cosust.2016.12.006>
- Shekar, P. R., Mathew, A., Hasher, F. F. B., Mehmood, K., & Zhran, M. (2025). Towards sustainable development: Ranking of soil erosion-prone areas using morphometric analysis and multi-criteria decision-making techniques. *Sustainability*, 17(5), 2124. <https://doi.org/10.3390/su17052124>
- Ramírez Sánchez, H. U., & Fajardo-Montiel, L. A. (2024). Impactos del cambio climático en los recursos forestales de México: Proyecciones regionales y vulnerabilidades. *Revista Internacional de Geografía, Medio Ambiente y Ciencias de la Tierra*, 28(12), 67–93. <https://doi.org/10.9734/jgeesi/2024/v28i12849>
- Jiang, W., Fu, B., Shu, Z., Lv, Y., Gao, G., Feng, X., Schüller, S., Wu, X., & Wang, C. (2024). Spatiotemporal drivers of nature's contributions to people: A county-level study. *Environmental Science and Ecotechnology*, 20, 100430. <https://doi.org/10.1016/j.esse.2024.100430>
- Liu, Y., Fu, B., Wang, S., Rhodes, J. R., Li, Y., Zhao, W., Li, C., Zhou, S., & Wang, C. (2023). Global assessment of nature's contributions to people. *Science Bulletin*, 68(4), 424–435. <https://doi.org/10.1016/j.scib.2023.01.027>

CAPÍTULO 2. REVISIÓN DE LITERATURA

2.1 Delimitación de unidades de estudio

La organización del territorio en unidades de manejo reduce la complejidad del área de estudio, convirtiéndolo en áreas manejables y comprensibles en términos de planeación de recursos naturales. Esta delimitación tiene diversas aplicaciones, desde la evaluación de la presión de los recursos hídricos respecto al cambio de uso de suelo en cuencas hidrológicas, hasta la evaluación de áreas vulnerables por cambio climático. Todo esto, con fines de diseño de políticas y estrategias para la gestión sostenible (Cruz-Cárdenas et al., 2017).

2.1.1 Método de Hills

El enfoque de Hills consiste en un sistema que se emplea para responder algunas preguntas clave sobre el uso de los recursos naturales. Primero, se quiere saber si se está aprovechando al máximo los recursos renovables, teniendo en cuenta las condiciones económicas y sociales. Si no es así, se necesita entender qué cambios deben hacerse en la manera en que se usa la tierra. Además, se plantea la pregunta sobre qué marco científico se necesita para responder a estas interrogantes. Este sistema se basa en dos ideas principales: la división del terreno en partes homogéneas y la evaluación de cómo se pueden utilizar esas partes para diferentes fines. Por ejemplo, se pueden considerar usos individuales, alternativos o combinados de la tierra, y esto se evalúa en función de diferentes niveles y condiciones de gestión (Gómez Orea & Gómez Villarino, 2013).

Para llevar a cabo este proceso, se divide gradualmente el área de estudio en unidades más pequeñas (A), siguiendo cambios en el clima y en las características del suelo. Se empieza con la creación de "zonas" basadas en patrones climáticos amplios, que a menudo están relacionados con el tipo de suelo y la vegetación presente. Luego, estas zonas se subdividen en "subzonas" o "tipos" según características más detalladas del suelo y la geología. También, se identifican "clases fisiográficas" dentro de las subzonas, basadas en diferencias locales en el clima que afectan a la vegetación, finalmente, incluye

“divisiones” o “tipos fisiográficos”, donde la clasificación de las clases se realiza teniendo en cuenta criterios como la profundidad y la humedad del suelo. Representa los tipos fisiográficos como las unidades fundamentales en el estudio de la ecología vegetal, ya que dentro de cada tipo pueden existir diversos ecosistemas, influenciados por factores tanto naturales como humanos. La extensión de un tipo fisiográfico puede variar considerablemente, desde tan sólo 2 hectáreas hasta 40 hectáreas.

En el siguiente paso del sistema propuesto por Hills, se elabora una lista de usos (B) que se deben considerar, junto con los requisitos físicos o demandas para cada uno. Hills identifica cuatro usos generales: Agricultura (A), Forestal (F), Reservas Forestales (W) y Recreo (R). Estos usos se subdividen en categorías más específicas, y para cada una se establecen sus necesidades particulares.

Luego, se procede a determinar el potencial de cada tipo fisiográfico o fase (C), en caso de que existan, en términos de capacidad, adecuación y viabilidad. La capacidad se evalúa en una escala de 7 grados (a-g), reflejando la productividad o la ausencia de limitaciones para el desarrollo de la actividad. La adecuación se refiere al esfuerzo requerido para llevar una unidad a un nivel deseado de explotación. La viabilidad se relaciona con la conveniencia económica y social de desarrollar una unidad, considerando factores como la accesibilidad o la población potencial cercana. Estos conceptos se evalúan tanto a nivel local como a nivel general, considerando la potencialidad intrínseca de las unidades y su relación con el contexto más amplio de la zona de estudio.

Posteriormente, se agrupan las unidades fisiográficas similares para formar unidades de paisaje más grandes, dentro de las cuales se pueden identificar unidades de suelo con significados especiales para ciertos usos. Se recalifica la capacidad, adecuación y viabilidad de cada una de estas unidades de paisaje.

Finalmente, se recomienda el uso principal o co-principal para cada unidad de paisaje (D), basado en la calificación más alta de viabilidad. Y se elaboran mapas

(E) que representan los usos principales o co-principales recomendados para cada unidad de paisaje (Gómez Orea & Gómez Villarino, 2013).

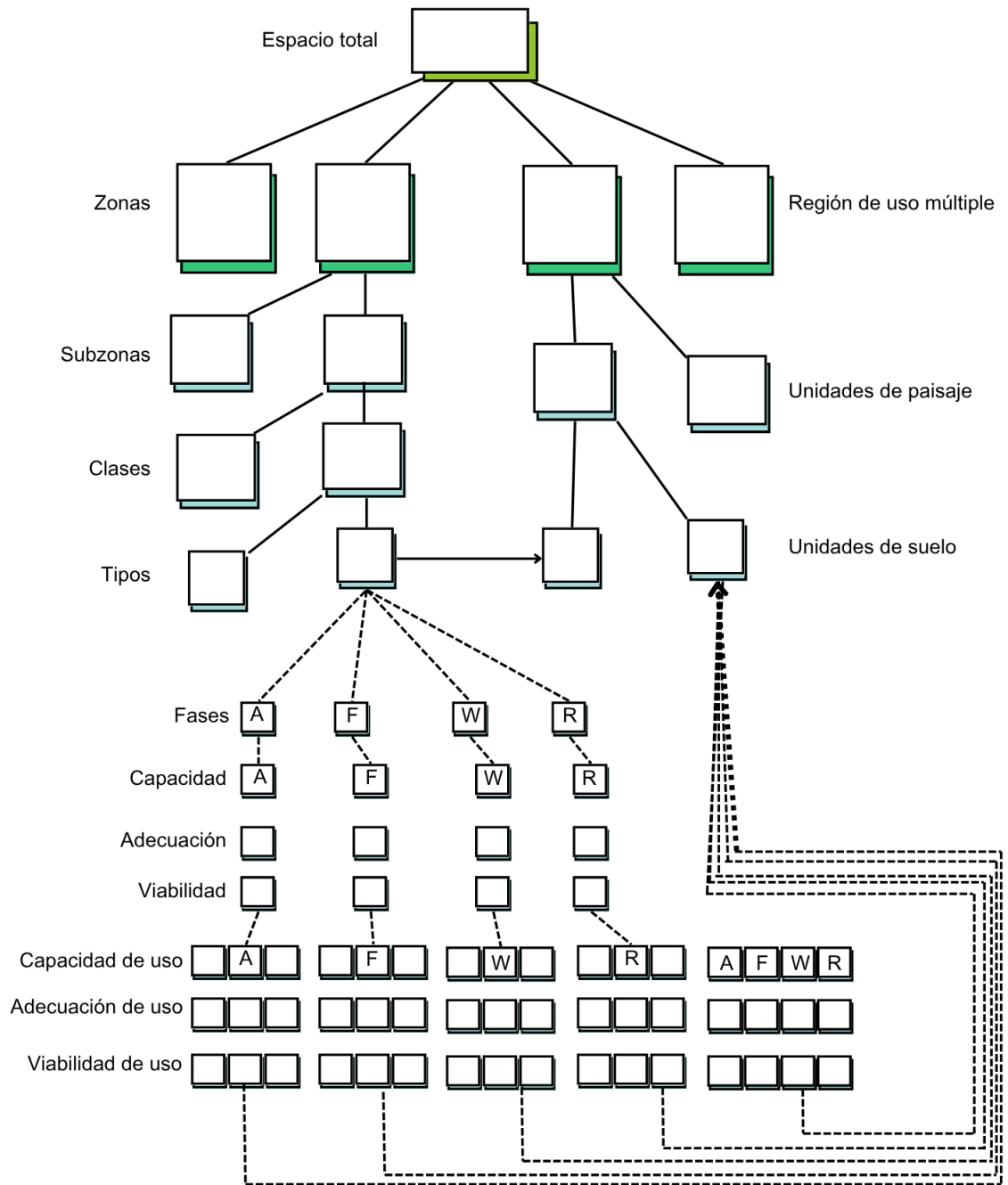


Figura 4. Diagrama del método de Hills. Tomado de Gómez Orea & Gómez Villarino, 2013.

2.1.2 Método de Mc Harg

McHarg, un destacado experto en planificación regional y arquitectura paisajista, se enfoca en la integración de los procesos biológicos, considerados como recursos naturales, como guías en la planificación regional. Su teoría se centra en presentar estos procesos naturales como expresiones de las condiciones territoriales y como determinantes naturales del uso del suelo, en contraposición al determinismo económico que ha dirigido el desarrollo urbano (Gómez Orea & Gómez Villarino, 2013). McHarg propone un sistema que permite incorporar la ciencia del medio natural a la planificación y desarrollo territorial. Este sistema sigue una secuencia específica:

1. Primero, se realiza una representación cartográfica de factores como clima, geología, fisiografía, hidrología, suelos, flora, fauna y uso actual del suelo. Estos datos se interpretan en términos de procesos naturales que influyen entre sí.
2. Luego, se interpretan los datos de inventario en relación con las actividades que se planean, y se traducen en mapas de capacidad intrínseca para cada actividad, como agricultura, recreo, forestal y uso urbano.
3. Se asignan valores a los procesos naturales, lo que permite realizar una zonificación del área total según su valor. McHarg establece cuatro valores: cualidades inherentes, productividad, mantenimiento del equilibrio ecológico y riesgos potenciales.
4. Todos estos datos se sintetizan en un mapa de adecuación o capacidad combinada para los distintos usos y sus combinaciones compatibles, permitiendo identificar los múltiples usos posibles del territorio.

Paralelamente, McHarg realiza un "inventario económico" y un análisis visual del paisaje, estableciendo criterios de visibilidad. Estos datos, junto con los mapas de adecuación y criterios de diseño, se utilizan para incorporar el análisis del medio natural en la planificación del territorio (Gómez Orea & Gómez Villarino, 2013).

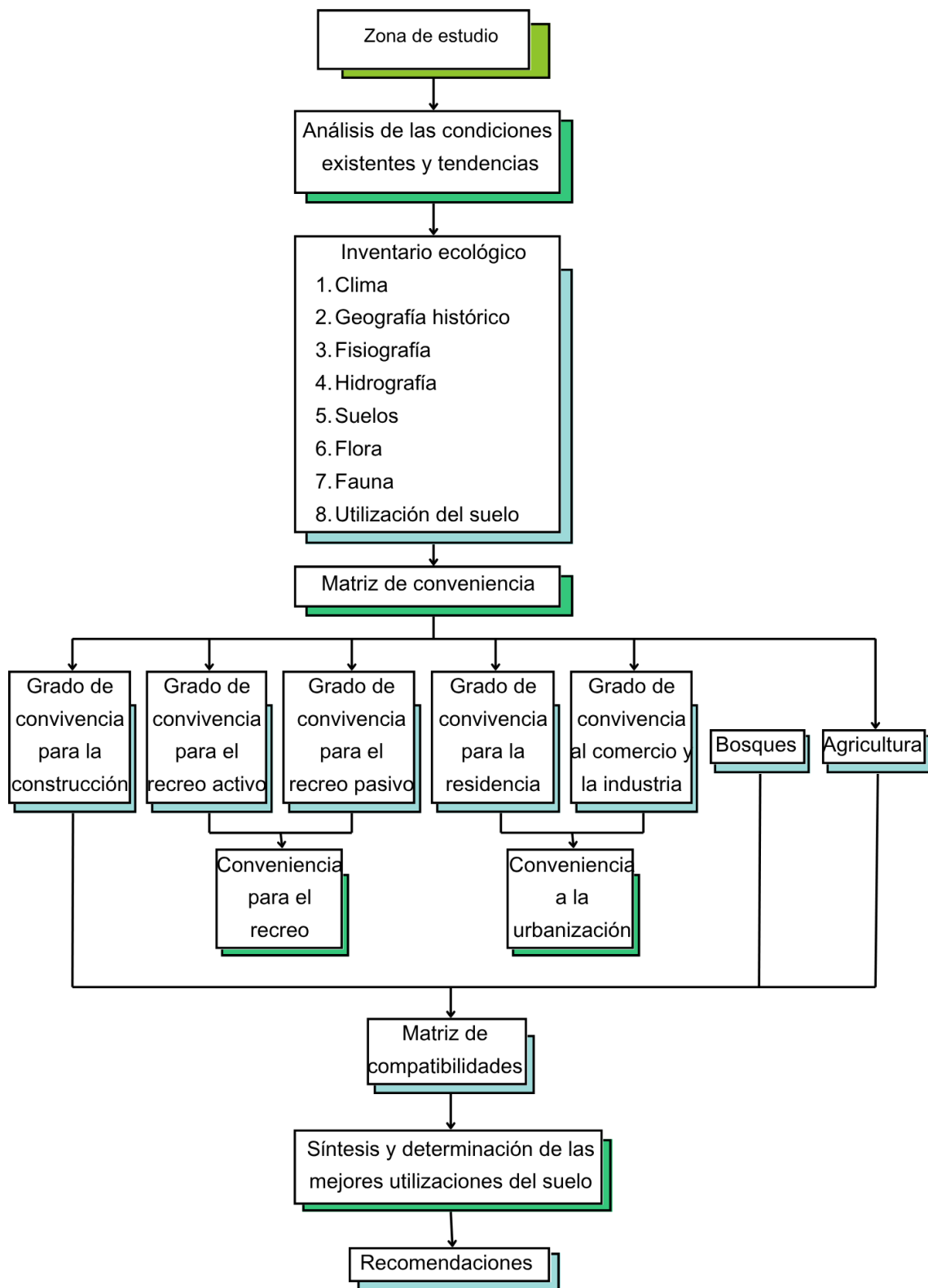


Figura 5. Secuencia del método de Mc Harg. Tomado de Gómez Orea & Gómez Villarino, 2013

McHarg también desarrolla técnicas para resolver problemas concretos, como la ubicación de grandes infraestructuras de transporte, identificando facilidades y limitaciones del medio físico y utilizando la valoración cartográfica para determinar las zonas más favorables para la ubicación. La superposición de mapas permite identificar las zonas que mejor responden a los criterios establecidos (Gómez Orea & Gómez Villarino, 2013).

2.1.3 Método fisiográfico

Este método se basa en determinar unidades homogéneas de una zona de estudio de acuerdo con elementos del medio físico, como el tipo de suelo, litología y relieve. En combinación con Sistemas de Información Geográfica (SIG), los resultados serán planos delimitados con precisión, para el posterior análisis de la dinámica ambiental-ser humano, o de algún otro proceso con fines de planificación y uso del territorio (Souza et al., 2020).

La secuencia del método fisiográfico ofrece la sistematización de unidades fisiográficas, lo que permite un mejor acercamiento al estado actual de los paisajes del área de estudio y a diferentes escalas, para vincularlos con componentes del entorno natural (vegetación, suelo, clima, etc) (Saavedra Guerrero & López López, 2019).

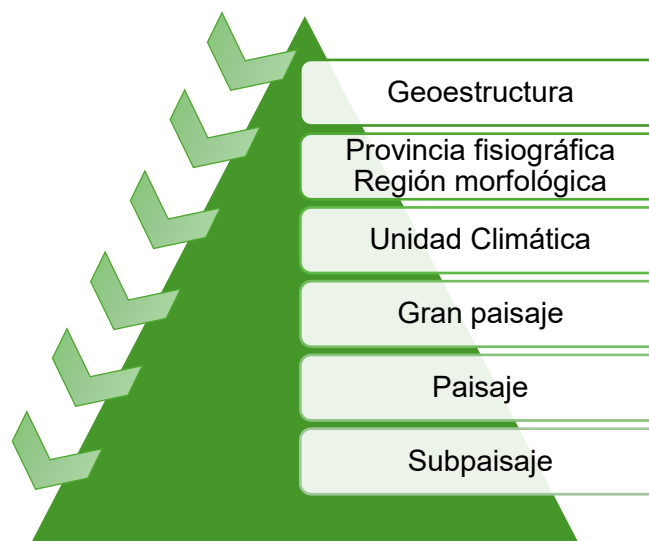


Figura 6. Secuencia del método fisiográfico. Tomado de Saavedra Guerrero & López López, 2019.

De acuerdo con el orden jerárquico, se enmarcan 6 estratos, la geoestructura (1), siendo el nivel más general, abarca formaciones continentales como cordilleras, escudos o mega cuencas. La provincia fisiográfica (2) coincide con una región morfológica y puede contener múltiples unidades climáticas. Caracterizada por afinidad geológica, topográfica y espacial. La unidad climática (3), es la zona dentro de la provincia con condiciones de temperatura y humedad homogéneas, que inciden en el tipo de suelo y vegetación. Le sigue, el gran paisaje (4), formado por conjuntos de paisajes con afinidad morfogenética (origen geológico), litológica, climática y topográfica. Las montañas, altiplanicies, llanuras y valles son algunos ejemplos. Posteriormente, se enlista el paisaje fisiográfico (5), el cual es una unidad dentro del gran paisaje que se define por la geología predominante y su edad relativa. Sirve como base en estudios semidetallados de suelos. Finalmente, se encuentra el subpaisaje (6), útil para detalles de uso de suelo, el cual consiste en una división del paisaje basada en la pendiente, erosión, drenaje o grado de disección (Aristides & López, 2022).

2.1.4 Método de microcuencas

Una cuenca hidrográfica es una unidad de planeación del territorio, donde confluyen características bióticas y abióticas en los procesos del ciclo hidrológico (infiltración, escorrentía, entre otros), y son delimitadas por un parteaguas de acuerdo con el sistema de drenaje. Consideradas como unidad de estudio para la planificación integrada de los recursos naturales, particularmente, el suelo y el agua (Gardon, 2021).

Dependiendo del punto donde converjan y salgan los flujos de agua será el tipo de cuenca que se trate. Si desemboca en un lago, corresponde a una cuenca endorreica (sin salida al mar) y si desagua en el mar es una cuenca exorreica (SEMARNAT, 2013).

Dentro de la cuenca, existen unidades básicas de ordenación e intervención llamadas microcuencas, ya que sus dimensiones posibilitan la medición de indicadores de sustentabilidad, es decir, es viable la gestión y observación de la producción en función del flujo del agua (Sánchez Vélez et al., 2003).

Para delimitar microcuencas es necesario conocer la dinámica del recurso hídrico dentro la superficie a estudiar, lo cual se facilita en gran medida utilizando Sistemas de Información Geográfica. Por ejemplo ArcGIS usa un Modelo Digital de Elevación (DEM) y el proceso es el siguiente (Macas Cobeña et al., 2023):

Cuadro 2. Metodología para delimitar microcuencas en ArcGIS. Modificado de Macas Cobeña et al., 2023.

Herramienta	Función	Producto
Fill	Corrige errores del DEM	DEM ajustado, con vacíos o hundimientos rellenados.
Flow direction	Calcula la dirección que seguirá el flujo de agua en cada celda, en función de la pendiente.	Dirección de flujo
Flow accumulation	Estima la cantidad de flujo que se acumula en cada celda a partir de la dirección de flujo.	Acumulación de flujo
Single output	Genera un raster que representa la red de drenaje derivada de la acumulación de flujo.	Red de drenaje
Stream link	Divide la red de drenaje en segmentos individuales para facilitar su identificación.	Drenaje en segmentos
Stream order	Asigna un orden jerárquico a cada segmento de la red de drenaje según su posición.	Orden de las corrientes

Stream feature	Convierte la red de drenaje raster a formato vectorial (shape) y delimita la cuenca hidrográfica.	Shape de drenaje
Feature vertice to point	Extrae los vértices de la red de drenaje delimitada, generando puntos representativos de la cuenca.	Nodos de la red de drenaje de la cuenca.

Existen diversos estudios que han realizado priorización de subcuencas y microcuencas, de acuerdo con sus características morfométricas, uso de suelo, tasas de erosión o escorrentía. Para ello se consideran categorías de prioridad, desde muy baja, hasta muy alta, dependiendo del contexto (Pathare & Pathare, 2020).

Dentro de los métodos de priorización se encuentra la toma de decisiones multicriterio, con especial aplicación en sistemas complejos. Estos, han sido aplicados en diferentes áreas de planificación territorial, tal como en el cambio climático, tratamiento de aguas residuales, gestión de agua, vulnerabilidad a deslizamientos y erosión, entre otros (López Pérez et al., 2024).

2.2 Vinculación con los Objetivos de Desarrollo Sostenible

La Organización de las Naciones Unidas, en el marco de la Agenda 2030, incluye Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) que guardan una conexión directa con actividades de gestión del suelo y el agua (Senanayake et al., 2024).

Particularmente, la degradación del suelo impide el logro del ODS 2 (Hambre Cero), al provocar la disminución de la capacidad productiva de las tierras cultivables y poner en riesgo la seguridad alimentaria. Además, también afecta al ODS 13 (Acción por el Clima), puesto que genera la liberación de carbono orgánico, alterando su ciclo y acelerando el cambio climático. Igualmente, este fenómeno constituye una amenaza para el cumplimiento del ODS 15 (Vida de Ecosistemas Terrestres), debido a la degradación de la tierra, la disminución de la diversidad biológica y el deterioro de la calidad de los hábitats (PNUD, s.f.).

Aun cuando la erosión es un proceso natural que es inevitable, sus efectos deben ser atenuados mediante prácticas de conservación del suelo. Estas técnicas incluyen medidas vegetativas (franjas de pasto, cercas vivas), estructuras (terrazas, presas), prácticas agronómicas sostenibles (labranza de conservación, cultivos de cobertura) y una gestión adecuada del uso del suelo. Estas prácticas también permiten reducir los altos costos económicos derivados de la erosión, que ascienden a aproximadamente 400 mil millones de dólares al año a nivel mundial en actividades de restauración, reposición de nutrientes y reparación de daños (Samuel et al., 2025; Yin et al., 2022).

Además, entre las metas específicas se subraya el ODS 6, que menciona la necesidad de mejorar la calidad del agua mediante la reducción de la contaminación, la optimización del uso eficiente de los recursos hídricos en todos los sectores, asegurar la sostenibilidad de la extracción y el abastecimiento del agua dulce, y fortalecer la gestión integrada de los recursos hídricos a diferentes niveles (PNUD, s.f.).

Se resalta, que este objetivo es transversal porque sostiene muchas otras metas (salud, la seguridad alimentaria, la producción de energía, la conservación de los ecosistemas y la reducción de la pobreza, etc) (Bocanegra, 2021).

2.3 Casos de estudio

2.3.1 Disponibilidad de agua

El agua es el líquido más importante para la vida. Todas las funciones esenciales de los seres vivos requieren del agua para llevarse a cabo, de hecho, las células de todas las formas de vida contienen entre el 75% y el 95% de agua (Chakraborty, 2021).

Además, está presente en todas las actividades humanas; en el hogar como agua potable, para la limpieza y la preparación de alimentos, en la agricultura, para el riego de cultivos y en la producción, y en la industria (Stojanović Bjelić et al., 2023).

Su valor también radica en la variedad de CNP que ofertan. Por ejemplo, los paisajes de ríos, lagos o humedales que representan las CNP inmateriales, pues su aporte es la recreación (Shaad et al., 2022).

La limitada información sobre el estado actual y futuro de la disponibilidad hídrica, aunada al poco entendimiento sobre la vulnerabilidad de los recursos naturales ante estos escenarios, representan las principales barreras para lograr una adecuada gestión de este recurso, a futuro. Por esto, el balance hídrico surge como una herramienta para conocer la dinámica de los componentes del medio para con el agua. Es decir, como la cobertura vegetal está interrelacionada con la humedad del suelo y el déficit hídrico, el fuego con la aridez, o la erosión con una alta escorrentía (Thoma et al., 2020).

El balance hídrico evalúa el volumen de agua que alimenta y drena un sistema determinado. Está compuesto por: precipitación (entrada principal de agua), evapotranspiración (pérdida de agua a través de la evaporación desde el suelo y la transpiración de las plantas), escorrentía (la pérdida de agua por flujo superficial o subsuperficial), y cambio en el almacenamiento (variación del agua almacenada en el suelo, acuíferos o cuerpos de agua durante un periodo de tiempo) (Ballinas et al., 2015; Aragón-Hernández et al., 2024)

Existe una gran variedad de métodos para calcular un balance hídrico. Duque-Sarango et al., (2019), por ejemplo, construyeron un balance hídrico en el Bosque de Vegetación Protectora Aguarongo (BVPA), una zona protegida declarada por el Ministerio del Medio Ambiente de Ecuador, se enfocaron en la microcuenca Chaquilcay, debido a su relevancia a nivel local. Posteriormente, se eligieron cuatro estaciones meteorológicas ubicadas fuera de la microcuenca Chaquilcay (considerando el tipo de estación, el radio de influencia, las características del terreno y una serie de datos con al menos 30 años de registro. Se obtuvieron datos mensuales de precipitación y temperatura de las estaciones climatológicas correspondiente al periodo 1982-2015. Para completar los registros incompletos de precipitación, se aplicó el método de regresión lineal. Las temperaturas de referencia para las estaciones que no registraron esta variable se estimaron utilizando la herramienta Extract Multi Values to Points del software ArcGIS. Para

este procedimiento, se emplearon los recorridos isotérmicos mensuales elaborados por el Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología (INAMHI) correspondientes al periodo 1981-2010. A partir del DEM, se elaboraron mapas de pendientes y orientaciones (aspectos), los cuales fueron reclasificados y combinados para generar el índice morfológico. Este índice se procesó mediante la herramienta Spatial Analyst de ArcGIS, para generar los recorridos de horas de luz solar mediante interpolación Kriging. Los datos empleados correspondieron al día 15 de cada mes del año 2015, con un rango horario de 06:00 a 18:30 horas. Debido a la falta de datos completos sobre variables meteorológicas en la zona de estudio, se aplicó el método empírico de Thornthwaite para la estimación de la evapotranspiración, el cuál ha demostrado ser confiable en condiciones climáticas húmedas y con abundante cobertura vegetal. Para estimar el balance, se consideraron las entradas y salidas: $P=ET+Q+\Delta S$, donde, P representó la precipitación, ET la evapotranspiración, Q el escurrimiento superficial y ΔS el cambio en el almacenamiento de agua en el suelo (en mm). La evapotranspiración real (ET_r) se calculó comparando la evapotranspiración potencial (ET_0) con la precipitación (P). Cuando la diferencia $P - ET_0$ fue menor que cero, se consideró que no había almacenamiento ni excedentes hídricos. En cambio, cuando $P - ET_0$ fue mayor que cero, el almacenamiento se fijó en la capacidad media de campo determinada en la zona de estudio (18,7 mm) y el excedente fue la diferencia entre la precipitación y la evapotranspiración potencial. Finalmente, el análisis espacial se realizó con ArcGIS, integrando la ubicación de las estaciones meteorológicas y las series de datos de precipitación y evapotranspiración, a través de la herramienta Map Algebra.

Bravo-Cadena et al. (2021) utilizaron el programa WaterWorld para modelar la disponibilidad de agua superficial en la región centro-oriental de México, abarcando 589 municipios en total. Sus datos de entrada fueron la precipitación, la niebla, el hielo, la nieve y los escurrimientos superficiales, mientras que las salidas consideradas fueron la evaporación, la evapotranspiración asociada a la

cobertura vegetal, el uso del suelo y la temperatura. Para estimar la cobertura forestal, emplearon datos provenientes de mapas globales de alta resolución sobre el cambio en la cobertura forestal del siglo XXI, y los registros climáticos de precipitación y temperatura se obtuvieron de la base de datos WorldClim. Los modelos se construyeron con datos climáticos históricos correspondientes al periodo 1970-2000 como escenario base y se proyectaron para los años 2060 y 2080 bajo escenarios de cambio climático. El déficit hídrico, tanto actual como futuro, se calculó como la diferencia entre la demanda y la disponibilidad de agua por municipio. Para las proyecciones futuras, se mantuvo la demanda actual, sin realizar ajustes por crecimiento poblacional. Para facilitar la interpretación de los resultados, elaboraron mapas que mostraron la distribución espacial del balance entre la oferta y la demanda de agua, así como mapas individuales para cada una de estas variables.

Por otro lado, en la Península de Yucatán, Rodríguez-Huerta et al. (2019) realizaron un balance hídrico a escala mensual, que se basa en el principio de conservación de masa. Emplearon la ecuación general: $\Delta S = P - ET - R - Q$ donde, ΔS es la variación en el almacenamiento de agua del suelo en un período, P es la precipitación, ET es la evapotranspiración (potencial y actual), R es la recarga o infiltración neta y Q es la escurrimiento. El modelo se enfocó principalmente en relacionar precipitación y evapotranspiración para estimar la recarga, puesto que en la región de estudio la escurrimiento y la variación en almacenamiento en escala mensual son relativamente pequeñas. Para estimar la evapotranspiración potencial, usaron ocho métodos diferentes; basados en temperatura como el método de Hargreaves-Samani, (que requiere datos de temperatura máxima y mínima), empíricos y estadísticos, como el método de Thornthwaite (que depende únicamente de temperaturas), y métodos que combinan precipitación y temperatura, por ejemplo, el método de Penman-Monteith en su forma simplificada (si los datos están disponibles). También calcularon el agua subterránea, considerando que, la infiltración neta, que llega a recargar el acuífero, es la diferencia entre precipitación y evapotranspiración potencial, ajustada por la capacidad de almacenamiento del suelo (modelo de suelo de

almacenamiento, STC). Para proyectar el comportamiento futuro de la recarga, se utilizaron cinco modelos climáticos regionalizados (de CMIP5), que proporcionaron datos de precipitación y temperatura para el período 2015-2039, bajo dos escenarios de concentración de gases de efecto invernadero: RCP 4.5 y RCP 8.5. Finalmente, desarrollaron una herramienta gráfica para apoyar a los usuarios y tomadores de decisiones a analizar cómo varía la recarga a nivel mensual y regional en función de las futuras condiciones climáticas.

2.3.2 Control de la erosión

El suelo ha sido definido conforme la orientación de su estudio, los físicos lo conceptualizan como un sistema de tres fases, los expertos en fertilidad como reservorios y procesadores de nutrientes para las plantas, los científicos ambientales como un recurso natural degradable y actualmente amenazado. Para los ecólogos representa un elemento esencial para los servicios ecosistémicos y para los geomorfólogos es un componente del paisaje (Cahyana & Mulyanto, 2024).

En pocas palabras, el suelo es el “material estratificado en la superficie de la tierra, que resulta de procesos químicos y biológicos y de la organización física de minerales y materia orgánica, y que sustenta los ecosistemas terrestres y a la humanidad” (McBratney & Hartemink, 2024).

Por otra parte, la palabra erosión proviene del latín y deriva de la palabra *erodere*: corroer (rodere, masticar). Se introdujo por vez primera en geología para la descripción de la formación de huecos por el agua. Actualmente se describe como el proceso natural que por acción del viento y la precipitación, las partículas de suelo se desprenden, transportan y se depositan de un lugar a otro (Hardaha, 2018).

La erosión hídrica es un evento natural causado por la acción del agua y ha contribuido a la formación de suelos fértiles de diversas formas del relieve (llanuras, montañas y paisajes montañosos). Sin embargo, se ha notado una aceleración de este proceso debido a actividades antropogénicas como la agricultura. Y se ha comprobado que la erosión hídrica trae consigo consecuencias hacia el recurso hídrico, de manera que disminuye su calidad, de

los sistemas de drenaje y provoca la pérdida de contribuciones de la naturaleza (Kanianska et al., 2024).

Aproximadamente 64% de la república mexicana cuenta con una pérdida de suelo potencial extrema (>250 ton/ha/año) asociada a problemas sociales, como la escasez de alimentos (Varón Ramírez & Guevara, 2024).

Debido al crecimiento exponencial de este fenómeno, se han desarrollado diversas técnicas para su estudio. Un ejemplo claro es la aplicación de la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo (RUSLE) calibrada y adecuada para las condiciones de México. Torres Benites et al., 2020, realizaron un estudio en la cuenca del Cañón del Sumidero en el estado de Chiapas, en donde calcularon la pérdida de suelo media anual, como resultado del producto de seis factores: la erosividad de la lluvia (R), erodabilidad del suelo (K), longitud (L) y grado de la pendiente (S), cobertura (C) y prácticas de conservación (P). Para el factor R utilizaron datos de precipitación media mensual de estaciones climatológicas ubicadas dentro y en sitios circundantes al área de estudio, y decidieron utilizar una ecuación genérica basada en el comportamiento de la intensidad de la lluvia. El factor K se calculó utilizando el nomograma de Wischmeier et al. (1971), con base en los resultados de laboratorio obtenidos de las muestras de suelo recolectadas en campo. El factor LS se calculó usando el algoritmo de máxima pendiente aguas abajo de Hickey et al. (1994), actualizado por Van Remortel et al. (2004), a partir de un modelo digital de elevación (CEM 2.0 del INEGI). Este método estima la pendiente máxima entre celdas vecinas en una malla de 3×3 , considerando la longitud de pendiente específica para cada dirección de flujo. El factor C se estimó mediante análisis mensual de cobertura vegetal usando imágenes MODIS y datos NDVI de 2003 a 2007, para capturar las variaciones estacionales. Se combinaron los valores de NDVI con tipos de cobertura del suelo y se aplicaron relaciones indirectas basadas en estudios previos, considerando diferentes tipos de vegetación. Ante la falta de datos específicos sobre la distribución espacial de las prácticas de conservación, se establece un valor de $P = 1$ para toda la cuenca (Torres Benites et al., 2020).

Echavarría-Cháirez et al., 2020, también utilizaron RUSLE para medir el efecto de la erosión hídrica en pastizales, por el calentamiento global, en el estado de Zacatecas. El cálculo se realizó en el software IDRISI Selva, la cual cuenta con una rutina RUSLE optimizada para mejorar las estimaciones de los factores L y S y cuenta con herramientas para mejorar el DEM. El factor R, se estimó con base en un mapa de isoerosividad nacional y ecuaciones específicas para las tres regiones donde se ubica Zacatecas. El factor K se obtuvo a partir de tablas de referencia, en función de la textura y tipo de suelo. Para evaluar los impactos del cambio climático, se utilizaron proyecciones climáticas del sistema del INIFAP para los escenarios RCP 4.5 y 8.5, a través de un ensamble de 11 modelos de circulación general (GCM) calibrados para México. Se analizaron datos de temperatura y precipitación mensual proyectados para los periodos 2021-2040, 2041-2060 y 2061-2080, referidos como años 2030, 2050 y 2070. Se consideró la información de uso del suelo del INEGI para evaluar la erosión hídrica por tipo de vegetación (matorral, pastizal, bosque y agricultura) en cada escenario climático. Finalmente, se desarrollaron modelos de regresión para estimar la tasa anual de cambio de erosión hídrica y así identificar las áreas más vulnerables bajo el efecto del cambio climático (Echavarría-Cháirez et al., 2020).

Por su parte, García Núñez et al., 2023, focalizaron la misma metodología en el Río Lerma-Santiago, comprendiendo un total de 332 municipios dentro de los estados de Guanajuato, Michoacán y Jalisco. En el caso del factor R, se usaron ecuaciones regionalizadas, que dividen a México en 14 regiones con fórmulas específicas que relacionan la precipitación media anual con la erosividad. Se seleccionó la ecuación correspondiente a la región 5: $R = 3.4880 * P - 0.000188 * P^2$, donde P es la precipitación anual en mm. Los datos de precipitación anual de estaciones meteorológicas se georreferenciaron en ArcGIS 10.3®, asignando altitud, precipitación y erosividad a cada punto. Esta información se procesó en formato raster para generar el mapa espacial del factor de erosividad. Debido a la falta de información precisa para aplicar métodos tradicionales, se utilizó la Metodología Provisional de la FAO (1980), que sólo requiere identificar el tipo de

suelo y su textura. Los valores resultantes se asignaron a los puntos previamente generados para este análisis. El factor LS se calculó considerando que la erosión del suelo se incrementa conforme aumenta la distancia que el agua recorre sobre la superficie y la inclinación del terreno. Los valores del factor C se asignaron utilizando la información de uso de suelo y vegetación proporcionada por la Carta de Uso del Suelo y Vegetación del INEGI, de acuerdo con la clasificación disponible para el área de estudio. El factor P no se tomó en cuenta, como consecuencia de la inexistente información sobre las prácticas de conservación.

2.4 Literatura citada

- Aragón-Hernández, J. L., Hernández González, L. A., Salas de León, D. A., & González Villarreal, F. J. (2024). Water availability: Spatially distributed analysis and evaluation of input variables. *H2Open Journal*, 7(5), 333–350. <https://doi.org/10.2166/h2oj.2024.016>
- Aristides, S. G., & López, L. D. M. (2022). Análisis fisiográfico como enfoque conceptual para el estudio integral del paisaje: Un estudio de caso de la cuenca del río Usumacinta, México. *Revista Europea de Ciencias Aplicadas*, 10(4), 247–261. <https://doi.org/10.14738/aivp.104.12467>
- Bocanegra, E. (2021). Proyecto OIEA IWAVE en América Latina en apoyo del ODS 6: Agua segura para todos de manera sostenible. *Boletín Geológico y Minero*, 132(1-2), 87–98. <https://doi.org/10.21701/bolgeomin.132.1-2.009>
- Bravo-Cadena, J., Pavón, N. P., Balvanera, P., Sánchez-Rojas, G., & Razo-Zarate, R. (2021). Water availability–demand balance under climate change scenarios in an overpopulated region of Mexico. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 18(4), 1846. <https://doi.org/10.3390/ijerph18041846>
- Cahyana, D., & Mulyanto, B. (2024). A simple definition of soil. *Soil Security*, 16, 100146. <https://doi.org/10.1016/j.soisec.2024.100146>
- Chakraborty, S. K. (2021). Water: Its properties, distribution, and significance. En *Riverine ecology* (Vol. 1). Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-53897-2_2
- Cruz-Cárdenas, G., Silva, J. T., Ochoa-Estrada, S., Estrada-Godoy, F., & Nava-Velázquez, J. (2017). Delimitación de unidades ambientales mediante técnicas multivariadas en la cuenca del Río Duero, Michoacán, México. *Modelado y Evaluación Ambiental*, 22, 257–266.
- Duque-Sarango, P., Cajamarca-Rivadeneira, R., Wemple, B. C., & Delgado-Fernández, M. E. (2019). Estimación del balance hídrico de una cuenca andina tropical: La Granja. *Revista de Ciencias de la Vida*, 29(1). <https://doi.org/10.17163/lgr.n29.2019.05>

- Echavarría-Cháirez, F. G., Medina-García, G., & Ruiz-Corral, J. A. (2020). Efecto en la erosión hídrica del suelo en pastizales y otros tipos de vegetación por cambios en el patrón de lluvias por el calentamiento global en Zacatecas, México. *Revista Mexicana de Ciencias Pecuarias*, 11(Supl. 2), 1–18. <https://doi.org/10.22319/rmcp.v11s2.4694>
- Gardon, F.R. Land Prioritization: An Approach to the Effective Environmental Planning of Hydrographic Basins. *Environmental Management* 67, 623–631 (2021). <https://doi.org/10.1007/s00267-021-01434-5>
- García Núñez, R. M., Rodríguez Domínguez, K. R., & Santiago Sánchez Vélez, A. (2023). Hydrological-environmental characterization and estimation of areas subject to water erosion in the Arrollo Prieto microbasin, Guanajuato. *Journal of Agricultural Sciences Research*, 3(16).
- Gómez Orea, D., & Gómez Villarino, A. (2013). *Ordenación territorial* (9ª ed.). Mundiprensa.
- Hardaha, M.K. (2018). Modeling Soil Erosion by Water. In: Dagar, J., Singh, A. (eds) *Ravine Lands: Greening for Livelihood and Environmental Security*. Springer, Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-10-8043-2_25
- Kanianska, R., Kizeková, M., Jančová, L., Čunderlík, J., & Dugátová, Z. (2024). Effect of soil erosion on soil and plant properties with a consequence on related ecosystem services. *Sustainability*, 16(16), 7037. <https://doi.org/10.3390/su16167037>
- López Pérez, A., Colín-García, G., Moya, H., Bolaños-González, M. A., Fernández-Reynoso, D. S., & Cruz-Ramírez, Á. S. (2024). Aplicación del Proceso Analítico de Redes para la priorización de subcuencas en la cuenca del río Huehuetán, Chiapas, México. *Tierra*, 13(11), 1868. <https://doi.org/10.3390/land13111868>
- Macas Cobeña, M., Bonilla Zambrano, M., Carriel Reyes, W., Parrales Carriel, J., Riofrio Arrobo, J., & Zambrano Flores, N. (2023). Caracterización hidrológica de la microcuenca del estero Hondo, cantón La Maná, Ecuador. *Revista Ciencia y Tecnología*, 16(2), 35–48. <https://doi.org/10.18779/cyt.v16i2.634>

- McBratney, A. B., & Hartemink, A. E. (2024). Define soil. *Soil Security*, 14, 100135. <https://doi.org/10.1016/j.soisec.2024.100135>
- Moritz, S. (2016a). *imputeTS: Time Series Missing Value Imputation* (R package version 1.7). <https://CRAN.R-project.org/package=imputeTS>
- Pathare, J. A., & Pathare, A. R. (2020). Prioritization of micro-watershed based on morphometric analysis and runoff studies in upper Darna basin, Maharashtra, India. *Modeling Earth Systems and Environment*, 6(1), 1123–1130. <https://doi.org/10.1007/s40808-020-00756-1>
- Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD). (s.f.). Objetivo 6: Agua limpia y saneamiento. <https://www.undp.org/es/sustainable-development-goals/agua-limpia-y-saneamiento>
- Rodríguez-Huerta, E., Rosas-Casals, M., & Hernández-Terrones, L. M. (2019). Un modelo de balance hídrico para estimar el impacto del cambio climático en la recarga de aguas subterráneas en la Península de Yucatán, México. *Revista de Ciencias Hidrológicas*, 65(3), 470–486. <https://doi.org/10.1080/02626667.2019.170298>
- Saavedra Guerrero, A., & López López, D. M. (2019). Análisis integral del paisaje: Elementos conceptuales y metodológicos. Estudio de caso cuenca del río Usumacinta. Centro de Investigación en Ciencias de Información Geoespacial.
- Samuel, K. J., Durowoju, O. S., Ayeni, ‘., & otros. (2025). Geospatial analysis of soil erosion and implications for sustainable development goals in tropical ecological zones. *Discover Environment*, 3(14). <https://doi.org/10.1007/s44274-025-00198-7>
- Sánchez Vélez, A. S., García Núñez, R. M., & Palma Trujano, A. (2003). La cuenca hidrográfica: unidad básica de planeación y manejo de recursos naturales (1ª ed.). Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT).
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. (2013). Cuencas hidrográficas: Fundamentos y perspectivas para su manejo y gestión (1a.

- reimpresión). Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, Centro de Educación y Capacitación para el Desarrollo Sustentable, Red Mexicana de Cuencas Hidrográficas.
- Senanayake, S., Pradhan, B., Wedathanthirige, H., Alamri, A., & Park, H.-J. (2024). Monitoring soil erosion in support of achieving SDGs: A special focus on rainfall variation and farming systems vulnerability. *Catena*, 234, 107537. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2023.107537>
- Shaad, K., Souter, N. J., Vollmer, D., et al. (2022). Integrating ecosystem services into water resource management: An indicator-based approach. *Environmental Management*, 69(5), 752–767. <https://doi.org/10.1007/s00267-021-01559-7>
- Souza, L. E. de, Robinael, & Trentinel, R. (2020). Definición de unidades fisiográficas en el municipio de São Francisco de Assis con aplicaciones SIG. *Geo UERJ*, (37). <https://doi.org/10.12957/geouerj.2020.33549>
- Stojanović Bjelić, L., Nešković Markić, D., & Ilić, P. (2023). Water quality and protection. *Environment*, 9(9). <https://doi.org/10.7251/EORU2309043B>
- Thoma, D. P., Tercek, M. T., Schweiger, E. W., Munson, S. M., Gross, J. E., & Olliff, S. T. (2020). Water balance as an indicator of natural resource condition: Case studies from Great Sand Dunes National Park and Preserve. *Global Ecology and Conservation*, 24, e01300. <https://doi.org/10.1016/j.gecco.2020.e01300>
- Torres Benites, E., Cortes Becerra, J., Uresti Gil, J., Torres Cedillo, L., & Rivera Torres, P. S. (2020). Predicción de la erosión hídrica en la cuenca del Cañón del Sumidero, Chiapas. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 11(8), 1903–1916.
- Varón Ramírez, V. M., & Guevara, M. (2024). Avances en el estudio de la erosión del suelo por agua en México publicados en español. *European Journal of Soil Science*, 75(1), e13458. <https://doi.org/10.1111/ejss.13458>
- Yin, C., Zhao, W., & Pereira, P. (2022). Soil conservation service underpins sustainable development goals. *Global Ecology and Conservation*, 33, e01974. <https://doi.org/10.1016/j.gecco.2021.e01974>

CAPÍTULO 3. CONTRIBUCIONES DE LA NATURALEZA EN AXTLA DE TERRAZAS, SAN LUIS POTOSÍ: UNA APROXIMACIÓN MEDIANTE SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA

Nature's contributions in Axtla de Terrazas, San Luis Potosí: an approach using
geographic information systems

Contribuciones de la naturaleza en Axtla de Terrazas, San Luis Potosí: una
aproximación mediante sistemas de información geográfica

*Nancy Patricia Marcos-Terrazas (0009-0003-6572-2258), Genaro Aguilar-Sánchez
(0000-0003-1518-0801), Carlos Leopoldo Cíntora González (0000-0001-5204-43617),
Juan Juárez-Méndez (0000-0002-7940-0079)

Universidad Autónoma Chapingo, km 38.5 Carretera México Texcoco. 56230, Texcoco,
Edo. de México

*Autor de correspondencia

Resumen

Introducción. Las Contribuciones de la Naturaleza a las Personas (CNP) son las relaciones entre la naturaleza y el bienestar humano, considerando aportes materiales, inmateriales y de regulación.

Objetivo. Este estudio analizó el estado base y escenarios en el futuro cercano del control de la erosión y la disponibilidad de agua como CNP, en Axtla de Terrazas, San Luis Potosí.

Materiales y métodos. Se delimitaron 24 microcuencas usando un Modelo Digital de Elevación y herramientas SIG. La erosión hídrica se estimó mediante la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo, considerando factores de lluvia, suelo, topografía, cobertura vegetal y prácticas de manejo. El balance hídrico se calculó con la fórmula de Thornthwaite. Además, se verificaron datos en campo.

Resultados. Los resultados indicaron que, en 2023, 2,572 hectáreas del municipio presentaron tasas de erosión mayores a 10 ton/ha/año. El escenario tendencial para 2026 sugiere una leve reducción del área erosionada en 1.5%, mientras que la eliminación de prácticas de conservación incrementaría la erosión en 2%. En contraste, un escenario con mejoras de manejo reduciría el área erosionada en un 11%. En cuanto a la disponibilidad de agua, la distribución espacial anual varió de entre 104 mm a 920 mm y de 524 mm a 805 mm, para la línea base y el 2026, respectivamente. Sin embargo, se detectó una reducción de los meses de lluvia en cada una de las estaciones para el futuro cercano.

Conclusiones. Se identificaron microcuencas prioritarias para intervención (2, 6, 17, 18, 20 y 21).

Palabras clave

erosión hídrica, balance hídrico, USLE, microcuencas, escenarios de manejo.

Introducción

Las Contribuciones de la Naturaleza a las Personas (CNP) representan un marco conceptual integral que reconoce la compleja interdependencia entre la naturaleza y el bienestar humano. Este enfoque, promovido y adoptado por la Plataforma Intergubernamental Científico-Normativa sobre Biodiversidad y Servicios Ecosistémicos (IPBES), supera la visión tradicional de los servicios ecosistémicos al incorporar no sólo los bienes materiales que la naturaleza provee, como alimentos, agua, madera y fibras, sino también las funciones reguladoras y los valores culturales, espirituales y sociales que sustentan la vida humana en sus múltiples dimensiones (Díaz et al., 2018; Liu et al., 2023).

Dentro de las CNP, las funciones reguladoras del ecosistema, en sí misma, mantienen la estabilidad ambiental y garantizan aportes ecosistémicos vitales, entre estas funciones destacan la protección del suelo frente a la erosión, la regulación del ciclo hidrológico y del clima, la purificación del agua, así como el mantenimiento de la biodiversidad, y la calidad del aire (IPBES, 2019; Campos et

al., 2022). Sin embargo, estas contribuciones están siendo cada vez más amenazadas por presiones antrópicas, especialmente por el cambio de uso de suelo y el cambio climático global (Ivanova, 2022; IPCC, 2023). La conversión de tierras naturales a áreas agrícolas, urbanas o industriales altera drásticamente la cobertura vegetal y las propiedades físicas del suelo, lo que resulta en una disminución significativa de la infiltración de agua, aumento de la escorrentía superficial y pérdida acelerada de suelo fértil por erosión hídrica (Zhang et al., 2021; Campos et al., 2022).

Por otra parte, el cambio climático afecta directamente los componentes del balance hídrico regional y local, alterando los patrones y la intensidad de la precipitación, incrementando las temperaturas medias y modificando las tasas de evapotranspiración (IPCC, 2023). Estos cambios repercuten en la capacidad de los ecosistemas para continuar proveyendo sus funciones reguladoras y de soporte (Liu et al., 2023).

Ante este escenario, la evaluación espacial y temporal del balance hídrico, y de las tasas de erosión a diferentes escalas territoriales (cuencas hidrográficas, microcuencas y niveles municipales) se ha convertido en una herramienta en crecimiento en la planificación territorial sostenible (García et al., 2020; Pérez et al., 2021). Ya que estos análisis permiten identificar áreas críticas de degradación, prever escenarios futuros bajo diferentes supuestos de uso de suelo y cambio climático, y orientar políticas públicas y estrategias de conservación que protejan las CNP (Campos et al., 2022; IPBES, 2019).

Todo esto alineado a los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) 6 (agua limpia y saneamiento) y 15 (vida de ecosistemas terrestres) de la Organización de las Naciones Unidas, en el marco de la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible (ONU, 2016).

En consecuencia, el presente estudio se centra en el análisis del balance hídrico y la erosión en un contexto local, con el objetivo de contribuir al conocimiento sobre la dinámica de las CNP reguladoras y apoyar la toma de decisiones para

la conservación y el manejo sostenible de los recursos naturales frente a los desafíos ambientales actuales.

Materiales y métodos

Axtla de Terrazas se localiza al sureste del estado de San Luis Potosí, México, entre las coordenadas geográficas 21° 26' N, y 98° 52' W, a una altitud promedio de 100 msnm y cuenta con una superficie de 191.04 km². Con un clima A(f) y Am(f) de acuerdo con la clasificación de Köppen. Predomina la vegetación de selva alta perennifolia y selva mediana subperennifolia, además de pastizal cultivado y agricultura de temporal como usos de suelo. Cuenta con estribaciones de sierra baja, alta y valle con llanuras, ya que se encuentra dentro de las provincias fisiográficas Sierra Madre Oriental y Llanura Costera del Golfo Norte. Forma parte de la cuenca exorreica río Pánuco y de la Región Hidrológica Prioritaria número 75 “Confluencia de las Huastecas”. La corriente principal es el río Axtla, que se origina en la confluencia de los ríos Huichihuayán y Tancuilín.

El estudio consistió en 5 etapas: delimitación de 24 microcuencas con el enfoque de análisis de cuencas hidrográficas y características fisiográficas de la región de estudio; levantamiento de datos en campo en octubre del 2024; la corrección y predicción de datos de precipitación y temperatura; el cálculo de dos CNP, el control de la erosión y la disponibilidad de agua para 2023 (estado base) y 2026 (futuro a corto plazo), los cuales fueron estimados por medio de la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo y un balance hídrico, respectivamente; y la determinación de microcuencas vulnerables prioritarias.

Delimitación de microcuencas

Se utilizó un Modelo Digital de Elevación DEM de 15 metros. Se aplicaron herramientas del apartado de Hydrology en ArcGIS para determinar la acumulación y dirección de flujo, e identificar los puntos de salida o drenaje. Se

utilizó un umbral de acumulación de 25,000 celdas, es decir, se consideraron zonas que drenan al menos 5.6 km como cauces.

Cuadro 3. Localidades identificadas dentro de cada microcuenca, su área y coordenadas.

Número	Localidades	Coordenadas		Área (ha)
		X	Y	
1	Las Cuevas	-98.89031	21.35824	549.85
2	Michotlayo, Cuixcoatitla	-98.80707	21.37097	387.77
3	La Garita	-98.91351	21.37489	310.22
4	Las Cuevas	-98.87094	21.36205	912.10
5	Tenexcalco, El Encinal, Rancho Tenexcalco	-98.89619	21.38462	600.44
6	Cuayo, Copalo, Ensenada	-98.80689	21.38152	592.71
7	La Garita	-98.91031	21.39664	577.52
8	Comoca Ahuacatitla, El Danubio, Picholco, Tenexio	-98.87398	21.38994	1535.82
9	Comunidad Picholco	-98.83784	21.40074	557.65
10	El Sacrificio, Texacal, Vista Hermosa, Joaquín Jonguitud	-98.91896	21.40983	714.21
11	Comunidad Jalpilla, La Ceiba	-98.86359	21.41431	561.72
12	Chicaxtitla, Barrio Santa Fe	-98.92535	21.42212	243.02
13	El Madrigal	-98.90681	21.43041	212.96
14	Otlasxuaco	-98.84553	21.43243	239.48
15	Temalacaco, La Noria, Loma Bonita Choteco	-98.85175	21.42108	598.43
16	Agua Fría, El Cerro, Chacuala, Tepetlaco, El Progreso, Xocoyo, Zojualo, Chacuala	-98.82266	21.41188	1492.49
17	Coamila, Coatzontitla, Rancho Coyocala, Matlalapa, Papatlayo, El Paraíso, San José, San	-98.88527	21.43278	1588.89

	Miguel, Santa Rita, El Laurel, Tenezcruz, Crucero de Comoca, Santa Cecilia, La Ceiba, Rancho Axtlán, Xochititla			
18	Rancho Nuevo, Santa Fe Texacal, Barrio el Tamarindo, Coamízatl, El Rincón	-98.92739	21.44456	1173.81
19	Choteco, Las Flores, El Mirador, Pomoco, La Esmeralda, Nuevo Ayotoxco, Rancho Viejo	-98.84511	21.45839	904.39
20	Chimalaco	-98.94488	21.46474	344.38
21	Arroyo de En Medio, Calcahual, Cuatlácatl, Cuayo Cerro, Escalante, Mapotla, La Purísima, Xoloco, Zacayuhual, Cuayo Buena Vista, Agua Fría Dos, Fracción Ahuehueyo, Barrio El Saucito, La Mora	-98.88999	21.46412	1911.81
22	Cuatecoyo, La Laja	-98.86729	21.47259	240.39
23	El Aquichal, Rancho Nuevo, Fracción el Cerro, Rancho Las Huastecas	-98.81927	21.47523	1764.84
24	Tampochocho, El Sacrificio, Cuayo Buenavista, Ejido La Libertad	-98.85704	21.48855	1089.09

Levantamiento de datos en campo

Durante 6 días se llevó a cabo una salida a campo al municipio de estudio para recabar información de las características del suelo y vegetación predominante. Para ello se trazaron de 1 a 2 puntos de muestreo por microcuenca delimitada.

Corrección y predicción de variables

Para predecir los valores futuros de precipitación y temperatura se usaron registros mensuales históricos de cinco años para cada estación. En el caso de datos faltantes en la serie de tiempo correspondiente, éstos se imputaron por medio de la metodología del filtro de Kalman, Moritz, (2016), y posteriormente, se usaron modelos de series de tiempo para generar los pronósticos de interés.

Para cada variable, temperatura o precipitación, y para cada estación se consideró un modelo de serie de tiempo del tipo autorregresivo, de promedios móviles integrados y estacional, es decir SARIMA de la forma $\{(p,d,q) \times (P,D,Q)\}_s$, ver Brockwell and Davis (2016) por ejemplo.

Los modelos se estimaron mediante el procedimiento ARIMA del sistema SAS, versión 9.4, SAS Institute (2012), usando el método de máxima verosimilitud. La selección de modelos, entre modelos candidatos considerados, se contempló el criterio de Akaike (AIC), la significancia de los coeficientes estimados en el modelo particular, así como el comportamiento de las funciones de autocorrelación parcial y de autocorrelación parcial de los residuales, ver Brockwell and Davis (2016).

Una vez estimado cada modelo, para la variable y estación de interés, se predijeron los valores de la variable respuesta en cuestión para los 12 meses futuros.

Estado base

Ecuación universal de pérdida de suelo

Esta metodología combinó cinco factores principales: $A = R * K * LS * C * P$

Donde A es la pérdida de suelo (ton/ha/año), R es la erosividad de la lluvia, K es la erodabilidad del suelo, LS es el factor de longitud-pendiente, C es el factor de la cobertura del suelo y P es el factor de prácticas de conservación.

Las capas ráster empleadas fueron proyectadas en el sistema UTM, zona 14 norte, utilizando como referencia el sistema geodésico WGS84.

Factor R

Se utilizaron 33 años de datos de precipitación media mensual, desde el año 1990 al 2023, los cuales fueron recabados del portal del Sistema Meteorológico Nacional, localizando 8 estaciones meteorológicas (Cuadro 2) dentro y en los límites del área de estudio.

Cuadro 4. Estaciones consideradas para el modelo

Estación	Nombre	Coordenadas	Altitud (msnm)
24026	Requetemu	21.418056, -98.883333	88
24084	Tancuilin	21.391667, -98.875000	92
24105	Xilitla	21.385556, -98.990556	676
24125	Tlamaya	21.430833, -99.008333	619
24167	Matlapa	21.326667, -98.838889	442
24182	Tampamolón	21.560833, -98.819167	91
24186	Huichihuayán	21.471667, -98.971667	91
24201	Totomoxtla	21.378333, -98.763056	107

Se aplicó la fórmula de Índice Modificado de Fournier (Blanco & Jiménez, 2022) y se generó un mapa de erosividad de la lluvia, interpolando los datos del IMF en ArcGIS con la herramienta IDW.

$$IMF = \sum_{i=1}^{12} \frac{P_i^2}{P}$$

Donde Pi es la precipitación mensual (mm) del mes i y P es la precipitación total anual (mm).

Factor K

El mapa de suelos proporcionado por la FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura) se utilizó como base para determinar las propiedades del suelo de manera estandarizada, incluyendo textura, contenido de arcilla y carbono orgánico, en conjunto con trabajo realizado en campo. Los datos de propiedades de los suelos (Cuadro 3) se organizaron en una tabla en formato Excel y se aplicó la fórmula según (Liu et al., 2024; Chakraborty et al., 2025). Finalmente, se interpolaron los valores de K, y se obtuvo el ráster de erodabilidad del suelo.

Cuadro 5. Proporciones de arena, limo, arcilla y carbono orgánico de los 4 tipos de suelo presentes en el área de estudio.

Unidad de suelo	Nombre	Arena %	Limo %	Arcilla %	Carbono orgánico%
HL	Feozem	39.1	26.5	34.6	1.46
LO	Luvisol	76	9.9	14.1	0.41
RC	Regosol	63.5	19.2	17.3	0.76
VP	Vertisol	25.1	12.2	62.7	0.68

$$K = 0.1313 \cdot f_{careg} \cdot f_{cl-ar} \cdot f_{ccorg} \cdot f_{caref}$$

Donde f_{careg} es el contenido de arena gruesa, f_{cl-ar} es la relación limo/arcilla, f_{ccorg} es el contenido de carbono orgánico, f_{caref} es el contenido de arena fina y el valor de 0.313 corresponde a un factor de conversión entre el sistema de unidades inglés y el sistema métrico internacional (Prado-Hernández et al. 2017).

$$f_{careg} = 0.2 + 0.3 \cdot \exp \left[-0.0256 \cdot C_{arena} \cdot \left(1 - \left(\frac{C_{limo}}{100} \right) \right) \right]$$

$$f_{cl-ar} = \left(\frac{C_{limo}}{C_{arcilla} + C_{limo}} \right)^{0.3}$$

$$f_{ccorg} = \left[1 - \frac{0.25 \cdot C_{ccorg}}{C_{ccorg} + \exp(3.72 - 2.95 \cdot C_{ccorg})} \right]$$

$$f_{caref} = \left[1 - \left(\frac{0.70 \left(1 - \frac{C_{arena}}{100} \right)}{\left(1 - \frac{C_{arena}}{100} \right) + \exp \left[-5.51 + 22.9 \left(1 + \frac{C_{arena}}{100} \right) \right]} \right) \right]$$

Donde C_{arena} es el contenido de arena, C_{limo} es el contenido de limo, $C_{arcilla}$ es el contenido de arcilla y C_{ccorg} es el contenido de carbono orgánico.

Factor LS

Se utilizó un Modelo Digital de Elevación (DEM) con una resolución espacial de 15 metros, proporcionado por el Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI, 2013).

Para su cálculo, se empleó la herramienta Raster Calculator de ArcGIS, utilizando fórmulas estándar basadas en el DEM para derivar los valores adimensionales de pendiente y longitud del terreno (Das et al., 2022):

$$\lambda = \left(\frac{A_{acum}}{\pi} \right)^{0.5}$$

$$\frac{\frac{\sin \beta}{0.0896}}{3 \cdot (\sin \beta)^{0.8} + 0.56}$$

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

$$S = 10.8 \sin \theta + 0.3, \quad \text{para } S < 9\%$$

$$S = 16.8 \sin \theta + 0.5, \quad \text{para } S \geq 9\%$$

$$LS = \left(\frac{\lambda}{22.13} \right)^m * S$$

Donde A_{acum} es el área acumulada de la cuenca en modelo raster, β es el ángulo de la pendiente ($^{\circ}$) y λ es la longitud de declive o pendiente.

Factor C

La Carta de Uso de Suelo y Vegetación Serie VII (INEGI, 2021) sirvió como base para identificar los tipos de cobertura vegetal y uso del suelo en el área de estudio.

A partir de esta información, se llevó a cabo un proceso de reclasificación temática, en el que se agruparon y simplificaron las categorías originales hasta obtener seis clases principales. Posteriormente, se asignaron valores del coeficiente de cobertura vegetal C según tablas de referencia y datos

recolectados en campo (Cuadro 4) (Castro Mendoza et al., 2015). Finalmente, estos valores fueron incorporados a un mapa ráster mediante el software ArcGIS.

Cuadro 6. Valores del factor C de acuerdo con la reclasificación de clases.

Clases de uso del suelo originales	Clases reclasificadas	Valores de factor C
Asentamientos humanos	Asentamientos humanos	0
Cuerpo de agua	Cuerpo de agua	0
Pastizal cultivado	Pastizal cultivado	0.04
Agricultura de temporal anual y permanente	Agricultura	0.5
Agricultura de temporal permanente	Agricultura	0.5
Agricultura de temporal semipermanente y permanente	Agricultura	0.5
Vegetación secundaria arbustiva de selva alta perennifolia	Selva Alta Perennifolia	0.011
Vegetación secundaria arbórea de selva alta perennifolia	Selva Alta Perennifolia	0.011
Vegetación secundaria arbórea de selva mediana subperennifolia	Selva Mediana Subperennifolia	0.011

Factor P

Este factor fue evaluado mediante trabajo de campo en las microcuencas de estudio donde se registraron prácticas locales de conservación del suelo, como terrazas y barreras vegetales. Los datos obtenidos en campo fueron sistematizados en hojas de cálculo (Excel) y se asignaron valores al factor P con base en la literatura técnica y en las condiciones reales observadas. Estos

valores fueron incorporados en ArcGIS para ajustar el modelo de acuerdo con las pendientes del terreno y las técnicas de manejo identificadas.

En el caso del estado base, dado que las prácticas de conservación se identificaron en usos de suelo ligado a pastizales y laderas de producción frutícola, se asignaron los valores de 0.5 y 0.75, respectivamente. El escenario 1 conservó sus valores y para los escenarios 2 y 3 se muestran en el Cuadro 5.

Escenarios

Se elaboraron en total cuatro mapas de erosión: un mapa de estado base y tres escenarios futuros para el año 2026. En los cuales, los factores que se modificaron fueron los factores R y P. Dado que en ausencia de prácticas de manejo $p = 1$, por lo tanto, para los distintos escenarios (cuadro 5), se asignaron valores considerando una combinación de observaciones en campo y revisión de literatura (Arias-Muñoz et al., 2023).

Cuadro 7. Valores asignados al factor P por cada escenario.

Escenario	Valor del factor P	Descripción
1	De 0.50-0.75	Si se conservan las prácticas de conservación actuales
2	1	Escenario catastrófico donde las prácticas de conservación son nulas
3	De 0-0.50	El mejor escenario, donde las prácticas de conservación se mejoran, se añaden otras más y se extienden a mayor área de estudio

Balance hídrico

Se compiló una base de datos de datos climáticos (temperatura y precipitación) que abarcó el periodo de 1990 a 2023, de las ocho estaciones meteorológicas mencionadas anteriormente, desde en el portal del Sistema Meteorológico Nacional, debido a la falta de algunos datos de las variables, se utilizó el método de Thornthwaite, ideal para zonas con características edafoclimáticas de vegetación densa y clima cálido húmedo (Aragón-Hernández et al., 2024).

Se empleó la fórmula general de balance hídrico, compuesta por:

$$P = ETP + Q + \Delta S$$

Donde P es la precipitación, ETP es la evapotranspiración, Q es la esorrentía y ΔS es el cambio en el almacenamiento.

Evapotranspiración

Se calculó el factor de corrección F_c por mes y estación, en función de sus latitudes. Por duración media de las horas de sol expresada en unidades de 30 días, con 12 horas de sol cada una. Posteriormente se calculó el índice térmico mensual i (Anggraini & Slamet, 2021).

$$i = \left(\frac{T}{5}\right)^{1.514}$$

$$a = (6.75 \times 10^{-7})I^3 - (7.71 \times 10^{-5})I^2 + (1.79 \times 10^{-2})I + 0.49$$

Donde i es el índice térmico mensual, T es la temperatura promedio (°C) e I es el índice térmico anual.

Para obtener la evapotranspiración no corregida, se empleó la ecuación:

$$ETP_{nc} = 16 \left(\frac{10 \times T_m}{I} \right)^\alpha$$

Donde ETP_{nc} es la evapotranspiración del mes (mm), T_m es la temperatura media mensual (°C), I es el índice térmico anual de Thornthwaite, α es el exponente calculado con base en I (también conocido como exponente de Thornthwaite)

Más adelante, se empleó el producto entre la ETP_{nc} y el F_c para calcular la evapotranspiración corregida ETP_c .

Excedentes y déficits

De acuerdo con el comportamiento de la precipitación y la evapotranspiración se determinaron los periodos de secas y excedentes, en cada una de las estaciones meteorológicas.

$$\text{Si } PP > ETP_c \Rightarrow \text{Excedente} = \text{Reserva de agua real} - 100$$

(Donde 100 es la capacidad máxima del suelo)

$$\text{Si } PP < ETP_c \Rightarrow \text{Déficit} = ETP_c - PP - \Delta H$$

Finalmente se interpolaron los valores obtenidos en ArcGIS y se aplicó la fórmula general de balance hídrico por cada mes y anualmente.

Priorización de microcuencas

Mediante la herramienta zonal statistics en ArcGIS, se calculó el área por rango de erosión (>10 ton/ha/año), para cada escenario. Después, se le asignó un peso de prioridad (Singh et al., 2021) de acuerdo con el rango de pérdida de suelo, en el cual el valor 1 es menos y 3 es más.

$$I_e = \frac{(w_1 \cdot 1) + (w_2 \cdot 2) + (w_3 \cdot 3)}{6}$$

Donde w_1 es el área erosionada (ha) con 10-25 ton/ha/año, w_2 el área erosionada con 25-50 y w_3 el área erosionada >50 ton/ha/año.

Se obtuvo el promedio de disponibilidad hídrica anual por microcuenca. Finalmente, ambos resultados se normalizaron (Romero-Rojas et al., 2019) y se conformó un índice de priorización general, con pesos iguales de 0.5.

$$I_g = (0.5 \cdot EH) + (0.5 \cdot DH)$$

Donde EH es la erosión hídrica y DH es la disponibilidad hídrica.

Resultados y discusión

Control de la erosión

La microcuenca 13 registró el valor más alto de erosión en el estado base (158 ton/ha/año). Por su parte, la número 20 presentó los mayores valores en los tres escenarios: 166, 221 y 55 ton/ha/año, respectivamente (Fig.1). Actualmente,

2,572 hectáreas del municipio se encuentran bajo alguna categoría de erosión superiores a 10 ton/ha/año. De acuerdo con el índice de erosión construido, las microcuencas mayormente afectadas por el grado y extensión de procesos erosivos son la 8 con 47.54, 21 con 56.84, la 18 con 66.52 y la 17 con 120.76 (Fig. 2).

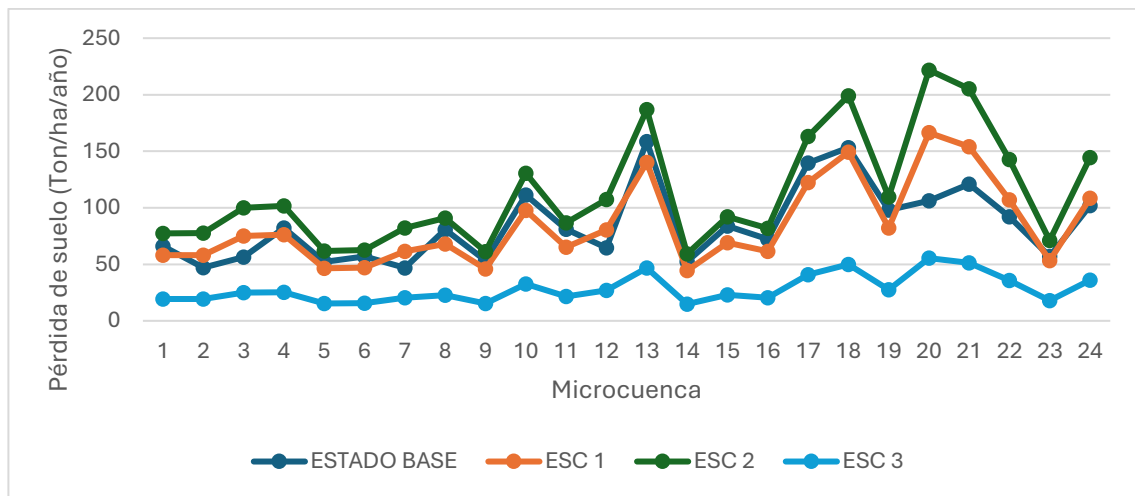


Figura 7. Representación gráfica de los valores máximos de erosión por escenario y por cada microcuenca.

Estas elevadas tasas de erosión representan riesgos directos para las actividades agrícolas locales y para la seguridad hídrica de las comunidades asentadas en la zona, como El Madrigal y Chimalaco. Aunado a la superficie que ocupan, las localidades más afectadas serían Coamila, Coatzontitla, Arroyo de en Medio, Xoloco, Zacayuhual y Picholco. Con impactos directos como la reducción de su productividad agrícola (de temporal), la sedimentación de cuerpos de agua, disminución de la capacidad del suelo para retener agua y nutrientes, provocando la reducción de la biodiversidad (Areu-Rangel et al., 2024).

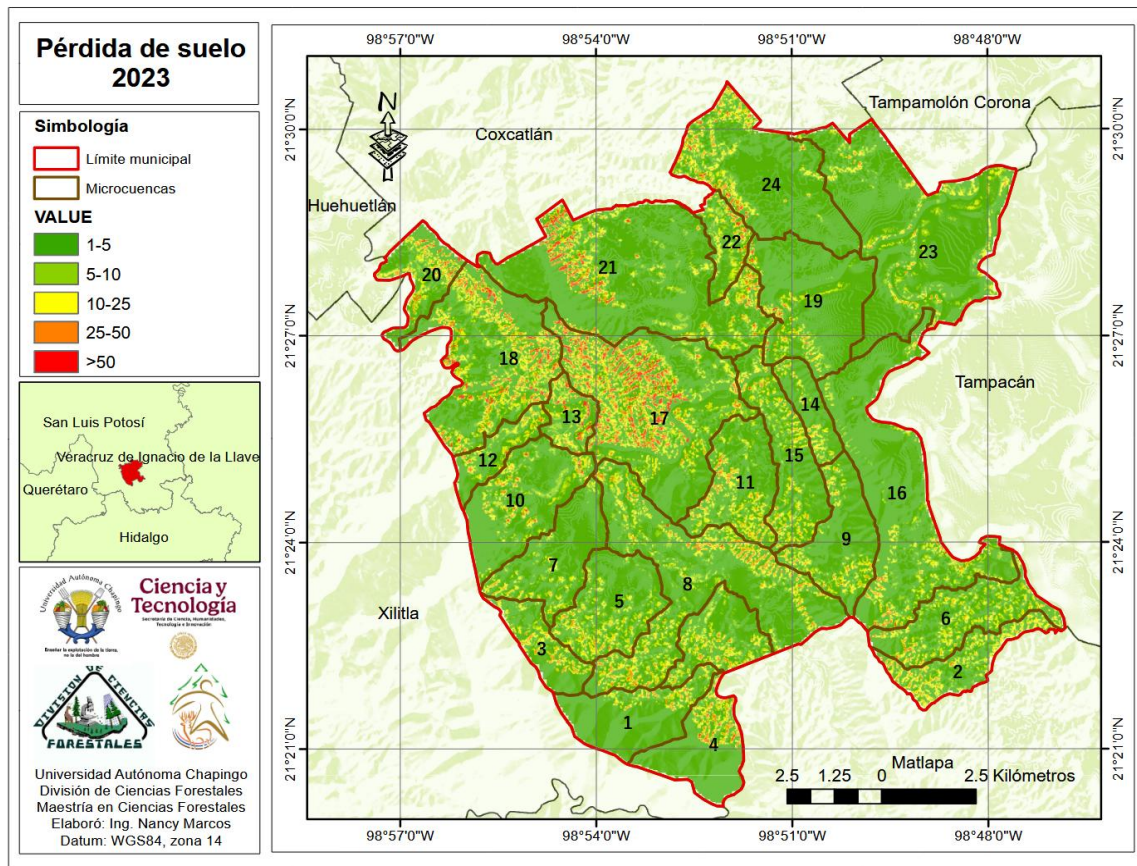


Figura 8. Mapa de distribución espacial de las tasas de pérdida de suelo por rango.

Según la clasificación de Castro-Villarreal et al. (2022), se establecen siete categorías de pérdida de suelo, desde muy baja (<5 ton/ha/año) hasta crítica (>200 ton/ha/año) (Cuadro 6). Dado que los suelos con pérdida de 5-10 ton/ha/año se clasifican como suelos con escasa erosión y pérdida dentro de los rangos aceptables, se consideraron tres categorías para efectos de este estudio (>10 ton/ha/año).

Cuadro 8. Categorización de tasas de pérdida de suelo por rango, según Castro Villarreal et al. 2022.

Categoría	Rango (ton/ha/año)	Interpretación
-----------	-----------------------	----------------

Muy baja	0 – 5	Suelos no susceptibles al proceso erosivo
Baja	5 – 10	Suelos con niveles de erosión baja y pérdidas tolerables
Moderada	10 – 25	Zonas con procesos erosivos leves
Media	25 – 50	Zonas con pérdida de suelo poco tolerables
Alta	50 – 100	Suelos con procesos de erosión graves
Muy alta	100 – 200	Sitios donde la erosión se aprecia con frecuencia
Crítica	>200	Zonas con procesos erosivos extremos

En el escenario tendencial, donde se mantienen las actuales prácticas de manejo sin contemplar cambios significativos en la cobertura del suelo, el área susceptible a erosión disminuiría ligeramente en un 2% (2,275 ha) para el año 2026. Por el contrario, si las prácticas de manejo existentes fueran eliminadas o resultaran inefectivas, se proyecta un aumento del área erosionada a 2,955 hectáreas, equivalente a un 15% del municipio. En cuanto al escenario 3, considerado como el más favorable, que supone la adopción de estrategias óptimas de conservación del suelo y restauración de cobertura vegetal, la superficie afectada se reduciría a casi 400 hectáreas, es decir, tan sólo el 2% de la zona de estudio (Cuadro 7).

Cuadro 9. Área erosionada por cada rango.

Escenario	Rango (ton/ha/año)		
	De 10 a 25	De 25 a 50	> 50
s			
Base	1841.20	594.87	135.92
1	1704.39	478.41	92.64
2	1979.85	753.12	222.80
3	370.21	12.79	0.04

Contribución hídrica

Aunque hay variabilidad, la mayoría de los valores promedio del saldo neto del agua por microcuenca se encuentran entre 700 y 850 mm/año, lo que sugiere una condición relativamente húmeda en gran parte del territorio. Las microcuencas con 852 mm/año y con 848 mm/año indican que tienen mayor excedente hídrico, posiblemente por una mayor precipitación o menor demanda evaporativa. Estas zonas pueden ser relevantes para la recarga de acuíferos o almacenamiento de agua. La microcuenca con 337 mm/año destaca como la más baja, puede ser una zona con alta evapotranspiración o menor precipitación. Estas áreas podrían ser más susceptibles a estrés hídrico en temporadas secas, por lo que requieren atención especial en su manejo (Fig. 3).

En el 2023, la mayoría de las estaciones concordaron en el periodo de déficit o sequía en los meses de marzo a mayo, y el excedente de agosto a octubre. Además, la esorrentía es siempre positiva, aunque llega a alcanzar puntos muy bajos en temporada de estiaje (Fig. 4).

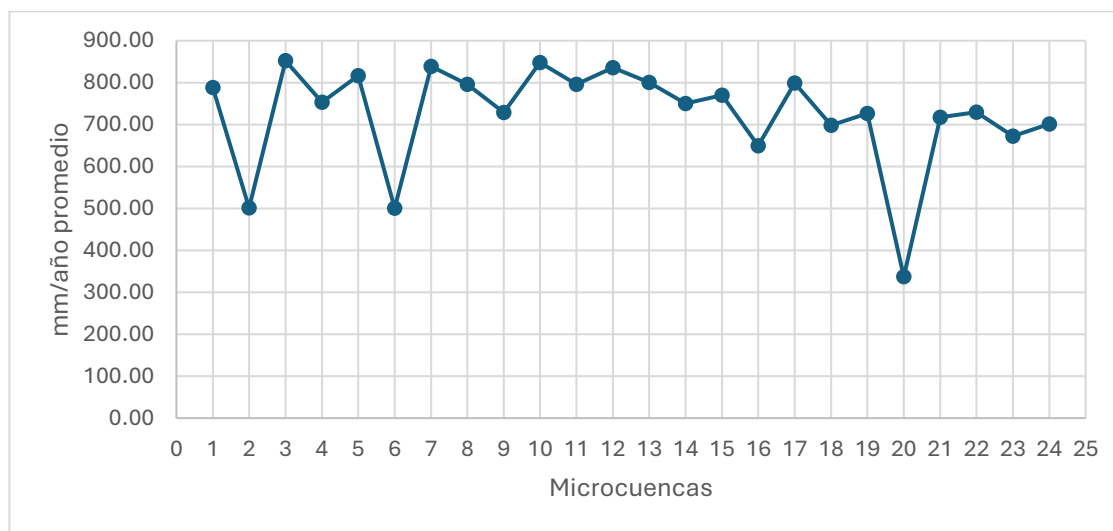


Figura 9. Distribución gráfica del saldo neto del agua promedio por microcuenca al año.

En contraste con la predicción, la temporada de estiaje también se presentaría en julio y agosto. Y la disponibilidad de agua sería menor, de manera general.

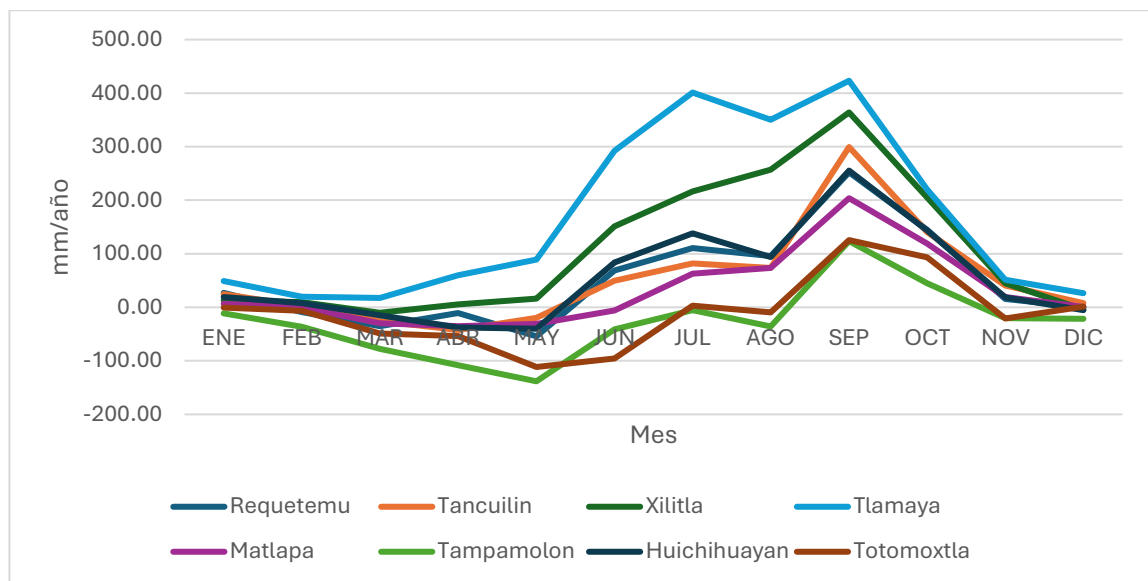


Figura 10. Comportamiento promedio anual de la disponibilidad hídrica por estación meteorológica en el estado base.

Espacialmente, la contribución hídrica tiende a incrementar a medida que las estrificaciones se hacen más pronunciadas (Fig. 5) (Bravo-Cadena et al., 2021), ya que pertenece a las faldas de la Sierra Madre Oriental, es decir, que es una zona de transición entre relictos de bosque mesófilo de montaña y selva mediana perennifolia. Las microcuencas con alta disponibilidad hídrica son 3, 10, 7 y 12, con 852, 848, 839 y 835 mm/año promedio.

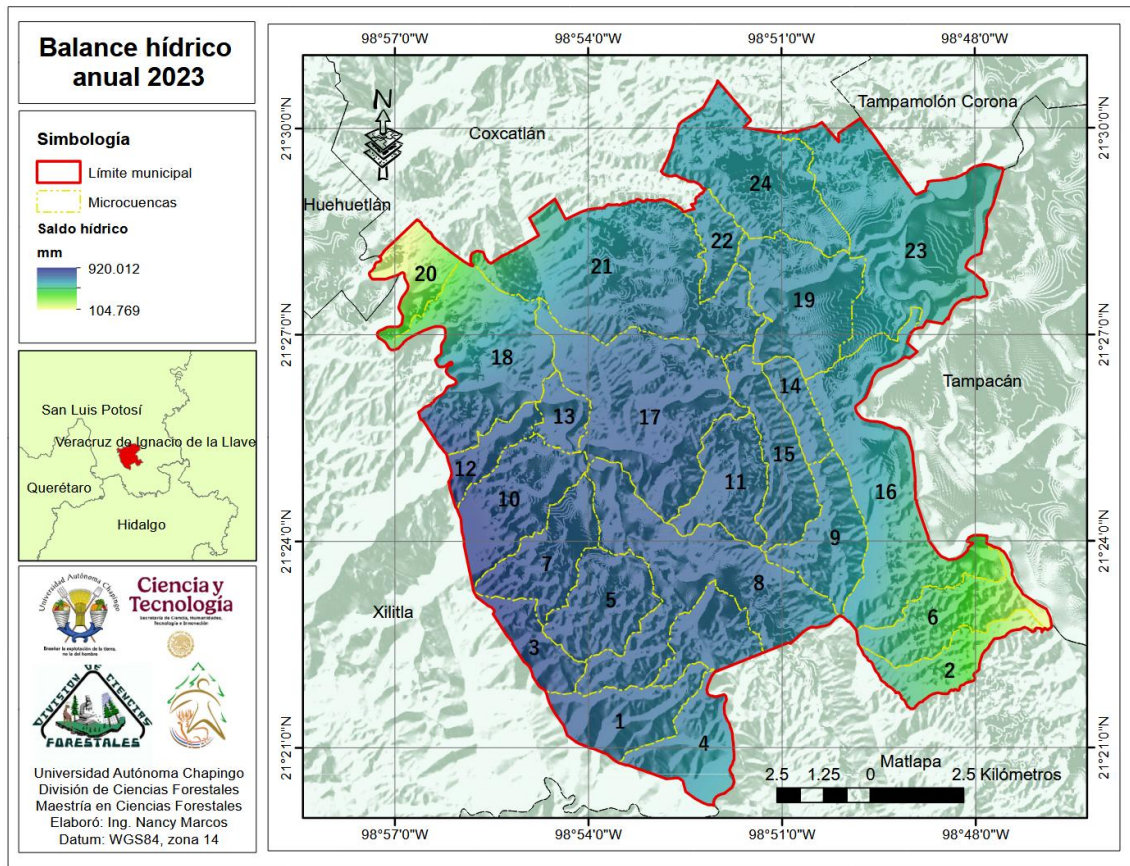


Figura 11. Mapa de la distribución espacial anual de la disponibilidad de agua.

Priorización de microcuencas

Tomando en cuenta la superficie y grado de afectación por procesos erosivos, y la distribución de la disponibilidad hídrica, se identificaron 6 microcuencas prioritarias a manejo (Cuadro 8). En el caso de la contribución hídrica entre mayor sea el índice, menor es su aporte, y en el caso de la erosión entre mayor sea el índice, se habla de una mayor pérdida de suelo.

Cuadro 10. Índice de prioridad de manejo de microcuencas.

Número	Contribución hídrica	Erosión	Índice
1	0.12	0.03	0.08
2	0.68	0.09	0.39
3	0.00	0.04	0.02
4	0.19	0.18	0.19
5	0.07	0.08	0.07
6	0.68	0.11	0.40
7	0.03	0.02	0.02
8	0.11	0.37	0.24
9	0.24	0.05	0.15
10	0.01	0.07	0.04
11	0.11	0.12	0.11
12	0.03	0.02	0.03
13	0.10	0.10	0.10
14	0.20	0.00	0.10
15	0.16	0.10	0.13
16	0.39	0.10	0.25
17	0.10	1.00	0.55
18	0.30	0.53	0.42
19	0.24	0.07	0.16
20	1.00	0.08	0.54
21	0.26	0.45	0.36
22	0.24	0.05	0.14
23	0.35	0.09	0.22
24	0.29	0.17	0.23

Las seis microcuencas señaladas como zonas de riesgo muestran suelos con características específicas que explican por qué son tan propensas a la erosión y tienen poca agua disponible (Cuadro 9). En la capa más superficial, abundan suelos con consistencia de arcilla pura o mezclada con arena, con un nivel de acidez entre 5 y 7, y la cantidad de materia orgánica varía desde escasa hasta muy abundante; la presencia de carbonatos va de inexistente a muy elevada. En la capa inferior, la consistencia es más variada, incluyendo mezclas de arcilla y limo, así como arena combinada con arcilla y tierra; la profundidad oscila entre 33 y 98 cm, y la cantidad de materia orgánica suele ser baja o moderada.

Cuadro 11. Características de los suelos de las microcuencas prioritarias por puntos de muestreo. Información recopilada en campo.

Micro- cuenca	Horizonte 1					Horizonte 2				
	Textura	pH	Profundidad (cm)	M.O.	Carbo- natos	Textura	pH	Profundidad (cm)	M.O.	Carbo- natos
2	Arcilloso	7	12	Bajo	Muy alto	Arcilloso	7	33	Bajo	Muy alto
6	Arcilloso	6	27	Alto	Nulo	Arcillo limoso	7	55	Medio	Alto
17	Arcillo arenoso	6	23	Alto	Medio	Arcillo arenoso	6	47	Alto	Muy bajo
18	Arcillo limoso	6	43	Medio	Nulo					
20	Arcillo arenoso	6	52	Alto	Nulo	Arcilloso	6	98	Bajo	Nulo
21	Arcilloso	5	24	Alto	Nulo	Arcillo limoso	5	50	Medio	Muy bajo
21	Arcillo arenoso	7	24	Muy alto	Nulo	Franco arcillo arenoso	7	43	Medio	Muy alto

Las características de las microcuencas identificadas como vulnerables se alinean con estudios previos que ilustran cómo los atributos físicos y químicos del suelo, así como el uso del suelo y la vegetación existente, influyen directamente en la erosión hídrica y el equilibrio del agua en el área (Echavarría-Cháirez et al., 2023). La existencia de componentes arcillosos y combinaciones de arcilla y arena, unidas a cambios en la proporción de materia orgánica y carbonatos, afectan la forma y la capacidad del terreno para retener agua, impulsando así el flujo superficial y la pérdida de suelo (Torres Benites et al., 2020). Además, la escasa profundidad de las capas del suelo (en especial de los horizontes superficiales) reduce la cantidad de agua aprovechable para las plantas, intensificando la fragilidad hídrica (Jaya-Santillán, 2023).

Conclusiones

El escenario tendencial muestra una reducción mínima del área erosionada, lo que indica que mantener las prácticas actuales de manejo del suelo no es suficiente para revertir o controlar el problema de erosión en la región. La mayor parte del municipio se encuentra en categorías de pérdida de suelo moderada y baja, es decir, aún hay un margen de acción preventiva antes de que se alcancen niveles de erosión severa o crítica.

Las microcuencas que presentan los valores más altos (852 y 848 mm/año) podrían tener un mayor excedente hídrico, ya sea por un régimen de precipitación más abundante o por una menor demanda evaporativa. Estas áreas representan sitios estratégicos para la recarga de acuíferos y el almacenamiento de agua, por lo que deberían ser priorizadas en esquemas de conservación y manejo hídrico territorial.

Por otro lado, la microcuenca con el valor más bajo (337 mm/año) evidencia una posible condición de déficit hídrico, atribuible a una menor precipitación o una elevada tasa de evapotranspiración. Esta situación indica un mayor grado de vulnerabilidad ante eventos de sequía, lo cual subraya la necesidad de implementar medidas de manejo adaptativo, tales como la restauración de vegetación, la captación de agua de lluvia o el fortalecimiento de prácticas agroecológicas.

El estudio se alineó con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), en especial el ODS 15, que busca proteger, restaurar y promover el uso sostenible de los ecosistemas terrestres, así como combatir la degradación del suelo. Asimismo, el ODS 6 plantea la necesidad de asegurar la disponibilidad y la gestión sostenible del agua, lo cual se ve directamente afectado por la pérdida de suelo y la alteración del ciclo hidrológico.

La degradación observada en estas microcuencas no sólo representa una amenaza ambiental, sino también social y productiva, ya que compromete la capacidad de retención del suelo, incrementa la sedimentación de cuerpos de

agua y pone en riesgo la seguridad hídrica de las comunidades locales. En este sentido, impulsar estrategias de manejo territorial con un enfoque integral se vuelve urgente. Estas acciones deben orientarse tanto a la conservación del suelo como a la protección de los recursos hídricos, con base en un ordenamiento participativo que fortalezca la resiliencia local frente al cambio climático y el uso inadecuado del territorio.

Agradecimientos

Extiendo un agradecimiento a la Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación por el apoyo económico de manutención para poder enfocarme tiempo completo al desarrollo de esta investigación.

A la Universidad Autónoma Chapingo, mi alma mater, por las diversas oportunidades brindadas durante mi formación académica.

A mi director de investigación el Dr. Genaro Aguilar Sánchez y mis asesores, el Dr. Carlos Leopoldo Cántora González y el M.C. Juan Juárez Méndez, por la confianza brindada, sus atenciones y por compartir sus conocimientos.

A las localidades de Axtla de Terrazas por su disposición durante el trabajo en campo.

Declaración de conflictos de intereses

Los autores declaramos que no tenemos conflictos de intereses económicos ni relaciones personales conocidas que pudieran haber influido en el trabajo presentado en este artículo.

Referencias

Aragón-Hernández, J. L., Hernández González, L. A., Salas de León, D. A., & González Villarreal, F. J. (2024). Disponibilidad de agua: análisis distribuido espacialmente y evaluación de variables de entrada. *Revista H2Open*, 7(5), 333–350. <https://doi.org/10.2166/h2oj.2024.016>

- Areu-Rangel, O. S., Hernández-Hernández, M. Á., & Bonasia, R. (2024). Erosión y transporte de sedimentos impulsados por el cambio de uso del suelo en la subcuenca del río Yaqui (México): Perspectivas a partir de imágenes satelitales y simulaciones hidráulicas. *Tierra*, 13(11), 1846. <https://doi.org/10.3390/land13111846>
- Arias-Muñoz, P., Saz, M. A., & Escolano, S. (2023). Estimación de la erosión del suelo mediante el modelo RUSLE. Caso de estudio: cuenca media alta del río Mira en los Andes de Ecuador. *Investigaciones Geográficas*, (79), 207–230. <https://doi.org/10.14198/INGEO.22390>
- Anggraini, N., & Slamet, B. (2021). Modelos de Thornthwaite para estimar la evapotranspiración potencial en la ciudad de Medan. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 912, 012095. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/912/1/012095>
- Blanco Chávez, M. E., & Jiménez, E. (2022). Erosividad mensual de la lluvia determinada a partir de información de cuatro estaciones meteorológicas de Nicaragua. *La Calera*, 22(39). <https://doi.org/10.5377/calera.v22i39.14549>
- Bravo-Cadena, J., Pavón, N. P., Balvanera, P., Sánchez-Rojas, G., & Razo-Zarate, R. (2021). Balance disponibilidad-demanda de agua bajo escenarios de cambio climático en una región sobrepoblada de México. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 18(4), 1846. <https://doi.org/10.3390/ijerph18041846>
- Campos Rojas, Gabriel Gerardo, Lacayo Moya, María Félix, & Chavarría Fernández, Keylin Lorena. (2022). Identificación de servicios de los ecosistemas: reconocimiento y desafíos para la planificación del desarrollo. *Revista ABRA*, 42(65), 1-23. <https://dx.doi.org/10.15359/abra.42-65.1>
- Castro Mendoza, I., López Báez, W., López Hernández, M. A., & Guillén Villar, L. F. (2015). Áreas de conservación en subcuencas aportadoras del sistema hidroeléctrico Grijalva, México. *Ingeniería Hidráulica y Ambiental*, 36(1).

- Castro-Villarreal, J. A., Cabrera-Rodríguez, J. A., & Villarreal-Núñez, J. E. (2023). Pérdida de suelo evaluada por el método USLE en la subcuenca del río Estibaná, Panamá. *Acta Agronómica*, 71(4). <https://doi.org/10.15446/acag.v71n4.108071>
- Chakraborty, R., Ali, T., Pal, T., Pande, C. B., Elaksher, A. F., & Abioui, M. (2025). Climate change and land use dynamics: Modeling soil erosion scenarios to achieve sustainable development goals. *Earth Systems and Environment*. Advance online publication. <https://doi.org/10.1007/s41748-025-00631-0>
- Das, S., Bora, P.K. & Das, R. (2022). Estimation of slope length gradient (LS) factor for the sub-watershed areas of Juri River in Tripura. *Model. Earth Syst. Environ.* 8, 1171–1177. <https://doi.org/10.1007/s40808-021-01153-0>
- Díaz, S., Pascual, U., Stenseke, M., Martín-López, B., Watson, R. T., Molnár, Z., & Shirayama, Y. (2018). Assessing nature's contributions to people. *Science*, 359(6373), 270-272. <https://doi.org/10.1126/science.aap8826>
- Echavarría-Cháirez, F. G., Medina-García, G., & Ruiz-Corralba, J. A. (2023). Efecto en la erosión hídrica del suelo en pastizales y otros tipos de vegetación por cambios en el patrón de lluvias por el calentamiento global en Zacatecas, México. *Revista Mexicana de Ciencias Pecuarias*, 11(S2), 4694. <https://doi.org/10.22319/rmcp.v11s2.4694>
- FAO. (2007). Digital Soil Map of the World [Base de datos geoespacial]. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. <http://www.fao.org/geonetwork/srv/en/metadata.show?id=14116>
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía. (2013). *Continuo de Elevaciones Mexicano 3.0 (CEM 3.0)* [Modelo de elevación digital]. <https://www.inegi.org.mx/app/geo2/elevacionesmex/>
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía. (2021). *Conjunto de datos vectoriales de uso del suelo y vegetación, escala 1:250 000, Serie VII (2021)* [Capa SIG]. <https://www.inegi.org.mx/app/biblioteca/ficha.html?upc=889463791093>

- Ivanova, I. Y. (2022). Afectación de los servicios ecosistémicos hídricos en la cuenca del río Teatinos (páramo Rabanal) efecto del cambio de coberturas de la tierra – producto del cambio climático global. *Investigación e Innovación en Ingenierías*, 10(2), 196–215. <https://doi.org/10.17081/invinno.10.2.5856>
- Jaya-Santillán, J. (2023). Altos niveles de erosión hídrica en una microcuenca tropical calculado mediante el modelo USLE. *FIGEMPA: Investigación y Desarrollo*, 15(1), 26–39. <https://doi.org/10.29166/revfig.v15i1.4269>
- Li, J., Zhang, C., & Zhu, S. (2021). Relative contributions of climate and land-use change to ecosystem services in arid inland basins. *Journal of Cleaner Production*, 298, 126844. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.126844>
- Liu, Y., Fu, B., Wang, S., Rhodes, J. R., Li, Y., Zhao, W., Li, C., Zhou, S., & Wang, C. (2023). Global assessment of nature's contributions to people. *Science Bulletin*, 68(4), 424–435. <https://doi.org/10.1016/j.scib.2023.01.027>
- Liu, Z., Wang, M., Liu, X., Lyu, X., Wang, M., Wang, F., Ji, X., & Li, X. (2024). Spatiotemporal simulation and projection of soil erosion as affected by climate change in Northeast China. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 135, 104305. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2024.104305>
- Moritz, S. (2016a). imputeTS: Time Series Missing Value Imputation (R package version 1.7). <https://CRAN.R-project.org/package=imputeTS>
- Prado-Hernández, J. V., Rivera-Ruiz, P., León-Mojarro, B. de, Carrillo-García, M., & Martínez-Ruiz, A. (2017). Calibración de los modelos de pérdidas de suelo USLE y MUSLE en una cuenca forestal de México: Caso El Malacate. *Agrociencia*, 51(3), 265–284. http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1405-31952017000300265
- Romero-Rojas, W., Vázquez-Jiménez, R., & Ramos-Bernal, R. N. (2019). Estudio de susceptibilidad a procesos de remoción en masa. Caso de estudio: Zona centro del Estado de Guerrero, México, mediante herramientas

geotecnológicas. Revista Cartográfica, (98), 201–221.
<https://doi.org/10.35424/rcarto.i98.147>

Samuel, K. J., Durowoju, O. S., Ayeni, 'B., Adelabu, S. A., & Chigbundu, O. S. (2025). Geospatial analysis of soil erosion and implications for sustainable development goals in tropical ecological zones. *Discover Environment*, 3, Article 14. <https://doi.org/10.1007/s44174-025-00014-5>

Singh, W.R., Barman, S. & Tirkey, G. Morphometric analysis and watershed prioritization in relation to soil erosion in Dudhnai Watershed. *Appl Water Sci* 11, 151 (2021). <https://doi.org/10.1007/s13201-021-01483-5>

Torres Benites, E., Cortes Becerra, J., Uresti Gil, J., Torres Cedillo, L., & Rivera Torres, P. S. (2020). Predicción de la erosión hídrica en la cuenca del Cañón del Sumidero, Chiapas. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 11(8), 1903–1915. <https://doi.org/10.29312/remexca.v11i8.2747>

CAPÍTULO 4. CONCLUSIONES GENERALES

Se cumplió con el objetivo número 1, la delimitación de microcuencas utilizando herramientas de Hydrology en ArcGIS y se resalta la utilidad de los SIG en estudios de esta índole, porque permiten eficientizar los procesos, reduciendo el tiempo y recursos. Combinados con recorridos en campo permitieron realizar un análisis espacial integral por microcuenca.

La aplicación de la EUPS permitió estimar la tasa de erosión actual y sus proyecciones (Objetivo 2). Se demostró que la implementación de prácticas de conservación puede reducir significativamente la pérdida de suelo, mientras que su ausencia aumenta la vulnerabilidad de las microcuencas, especialmente en zonas con pendientes pronunciadas, vegetación degradada o nula.

La disponibilidad de agua varió entre microcuencas, estaciones meteorológicas y entre épocas de año, de acuerdo con lo reflejado en el balance hídrico (Objetivo 3). Cuyas fluctuaciones se relacionan con las características edafoclimáticas de cada unidad de estudio y su cobertura.

Se determinaron las microcuencas que necesitan ser manejadas con urgencia (Objetivo 4) para que al menos sus tasas de erosión no aumenten y mejoren su capacidad de almacenar agua.

Este estudio buscó alinearse con los ODS, especialmente con el 15 y el 6, que promueven la protección y restauración de los ecosistemas terrestres, así como garantizar la disponibilidad y gestión sostenible del agua, respectivamente. Se espera que este trabajo sirva como apoyo a los actores implicados para tomar mejores decisiones de planificación de recursos naturales en el municipio.