



BENEMÉRITA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE PUEBLA



INSTITUTO DE CIENCIAS

POSGRADO EN CIENCIAS AMBIENTALES

“La Tierra no es de nosotros, nosotros somos de la Tierra”

MODELO DE LA DINÁMICA ECOSISTÉMICA DE LA MICROCUCENCA HUEYATENO, PUEBLA

TESIS

Que para obtener el grado de:

DOCTOR EN CIENCIAS AMBIENTALES

Presenta:

Carlos Felipe Luna Bautista

Directora de tesis:

Dra. Rosalía del Carmen Castelán Vega



Enero 2026



BENEMÉRITA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE PUEBLA



INSTITUTO DE CIENCIAS

POSGRADO EN CIENCIAS AMBIENTALES

“La Tierra no es de nosotros, nosotros somos de la Tierra”

MODELO DE LA DINÁMICA ECOSISTÉMICA DE LA MICROCUCUENCA HUEYATENO, PUEBLA

TESIS

Que para obtener el grado de:

DOCTOR EN CIENCIAS AMBIENTALES

Presenta:

Carlos Felipe Luna Bautista

Directora de tesis:

Dra. Rosalía del Carmen Castelán Vega

Integrantes:

Codirector: Dr. José Víctor Rosendo Tamariz

Integrante de comité: Dra. Edith Chávez Bravo

Integrante de comité: Dr. Ricardo Darío Peña Moreno

Tutora: Dra. Wendy Argelia García Suastegui

Externo: Dr. Gonzalo Yanes Gómez

Enero 2026

ÍNDICE

| | |
|---|----|
| I. INTRODUCCIÓN | 1 |
| II. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA | 2 |
| III. JUSTIFICACIÓN | 3 |
| IV. MARCO TEÓRICO | 3 |
| 4.1 Sistemas Complejos | 4 |
| 4.2 Cuenca hidrográfica | 4 |
| 4.2.1 Microcuenca | 5 |
| 4.3 Salud Ambiental | 6 |
| 4.4 Modelo DPSIR | 7 |
| 4.5 Índices bióticos | 8 |
| 4.6 Sistemas de información geográfica | 8 |
| 4.7 Teledetección | 9 |
| 4.8 Cambio de uso de suelo y degradación ambiental | 9 |
| V. PREGUNTA DE INVESTIGACIÓN | 9 |
| VI. HIPÓTESIS | 9 |
| VII. OBJETIVOS | 10 |
| 7.1 Objetivo general | 10 |
| 7.2 Objetivos particulares | 10 |
| VIII. ZONA DE ESTUDIO | 10 |
| IX. DISEÑO DE LA EXPERIMENTACIÓN | 11 |
| 9.1. Etapa 1: De gabinete | 14 |
| 9.1.1 Caracterización biofísica de la microcuenca | 14 |
| 9.1.2. Caracterización socioeconómica de la microcuenca | 15 |
| 9.2. Etapa 2: De campo | 15 |
| 9.2.1 Análisis en agua | 16 |
| 9.2.1.1. Físicoquímicos | 16 |
| 9.2.1.2. Bioindicadores | 17 |
| 9.2.1.3 Salud del suelo | 18 |
| 9.3 Etapa 3: De integración | 19 |
| 9.3.1 Estrategia de análisis y validación: triangulación de métodos | 20 |
| X. RESULTADOS Y DISCUSIÓN | 20 |
| 10.1 Aspectos generales y delimitación | 20 |

| | |
|---|--------------------------------------|
| 10.2 Hidrología | 21 |
| 10.3 Curva hipsométrica | 22 |
| 10.4 Edafología | 24 |
| 10.5 Clima, precipitación total anual y temperatura media anual | 25 |
| 10.6 Climatología | 28 |
| 10.7 Pendientes | 29 |
| 10.8 Localidades y áreas de cultivo | 30 |
| 10.8.1 Zonas altitudinales de la microcuenca Hueyateno | 31 |
| 10.9. Caracterización y diagnóstico socioeconómico | 33 |
| 10.9.1. Población | 33 |
| 10.9.2. Economía | 33 |
| 10.9.3. Actividades agropecuarias y tenencia de la tierra | 34 |
| 10.9.4. Marginación | 37 |
| 10.9.5. Desarrollo humano | 38 |
| 10.9.6. Educación | 39 |
| 11. Determinación de calidad de agua de la microcuenca Hueyateno | 40 |
| 12. Determinación de la salud de la vegetación y cambio de uso de suelo | 45 |
| 12.1 Índice de vegetación diferencial normalizada | 45 |
| 12.2 Cambio de uso de suelo | 47 |
| 12.3 Impactos y Consideraciones | 52 |
| 13. Determinación de la salud del suelo de la microcuenca Hueyateno | 53 |
| 13.1 Materia Orgánica (MO) | 55 |
| 13.2 Nitrógeno Total (N) | 55 |
| 13.3 pH | 55 |
| 13.4 Conductividad Eléctrica (CE) | 56 |
| 13.5 Cationes Intercambiables (Ca, Mg, K, Na) | 56 |
| 13.6 Capacidad de Intercambio Catiónico (CIC) | 56 |
| 13.7 Textura del Suelo | 57 |
| 13.7.1 Clase textural | 57 |
| 13.7.2 Dinámica de la materia orgánica y nitrógeno | 57 |
| 13.7.3 Acidez y disponibilidad de nutrientes | ¡Error! Marcador no definido. |
| 13.7.4 Capacidad de Intercambio Catiónico (CIC) y Bases Intercambiables | 58 |
| 13.7.5 Textura e implicaciones para el uso del suelo | ¡Error! Marcador no definido. |

| | |
|--|----|
| 13.7.6 Perspectivas comparativas | 58 |
| 14. Análisis integral mediante el marco DPSIR para la gestión sostenible de la microcuenca Hueyateno | 65 |
| 14.1 Fuerzas motrices (Drivers) | 66 |
| 14.2 Presiones (Pressures) | 66 |
| 14.3 Estado (State) | 66 |
| 14.4 Impactos (Impacts) | 67 |
| 14.5 Respuestas (Responses) y Análisis de Gobernanza | 67 |
| 14.6 Discusión y Conclusiones del Análisis DPSIR | 68 |
| 14.7 Diagnóstico Integral mediante Triangulación Metodológica | 69 |
| XI. CONCLUSIONES | 71 |
| XII. LITERATURA CITADA | 72 |

Índice de figuras

| | |
|--|----|
| Figura 1. Estructura jerárquica de la microcuenca hidrográfica. | 6 |
| Figura 2. Ubicación espacial de la zona de estudio. | 11 |
| Figura 3. Diagrama metodológico. | 14 |
| Figura 4. Área de estudio: microcuenca del río Hueyateno. | 21 |
| Figura 5. Red hidrológica. | 22 |
| Figura 6. Clasificación de cuencas según forma de curva hipsométrica. | 22 |
| Figura 7. Curva hipsométrica de la microcuenca Hueyateno. | 23 |
| Figura 8. Clasificación de tipos de suelo en la microcuenca Hueyateno. | 25 |
| Figura 9. Clasificación de tipos de clima en la microcuenca Hueyateno. | 26 |
| Figura 10. Rango de precipitación en la microcuenca Hueyateno. | 27 |
| Figura 11. Rango de temperatura en la microcuenca Hueyateno. | 27 |
| Figura 12. Climograma de la microcuenca Hueyateno. | 28 |
| Figura 13. Balance hídrico para la zona de estudio. | 28 |
| Figura 14. Mapa de pendientes del terreno de la microcuenca Hueyateno. | 30 |
| Figura 15. Mapa de localidades y áreas de cultivo de la microcuenca Hueyateno. | 31 |
| Figura 16. Zonas de la microcuenca Hueyateno. | 32 |
| Figura 17. Sitios de colecta para muestras de agua y material biológico. | 40 |
| Figura 18. NDVI del mes de junio para los años 1993 (A) y 2023 (B). | 46 |
| Figura 19. Uso de suelo en la microcuenca Hueyateno en el año 1993. | 51 |

| | |
|---|----|
| Figura 20. Uso de suelo en la microcuenca Hueyateno en el año 2023. | 52 |
| Figura 21. Puntos de colecta de muestras de suelo. | 54 |
| Figura 22. Intervalos de confianza (95%) del contenido de materia orgánica en sistemas de uso del suelo agrupados por el método de Tukey. | 64 |
| Figura 23. Diagrama DPSIR de las relaciones socioeconómicas-ambientales de la microcuenca Hueyateno. | 66 |

Índice de cuadros

| | |
|--|----|
| Cuadro 1. Indicadores propuestos de determinantes de salud ambiental. | 12 |
| Cuadro 2. Colecta de muestras de agua en la Microcuenca Hueyateno. | 17 |
| Cuadro 3. Familias de macroinvertebrados identificados en la microcuenca Hueyateno. | 18 |
| Cuadro 4. Métodos para determinar variables del suelo. | 18 |
| Cuadro 5. Análisis de las muestras del suelo de la microcuenca Hueyateno. | 19 |
| Cuadro 6. Parámetros fisiográficos de la microcuenca Hueyateno. | 24 |
| Cuadro 7. Bosque y neblina en la microcuenca Hueyateno. | 26 |
| Cuadro 8. Datos totales de hombres y mujeres en la zona de estudio. | 33 |
| Cuadro 9. Indicadores de calidad económica de la microcuenca Hueyateno. | 34 |
| Cuadro 10. Producción agrícola en la microcuenca Hueyateno. | 35 |
| Cuadro 11. Producción ganadera en la microcuenca Hueyateno. | 36 |
| Cuadro 12. Indicadores de marginación en la microcuenca Hueyateno. | 37 |
| Cuadro 13. Índice de Desarrollo Humano en la microcuenca Hueyateno. | 38 |
| Cuadro 14. Población analfabeta en la microcuenca Hueyateno. | 39 |
| Cuadro 15. Población de 15 años y más, por nivel de escolaridad en la microcuenca Hueyateno | 39 |
| Cuadro 16. Parámetros de calidad de agua. | 41 |
| Cuadro 17. Contaminación urbana en el río Hueyateno. | 43 |
| Cuadro 18. Correlación de Spearman entre parámetros de calidad de agua VS índice biológico. | 44 |
| Cuadro 19. Pérdida de área por clase de uso de suelo en la microcuenca Hueyateno (1993-2023). | 47 |
| Cuadro 20. Tasa de cambio anual por clase de uso de suelo en la microcuenca Hueyateno (1993-2023). | 48 |
| Cuadro 21. Matriz de transición de uso del suelo en la microcuenca Hueyateno entre 1993 y 2023. | 49 |
| Cuadro 22. Coordenadas geográficas en UTM de los sitios de colecta de suelo. | 54 |
| Cuadro 23. Promedio de los indicadores de fertilidad de la microcuenca Hueyateno. | 60 |

Cuadro 24. Diferencias significativas en materia orgánica del suelo entre sistemas de uso agrícola y zonas altitudinales.

AGRADECIMIENTOS

La realización de esta tesis no habría sido posible sin el apoyo, la comprensión y el aliento de muchas personas a las que deseo expresar mi más profundo agradecimiento.

En primer lugar, quiero agradecer a mi familia, el pilar fundamental en todo este proceso.

Agradezco también a mi directora y codirector de tesis Rosalía Castelán Vega – Víctor Tamariz Flores por su orientación, confianza y valiosas sugerencias que han enriquecido notablemente este trabajo. Su disponibilidad y rigor académico han sido esenciales para completar esta etapa. De igual modo, extendiendo mi gratitud al resto del comité, a los profesores y compañeros del Centro de Investigación en Ciencias Agrícolas que, con sus comentarios, ideas y apoyo, han contribuido al desarrollo de esta investigación.

No puedo olvidar a mis más cercanos, quienes han estado presentes en las largas jornadas de estudio, en las celebraciones de pequeños avances y en los momentos en que necesitaba desconectar. Gracias por escucharme, por hacerme reír y por recordarme que no estaba solo en esta aventura. Finalmente, agradezco a todas aquellas personas que, de forma directa o indirecta, han formado parte de este camino. Este logro también es suyo.

Con cariño y gratitud,

-Carlos Felipe Luna Bautista

RESUMEN

La microcuenca Hueyateno, ubicada en la Sierra Nororiental de Puebla, alberga a 57,887 habitantes y enfrenta un proceso de deterioro ambiental asociado a la transformación de sus usos de suelo. El análisis de la calidad del agua mostró un marcado gradiente desde condiciones favorables en la parte alta hasta un deterioro severo en la zona baja, evidenciado por la disminución del oxígeno disuelto (7.9 a 2.1 mg/L), el incremento de la DBO₅ (menor a 4.5 hasta 78 mg/L), el aumento de sólidos disueltos totales (11 a 102 mg/L) y conductividad eléctrica (160 a 600 μ S/cm), así como altas concentraciones de nutrientes (nitrógeno amoniacal hasta 8.0 mg/L y fosfatos hasta 4.6 mg/L). Los valores del índice BMWP oscilaron entre 8 y 56, destacando la mejor calidad biológica en la zona media asociada al bosque mesófilo de montaña conservado, y los valores más bajos en la parte baja vinculados a descargas domésticas y agrícolas.

El análisis multitemporal del NDVI reveló un deterioro significativo de la cobertura vegetal, pasando de valores entre 0.67 y 0.02 en 1993 a un rango de 0.51 a -0.65 en 2023, lo que refleja pérdida de áreas boscosas, incremento de superficies urbanas (1601.67 ha) y agrícolas (935.15 ha), así como deforestación neta de 2519 ha. Estos cambios están asociados a procesos de urbanización, intensificación agrícola y degradación del suelo.

Mediante el marco DPSIR se identificó que las principales fuerzas motrices corresponden a las actividades agrícolas, ganaderas y a la expansión urbana, las cuales detonan presiones como deforestación, agricultura de temporal y contaminación hídrica por agroquímicos y descargas domésticas. Estas presiones se traducen en impactos negativos en la calidad del agua y en la integridad de los ecosistemas acuáticos, concentrándose en la parte baja de la cuenca.

En conjunto, los resultados muestran que la microcuenca Hueyateno enfrenta un proceso de degradación socioecológica derivado de la pérdida de cobertura forestal, el aumento de actividades productivas y la presión urbana, lo que compromete la sostenibilidad ambiental y la seguridad hídrica en la región.

I. INTRODUCCIÓN

El impacto del crecimiento económico y urbanización a costa del detrimento de la calidad ambiental es cuestionado en la actualidad en las esferas científicas y políticas. El incremento de la densidad poblacional y de los niveles de producción y consumo ha sido progresivo a nivel internacional y nacional, al igual que los desechos y residuos resultantes de esos procesos productivos, lo que ha generado una considerable contaminación ambiental a escala mundial (Kattan, 2001; Yang et al., 2024).

La contaminación ambiental es definida como la presencia de sustancias, organismos o formas de energía en ambientes a los que no pertenecen en cantidades superiores a las propias de dicho sustrato, hasta tal punto que los procesos ambientales se vean afectados negativamente (Muralikrishna & Manickam, 2017).

Los efectos negativos de los residuos contaminantes sobre el agua, aire y suelo son motivo de preocupación, debido a que representan una amenaza para el mantenimiento de los servicios ecosistémicos, pero también para la salud humana y de las poblaciones naturales silvestres (Bikham et al., 2000; Shetty et al., 2023). En este sentido, la Organización Mundial de la Salud introduce el concepto de “Salud Ambiental”, que comprende los aspectos de la salud humana, incluida la calidad de vida y el bienestar social, que son determinados por factores ambientales físicos, químicos, biológicos, sociales y psico-sociales. Por lo tanto, la evaluación y protección de la salud ambiental es indispensable para el bienestar del medio ambiente y de las poblaciones.

Los contaminantes generados por la intensificación de las actividades agrícolas, pecuarias y, en algunos casos, la minería, son considerados pasivos ambientales que expresan silenciosamente efectos adversos en la biota y el humano, se dispersan en los diferentes compartimentos socio-ambientales, siendo el compartimento acuático uno de los más afectados, debido a que es el receptáculo final de todos los residuos generados (Mesa, 2010; Marisa et al., 2024).

En este contexto cobra relevancia la importancia de la evaluación de las determinantes de la condición de salud ambiental de las cuencas nacionales, en donde se establezcan las interrelaciones complejas que determinan el deterioro de los ecosistemas y su impacto en el detrimento de la salud humana, sirviendo como una herramienta de apoyo para la toma de

decisiones acertadas dentro de las políticas, estrategias, planes, programas o proyectos de manejo sustentable de las mismas.

II. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

La microcuenca Hueyateno, ubicada en la Sierra Nororiental de Puebla, enfrenta una grave problemática socioambiental vinculada a su alta marginación y dispersión poblacional. Estas condiciones dificultan la provisión eficiente de servicios básicos y propician la migración hacia centros urbanos y al extranjero. La principal actividad económica, la agricultura de temporal, emplea técnicas que favorecen un alto grado de erosión hídrica, particularmente en laderas con inclinaciones superiores al 30% y con una precipitación promedio anual de 3000 mm (Can-Chulim et al., 2014).

Esta situación se ve agravada por el azolvamiento y la contaminación de sus ríos, causados por la presencia de presas y la constante descarga de aguas residuales domésticas sin tratar, lo que ha desencadenado evidentes procesos de eutrofización.

El conjunto de estos factores representa un riesgo significativo para la salud de los ecosistemas y de la población local, generando elevados costos ambientales y sanitarios. A pesar de la relevancia de esta problemática, ha recibido escasa atención por parte de las autoridades en los tres niveles de gobierno, así como insuficiente investigación científica para generar una línea base sobre el estado ambiental de la microcuenca.

Por lo tanto, esta investigación pretende realizar un diagnóstico de la salud ambiental de la microcuenca Hueyateno. El objetivo es analizar la problemática desde un enfoque de sistemas complejos dinámicos y adaptativos, estableciendo las interrelaciones y propiedades emergentes mediante indicadores de determinantes de salud ambiental que expliquen los procesos de degradación identificados.

III. JUSTIFICACIÓN

La creciente preocupación global por los problemas ambientales derivados de las actividades humanas y la gestión inadecuada de los recursos naturales ha posicionado al agua dulce como un elemento crítico para el mantenimiento de la vida y el equilibrio de los ecosistemas. Las microcuencas se rigen como unidades funcionales fundamentales del territorio, donde convergen e integran dinámicas ecológicas, sociales y productivas. La microcuenca del río Hueyateno, ubicada en la Sierra Nororiental de Puebla, representa un claro ejemplo de este entramado complejo. Este espacio estratégico concentra múltiples usos del recurso hídrico como la agricultura, la ganadería y el abastecimiento humano, los cuales, aunados a la alta marginación y dispersión poblacional, ejercen una presión constante sobre el sistema ambiental. Las manifestaciones de esta presión, tales como la pérdida de cobertura vegetal, la alteración de la calidad del agua, el deterioro del suelo y los procesos de eutrofización, evidencian la necesidad de una evaluación integral que trascienda visiones fragmentadas. Un enfoque holístico resulta indispensable para comprender esta dinámica ecosistémica compleja. La incorporación de indicadores de salud ambiental de tipo físico-químico, biológico y funcional se presenta como una herramienta clave para analizar el estado actual del sistema, identificar las presiones e impactos, y proponer respuestas de manejo efectivas. Estos indicadores permiten generar diagnósticos robustos y establecer las bases para un monitoreo ambiental sostenido.

La presente investigación se justifica en la urgente necesidad de generar una línea base del estado ambiental de la microcuenca mediante un enfoque de sistemas complejos. El modelo propuesto de dinámica ecosistémica, apoyado en herramientas de teledetección, sistemas de información geográfica (SIG) e indicadores de determinantes de salud ambiental, facilitará la identificación de patrones de deterioro, el establecimiento de interrelaciones y la orientación de estrategias de conservación, restauración y uso sostenible. Este abordaje integral resulta fundamental para comprender la microcuenca como una totalidad articulada y proporciona información valiosa para la toma de decisiones ante una problemática que ha sido insuficientemente estudiada y atendida.

IV. MARCO TEÓRICO

4.1 Sistemas Complejos

La complejidad puede definirse como el tejido de eventos, acciones, interacciones, retroacciones, determinaciones, azares, que constituyen el mundo fenoménico (Morin, 2009). De esta forma, dentro de las Ciencias Ambientales una de las principales teorías que apoyan y soportan a las investigaciones es la Teoría General de Sistemas, propuesta por Ludwin Von Bertalanffy, donde se recalca el hecho que se debe constituir un mecanismo de integración entre las ciencias naturales y sociales, al mismo tiempo que debe ser un instrumento básico para la formación y preparación de científicos (Arnold y Osorio, 1998).

Con base a lo anterior Rolando García, en su publicación “*Sistemas complejos*” (2006), retoma dicha Teoría de Sistemas para integrarla en su hipótesis como paradigma fundamental que permita resolver problemas de índole ambiental. De acuerdo con García (2006) “en el ‘mundo real’, las situaciones y los procesos no se presentan de manera que puedan ser clasificados por su correspondencia con alguna disciplina en particular. En ese sentido, se puede hablar de una *realidad compleja*. Por tanto, *un sistema complejo* es una representación de un recorte de esa realidad, conceptualizándolo como una *totalidad organizada* (sistema), en el cual los elementos no son separables y, por ende, no pueden ser estudiados aisladamente”.

En otras palabras, los sistemas complejos se caracterizan por la confluencia de múltiples procesos cuyas interrelaciones constituyen la estructura de un sistema que funciona como una totalidad organizada. Por consiguiente, para comprender la complejidad de un sistema, como lo es el ambiente, debe entenderse que las interacciones entre la totalidad y las partes no pueden ser analizadas fraccionando el sistema en un conjunto de áreas parciales que correspondan al dominio disciplinario de cada uno de los elementos (García, 1994). Por ende investigar un sistema significa estudiar un ‘trozo de realidad’ que incluye los aspectos físicos, biológicos, sociales, económicos y políticos que lo componen (García, 2006).

4.2 Cuenca hidrográfica

Una cuenca hidrográfica se entiende como toda la porción de la superficie terrestre cuyas aguas provenientes de la precipitación se vierten a un determinado curso de agua, grande o pequeño, que posteriormente puede, o no, descargarse al mar; siendo así su función

hidrológica semejante al de un colector que recibe la precipitación pluvial y la convierte en escurrimientos que están definidos por el relieve (Cruz-Romero *et al.*, 2015; Martínez-Duarte, 2006). Cabe señalar, que la cuenca puede dividirse a su vez en subcuencas y microcuencas. El área de la subcuenca está delimitada por la divisoria de las aguas del afluente, que forma parte de otra cuenca, que es la del cauce principal al que fluyen sus aguas. La microcuenca es una agrupación de pequeñas áreas de una subcuenca o de parte de ella (Ramakrishna, 1997).

Sin embargo, no hay que olvidar que una cuenca se conforma de componentes biofísicos, como el agua y el suelo; biológicos, tales como la flora y la fauna; y antropocéntricos donde se incluye aspectos socioeconómicos, culturales, políticos, institucionales. Dichos componentes están mutuamente interrelacionados guardando cierto equilibrio entre sí, de tal forma que al afectarse uno de ellos, se produce un desbalance que pone en peligro todo el sistema (Ramakrishna, 1997).

Por tanto, la cuenca debe entenderse como un sistema natural, donde el agua es uno de los principales factores limitantes dentro de la dinámica y el desarrollo de factores físicos, biológicos, sociales, y económicos en el espacio y en el tiempo (Martínez-Duarte, 2006). Es decir, una cuenca es un sistema complejo debido a que contiene una gran variedad de componentes, niveles jerárquicos y alta intensidad de interconexiones. Además, es sistema dinámico, que está interrelacionado y gobernado por procesos de retroalimentación, auto-organizado, adaptativo y dependiente de su historia (Cotler, 2007). Epistemológicamente esto se fundamenta con la teoría general de sistemas de Ludwin Von Bertalanffy, que aborda el problema de la complejidad a través de un pensamiento de totalidad, complementando a su vez el reduccionismo científico (Martínez-Duarte, 2006).

4.2.1 Microcuenca

Es importante considerar que una microcuenca es un área geográfica que se encuentra dentro de una cuenca mayor (Fig.1), en la cual existen interacción entre los aspectos económicos, sociales y ambientales en donde se puede considerar y tratar esta zona como un núcleo social en donde hay intereses comunes como el uso del agua, la infraestructura, el uso del suelo, etc. (Sanchez-Velez et al., 2003).

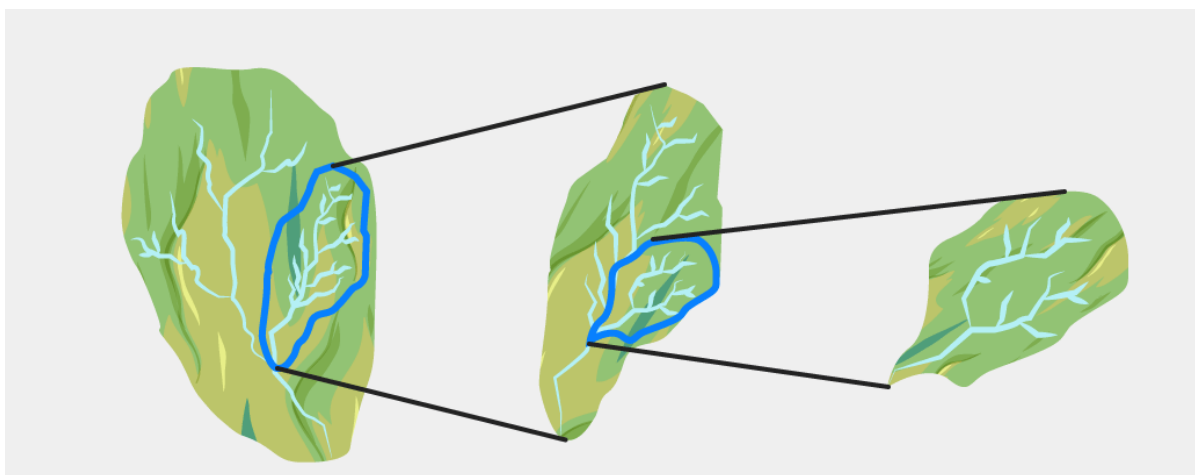


Figura 1. Estructura jerárquica de la microcuenca hidrográfica.

4.3 Salud Ambiental

Los ecosistemas son importantes para la salud y vida humana, si los ecosistemas se encuentran contaminados o degradados habrá un impacto en todas las formas de vida (Albrecht et al., 2017).

El impacto de las actividades antropogénicas hacia la salud de los ecosistemas es una relación que engloba una red compleja en donde se debe obtener información para un uso y manejo sostenible de los recursos naturales (Burkhard et al., 2008). Es por ello que, los datos obtenidos deben reflejar los impactos antropogénicos que representen la compleja relación de causa y efecto en los sistemas humano-ambiente, en la cual se necesita la comprensión de las dimensiones sociales, económicas culturales, etc., (Kruse, 2018).

De manera general, un sistema se define como saludable cuando tiene resiliencia y es sostenible para el suministro de bienes y servicios empleados por la sociedad, es decir, que implica que tiene la capacidad de mantener su estructura y función a lo largo del tiempo bajo un estrés externo, por lo tanto, la salud ambiental de los ecosistemas representa la

sostenibilidad que ostentan y en conjunto la necesidad de un apoyo externo mediante medidas de gestión integrando las dimensiones sociales (Burkhard et al., 2008).

Determinantes de la salud ambiental (DetSA) son los factores o hechos de la realidad física ambiental sobre los que se debe actuar a fin de satisfacer necesidades de los seres humanos relacionadas con la salud ambiental (Allesina y Bodini, 2008).

4.4 Modelo DPSIR

Las cuencas hidrográficas tienen una gran cantidad de procesos interrelacionados que actúan entre sus componentes físicos, químicos y biológicos. Las diversas actividades humanas que se desarrollan en este sistema ejercen presión sobre este entorno complejo y los efectos ambientales acumulativos de estas actividades sobre el sistema varían según la intensidad, el número y las escalas espaciales y temporales de las presiones asociadas. Existe una necesidad creciente de demostrar, cuantificar, predecir y comunicar los efectos de las actividades humanas en estos componentes interrelacionados a través del espacio y el tiempo mediante el empleo de indicadores (Patricio et al., 2016)

En términos de desarrollo de políticas, los indicadores ambientales se utilizan principalmente para tres propósitos: 1. Proporcionar información sobre problemas ambientales para que los formuladores de políticas puedan evaluar su gravedad 2. Apoyar el desarrollo de políticas y el establecimiento de prioridades mediante la identificación de factores clave que ejercen presión sobre el medio ambiente 3. Vigilancia de la eficacia de las respuestas políticas (Smeets y Weterings, 1999).

Con un enfoque basado en indicadores para la presentación de informes ambientales, el modelo DPSIR tiene como objetivo describir los problemas ambientales identificando las relaciones causales entre el medio ambiente y diversas actividades antropogénicas en un contexto socioeconómico. En este marco, el desarrollo socioeconómico y las fuerzas socioculturales actúan como impulsores (D) de la actividad humana para aumentar o disminuir las presiones (P) sobre el medio ambiente. Por lo tanto, el estrés ambiental alterará el estado del medio ambiente (S) y provocará impactos en la salud humana, los ecosistemas y la economía (I). Estos pueden conducir a respuestas sociales (R) a los correspondientes

impulsores, presiones, condiciones ambientales o impactos a través de diversas medidas de mitigación, prevención o adaptación para los problemas ambientales identificados (Song y Frostell, 2012).

4.5 Índices bióticos

Los análisis de la calidad del agua basado en criterios biológicos se determinan mediante la observación de la variación de los organismos que existen en agua contaminada como los que se presentan en agua limpia (Acosta et al., 2009).

Uno de los índices más usados es el BMWP (Biological Monitoring Working Party) empleado como un método simple y rápido para evaluar la calidad ambiental del agua los macroinvertebrados como bioindicadores, el método emplea la identificación taxonómica de los organismos hasta nivel de familia, otorgándoles un puntaje que va del 1 a 10 de acuerdo a la tolerancia ante la contaminación del medio acuático. Las sumas de los puntajes de todas las familias taxonómicas identificadas proporcionan el puntaje total BMWP (Medina et al., 2010).

4.6 Sistemas de información geográfica

Los distintos eventos naturales y antropogénicos que existen en el mundo generan gran cantidad de información que es utilizada para conocer el estado pasado y actual de los ecosistemas, por lo que es necesario, un sistema de información geográfica (SIG), definido como un sistema que permite representar, analizar, modelar e incluso simular los datos, con ello constituye una herramienta de gran apoyo (Escobar et al., 2008).

Con el análisis de los datos que pueden ser o no espaciales, mediante los SIG, se pueden elaborar y visualizar mapas a fin de dar seguimiento y la toma de decisiones ante situaciones ambientales que sean adversas, planeaciones para construcciones, crecimiento urbano, etc., (Kareem Jebur, 2021). A través de esto, se visualiza la importancia de los SIG, para el monitoreo de los eventos ambientales que acontecen y acontecieron para correlacionar información revelarnos patrones y/o tendencias de acuerdo a los objetivos que persigamos.

4.7 Teledetección

La teledetección, conocida también como percepción remota, se define como las técnicas que nos permiten obtener información a distancia de un fenómeno que acontece en la superficie terrestre, sin tener la necesidad de estar en contacto directo o en tiempo real en el área de interés, todo esto es ayudado mediante los SIG para visualizar y analizar la información (Bella et al., 2008; Veneros et al., 2020) a fin de entender y comprender tendencias que pueden ir desde derretimiento de polos y aumento del nivel mar hasta incremento de la deforestación y cuestiones agrícolas.

4.8 Cambio de uso de suelo y degradación ambiental

La transformación del uso del suelo influye profundamente en la estructura del entorno natural, ya que afecta de manera directa a la biodiversidad, al clima y a la disponibilidad de los recursos naturales (Osman et al., 2023). Este proceso implica la conversión de áreas naturales en superficies destinadas a actividades urbanas, agrícolas u otros fines, lo que altera el equilibrio ecológico y compromete la sostenibilidad ambiental (Homem de Abreu Loureiro et al., 2023). Por ello, entender cómo ocurre este cambio es fundamental para diseñar estrategias que permitan reducir sus impactos negativos y promover una relación más equilibrada entre las actividades humanas y los ecosistemas.

V. PREGUNTA DE INVESTIGACIÓN

¿Cómo se configuran las interrelaciones entre los motores, presiones, estado, impactos y respuestas (DPSIR) que conforman el modelo de dinámica ecosistémica de la microcuenca Hueyateno, y qué propiedades emergentes surgen de dichas conexiones, influyendo en los determinantes de salud ambiental?

VI. HIPÓTESIS

Las prácticas productivas y las condiciones de marginación social ejercen una presión negativa sobre el subsistema ambiental de la microcuenca Hueyateno, lo que provoca un deterioro ambiental acelerado y retroalimentado. Este deterioro se manifiesta en un aumento simultáneo de la pérdida de cobertura vegetal, la erosión del suelo y la eutrofización del agua.

VII. OBJETIVOS

7.1 Objetivo general

- ❖ Caracterizar la dinámica ecosistémica de la microcuenca Hueyateno mediante la construcción de un modelo conceptual basado en el análisis de indicadores de salud ambiental del suelo, la vegetación y el agua, bajo un enfoque de sistemas complejos.

7.2 Objetivos particulares

- ❖ Evaluar la calidad del agua del río Hueyateno a través de parámetros fisicoquímicos y del índice BMWP utilizando macroinvertebrados acuáticos como bioindicadores.
- ❖ Determinar el estado de salud de la vegetación de la microcuenca mediante el análisis del índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI).
- ❖ Analizar la salud del suelo a partir de indicadores físico-químicos relevantes para la funcionalidad ecosistémica.
- ❖ Integrar los resultados obtenidos en un modelo conceptual de dinámica ecosistémica utilizando el marco DPSIR que evidencie las interrelaciones entre los subsistemas social, económico y ambiental.

VIII. ZONA DE ESTUDIO

La localización del sitio de estudio está en la subcuenca del río Apulco que se encuentra ubicada a $97^{\circ} 30' 12.35''$ longitud, $19^{\circ} 57' 52.94''$ latitud aguas arriba y $97^{\circ} 27'$ longitud, $20^{\circ} 13' 33.52''$ latitud aguas abajo, en el estado de Puebla (Fig. 2).

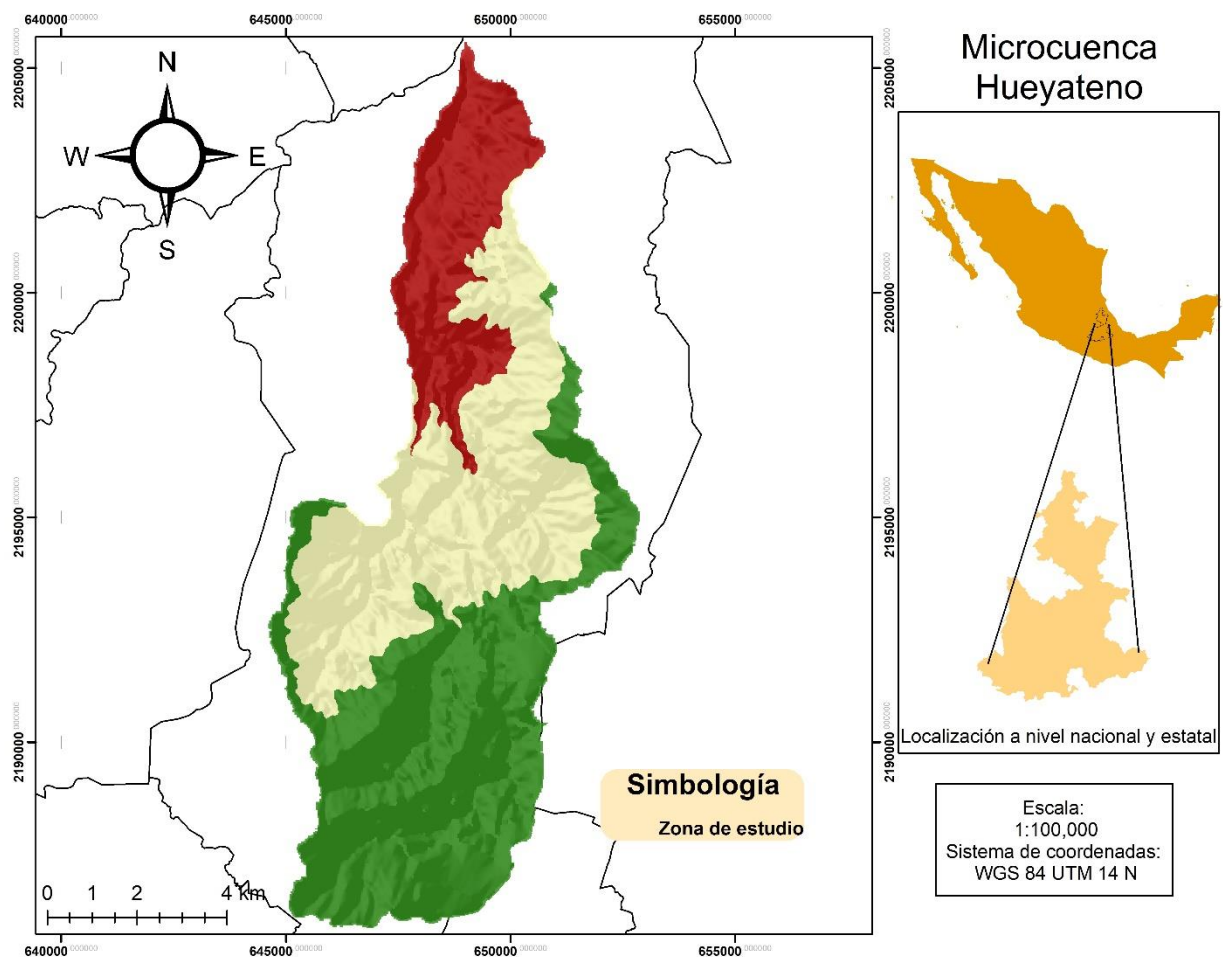


Figura 2. Ubicación espacial de la zona de estudio.

Cuenta con clima templado húmedo con lluvias todo el año, temperatura promedio de 18°C y precipitaciones de 3000 mm anuales, con vegetación predominante de bosque de pino, encino y pino-encino.

IX. DISEÑO DE LA EXPERIMENTACIÓN

El análisis de la dinámica ecosistémica requiere un enfoque integral que considere la interacción entre los subsistemas ambiental, social y económico. En este contexto, los indicadores son herramientas fundamentales para describir, evaluar y comparar el estado y funcionamiento de los sistemas socioecológicos (Gallopín, 1997; Niemeijer & de Groot, 2008). La presente investigación adopta un conjunto de indicadores representativos de los

determinantes de salud ambiental, seleccionados con base en su relevancia ecológica, disponibilidad de datos y aplicabilidad en estudios de microcuencas.

Para el subsistema ambiental, se eligieron indicadores relacionados con la salud del suelo (materia orgánica, pH, textura, capacidad de intercambio catiónico y conductividad eléctrica), ya que estos parámetros permiten evaluar la fertilidad y la degradación del suelo, aspectos clave en el funcionamiento ecosistémico (FAO, 2020; Doran & Parkin, 1994). En cuanto a la vegetación, se utilizó el índice NDVI y el análisis del cambio de uso de suelo como indicadores de cobertura y salud vegetal, ampliamente empleados en estudios de degradación ambiental y dinámica del paisaje (Pettorelli et al., 2005; Lambin et al., 2003). Para el componente hídrico, se consideraron parámetros fisicoquímicos junto con indicadores biológicos (índice BMWP con macroinvertebrados), siguiendo protocolos estandarizados que permiten evaluar la calidad ecológica de cuerpos de agua (Barbour et al., 1999; Ramírez, 2010).

En el subsistema económico, indicadores como la población económicamente activa, la tasa de participación y los censos agropecuarios permiten identificar los patrones productivos y su presión sobre los recursos naturales (Turner et al., 1990). Por su parte, el subsistema social se abordó mediante indicadores demográficos, educativos, de marginación y tenencia de la tierra, debido a su influencia directa en la gestión local del territorio y en la vulnerabilidad frente al deterioro ambiental (Ostrom, 2009; Berkes & Folke, 1998).

Cuadro 1. Indicadores propuestos de determinantes de salud ambiental.

| Subsistema | Grupo indicador | Indicador |
|-------------------|------------------------|---|
| Ambiental | Salud del Suelo | Materia orgánica pH Textura Capacidad de intercambio catiónico Conductividad eléctrica |
| | Clima | Precipitación media anual y mensual Temperatura media anual y mensual Evapotranspiración potencial Balance hídrico |
| | Calidad del agua | Parámetros fisicoquímicos Indicadores biológicos |
| | | Cambio de uso de suelo |

| | Salud de la vegetación | NDVI |
|-----------|------------------------|---|
| Económico | Economía | Población económicamente activa (PEA) Tasa de participación económica Censos agropecuarios y ganaderos |
| Social | Demografía | Población total: Hombres y mujeres |
| | Migración | Tasa de migración neta Población de 5 años y más emigrante |
| | Educación | Porcentaje de población de 15 años o más analfabeta Porcentaje de población de 15 años o más sin primaria completa |
| | Marginación | Índice de marginación Grado de marginación |
| | Desarrollo humano | Índice de desarrollo humano |
| | Tenencia de la tierra | Tipo de propiedad |

La integración de estos indicadores en un modelo ecosistémico permite representar las interacciones entre los distintos subsistemas, identificar propiedades emergentes y proponer estrategias de manejo ambiental basadas en evidencia. De esta manera, el enfoque metodológico no solo responde a la complejidad del sistema de estudio, sino que también posibilita la generación de información útil para la toma de decisiones en la microcuenca Hueyateno. La división natural del ambiente está asociada a ecosistemas determinados o a grandes ecosistemas como biomasa, unidades fitogeográficas o tipos forestales. Sin embargo, la unidad territorial que mejor refleja las relaciones e interacciones entre sociedad y naturaleza es la cuenca hidrográfica. Esto último por ser un sistema ambiental existente en el territorio delimitado por una línea divisoria a partir del cual las aguas superficiales o subterráneas escurren o drenan hacia un río o área en común. El carácter permanente de la divisoria de las aguas de las cuencas hidrográficas permite identificar las entradas y las salidas del sistema natural, por tanto, es posible aplicar un enfoque sistémico al análisis de los fenómenos y procesos del ambiente natural presente en la cuenca (Alfaro, 2005). Con base a lo anterior, se propone una metodología con enfoque de cuencas y la cual se divide en tres etapas básicas para cumplir con los objetivos planteados (Fig. 3).

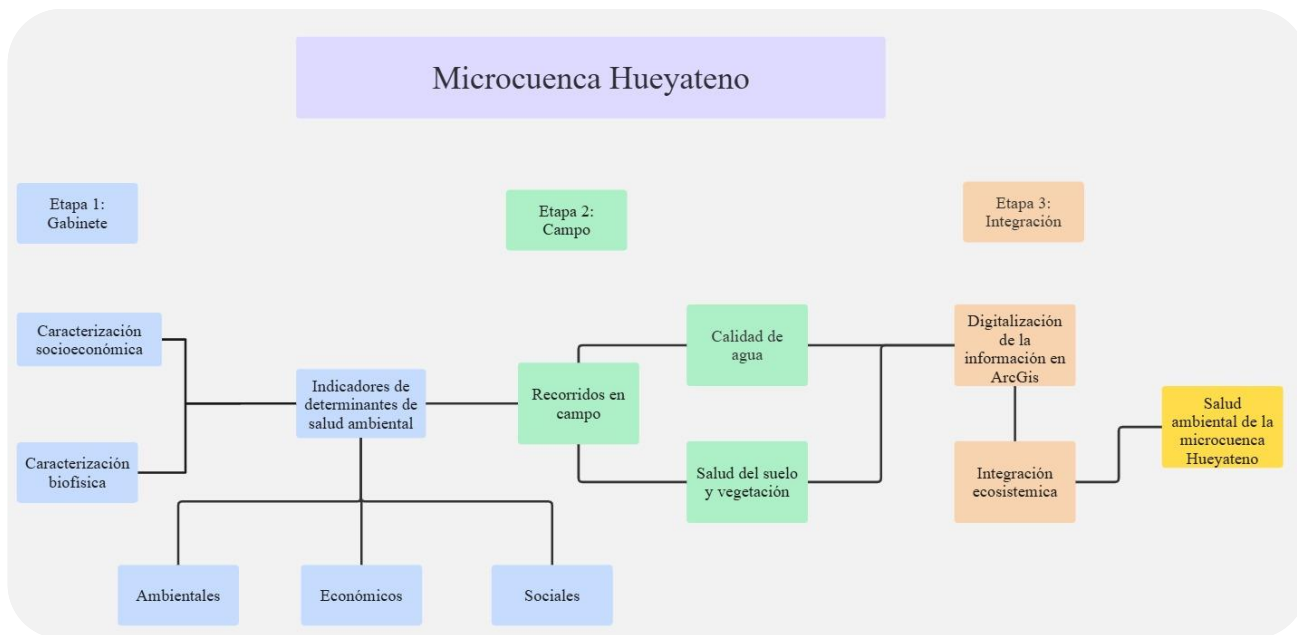


Figura 3. Diagrama metodológico.

9.1. Etapa 1: De gabinete

Se realizó una descripción detallada de los componentes ambientales y socioeconómicos de la microcuenca y sus interacciones. Para lograrlo se hizo una recopilación bibliográfica de toda la información disponible de la zona de estudio. Así como de estadísticos realizados por el Instituto Nacional de Estadística y geografía (INEGI, 2021), Consejo Nacional de Población (CONAPO, 2015). La finalidad es constituir y cuantificar las variables que tipifican el área de estudio, al mismo tiempo establecer una base de datos que permita definir y cuantificar los indicadores que se utilizarán en el diagnóstico de la salud ambiental de la zona de estudio, para finalmente realizar una digitalización de toda la información obtenida con el uso de sistemas de información geográfica (ArcGIS).

9.1.1 Caracterización biofísica de la microcuenca

La localización geográfica de la zona de estudio y la información referente a la fisiografía, edafología, vegetación, clima e hidrología se obtuvo mediante la generación de mapas temáticos de la microcuenca Hueyateno:

- Mapa de ubicación de la microcuenca Hueyateno. Fuente: microcuencas SIATL (2023)
- Mapa de climas. Fuente: García y CONABIO (1998), escala: 1:1000000
- Mapa de precipitación media anual. Fuente: Normales climatológicas por estado 1951-2010
- Mapa de temperatura media anual. Fuente: Normales Climatológicas por Estado (2021)
- Mapa de tipo de suelo. Fuente: SEMARNAP (1998), escala: 1:4000000
- Mapa uso de suelo y vegetación. Fuente: INEGI (2021), escala: 1:250000
- Mapa de curvas de nivel/pendientes. Fuente: CONABIO (1998), escala: 1:250000
- Mapa de hidrología. Fuente: CONABIO (1998), escala: 1:250000
- Mapa de zonas de la microcuenca: carta topográfica e14b15 conjuntos de datos vectoriales, escala 1:50 000

Para el mapa del índice diferencial de vegetación normalizada (NDVI), y cambio de uso de suelo se descargaron del sitio USGS Earth Explorer imágenes del satélite Landsat 5 del año 1993 y landsat 8 del año 2023, para procesar las imágenes en ArcGIS 10.8. se utilizaron las siguientes fórmulas: $NDVI = (NIR - R) / (NIR + R)$; $TDA = (S2/S1)^{1/n} - 1$.

9.1.2. Caracterización socioeconómica de la microcuenca

La caracterización socioeconómica de la microcuenca se realizó a partir del análisis de datos estadísticos proporcionados por el Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI) y el Consejo Nacional de Población (CONAPO). Esta información permitió cuantificar variables clave como la población total, los niveles de marginación, educación, migración, desarrollo humano, tenencia de la tierra, condiciones de salud y actividad económica. Dichas variables son fundamentales para entender las dinámicas sociales y económicas que interactúan con el sistema ambiental de la microcuenca, así como para identificar presiones y potenciales factores de riesgo que inciden sobre las determinantes de salud ambiental.

9.2. Etapa 2: De campo

Esta etapa estuvo dirigida a evaluar indicadores de determinantes de la salud ambiental de la microcuenca en los subsistemas biofísico y socio-económico, considerando su capacidad natural y las tendencias de las intervenciones humanas sobre el ambiente. Prioritariamente se pretenden conocer las características, potencialidades, interacciones,

causas y consecuencias, a la problemática de la microcuenca, desde una perspectiva de salud ambiental con ayuda de la determinación de indicadores pertinentes para cada subsistema de la microcuenca (Cuadro 1). Cabe señalar que en primera instancia se realizó un recorrido de reconocimiento para establecer los puntos de muestreo de agua y suelo, así como su georreferenciación.

9.2.1 Análisis en agua

9.2.1.1. Físicoquímicos

Se establecieron 3 estaciones georreferenciadas de muestreo para análisis físicoquímicos y colecta de material biológico, tomando de referencia los parámetros del índice de calidad de agua (ICA) de la CONAGUA se tomaron muestras de agua por triplicado en envases limpios y secos de plástico de 1 L para los análisis físicoquímicos (llenándose a contracorriente) (Cuadro 2). Para la medición de los parámetros de campo se empleó un equipo multiparamétrico HACH. El manejo y preservación de las muestras se realizó con base a la norma mexicana NMX-AA-14-1980.

Los parámetros físicoquímicos que se tomaron en cuenta para el estudio se agruparán en dos categorías, realizándolos por triplicado para cada estación de muestreo:

In situ: Oxígeno disuelto, sólidos disueltos totales (TDS), conductividad eléctrica (CE) y pH.

Laboratorio: nitrógeno amoniacal y fosfatos totales.

Para determinar la calidad del agua de los ríos se tomaron como referencia los límites máximos permisibles (LMP) establecidos en los criterios ecológicos de calidad del agua (CE CCA-001/89).

Cuadro 2. Colecta de muestras de agua del río en la Microcuencua Hueyateno.

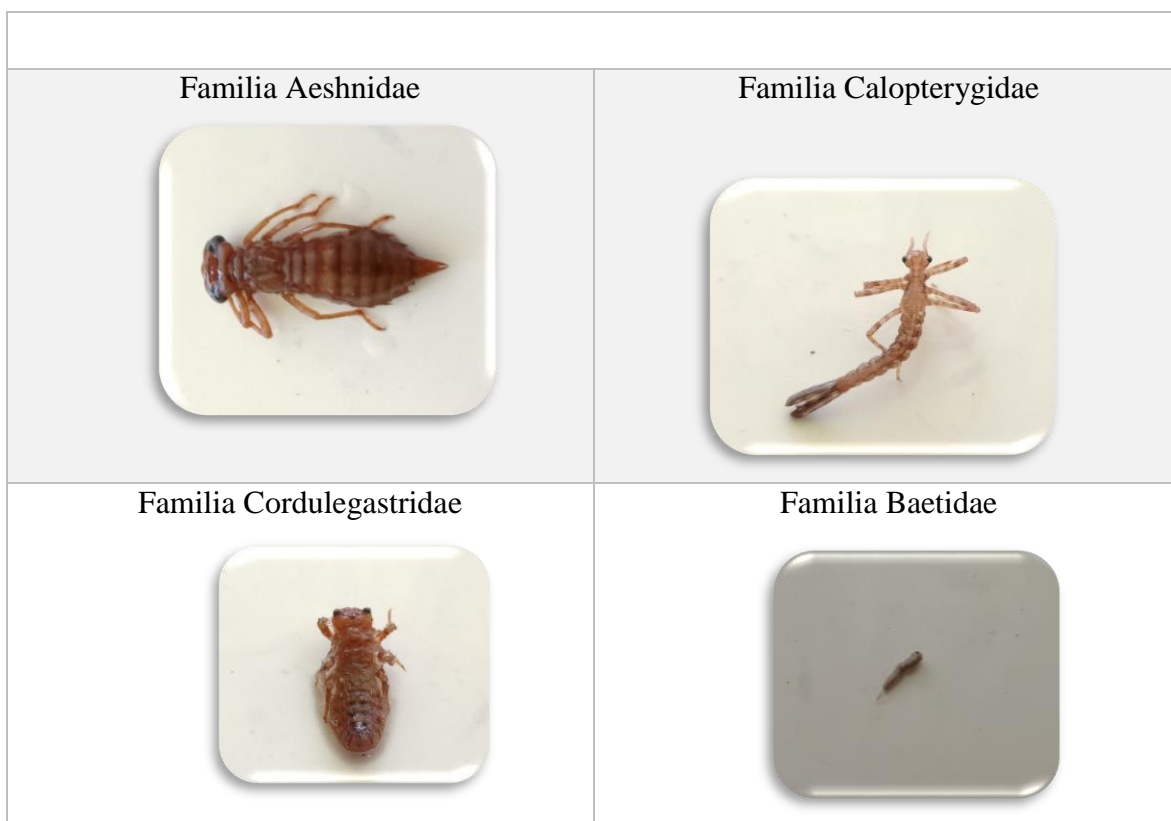


9.2.1.2. Bioindicadores

Se utilizó un tamiz de 500 μm de abertura para la recolección de los organismos, contracorriente, ayudado de unas pinzas entomológicas para su conservación en frascos con alcohol al 70% para su posterior traslado a laboratorio. Los organismos fueron identificados con la ayuda de un microscopio estereoscopio, mediante el apoyo de claves taxonómicas dicotómicas para llegar a nivel familia (Cuadro 3).

Familias de macroinvertebrados: Se usó la clasificación de Roldan (2003) modificada para México, que considera a las familias de insectos acuáticos con puntajes obtenidos del índice Biological Monitoring Working Party (BMWP) de 8-10= indicadores de buena calidad, 4-7= indicadores de mediana calidad y 1-3= indicadores de mala calidad. Aquellas familias que no toleran la pérdida de la calidad de agua tienen puntajes altos, mientras que las que toleran la pérdida de calidad tienen puntajes bajos. Las sumas totales de los puntajes de todas las familias encontradas en un sitio proporcionan el valor de la calidad del agua (Roldán, 2003).

Cuadro 3. Familias de macroinvertebrados identificados en la microcuenca Hueyateno.



Este enfoque permitió integrar los análisis fisicoquímicos y biológicos, lo que facilitó la obtención de resultados que evaluaron de manera integral la salud ambiental de la microcuenca Hueyateno.

9.2.1.3 Salud del suelo


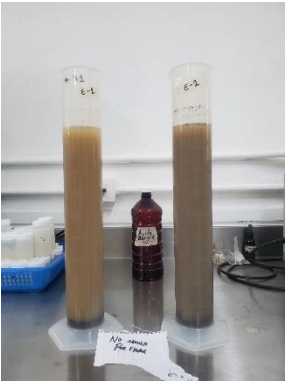

La caracterización fisicoquímica del suelo en la microcuenca Hueyateno permitió evaluar su fertilidad mediante muestras compuestas (Cuadro 5). Estos análisis emplearon los métodos establecidos en el Cuadro 4, conforme a lo indicado en la NOM-021-SEMARNAT-2000.

Cuadro 4. Métodos para determinar variables del suelo.

| Método | Tipo de determinación |
|--------|--------------------------------|
| AS-01 | Preparación de la muestra. |
| AS-02 | pH medido en agua. |
| AS-07 | Contenido de materia orgánica. |

| | |
|-------|---|
| AS-09 | Textura del suelo. |
| AS-12 | Capacidad de intercambio catiónico y cationes intercambiables |
| AS-18 | Conductividad eléctrica. |

Cuadro 5. Analisis de las muestras del suelo de la microcuenca Hueyateno.

| | |
|---|---|
|  |  |
| <p>A) Mediciones de materia orgánica en muestras de suelo de la microcuenca Hueyateno.</p> | <p>B) Determinación de la textura del suelo en muestras de suelo de la microcuenca Hueyateno.</p> |
| <div style="display: flex; justify-content: center; align-items: center;">  </div> <p>C) Evaluación de muestras de suelo de la zona de estudio.</p> | |

9.3 Etapa 3: De integración

Los datos recolectados se organizaron en una base de datos y se digitalizaron con el Sistema de Información Geográfica (ArcGIS) para producir mapas temáticos que ilustraran

la distribución espacial y temporal de los indicadores en los subsistemas ambiental, social y económico. Estos mapas permitieron identificar y visualizar patrones, tendencias y zonas de presión en el sistema socioecológico de la microcuenca.

9.3.1 Estrategia de análisis y validación: triangulación de métodos

Para garantizar la robustez, validez y confiabilidad de los hallazgos de esta investigación, se adoptó una estrategia de triangulación de métodos (Denzin, 1978; Olsen, 2004). Este enfoque metodológico consiste en utilizar múltiples fuentes de datos, técnicas analíticas y perspectivas independientes para estudiar un mismo fenómeno. La convergencia de conclusiones a partir de estas distintas líneas de evidencia fortalece sustancialmente la validez interna del estudio, al mitigar los sesgos o limitaciones inherentes a cualquier método único.

En esta investigación, la triangulación se realizó mediante la integración sistemática de cinco fuentes:

1. Datos Físicoquímicos.
2. Datos Biológicos.
3. Datos de Percepción Remota.
4. Datos Edáficos.
5. Datos Socioeconómicos.

X. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

10.1 Aspectos generales y delimitación

La microcuenca del río Hueyateno forma parte de la cuenca del río Tecolutla y se ubica en la región hidrológica número 27, denominada Tuxpan-Nautla. Esta microcuenca presenta una superficie de 83.55 km² (Fig. 4), y dentro de ella se asientan de manera parcial cinco municipios del estado de Puebla: Nauzontla, Cuetzalan, Tlatlauquitepec, Zaragoza y Zacapoaxtla.



Figura 4.. Área de estudio: microcuenca del río Hueyateno.

10.2 Hidrología

La microcuenca Hueyateno se ubica, en términos hidrológicos, dentro de la subcuenca del río Apulco. Esta microcuenca presenta un sistema hidrológico compuesto por numerosos efluentes que conforman el cauce principal, denominado Hueyateno. Este cauce recorre todo el municipio de Zacapoaxtla y desemboca finalmente en el río Apulco. El cauce principal del presente estudio nace en la zona alta y recorre toda la microcuenca, con una longitud de 26.66 km (Fig. 5).

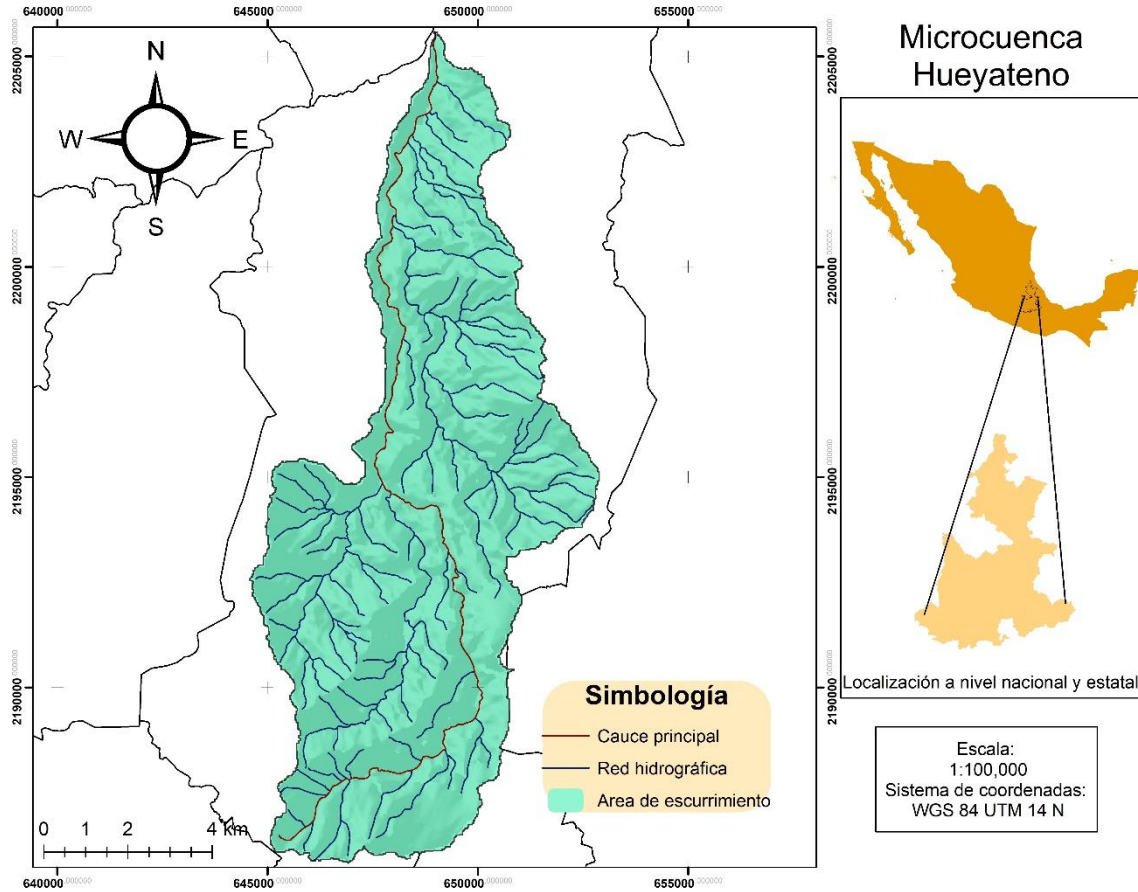


Figura 5. Red hidrológica.

10.3 Curva hipsométrica

La curva hipsométrica (Fig. 6) describe la distribución de las elevaciones en un área de terreno y que es empleada para evaluar el estado evolutivo de las formas del terreno tanto en evolución geomórfica como tectónica (Pathak et al., 2019). La forma de la curva hipsométrica puede variar en función de las etapas geológicas de desarrollo de la cuenca de drenaje, pero cuando alcanza una etapa de equilibrio suele variar poco (Carrión et al., 2016).

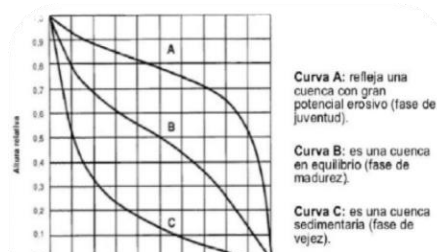


Figura 6. Clasificación de cuencas según forma de curva hipsométrica.

La curva hipsométrica de la microcuenca Hueyateno corresponde a una curva de tipo B de acuerdo a Domínguez Cortázar (2003), la cual indica una zona de equilibrio en función de la relación a la altitud con el área que cambia a lo largo del tiempo en medida que la microcuenca sufre efectos de la erosión, por ello implica que la zona de estudio no presenta gran potencial erosivo y se clasifica como una microcuenca en su fase de madurez (Fig. 7).

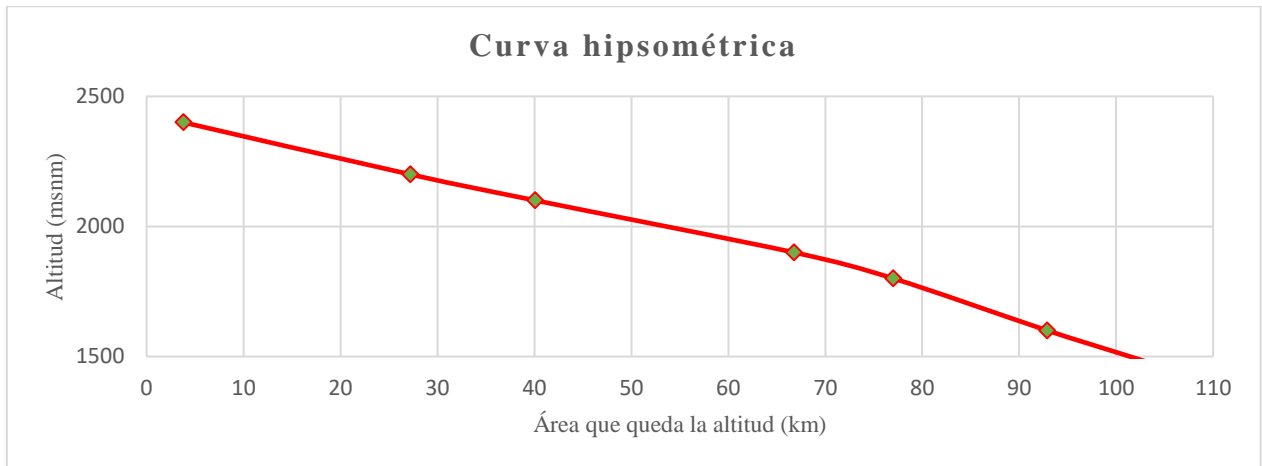


Figura 7. Curva hipsométrica de la microcuenca Hueyateno.

Los resultados fisiográficos obtenidos para la microcuenca del río Hueyateno se presentan en el siguiente cuadro (6).

Cuadro 6. Parámetros fisiográficos de la microcuenca Hueyateno.

| Parámetros fisiográficos de la microcuenca Hueyateno | | | |
|---|-----------------------------|-------------------------|----------------------------|
| | | Unidad de medida | Cuenca Hidrográfica |
| Parámetros de forma de la cuenca | Área total de la cuenca | Km ² | 83.5500 |
| | Perímetro de la cuenca | Km | 70.37 |
| | Longitud de río principal | Km | 33.15 |
| | Centroides | | |
| | Este X | m | 648615.70 |
| | Norte Y | m | 2194123.85 |
| | Ancho promedio de la cuenca | Km | 2.52 |
| | Coeficiente de compacidad | Km | 2.17 |
| | Factor de forma | - | 0.0760 |
| Radio de Circularidad | Km | 0.2120 | |

El análisis de los resultados presentados en el cuadro muestra un factor de forma de 0.0760. Este valor, de acuerdo con la clasificación de Pérez (1979), indica que la microcuenca Hueyateno presenta una forma casi rectangular y muy alargada, lo que favorece que las aguas escurran directamente hacia un solo curso principal.

10.4 Edafología

Los suelos del área de estudio corresponden principalmente a dos tipos según la clasificación de INIFAP-CONABIO (1995). Los andosoles se formaron a partir de cenizas volcánicas y presentan como características principales un alto contenido de materia orgánica, una elevada capacidad de retención de agua y la fijación de grandes cantidades de fósforo. Este tipo de suelo ocupa 83.15 km² de la superficie de la microcuenca. Hernández Ordoñez et al. (2017) destacan que los andosoles resultan aptos para la agricultura gracias a su alta concentración de materia orgánica; sin embargo, estos suelos muestran alta susceptibilidad a la erosión eólica e hídrica. Un manejo agroforestal representa la opción ideal para contrarrestar dichos procesos erosivos, aunque en la zona de estudio predomina la agricultura de temporal (Tabla

8). El litosol ocupa apenas 0.04 km² dentro del área de estudio. Este suelo se caracteriza por ser delgado, rocoso y poco desarrollado, con presencia en relieves complejos y en cualquier tipo de clima, especialmente en zonas montañosas. Su potencial agrícola resulta limitado debido a la escasa profundidad y al alto contenido de rocas, lo que restringe las prácticas agrícolas (Fig. 8).

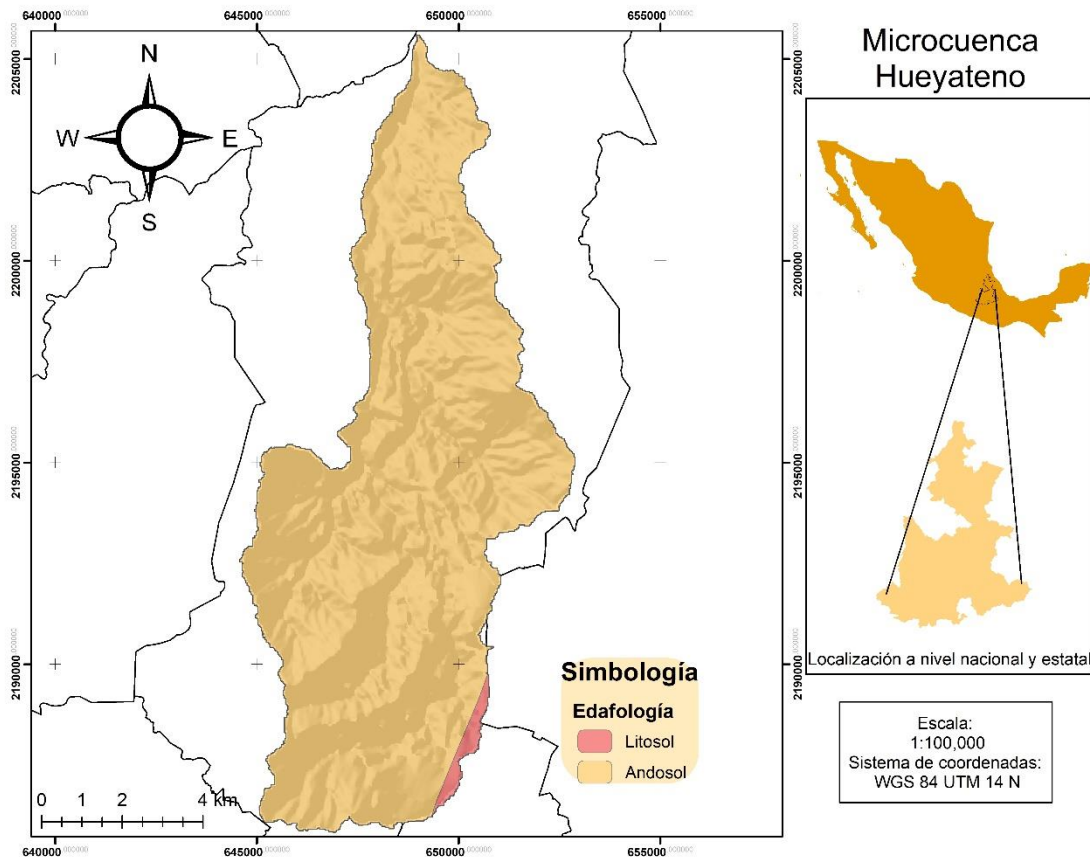
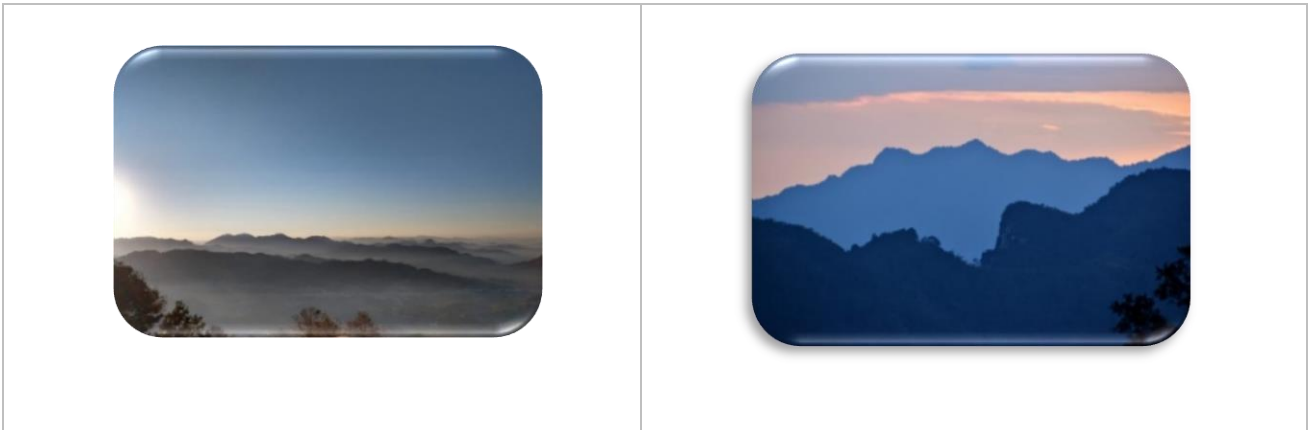


Figura 8. Clasificación de tipos de suelo en la microcuenca Hueyateno.

10.5 Clima, precipitación total anual y temperatura media anual

El área de estudio se localiza en una zona de transición entre los cálidos del declive del golfo y los templados de la sierra nororiental, presenta el clima templado subhúmedo, la lluvia es frecuente en la zona por lo que se forman densos bancos de niebla (Cuadro 7).

Cuadro 7. Bosque y neblina en la microcuenca Hueyateno.



De acuerdo a la clasificación de climas de García (1998), en la microcuenca predomina el clima de tipo C que se caracteriza por la precipitación en el mes más seco suele ser menor a 40 mm, lluvias en verano y/o todo el año y el porcentaje de lluvia invernal entre el 10.2 y 18 % del total anual, el cual ocupa el 100% de la zona de estudio (Fig. 9).

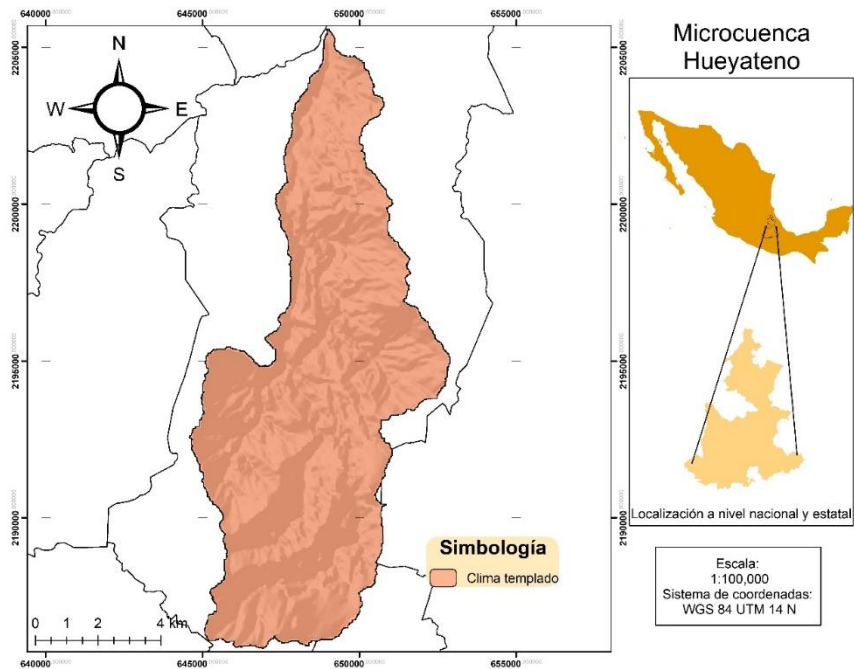


Figura 9. Clasificación de tipos de clima en la microcuenca Hueyateno.

La precipitación media anual llega a 2017.2 mm en la parte norte con variaciones que van desde los 1315.12 mm en la parte centro y sur (Fig. 10). La distribución geográfica de las precipitaciones depende de varios factores, como la latitud, la altitud, la continentalidad y la exposición de la pendiente, por otro lado, la temperatura más cálida (Fig. 11) se puede encontrar en la parte norte de la zona de estudio llegado a los 16°C mientras que en la parte sur desciende a los 13°C.

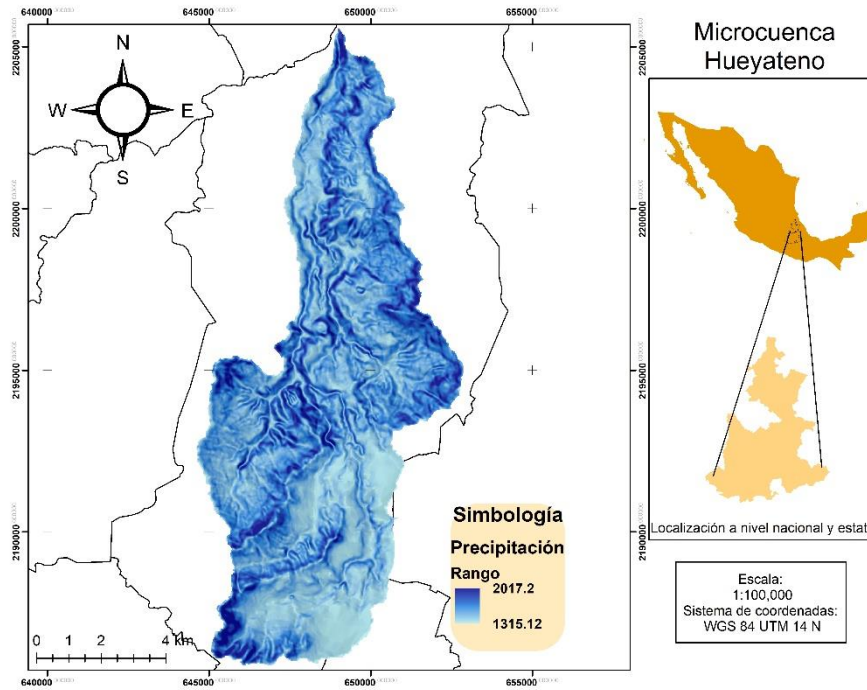


Figura 10. Rango de precipitación en la microcuenca Hueyateno.

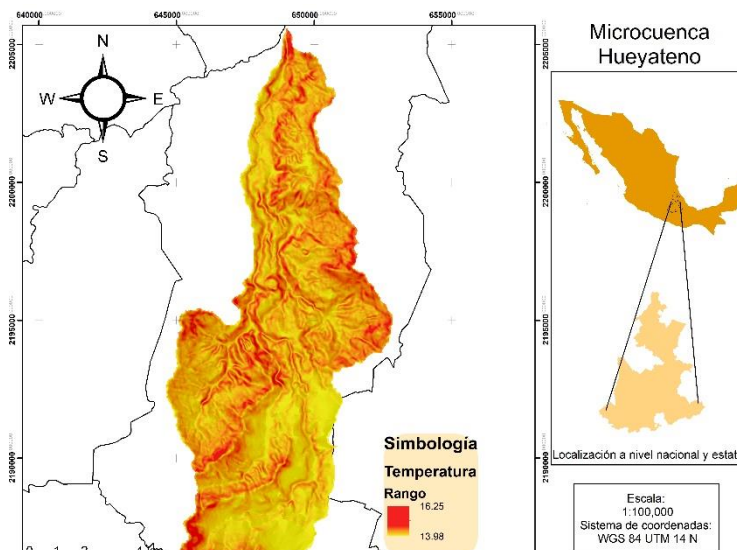


Figura 11. Rango de temperatura en la microcuenca Hueyateno.

10.6 Climatología

En el climograma (Fig. 13) correspondiente al periodo 1951-2010, se presentan los datos de temperatura media anual, precipitación total anual y evapotranspiración anual para la microcuenca del río Hueyateno. La temperatura más alta registrada fue en el mes de mayo con 18.5°C y la más baja para el mes de enero con 12.2°C. En relación a la precipitación el mes más lluvioso fue septiembre con 361.9 mm y para el mes con menos lluvia fue enero con 38.7 mm. Para la evapotranspiración se observa que de los meses de marzo a mayo hay mayor pérdida de agua que se devuelve a la atmósfera (Fig. 12).

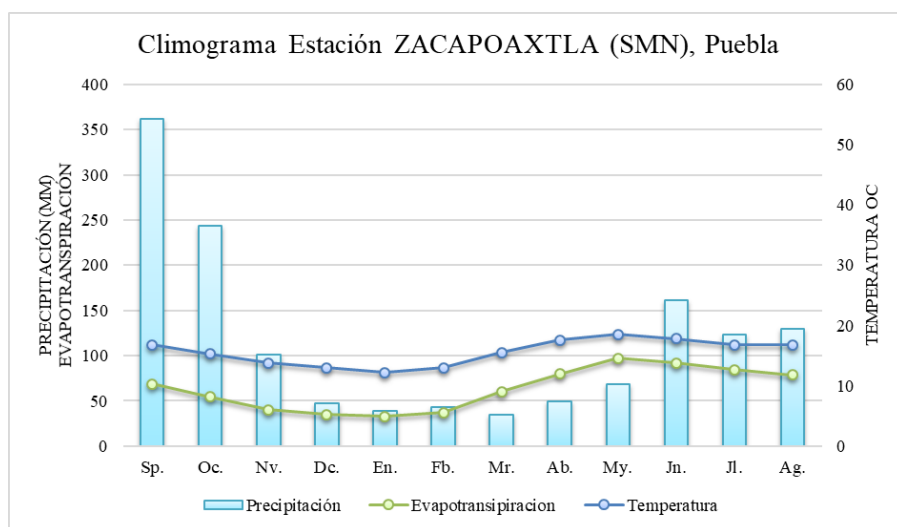


Figura 12. Climograma de la microcuenca Hueyateno.

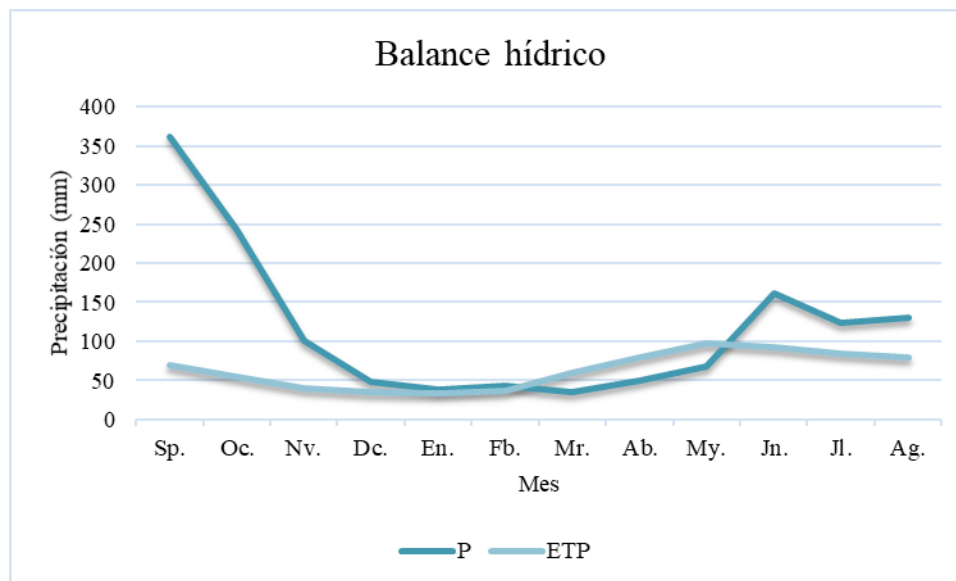


Figura 13. Balance hídrico para la zona de estudio.

10.7 Pendientes

En la microcuenca Hueyateno, las pendientes del terreno juegan un papel crucial en la gestión del agua y el uso del suelo. Al clasificar las pendientes en tres categorías, podemos comprender mejor cómo se comporta el agua y cómo se deben manejar las distintas áreas de la cuenca.

Clase 1: Pendientes muy suaves a moderadas (0.0049 - 18.837%)

Esta clase incluye terrenos que son prácticamente planos hasta ligeramente inclinados. Estas áreas son ideales para la agricultura y el desarrollo urbano porque la erosión del suelo es mínima y el riesgo de deslizamientos de tierra es bajo. Las pendientes suaves permiten que el agua se infiltre en el suelo más fácilmente, lo que beneficia a los cultivos y ayuda a recargar los acuíferos. Además, estas zonas son perfectas para construir viviendas e infraestructuras, ya que presentan pocos desafíos topográficos.

Clase 2: Pendientes moderadas a fuertes (18.838 - 40.215%)

Aquí encontramos terrenos más inclinados, que pueden presentar ciertos desafíos para la agricultura y la construcción. En estas áreas, es común ver prácticas agrícolas en terrazas y pastizales, ya que ayudan a controlar la erosión y a manejar el agua de manera más efectiva. La velocidad del agua que corre por estas pendientes es mayor, lo que puede llevar a una mayor erosión si no se implementan técnicas adecuadas de conservación del suelo. Aunque no son las más adecuadas para desarrollos urbanos extensivos, con las medidas correctas, pueden albergar ciertas construcciones.

Clase 3: Pendientes muy fuertes a extremadamente escarpadas (40.216 - 129.798%)

Esta clase representa los terrenos más inclinados de la cuenca, donde las pendientes son tan pronunciadas que el riesgo de erosión y deslizamientos es muy alto. Estas áreas generalmente se destinan a la conservación de la naturaleza y a usos forestales, ya que la agricultura y la construcción son poco viables y peligrosas. La rápida escorrentía en estas pendientes contribuye significativamente al flujo de los ríos y arroyos, pero también puede causar problemas de sedimentación y erosión en otras partes de la cuenca.

Entender las diferentes clases de pendiente en una cuenca hidrográfica nos permite tomar decisiones informadas sobre el uso del suelo y la gestión del agua. Las pendientes suaves son ideales para la agricultura y el desarrollo urbano, mientras que las pendientes más pronunciadas requieren prácticas especiales para evitar la erosión y manejar el agua de manera sostenible. Por otro lado, las pendientes muy escarpadas deben conservarse y protegerse para evitar desastres naturales como deslizamientos de tierra (Fig. 14).

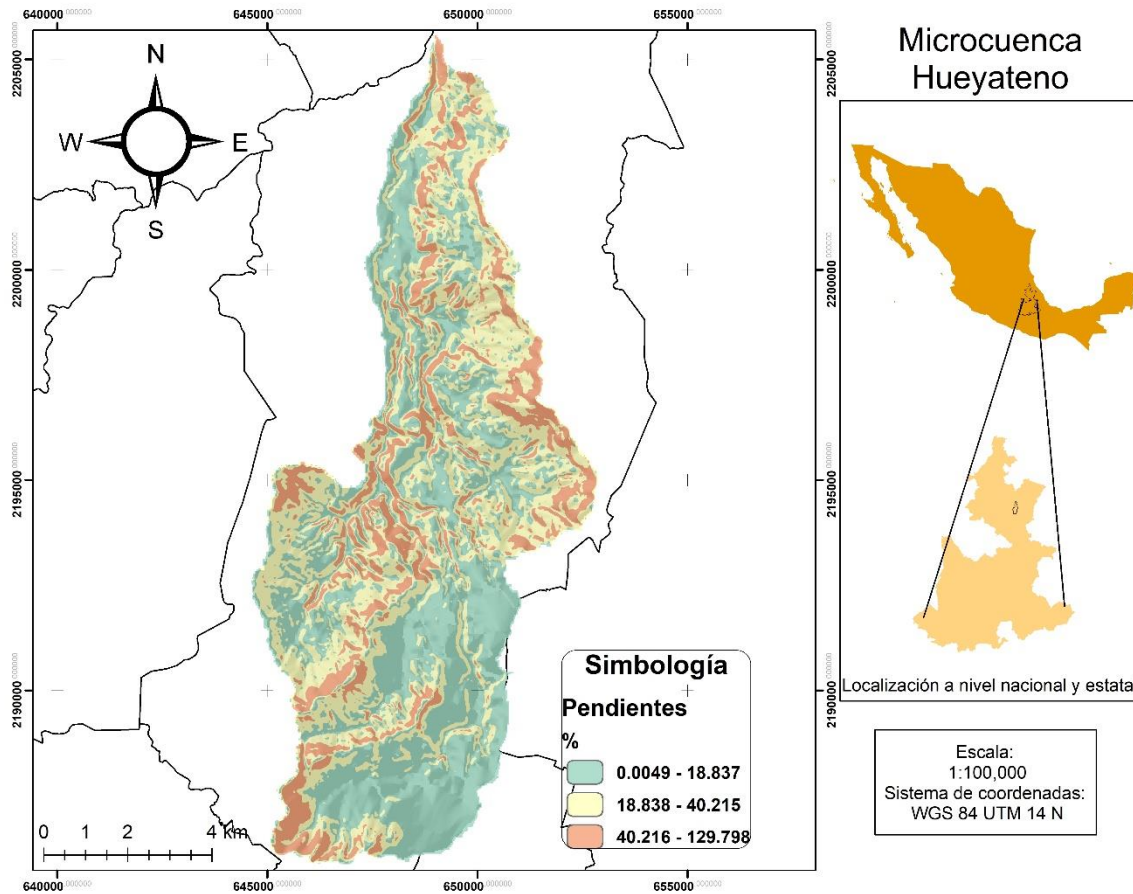


Figura 14. Mapa de pendientes del terreno de la microcuenca Hueyateno.

10.8 Localidades y áreas de cultivo

De acuerdo a la carta vectorial e14b15, dentro de la microcuenca la agricultura desempeña un rol importante en la economía de la población, en el cual se producen productos de tipo forestal, frutícolas, apícolas y que predomina principalmente el cultivo de maíz, café, papa entre otra variedad de cultivos, el área que llega a ocupar la superficie dedicada a la parte

agrícola es de 31.04 km² que se encuentran distribuidos a lo largo de las tres zonas de la microcuenca.

En la zona de estudio se asientan distintas localidades las cuales ocupan un total de 29.94 km² del total de la microcuenca (Fig. 15).

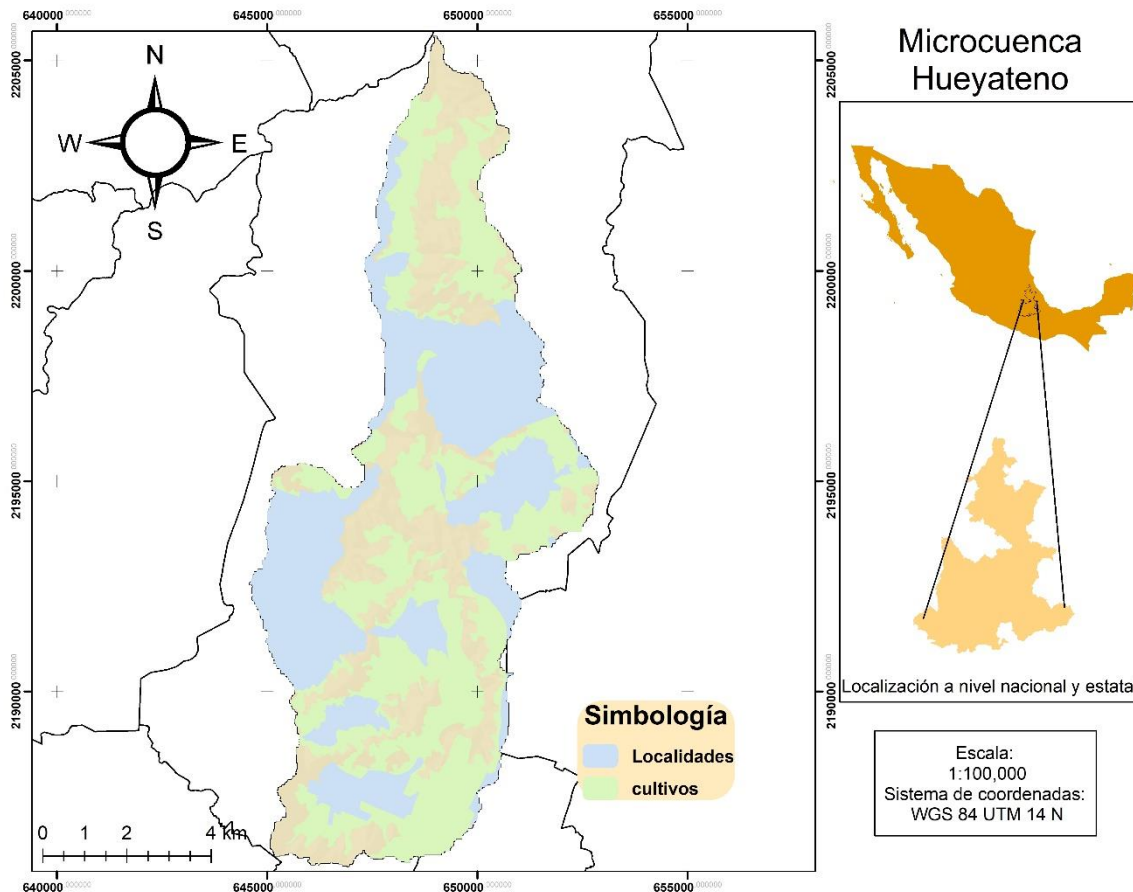


Figura 15. Mapa de localidades y áreas de cultivo de la microcuenca Hueyateno.

10.8.1 Zonas altitudinales de la microcuenca Hueyateno

En la zona de estudio se pueden encontrar diversas actividades que afectan tanto el uso del suelo como la calidad del agua del río principal, la agricultura de temporal con el paso de los años ha ido en incremento y el relieve de la zona alta de la microcuenca Hueyateno, ha influido para que se expanda una variedad de cultivos.

La zona alta de la microcuenca ocupa una superficie de 37.22 km², la zona media ocupa un total de 31.67 km² y la parte baja ocupa 14.61 km² (Fig. 16).

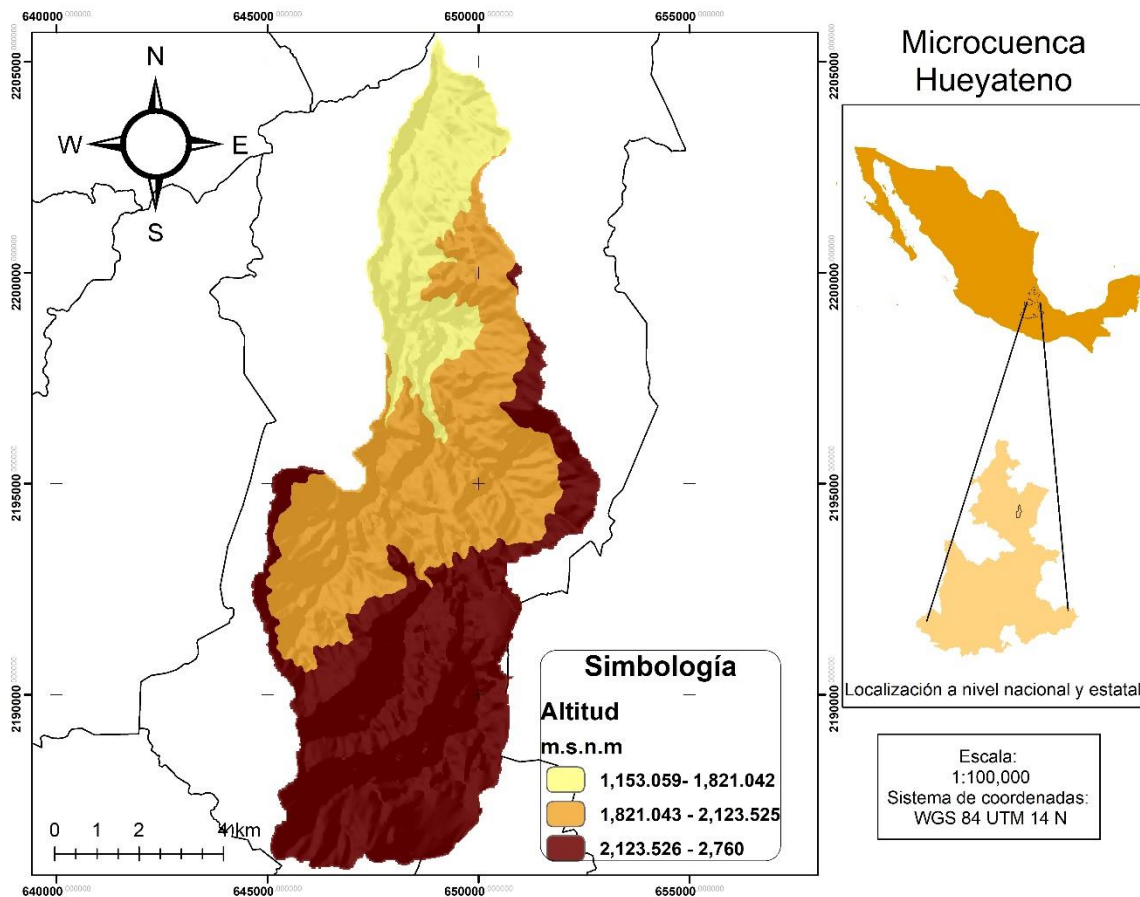


Figura 16. Zonas de la microcuenca Hueyateno.

10.9. Caracterización y diagnóstico socioeconómico

10.9.1. Población

En la microcuenca hay 57,887 habitantes distribuidos en 14,785 viviendas, con una densidad poblacional de 327.9 habitantes por km² y con un promedio de 4 habitantes por hogar (INEGI, 2020) (Cuadro 8). El 46.9% corresponde a habitantes masculinos mientras que el 53.1% es referido a habitantes femeninos (INEGI, 2020).

Cuadro 8. Datos totales de hombres y mujeres en la zona de estudio.

| | Número de personas | % con respecto al número de personas |
|---------|--------------------|--------------------------------------|
| Hombres | 27,151 | 46.9 |
| Mujeres | 30,736 | 53.1 |
| Total | 57,887 | 100 |

10.9.2. Economía

Población Económicamente Activa (PEA)

La población económicamente activa (PEA), en la microcuenca Hueyateno, cuenta con un total de 18,863 personas activas, de las cuales 13,564 son hombres y 5299 mujeres, por otro lado, se encuentra el número total de población no económicamente activa que asciende a un total de 19665 habitantes de los cuales 4461 son hombre y 15204 mujeres. Correspondiente a la tasa de participación económica se encontró que el 74.70% corresponde a hombre y 25.74 a población femenina (INEGI, 2010) (Cuadro 9).

Cuadro 9. Indicadores de calidad económica de la microcuenca Hueyateno.

| Indicadores de participación económica | Total | Hombres | Mujeres | % Hombres | % Mujeres |
|--|--------|---------|---------|-----------|-----------|
| Población económicamente activa (PEA) | 18,853 | 13,564 | 5,299 | 71.91 | 28.09 |
| Ocupada | 18,426 | 13,183 | 5,243 | 71.55 | 28.45 |
| Desocupada | 437 | 381 | 56 | 87.19 | 12.81 |
| Población no económicamente activa | 19,665 | 4,461 | 15,204 | 22.68 | 77.32 |

10.9.3. Actividades agropecuarias y tenencia de la tierra

Agricultura

Para la zona de estudio se encontró que existen dos tipos de producción: de temporal y de riego, para la producción de riego la papa alpha (blanca) es la que más superficie por hectárea ocupó con un total de 72 Ha y con una producción anual de 2,149.02 toneladas, por otro lado, se encuentra la producción agrícola de temporal, en primer lugar se encontró al maíz de grano blanco del cual se sembró una superficie de 2,282.00 Ha y se tuvo una producción anual de 21,195.36 toneladas, en segundo lugar, la papa alpha (blanca) fue sembrada en 1,112.00 Ha, y tuvo una producción anual de 21,195.36 toneladas, para los cultivos con menor hectárea

sembrada fueron el frijol negro, chile verde morrón y pera con 9, 19.72 y 20.5 hectáreas respectivamente (SIAP, 2020) (Cuadro 10).

Cuadro 10. Producción agrícola en la microcuenca Hueyateno.

| | Superficie sembrada (Ha) | Superficie cosechada (Ha) | Producción (Ton) | Valor de la producción (Miles de pesos) |
|---|-----------------------------|---------------------------------|---------------------|--|
| Riego | | | | |
| Papa alpha (blanca) | 72 | 72 | 2,149.02 | 14,125.32 |
| Tomate rojo (jitomate) saladette invernadero | 0.22 | 0.22 | 17.95 | 129.24 |
| Temporal | | | | |
| Aguacate criollo | 22.25 | 21 | 74.87 | 552.25 |
| Aguacate hass | 67 | 54 | 309.96 | 4,651.53 |
| Avena forrajera en verde s/clasificar | 35 | 35 | 277.9 | 226.65 |
| Café cereza s/clasificar | 28.75 | 25.75 | 60 | 335.05 |
| Chile verde morrón (bell pepper) | 19.72 | 19.72 | 53.84 | 446.87 |
| Durazno criollo | 22.9 | 17.9 | 74.82 | 662.82 |
| Frijol otros negros | 9 | 9 | 5.31 | 66.38 |

| | | | | |
|---------------------|-----------------|-----------------|------------------|-------------------|
| Maíz grano blanco | 2,282.00 | 2,282.00 | 4,322.76 | 18,406.14 |
| Manzana criolla | 34.9 | 21.9 | 129.65 | 488.14 |
| Papa alpha (blanca) | 1,112.00 | 1,112.00 | 21,195.36 | 106,444.72 |
| Pera s/clasificar | 20.5 | 18 | 145.8 | 565.45 |
| TOTAL | 3,726.24 | 3,688.49 | 28,817.24 | 147,100.56 |

Ganadería

La ganadería en la microcuenca Hueyateno también es una fuente importante de ingreso económico para los pobladores, los porcinos y bovinos fueron los grupos que más producción por tonelada obtuvieron anualmente con 137.22 y 129.99 respectivamente, de los cuales el producto obtenido fue la carne para su venta comercial. También se registraron aves de corral que para las gallinas se obtuvo tanto carne como huevo para su aprovechamiento con una producción de 84.15 y 20.42 toneladas, para los guajolotes únicamente se aprovechó la carne con un total de 19.77 toneladas por año. El grupo de abejas representó la menor producción en miles de litros, en el área de estudio con 2.82 anual (SIAP, 2020) (Cuadro 11).

Cuadro 11. Producción ganadera en la microcuenca Hueyateno.

| Animal | Producto | Producción en | |
|-----------|----------|---------------|-----------------|
| | | Toneladas | Miles de litros |
| Ave | Carne | 84.15 | |
| | Huevo | 20.42 | |
| Guajolote | Carne | 19.77 | |
| Bovino | Carne | 129.99 | |
| | Leche | | 367.08 |

| | | |
|---------|-------|--------|
| Ovino | Carne | 15.65 |
| Porcino | Carne | 137.22 |
| Abeja | Miel | 2.82 |

Tipo de propiedad

En relación a la tenencia de la tierra en la zona de estudio, poseen pequeña propiedad y ejidos, los productores agrícolas y pecuarios poseen en promedio 5 hectáreas (INEGI, 2016).

10.9.4. Marginación

El índice de Marginación (IM) es una medida-resumen que permite diferenciar entidades federativas y municipios de acuerdo con las carencias que padece la población, como resultado de la falta de acceso a la educación, la residencia en viviendas inadecuadas, ingresos monetarios insuficientes y las relacionadas con la residencia en localidades pequeñas (CONAPO, 2015)

El IM para el área de estudio presentó un valor de 0.11500, mientras que el grado de marginación fue clasificado en un valor alto, de acuerdo a estos valores la microcuenca Hueyateno se encuentra a nivel estatal en la posición 135 y a nivel nacional en el lugar 1067 (CONAPO, 2015) (Cuadro 12).

Cuadro 12. Indicadores de marginación en la microcuenca Hueyateno.

| Indicador | Valor |
|-----------------------|-------|
| Índice de marginación | 0.115 |
| Grado de marginación | Alto |
| Lugar a nivel estatal | 135 |

10.9.5. Desarrollo humano

Este índice compuesto tiene en cuenta factores sanitarios, educativos y económicos para medir el desarrollo humano de un lugar en particular, su valor oscila entre 0 y 1, y según el PNUD, el IDH se clasifica en 4 categorías:

Muy alto: un IDH superior a 0,80.

Alto: un IDH entre 0,70 y 0,80.

Medio: un IDH entre 0,55 y 0,70.

Bajo: un IDH inferior a 0,55.

Para el índice de desarrollo humano en la microcuenca Hueyateno se encontró un valor de 0.65, con un grado de desarrollo humano clasificado como medio y posicionado al área de estudio a nivel nacional en el lugar 1282 (CONAPO, 2015) (Cuadro 13).

Cuadro 13. Índice de Desarrollo Humano en la microcuenca Hueyateno.

| Indicador | Valor |
|-----------------------------|-------|
| Índice de Desarrollo Humano | 0.65 |
| Grado de Desarrollo Humano | Medio |
| Posición a nivel nacional | 1282 |

10.9.6. Educación

De acuerdo a la población de 15 años y más, se registró un total de hombres de 16,321, de los cuales 1,735 son analfabetas mientras que para la población femenina se registró un total de 18,804 de las cuales 3,465 son analfabetas (INEGI, 2010) (Cuadro 14).

Cuadro 14. Población analfabeta en la microcuenca Hueyateno.

| | Total | Analfabeta | % |
|---------|--------|------------|-------|
| Hombres | 16,321 | 1,735 | 10.63 |
| Mujeres | 18,804 | 3,465 | 18.43 |
| Total | 35,125 | 5,200 | 14.8 |

De acuerdo a la población de 15 años y más, por nivel de escolaridad de según sexo, sin escolaridad se presentó un total de 4,201 individuos de los cuales 1,382 corresponden a hombres mientras que 2,819 a mujeres, para personas con primaria completa se registró un total de 6,795 individuos de los cuales 3,210 fueron hombres y 3,585 mujeres. En relación a los individuos con secundaria completa se registró un total de 7,295 personas de las cuales 3,780 fueron hombres y 3,515 para mujeres (Cuadro 15).

Cuadro 15. Población de 15 años y más, por nivel de escolaridad en la microcuenca Hueyateno.

| Nivel de escolaridad | Total | Hombres | Mujeres | Representa la población de 15 años y más | | |
|----------------------|-------|---------|---------|--|-------------|-------------|
| | | | | Total (%) | Hombres (%) | Mujeres (%) |
| Sin escolaridad | 4,201 | 1,382 | 2,819 | 11.96 | 8.47 | 14.99 |

| | | | | | | |
|---------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Primaria completa | 6,795 | 3,210 | 3,585 | 19.35 | 19.67 | 19.07 |
| Secundaria completa | 7,295 | 3,780 | 3,515 | 20.77 | 23.16 | 18.69 |

11. Determinación de calidad de agua de la microcuenca Hueyateno

Se colectaron en seis sitios de la zona de estudio (Fig. 17) muestras de agua para el análisis fisicoquímico del agua del río Hueyateno y la comparación con el cumplimiento con los estándares de criterios ecológicos de calidad de agua, se resumen en el cuadro 16.

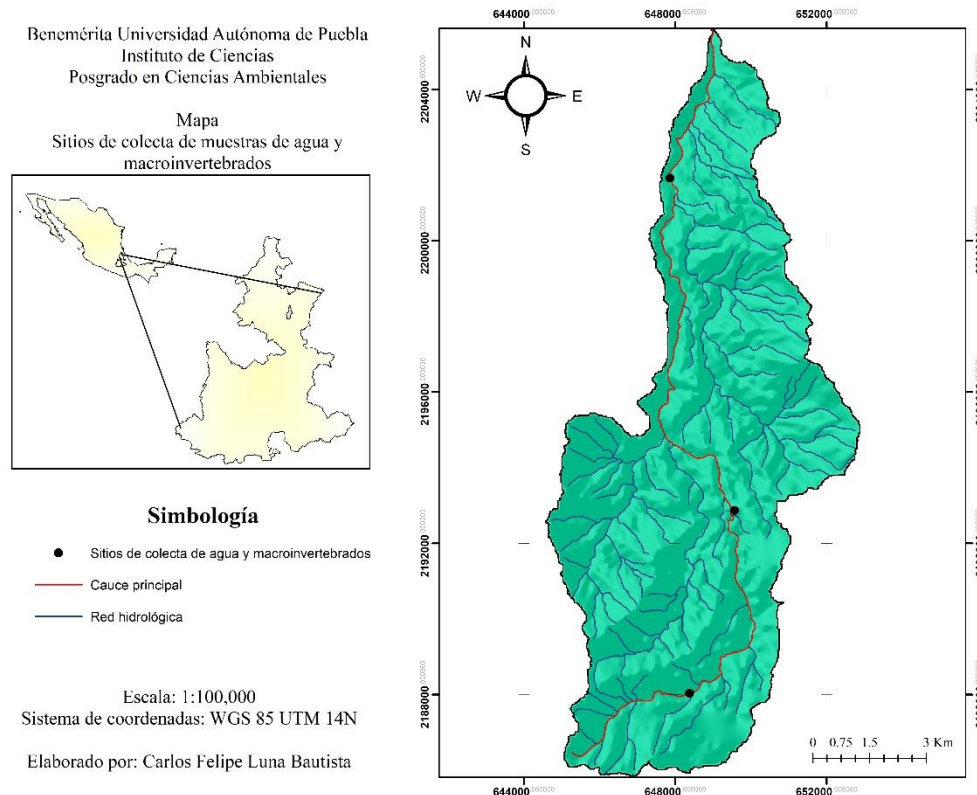


Figura 17. Sitios de colecta para muestras de agua y material biológico.

Los datos de la microcuenca Hueyateno muestran variaciones significativas en los parámetros de calidad del agua a lo largo de los sitios de muestreo (cuadro 16). En cuanto al índice BMWP, los valores oscilaron entre 8 hasta 56. La zona media, particularmente M2, mostró la mejor calidad biológica, atribuida al bosque mesófilo de montaña más conservado, mientras que los valores bajos de la parte baja reflejan un fuerte deterioro por descargas domésticas y actividades agrícolas.

Cuadro 16. Parámetros de calidad de agua.

| SITIO | MES | EPOCA | Índice BMWP | Parámetros | | | | | | |
|-------|------------|---------|----------------|------------|--------------|----------------------------|---------------|--|---------------|-----------|
| | | | | pH | OD (mg/L) | DBO ₅ (mg/L) | TDS (mg/L) | N-NH ₄ ⁺ (mg/L) | CE (μS/cm) | pH |
| A1 | SEPTIEMBRE | LLUVIAS | 38 | 7.3 ± 0.1 | 7.6 ± 0.2 | 3.1 ± 0.3 | 18 ± 2 | 1.4 ± 0.1 | 160 ± 5 | 7.3 ± 0.1 |
| A2 | | LLUVIAS | 47 | 7.2 ± 0.1 | 7.4 ± 0.2 | 2.9 ± 0.2 | 21 ± 2 | 1.6 ± 0.2 | 170 ± 6 | 7.2 ± 0.1 |
| M1 | | LLUVIAS | 24 | 7.1 ± 0.1 | 7.0 ± 0.3 | 4.2 ± 0.3 | 25 ± 3 | 1.8 ± 0.2 | 190 ± 7 | 7.1 ± 0.1 |
| M2 | | LLUVIAS | 55 | 6.9 ± 0.1 | 6.8 ± 0.3 | 4.0 ± 0.2 | 27 ± 3 | 1.6 ± 0.2 | 205 ± 8 | 6.9 ± 0.1 |
| B1 | | LLUVIAS | 25 | 6.5 ± 0.1 | 2.8 ± 0.2 | 75 ± 0.4 | 98 ± 5 | 7.6 ± 0.4 | 550 ± 12 | 6.5 ± 0.1 |
| B2 | | LLUVIAS | 11 | 6.7 ± 0.1 | 2.4 ± 0.2 | 72 ± 0.4 | 93 ± 5 | 7.3 ± 0.4 | 530 ± 12 | 6.7 ± 0.1 |
| A1 | OCTUBRE | LLUVIAS | 40 | 7.2 ± 0.1 | 7.5 ± 0.2 | 3.3 ± 0.2 | 22 ± 2 | 1.5 ± 0.1 | 165 ± 6 | 7.2 ± 0.1 |
| A2 | | LLUVIAS | 48 | 7.1 ± 0.1 | 7.3 ± 0.2 | 3.2 ± 0.2 | 23 ± 2 | 1.7 ± 0.2 | 175 ± 6 | 7.1 ± 0.1 |
| M1 | | LLUVIAS | 25 | 7.2 ± 0.1 | 7.1 ± 0.3 | 3.5 ± 0.2 | 25 ± 3 | 1.5 ± 0.2 | 185 ± 7 | 7.2 ± 0.1 |
| M2 | | LLUVIAS | 56 | 6.8 ± 0.1 | 6.6 ± 0.3 | 4.3 ± 0.3 | 29 ± 3 | 1.8 ± 0.2 | 210 ± 8 | 6.8 ± 0.1 |
| B1 | | LLUVIAS | 26 | 6.4 ± 0.1 | 2.5 ± 0.2 | 78 ± 0.4 | 102 ± 6 | 8.0 ± 0.5 | 565 ± 13 | 6.4 ± 0.1 |
| B2 | | LLUVIAS | 12 | 6.6 ± 0.1 | 3.0 ± 0.3 | 75 ± 0.4 | 97 ± 5 | 7.1 ± 0.4 | 545 ± 12 | 6.6 ± 0.1 |
| A1 | NOVIEMBRE | SECA | 35 | 7.3 ± 0.1 | 7.9 ± 0.2 | 2.7 ± 0.2 | 11 ± 2 | 1.1 ± 0.1 | 175 ± 5 | 7.3 ± 0.1 |

| | | | | | | | | | | |
|--|---------------|-----------|----|--------------|--------------|--------------|--------|-----------|-------------|--------------|
| A2 | | SECA S | 43 | 7.2 ± 0.1 | 7.7 ± 0.2 | 3.3 ± 0.2 | 13 ± 2 | 1.2 ± 0.1 | 185 ± 6 | 7.2 ± 0.1 |
| M1 | | SECA S | 21 | 7.3 ± 0.1 | 7.7 ± 0.2 | 3.7 ± 0.2 | 12 ± 2 | 1.2 ± 0.1 | 195 ± 6 | 7.3 ± 0.1 |
| M2 | | SECA S | 50 | 7.1 ± 0.1 | 7.1 ± 0.3 | 4.2 ± 0.3 | 19 ± 2 | 1.3 ± 0.2 | 215 ± 7 | 7.1 ± 0.1 |
| B1 | | SECA S | 22 | 6.7 ± 0.1 | 3.5 ± 0.2 | 65 ± 0.4 | 65 ± 4 | 6.5 ± 0.3 | 590 ± 14 | 6.7 ± 0.1 |
| B2 | | SECA S | 9 | 6.8 ± 0.1 | 3.1 ± 0.2 | 60 ± 0.3 | 55 ± 4 | 6.5 ± 0.3 | 570 ± 13 | 6.8 ± 0.1 |
| A1 | DICIEM BRE | SECA S | 32 | 7.2 ± 0.1 | 7.7 ± 0.2 | 2.9 ± 0.2 | 13 ± 2 | 1.2 ± 0.1 | 180 ± 6 | 7.2 ± 0.1 |
| A2 | | SECA S | 40 | 7.0 ± 0.1 | 7.5 ± 0.2 | 3.3 ± 0.2 | 15 ± 2 | 1.3 ± 0.1 | 190 ± 6 | 7.0 ± 0.1 |
| M1 | | SECA S | 19 | 7.1 ± 0.1 | 7.1 ± 0.2 | 3.2 ± 0.2 | 19 ± 2 | 1.7 ± 0.2 | 205 ± 7 | 7.1 ± 0.1 |
| M2 | | SECA S | 47 | 6.9 ± 0.1 | 6.9 ± 0.3 | 4.5 ± 0.3 | 22 ± 2 | 1.3 ± 0.1 | 180 ± 6 | 6.9 ± 0.1 |
| B1 | | SECA S | 20 | 6.6 ± 0.1 | 3.2 ± 0.2 | 68 ± 0.4 | 64 ± 4 | 7.2 ± 0.3 | 605 ± 15 | 6.6 ± 0.1 |
| B2 | | SECA S | 8 | 6.7 ± 0.1 | 2.8 ± 0.2 | 63 ± 0.3 | 59 ± 4 | 6.8 ± 0.3 | 585 ± 14 | 6.7 ± 0.1 |
| Sitios: A= Zona alta, M= Zona media, B= Zona baja de la microcuenca Hueyateno *± indica desviación estándar | | | | | | | | | | |

El oxígeno disuelto mostró un patrón decreciente desde 7.9 mg/L en A1 hasta 2.1 mg/L en B2, lo que evidenció condiciones favorables en la zona alta y limitantes en la parte baja, donde los valores resultaron críticos para la vida acuática. Este comportamiento se relacionó directamente con los altos valores de DBO₅ en los sitios bajos, que oscilaban entre 63 y 78 mg/L e indicaban una gran carga de materia orgánica biodegradable, en contraste con los sitios altos que registraron valores menores a 4.5 mg/L.

El pH se mantuvo en un rango cercano a la neutralidad (6.5–7.3), aunque en la parte baja (B1 y B2) se observaron ligeras tendencias hacia la acidez, probablemente vinculadas a procesos de descarga de aguas residuales. En cuanto al contenido de sólidos disueltos totales (TDS), se registró un incremento marcado desde 11 mg/L en los sitios altos hasta 102 mg/L en los sitios bajos, lo que indica una mayor incorporación de materiales orgánicos e inorgánicos en el agua debido a escorrentía y descargas.

La conductividad eléctrica mostró un comportamiento coherente con los TDS, con valores que oscilaron entre 160 $\mu\text{S}/\text{cm}$ en A1 y hasta 600 $\mu\text{S}/\text{cm}$ en B1, reflejando una alta presencia de sales y contaminantes iónicos en la zona baja. Respecto al nitrógeno amoniacal, los valores fueron bajos en los sitios altos (1.1–1.6 mg/L), mientras que en los sitios bajos se elevaron hasta 8.0 mg/L, indicando un aporte constante de nutrientes por descargas domésticas y prácticas agrícolas. Los fosfatos totales siguieron un patrón similar, desde 0.3 mg/L en A1 hasta 4.6 mg/L en B2, valores que superan ampliamente el límite ecológico de 0.05 mg/L establecido en 1989, lo que indica riesgo de eutrofización en la parte baja de la microcuenca.

Cuadro 17. Contaminación urbana en el río Hueyateno.



Estos resultados muestran que la zona alta presenta condiciones de calidad moderadas, pero ya con influencia antrópica; la zona media, especialmente M2, mantiene la mejor calidad

gracias al bosque mesófilo de montaña, mientras que la zona baja refleja un deterioro severo con altas cargas de nutrientes, materia orgánica y conductividad, lo que pone en riesgo la salud de los ecosistemas de la microcuenca Hueyateno.

Los parámetros fisicoquímicos y el índice BMWP evidenciaron variaciones significativas a lo largo de la microcuenca del río Hueyateno, lo que hace necesario evaluar la existencia de una relación estadísticamente significativa entre estas variables (Cuadro 18). La correlación de Spearman se aplicó para analizar la asociación entre la calidad biológica del agua, expresada mediante el índice BMWP y los parámetros fisicoquímicos registrados en los diferentes sitios de muestreo.

Cuadro 18. Correlación de Spearman entre parametros de calidad de agua VS índice biológico.

Correlaciones

| | BMWP | pH_1 | OD (mg/L) | DBO ₅ (mg/L) | TDS (mg/L) | Nitrógeno amoniacal (mg/L) | Fosfatos totales (mg/L) |
|----------------------------|--------|--------|-----------|-------------------------|------------|----------------------------|-------------------------|
| pH_1 | 0.423 | | | | | | |
| OD (mg/L) | 0.506 | 0.950 | | | | | |
| DBO ₅ (mg/L) | -0.502 | -0.955 | -0.958 | | | | |
| TDS (mg/L) | -0.404 | -0.903 | -0.949 | 0.915 | | | |
| Nitrógeno amoniacal (mg/L) | -0.556 | -0.875 | -0.929 | 0.893 | 0.965 | | |
| Fosfatos totales (mg/L) | -0.442 | -0.963 | -0.990 | 0.961 | 0.960 | 0.923 | |
| CE (µS/cm) | -0.523 | -0.924 | -0.850 | 0.875 | 0.749 | 0.725 | 0.857 |

Este análisis busca determinar cuáles factores ambientales ejercen mayor influencia sobre la composición y tolerancia de la comunidad de macroinvertebrados, y así aporta una visión integral sobre los procesos de deterioro o conservación que ocurren en la microcuenca.

El análisis de correlación de Spearman reveló que el índice biótico BMWP presenta una respuesta altamente significativa a las variaciones en la calidad fisicoquímica del agua. Este índice mostró correlaciones negativas con indicadores de contaminación orgánica y nutrimental (DBO₅, rho = -0.502; nitrógeno amoniacal, rho = -0.556; fosfatos, rho = -0.442) y una correlación positiva igualmente significativa con el oxígeno disuelto (rho = 0.506). Las fuertes correlaciones entre los propios parámetros fisicoquímicos (por ejemplo, DBO₅ vs.

fosfatos, $\rho = 0.961$) sugieren una fuente de contaminación conjunta y sincronizada, probablemente asociada a descargas de origen antrópico en la cuenca. Estos resultados confirman la efectividad del BMWP como indicador de la salud ecológica del río Hueyateno y delimitan claramente los principales factores de estrés que afectan al sistema.

12. Determinación de la salud de la vegetación y cambio de uso de suelo

12.1 Índice de vegetación diferencial normalizada

Mediante el análisis de imágenes satelitales Landsat 8 y 5 se obtuvo el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI, por sus siglas en inglés) para el mes de junio de los años 1993 y 2023 (Figura 16). Este índice mide la relación entre la reflectancia en las bandas del infrarrojo cercano y del rojo, lo que permite evaluar la cantidad de vegetación presente en una superficie y su estado de salud o vigor vegetativo. En esencia, el NDVI cuantifica la intensidad del verdor de la cobertura del suelo.

El NDVI es un índice adimensional cuyos valores van de -1 a +1. Generalmente, los valores inferiores a 0.1 se asocian a cuerpos de agua y superficies de suelo desnudo, mientras que los valores más altos (superiores a 0.3-0.4) son indicadores de una densa actividad fotosintética, ya sea de vegetación natural o de cultivos agrícolas.

En 1993, los valores del NDVI en la microcuenca Hueyateno oscilaron entre 0.67 y 0.02, lo que indica una cobertura vegetal relativamente saludable y continua. Sin embargo, en 2023, los valores del NDVI disminuyeron significativamente, con un rango de 0.51 a -0.65. Este drástico descenso sugiere una degradación notable en la cobertura vegetal, con la aparición de áreas sin vegetación, suelos severamente degradados o superficies artificiales.

El cambio en los valores del NDVI de 1993 a 2023 en la microcuenca Hueyateno refleja una clara reducción en la calidad y extensión de la vegetación (Fig. 18). Esta tendencia puede deberse a una combinación de factores, entre los que se incluyen:

- Urbanización y desarrollo: El crecimiento urbano y la expansión de infraestructuras han podido transformar áreas verdes en superficies construidas.

- Actividades agrícolas: La intensificación de la agricultura y la deforestación para ampliar la frontera de cultivos probablemente redujeron la cobertura vegetal natural.
- Degradación del suelo: La erosión y la pérdida de nutrientes también son factores que pueden haber contribuido a la disminución de la vegetación.

Estos tipos de cambios en el NDVI y su interpretación son consistentes con estudios similares en otras regiones. Por ejemplo, la investigación de García y López (2015) sobre la cuenca del río Ebro en España identificó que la expansión urbana y la intensificación agrícola eran los principales factores responsables de la disminución del NDVI en la región durante las últimas décadas.

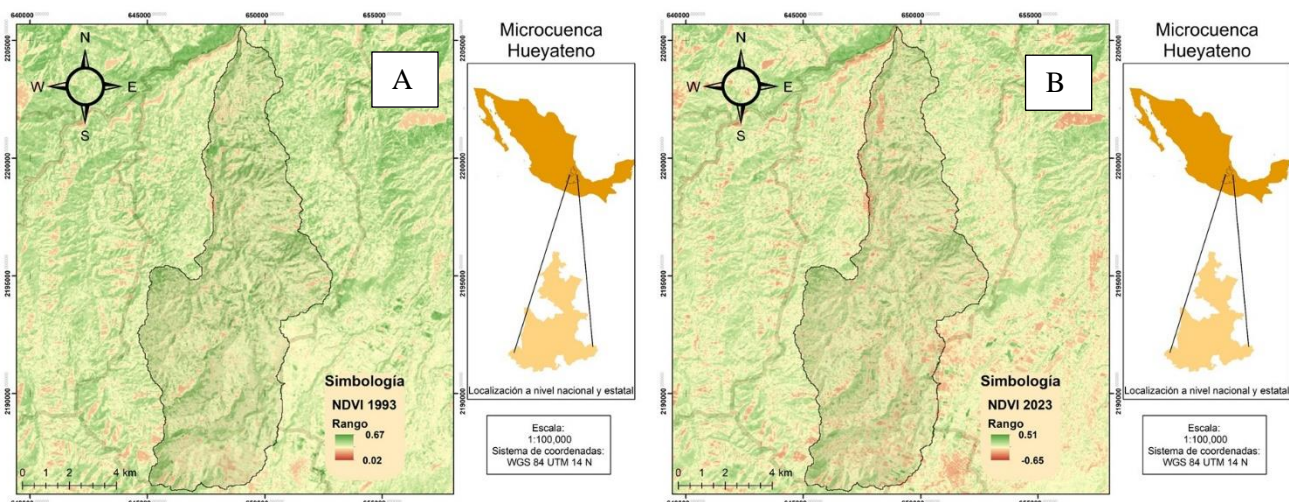


Figura 18. NDVI del mes de junio para los años 1993 (A) y 2023 (B).

La marcada disminución del NDVI en la microcuenca Hueyateno entre 1993 y 2023 no solo confirma una tendencia global de pérdida de cobertura vegetal, sino que también revela las presiones locales específicas. Si bien los factores identificados (urbanización, agricultura, cambio climático y degradación del suelo) suelen estar interconectados, el patrón espacial de los valores más negativos (Fig. 16) sugiere que la expansión de infraestructuras y la transformación del uso del suelo para agricultura intensiva podrían ser los drivers

predominantes en esta área, un hallazgo que está en línea con las conclusiones de García y López (2015) para el río Ebro.

Sin embargo, la magnitud del cambio observado es suficientemente grande como para indicar una tendencia clara e irreversible del paisaje.

Las implicaciones de esta degradación son significativas, e incluyen una potencial pérdida de biodiversidad, alteración del ciclo hidrológico de la microcuenca y una mayor vulnerabilidad a la erosión del suelo. Por lo tanto, estos resultados destacan la urgente necesidad de implementar políticas de manejo territorial y conservación que mitiguen la pérdida de servicios ecosistémicos críticos.

12.2 Cambio de uso de suelo

Entre 1993 y 2023, la microcuenca Hueyateno experimentó cambios significativos en el uso del suelo (Cuadro 19). La clase de bosque sufrió una pérdida neta de 2519 hectáreas, indicando una notable deforestación. En contraste, la superficie destinada a uso agrícola aumentó en 935.15 hectáreas, y las áreas urbanas se expandieron en 1601.67 hectáreas, reflejando un incremento en la urbanización y la conversión de tierras para la agricultura. El suelo desnudo tuvo una reducción de 17.82 hectáreas. Estos cambios sugieren un desplazamiento de áreas forestales hacia usos agrícolas y urbanos, con implicaciones importantes para la sostenibilidad ambiental y la gestión del territorio en la región.

Cuadro 19. Pérdida de área por clase de uso de suelo en la microcuenca Hueyateno (1993-2023).

| Área pérdida (ha) | 1993-2023 | Clase | | | |
|----------------------|-----------|----------|----------|---------|---------------|
| | | Bosque | Agrícola | Urbano | Suelo desnudo |
| | | -2519.00 | 935.15 | 1601.67 | -17.82 |

La tasa de cambio anual de uso del suelo en la microcuenca Hueyateno entre 1993 y 2023 revela una transformación considerable en las diferentes clases de cobertura (Cuadro 20). La superficie de bosque decreció a una tasa anual del -1.56%, evidenciando un proceso de deforestación constante. Por otro lado, las áreas agrícolas aumentaron significativamente con

una tasa anual del 7.33%, indicando una intensificación en el uso de la tierra para actividades agrícolas. Las áreas urbanas también crecieron, aunque a un ritmo más moderado, con una tasa anual del 2.48%, reflejando la expansión urbana. En contraste, el suelo desnudo disminuyó a una tasa anual del -1.10%, sugiriendo una reducción marginal de áreas sin cobertura vegetal. Estos cambios en las tasas de uso del suelo destacan la dinámica de conversión de áreas forestales hacia usos agrícolas y urbanos, subrayando la necesidad de políticas de gestión sostenible del territorio para mitigar los efectos adversos de estas transformaciones.

Cuadro 20. Tasa de cambio anual por clase de uso de suelo en la microcuenca Hueyateno (1993-2023).

| | | Clase | | | |
|--------------------------|-----------|--------|----------|--------|---------------|
| | | Bosque | Agrícola | Urbano | Suelo desnudo |
| Tasa de cambio anual (%) | 1993-2023 | -1.56 | 7.33 | 2.48 | -1.10 |

La matriz de transición de uso del suelo de la microcuenca Hueyateno entre 1993 y 2023 proporciona información detallada sobre la dinámica de conversión entre diferentes clases de cobertura del suelo (Cuadro 21). Los cambios más significativos se observan en la conversión de bosques a tierras agrícolas y urbanas.

Principales cambios observados

- Conversión de bosque a agrícola: La mayor transición se registra en la conversión de áreas boscosas a tierras agrícolas, con 1910.63 hectáreas transformadas. Este cambio refleja una intensa deforestación impulsada por la expansión agrícola, lo que sugiere una presión considerable sobre los recursos forestales.
- Conversión de bosque a urbano: Se observó una conversión significativa de 656.10 hectáreas de bosque a áreas urbanas. Este fenómeno indica un notable crecimiento urbano en detrimento de las áreas forestales, lo cual puede tener implicaciones importantes para la sostenibilidad ambiental y la biodiversidad.

- Agrícola a urbano: Se convirtieron 293.42 hectáreas de tierras agrícolas en urbanas, lo que evidencia la expansión de las zonas urbanas sobre áreas previamente utilizadas para la agricultura.
- Agrícola a bosque: La conversión de tierras agrícolas a bosque es mínima, con solo 53.95 hectáreas, lo que sugiere una limitada reforestación en comparación con la deforestación observada.
- Suelo desnudo a agrícola y urbano: Se transformaron 25.95 hectáreas de suelo desnudo en agrícola y 24.31 hectáreas en urbano, lo que refleja una utilización de áreas sin vegetación para usos agrícolas y urbanos.

La matriz de transición de uso del suelo en la microcuenca Hueyateno entre 1993 y 2023 revela una marcada tendencia hacia la conversión de áreas boscosas a tierras agrícolas y urbanas, con una pérdida neta significativa de cobertura forestal. Esta tendencia pone de manifiesto la presión antropogénica sobre los recursos naturales y resalta la necesidad de implementar estrategias de gestión sostenible del territorio para mitigar los efectos adversos de estos cambios en el uso del suelo. La expansión agrícola y urbana sobre áreas boscosas y suelos desnudos subraya la urgencia de políticas que promuevan la conservación y recuperación de la vegetación nativa para mantener la integridad ecológica de la microcuenca.

Cuadro 21. Matriz de transición de uso del suelo en la microcuenca Hueyateno entre 1993 y 2023.

| | | 2023 | | | | | Pérdida |
|------|---------------|----------|---------|---------------|---------|---------|---------|
| | | Agrícola | Bosque | Suelo desnudo | Urbano | Total | |
| 1993 | Agrícola | 1122.17 | 53.95 | 5.26 | 293.42 | 1474.80 | 352.63 |
| | Bosque | 1910.63 | 4091.37 | 20.27 | 656.10 | 6678.37 | 2587.00 |
| | Suelo desnudo | 25.95 | 3.24 | 10.98 | 24.31 | 64.48 | 53.50 |
| | Urbano | 15.73 | 17.38 | 8.58 | 84.70 | 126.39 | 41.69 |
| | Total | 3074.49 | 4165.94 | 45.09 | 1058.53 | 8344.04 | |
| | Ganancia | 1952.32 | 74.57 | 34.11 | 973.83 | | |

Las clases de uso de suelo en la microcuenca Hueyateno para el año 1993 se ilustran en la Figura 19. El bosque predomina en la mayor parte de la microcuenca y se concentra principalmente en áreas montañosas y menos accesibles, donde cubre grandes extensiones del territorio. Las áreas urbanas resultan limitadas y se localizan sobre todo en la parte norte y central de la cuenca; estas zonas corresponden probablemente a asentamientos humanos y áreas de infraestructura.

Las áreas agrícolas se distribuyen principalmente en las zonas bajas y en las laderas menos inclinadas, lo que indica una importante actividad agrícola concentrada en la periferia de las áreas boscosas y cerca de las zonas urbanas. El suelo descubierto aparece disperso por la cuenca, aunque resulta menos frecuente en comparación con las otras clases; estas áreas representan zonas sin vegetación significativa, potencialmente sujetas a procesos de erosión o en preparación para otros usos.

La distribución general del uso de suelo muestra una fragmentación notable del bosque, especialmente en las áreas adyacentes a las zonas agrícolas y urbanas. Los patrones observados sugieren transiciones entre áreas boscosas y agrícolas que podrían reflejar procesos de conversión de tierra para la expansión agrícola. Las áreas de suelo descubierto, aunque limitadas, indican posibles zonas propensas a la erosión o degradación del suelo, lo que requiere estrategias específicas de manejo y conservación.

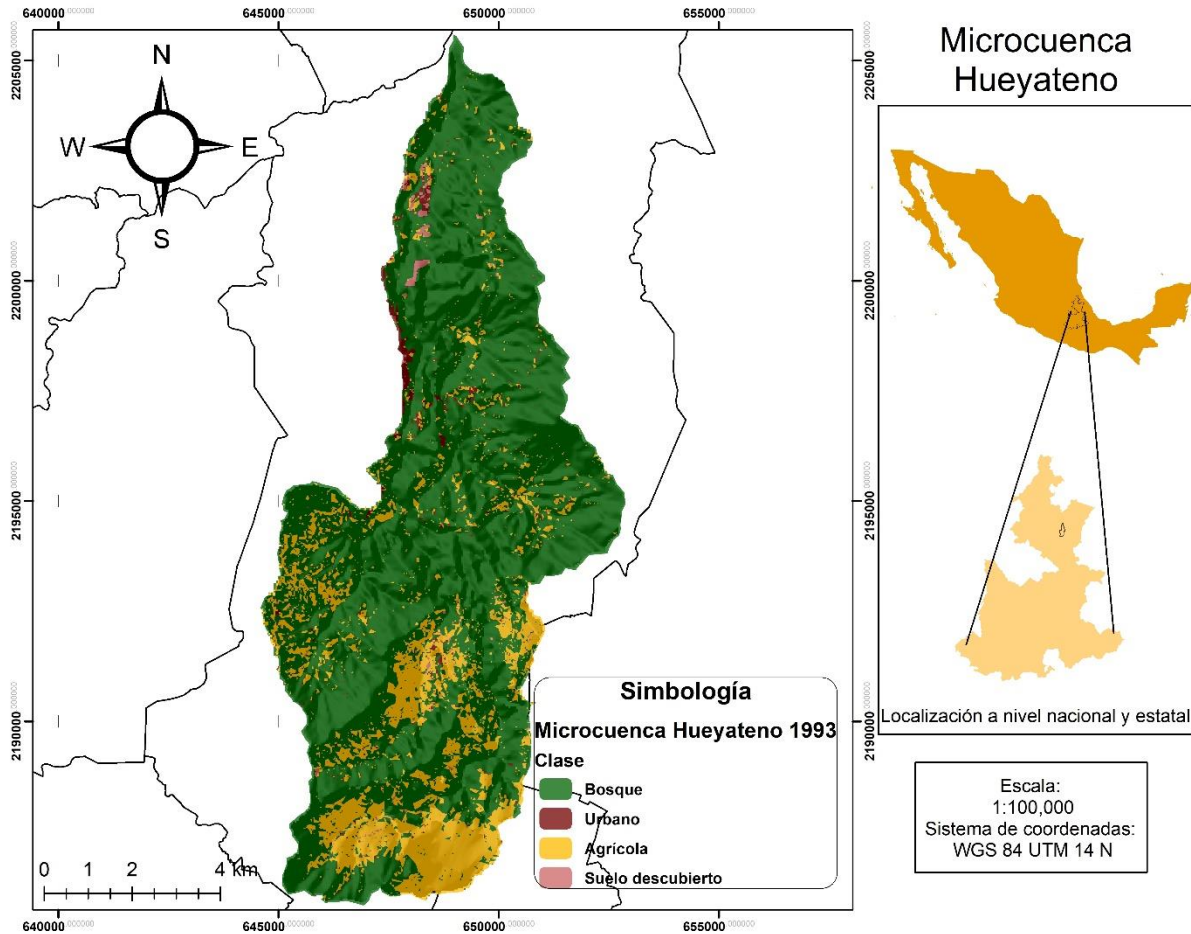


Figura 19. Uso de suelo en la microcuenca Hueyateno en el año 1993.

Los mapas proporcionan una visión clara de la evolución del uso del suelo en la microcuenca Hueyateno entre 1993 y 2023. Estos mapas, que utilizan la misma simbología, distinguen cuatro clases de cobertura del suelo: bosque, urbano, agrícola y suelo descubierto (Fig. 20).

La cobertura boscosa cubría, en 1993, la mayor parte de la cuenca, especialmente en las áreas montañosas. Esta cobertura disminuyó notablemente para 2023, particularmente en el norte y centro de la cuenca, donde fue reemplazada por zonas urbanas y agrícolas.

Las áreas urbanas eran, en 1993, limitadas y dispersas, principalmente en el norte. Estas áreas aumentaron significativamente para 2023, con una expansión notable en el centro y hacia el sur de la cuenca. La urbanización invadió extensas zonas previamente ocupadas por bosque.

La actividad agrícola se concentraba, en 1993, principalmente en las áreas bajas y laderas. Las tierras agrícolas se expandieron de manera significativa para 2023, al ocupar una gran parte de la cuenca que

anteriormente correspondía a bosque. Este cambio resulta especialmente visible en el sur y centro de la cuenca. Las áreas de suelo descubierto eran, en 1993, dispersas y limitadas. Estas áreas mostraron un ligero aumento para 2023, lo que puede indicar zonas de degradación del suelo o en preparación para futuros usos agrícolas o urbanos.

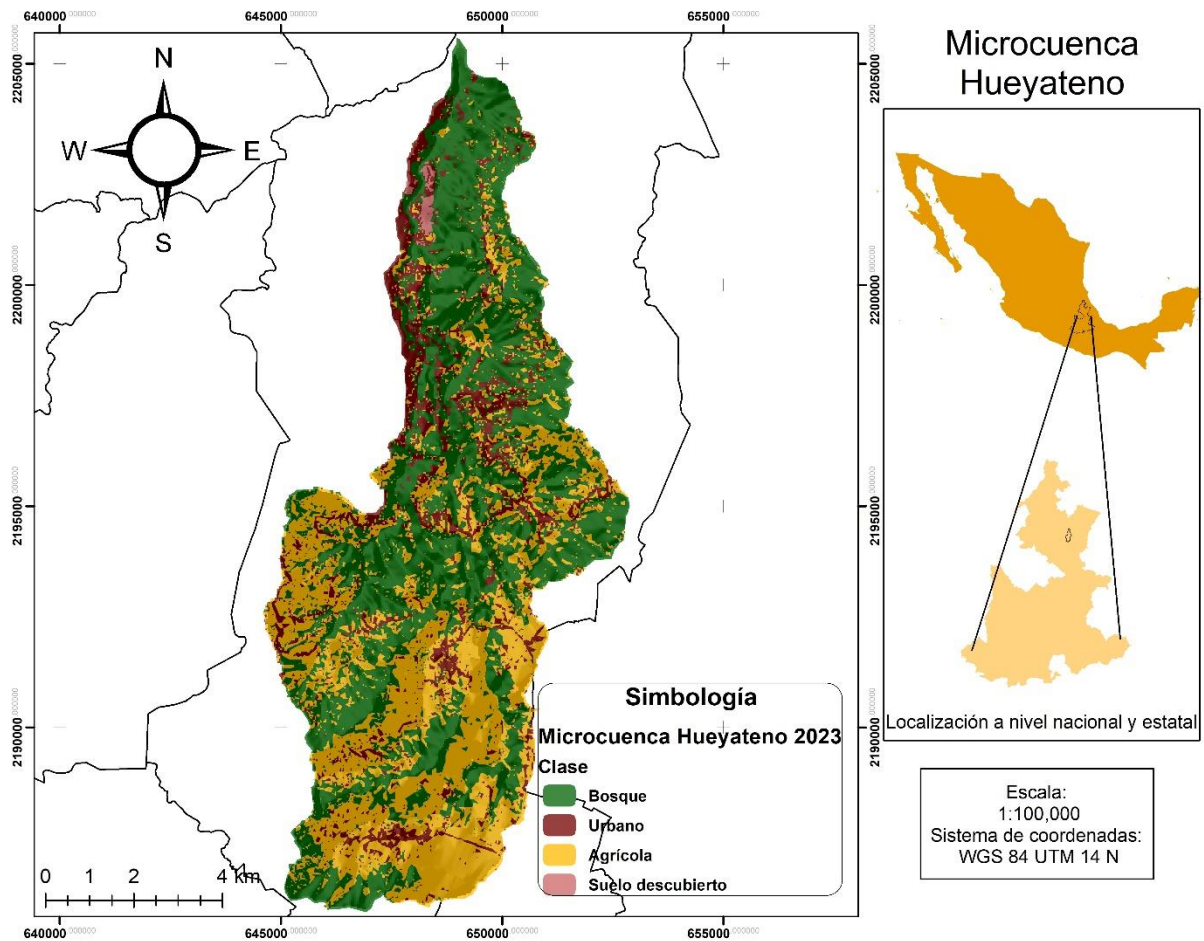


Figura 20. Uso de suelo en la microcuenca Hueyateno en el año 2023.

12.3 Impactos y Consideraciones

- **Deforestación:** La reducción en la cobertura forestal es notable. Esto podría tener implicaciones negativas para la biodiversidad, la conservación del suelo y la regulación del ciclo hidrológico en la cuenca.

- **Urbanización:** La expansión urbana refleja el crecimiento poblacional y el desarrollo de infraestructura. Sin embargo, esta tendencia también sugiere una mayor presión sobre los recursos naturales y posibles conflictos de uso del suelo.
- **Expansión agrícola:** El incremento en las tierras agrícolas indica una intensificación de la producción agrícola, lo que puede estar relacionado con la demanda de alimentos. No obstante, esta expansión podría estar contribuyendo a la deforestación y la pérdida de hábitats naturales.
- **Degradación del suelo:** El aumento en áreas de suelo descubierto puede ser un indicativo de procesos de erosión o de uso no sostenible de la tierra, lo que subraya la necesidad de prácticas de manejo y conservación del suelo.

13. Determinación de la salud del suelo de la microcuenca Hueyateno

El suelo es un recurso indispensable para la agricultura, sin embargo, diversos factores pueden afectar su calidad, como el uso excesivo de fertilizantes, la acidez, extracción de materia orgánica, etc., es por ello que para que los cultivos agrícolas tengan un buen rendimiento el suelo debe tener un balance homogéneo en cuanto a los principales indicadores de fertilidad tales como: conductividad, pH, nitrógeno, materia orgánica, etc., (Abdu et al., 2023).

Se analizaron propiedades fisicoquímicas de suelo andosol distribuido en tres zonas altitudinales (alta, media y baja) de la microcuenca Hueyateno. Se recolectaron muestras de suelo en 21 sitios representativos asociados a diferentes usos del suelo: agrícola (cultivos de aguacate, maíz, papa, manzana), forestal y asentamientos humanos, en la figura 21 se aprecia los puntos de colecta y en el cuadro 22 las coordenadas UTM.

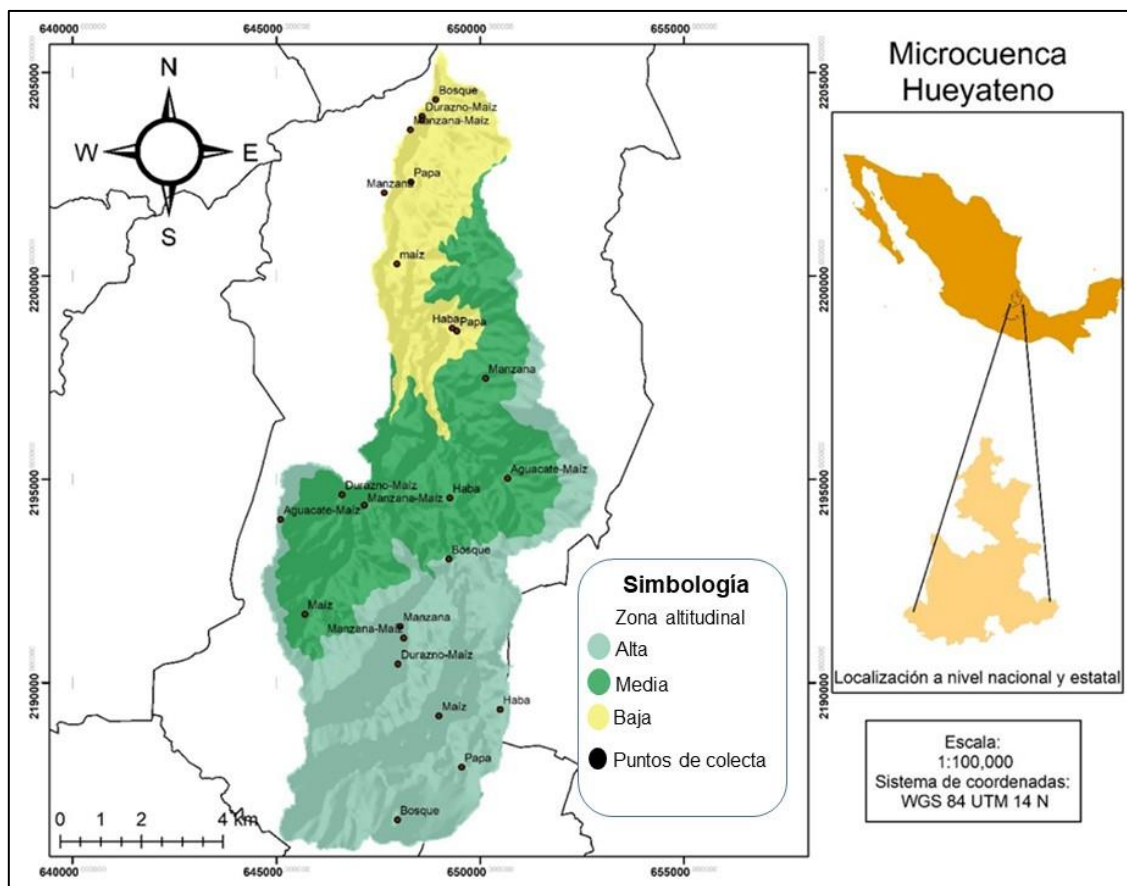


Figura 21. Puntos de colecta de muestras de suelo.

Cuadro 22. Coordenadas geográficas en UTM de los sitios de colecta de suelo.

| Cultivo | X (Latitud) | Y (Longitud) | Cultivo | X (Latitud) | Y (Longitud) |
|---------------|-------------|--------------|---------------|-------------|--------------|
| Manzana-Maíz | 648128.6 | 2191099 | Bosque | 647972 | 2186625.7 |
| Aguacate-Maíz | 645105.4 | 2194015.4 | Aguacate-Maíz | 650676.9 | 2195025.6 |
| Durazno-Maíz | 647985 | 2190457.7 | Maíz | 645702.2 | 2191681.7 |
| Papa | 649547.8 | 2187920.2 | Haba | 649258.1 | 2194543.8 |
| Manzana | 648042 | 2191382.7 | Bosque | 649232.6 | 2193039 |
| Maíz | 648992.3 | 2189182.4 | Papa | 648304.2 | 2202310.8 |
| Haba | 650491 | 2189340 | Haba | 649316.3 | 2198715.3 |

| | | | | | |
|--------------|----------|-----------|---------------|---------|-----------|
| Manzana-Maíz | 647161.4 | 2194364.5 | Bosque | 648916 | 2204336.3 |
| Durazno-Maíz | 46614.2 | 94623.8 | Maíz | 47956.3 | 296766.9 |
| Manzana | 50138.8 | 97483.8 | Manzana | 47646.8 | 204564.9 |
| Papa | 49431.7 | 98647.5 | Durazno-Maíz | 48579.5 | 396522.4 |
| | | | Manzana-Maíz | 48289.8 | 355695.5 |
| | | | Aguacate-Maíz | 48570.6 | 382569 |

13.1 Materia Orgánica (MO)

Los suelos bajo bosque en la zona media presentan el contenido más alto de MO (27.32%), clasificado como muy alto, lo que refleja la acumulación de hojarasca, raíces y la mínima perturbación antrópica. Este valor es consistente con estudios en Andosoles de bosques templados (Galicia et al., 2016). En contraste, los suelos cultivados con maíz y haba en zonas alta y baja muestran valores significativamente menores (4.3–8.6%, bajo a medio), lo que sugiere pérdidas aceleradas debido a la labranza intensiva, la erosión y la menor aportación de residuos orgánicos. Los sistemas agroforestales (manzana-maíz) en la zona baja registran 15.28% (alto), indicando que prácticas agrícolas diversificadas favorecen la retención de carbono, similar a lo reportado en Andosoles de Michoacán (Arenas-Navarro & García-Oliva, 2024)

13.2 Nitrógeno Total (N)

El N sigue una tendencia similar a la MO, con los valores más altos en suelos de bosque (0.37–0.39%, medio), debido a la fijación biológica y la descomposición de materia orgánica. En cambio, los cultivos de haba (0.05–0.10%) y maíz (0.11–0.33%) en zonas alta y baja presentan deficiencias (bajo), lo que puede limitar el crecimiento vegetal. La baja relación C/N en estos suelos (<20) sugiere una rápida mineralización, pero también una mayor susceptibilidad a pérdidas por lixiviación (Poulenard et al., 2003).

13.3 pH

Los suelos son predominantemente ácidos (pH 4.5–5.9), característica típica de Andosoles no encalados. Los valores más bajos (<4.7) en bosques se asocian a la lixiviación de bases (Ca, Mg, K) y a la alta acumulación de MO, que libera ácidos orgánicos. En contraste, los suelos cultivados con maíz en zona alta (pH 6.77) podrían reflejar el uso histórico de enmiendas calcáreas. La acidez moderada (pH 5.1–6.5) en cultivos como papa y manzana puede afectar la disponibilidad de fósforo y micronutrientes, requiriendo estrategias de manejo como el encalado.

13.4 Conductividad Eléctrica (CE)

Todos los suelos presentan CE <0.15 dS/m, confirmando la ausencia de salinidad, un rasgo esperado en regiones húmedas como Zacapoaxtla, donde el lavado de sales es constante. Esto favorece el cultivo de especies sensibles a la salinidad, como la papa y el maíz.

13.5 Cationes Intercambiables (Ca, Mg, K, Na)

- Calcio (Ca): Los niveles más altos (7.5 cmol+/kg) en bosque (media) contrastan con los suelos agrícolas (2.0–5.8 cmol+/kg), donde la extracción por cosechas y la acidez reducen su disponibilidad.
- Magnesio (Mg): Los valores oscilan entre 1.0–4.7 cmol+/kg, con niveles óptimos (>1.3 cmol+/kg) en sistemas diversificados (e.g., manzana-maíz).
- Potasio (K): La mayoría de los suelos están en rango bajo (0.4–0.9 cmol+/kg), excepto en maíz (media) (2.3 cmol+/kg), posiblemente por fertilización potásica.
- Sodio (Na): Todos los valores son bajos (<1.7 cmol+/kg), lo que elimina riesgos de sodificación.

13.6 Capacidad de Intercambio Catiónico (CIC)

La CIC varía desde muy baja (7.06 cmol+/kg en haba-baja) hasta muy alta (30.26 cmol+/kg en bosque-medio), correlacionándose directamente con el contenido de MO y arcilla. Andosoles con CIC >25 cmol+/kg (e.g., manzana-maíz-baja) confirman su alta capacidad

para retener nutrientes, un rasgo clave para la fertilidad en suelos volcánicos (Dahlgren et al., 2004).

13.7 Textura del Suelo

- Franco-arcillosos y franco-limosos: Dominan en la mayoría de los sitios (e.g., manzana-maíz, papa), lo que favorece la retención de agua y nutrientes. Estos suelos son ideales para cultivos exigentes como la papa.
- Franco-arenosos y areno-francosos: Presentes en suelos bajo haba (86% arena) y maíz-baja, donde la baja retención hídrica puede limitar la productividad en épocas secas.
- Arcillo-limosos: Solo en bosque-alta (50% arcilla + 40% limo), indicando alta fertilidad, pero potencial problemas de drenaje.

13.7.1 Clase textural

La predominancia de texturas franco-arcillosas en zonas cultivadas sugiere un equilibrio favorable entre aireación, infiltración y retención de humedad. Sin embargo, suelos con alto contenido de arena (haba) requieren riegos más frecuentes y enmiendas orgánicas para mejorar su capacidad de campo. En contraste, los suelos arcillosos (bosque) pueden presentar limitaciones de labranza y encharcamiento.

Los resultados obtenidos en los Andosoles de la microcuenca Hueyateno, coinciden con tendencias globales observadas en suelos volcánicos, particularmente en cuanto al impacto del uso del suelo en la materia orgánica (MO), dinámica de nutrientes y propiedades físicas. Estos hallazgos se contextualizan dentro de la literatura científica sobre Andosoles, destacando su vulnerabilidad a disturbios antrópicos y su resiliencia bajo manejo sostenible.

13.7.2 Dinámica de la materia orgánica y nitrógeno

Los altos contenidos de MO (27.32%) en Andosoles forestales de la zona media altitudinal concuerdan con reportes de otras regiones volcánicas como los Andes ecuatorianos

(Poulenard et al., 2003) y el sur de Chile (Dörner et al., 2012), donde Andosoles no perturbados suelen presentar MO >20% debido a la formación de complejos órgano-minerales estables. Sin embargo, la drástica reducción de MO (4.3–8.6%) en monocultivos de maíz y haba refleja lo observado en la Faja Volcánica Transmexicana (García-Oliva et al., 2019), donde el laboreo convencional acelera la mineralización de MO. Sistemas agroforestales (ej. manzana-maíz) mantuvieron niveles altos de MO (15.28%), similar a Andosoles cafetaleros en Costa Rica (Hagggar et al., 2001), donde árboles de sombra mitigaron pérdidas de MO.

El nitrógeno mostró tendencias análogas: suelos forestales conservaron niveles moderados (0.37–0.39%), mientras cultivos intensivos (especialmente haba) presentaron deficiencias críticas (0.05–0.10%). Esto coincide con estudios en Andosoles colombianos (Buytaert et al., 2006), donde la disminución de N se vinculó a menores aportes orgánicos y lixiviación. Las bajas relaciones C/N (<20) en suelos agrícolas sugieren mineralización rápida pero también riesgo de pérdida de N, problema común en Andosoles ácidos (Takahashi & Shoji, 2001)

13.7.3 Capacidad de Intercambio Catiónico (CIC) y bases intercambiables

Los valores de CIC en la microcuenca (7.06–30.26 cmol₊/kg) abarcan el rango típico de Andosoles. Los suelos forestales mostraron la CIC más alta (>25 cmol₊/kg), consistente con su elevada MO y arcilla, patrón también observado en Andosoles de Kenia (Mugagga et al., 2012). Por el contrario, la baja CIC en cultivos de haba (7.06 cmol₊/kg) se correlaciona con texturas arenosas y pérdida de MO, similar a Andosoles degradados de Ruanda (Rushemuka et al., 2014).

Los niveles de Ca²⁺ y Mg²⁺ en suelos agrícolas (2.0–5.8 y 1.0–2.4 cmol₊/kg, respectivamente) fueron inferiores a los de bosques, probablemente por extracción por cultivos y lixiviación. Déficits similares se reportan en Andosoles filipinos (Asio et al., 2009), donde el cultivo continuo sin fertilización agotó las bases intercambiables. La excepción fue un cultivo de maíz con alto K (2.3 cmol₊/kg), posiblemente por fertilización potásica.

13.7.5 Perspectivas comparativas

Aunque los Andosoles de la microcuenca Hueyateno comparten similitudes con otras regiones, destacan dos particularidades:

1. **Agroforestería como estrategia de mitigación:** La mayor MO en sistemas manzana-maíz contrasta con la disminución en monocultivos, sugiriendo que estos sistemas emulan el ciclo de nutrientes de los bosques.

Cuadro 23. Promedio de los indicadores de fertilidad de la microcuenca Hueyateno.

| | | Cultivo | M.O. (%) | N (%) | pH | CE (dS/m) | Ca (cmol(+)/kg) | Mg (cmol(+)/kg) | Na (cmol(+)/kg) | K (cmol(+)/kg) | CIC (cmol(+)/kg) | Arenas (%) | Limos (%) | Arcillas (%) | Clase Textural |
|-----------------------|-------|---------------|---------------------|-------------|--------------|-------------|-----------------|-----------------|-----------------|----------------|------------------|------------|-----------|--------------|------------------|
| | Zonas | | | | | | | | | | | | | | |
| microcuenca Hueyateno | Alta | Manzana-Maíz | 13.12 ± 0.37 | 0.61 ± 0.02 | 5.15 ± 0.005 | 0.05 ± 0.01 | 4.50 ± 0.10 | 1.20 ± 0.05 | 0.20 ± 0.01 | 0.80 ± 0.02 | 15.33 ± 0.23 | 46 | 34 | 20 | Franca |
| | | Aguacate-Maíz | 8.60 ± 0.37 | 0.33 ± 0.02 | 5.96 ± 0.005 | 0.04 ± 0.01 | 5.00 ± 0.10 | 2.00 ± 0.05 | 0.30 ± 0.01 | 0.90 ± 0.02 | 14.66 ± 0.23 | 30 | 36 | 34 | Franco arcillosa |
| | | Durazno-Maíz | 5.16 ± 1.11 | 0.17 ± 0.03 | 5.74 ± 0.01 | 0.06 ± 0.01 | 3.80 ± 0.10 | 1.50 ± 0.05 | 0.30 ± 0.01 | 0.60 ± 0.03 | 15.60 ± 0.40 | 44 | 32 | 24 | Franca |
| | | Papa | 8.82 ± 0.37 | 0.30 ± 0.02 | 5.94 ± 0.005 | 0.07 ± 0.01 | 4.80 ± 0.10 | 1.60 ± 0.05 | 0.25 ± 0.01 | 1.10 ± 0.03 | 14.93 ± 0.23 | 38 | 40 | 22 | Franca |
| | | Manzana | 7.53 ± 0.37 | 0.28 ± 0.06 | 6.17 ± 0.005 | 0.07 ± 0.01 | 5.20 ± 0.10 | 1.80 ± 0.05 | 0.20 ± 0.01 | 0.90 ± 0.03 | 14.40 ± 0.40 | 34 | 38 | 28 | Franco arcillosa |
| | | Maíz | 4.47 ± 0.29 | 0.11 ± 0.02 | 6.77 ± 0.20 | 0.03 ± 0.01 | 5.40 ± 0.10 | 1.60 ± 0.05 | 0.20 ± 0.01 | 0.80 ± 0.02 | 14.80 ± 0.40 | 56 | 24 | 20 | Franco arenosa |
| | | Haba | 4.30 ± 0.29 | 0.10 ± 0.04 | 5.54 ± 0.36 | 0.02 ± 0.01 | 5.00 ± 0.10 | 1.20 ± 0.05 | 0.15 ± 0.01 | 0.40 ± 0.02 | 7.20 ± 0.80 | 86 | 6 | 8 | Areno francosa |
| | | Bosque | 9.89 ± 0.74 | 0.39 ± 0.02 | 4.70 ± 0.01 | 0.09 ± 0.02 | 2.00 ± 0.05 | 1.50 ± 0.05 | 0.25 ± 0.01 | 1.20 ± 0.02 | 16.53 ± 0.23 | 10 | 40 | 50 | Arcillo limosa |
| | Media | Aguacate-Maíz | 4.73 ± 0.37 | 0.19 ± 0.02 | 5.83 ± 0.01 | 0.10 ± 0.03 | 3.10 ± 0.05 | 2.30 ± 0.05 | 0.20 ± 0.01 | 0.90 ± 0.02 | 13.60 ± 0.40 | 34 | 34 | 32 | Franco arcillosa |
| | | Manzana-Maíz | 11.19 ± 0.37 | 0.41 ± 0.02 | 4.97 ± 0.010 | 0.12 ± 0.02 | 3.00 ± 0.10 | 1.60 ± 0.05 | 0.25 ± 0.01 | 0.70 ± 0.03 | 22.13 ± 0.46 | 32 | 40 | 28 | Franco arcillosa |
| | | Durazno-Maíz | 11.83 ± 0.37 | 0.30 ± 0.02 | 4.90 ± 0.005 | 0.12 ± 0.02 | 3.20 ± 0.10 | 1.50 ± 0.05 | 0.25 ± 0.01 | 0.80 ± 0.03 | 22.00 ± 0.40 | 30 | 40 | 30 | Franco arcillosa |
| | | Manzana | 8.18 ± 0.37 | 0.40 ± 0.02 | 5.46 ± 0.015 | 0.15 ± 0.02 | 3.20 ± 0.10 | 1.60 ± 0.05 | 0.35 ± 0.02 | 0.75 ± 0.03 | 21.33 ± 0.46 | 26 | 44 | 30 | Franco arcillosa |
| | | Papa | 9.25 ± 0.75 | 0.29 ± 0.02 | 5.85 ± 0.011 | 0.10 ± 0.02 | 2.80 ± 0.05 | 1.10 ± 0.05 | 0.35 ± 0.02 | 0.70 ± 0.03 | 21.73 ± 0.23 | 40 | 50 | 10 | Franco limosa |
| | | Maíz | 9.89 ± 0.74 | 0.26 ± 0.02 | 5.47 ± 0.01 | 0.10 ± 0.10 | 2.50 ± 0.10 | 2.40 ± 0.05 | 0.30 ± 0.02 | 2.30 ± 0.03 | 14.26 ± 0.23 | 36 | 36 | 28 | Franco arcillosa |

| | | | | | | | | | | | | | | | |
|--|------|---------------|---------------------|--------------|--------------|-------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|--------------|----|----|----|------------------|
| | | Haba | 3.95 ± 0.29 | 0.035 ± 0.00 | 5.52 ± 0.35 | 0.05 ± 0.40 | 2.60 ± 0.05 | 2.00 ± 0.05 | 0.40 ± 0.03 | 0.90 ± 0.02 | 7.06 ± 0.23 | 86 | 4 | 10 | Areno francosa |
| | | Bosque | 27.32 ± 1.34 | 0.37 ± 0.02 | 5.34 ± 0.14 | 0.05 ± 0.65 | 4.50 ± 0.10 | 4.70 ± 0.05 | 1.00 ± 0.10 | 0.85 ± 0.02 | 30.26 ± 1.28 | 62 | 28 | 10 | Franco arenosa |
| | Baja | Aguacate-Maíz | 8.82 ± 0.37 | 0.41 ± 0.02 | 5.13 ± 0.017 | 0.001373 ± 0.02 | 2.10 ± 0.34 | 1.20 ± 0.18 | 1.65 ± 0.23 | 0.70 ± 0.19 | 19.47 ± 0.23 | 30 | 42 | 28 | Franco arcillosa |
| | | Manzana-Maíz | 15.28 ± 0.75 | 0.63 ± 0.03 | 4.55 ± 0.020 | 0.001883 ± 0.03 | 1.50 ± 0.40 | 1.10 ± 0.12 | 1.58 ± 0.25 | 0.60 ± 0.16 | 25.07 ± 0.23 | 32 | 56 | 12 | Franco limosa |
| | | Durazno-Maíz | 14.63 ± 0.37 | 0.55 ± 0.02 | 4.84 ± 0.020 | 0.002146 ± 0.00 | 1.80 ± 0.34 | 1.50 ± 0.21 | 1.67 ± 0.12 | 0.80 ± 0.09 | 20.93 ± 0.46 | 62 | 28 | 10 | Franco arenosa |
| | | Manzana | 10.76 ± 0.75 | 0.64 ± 0.02 | 4.95 ± 0.020 | 0.001862 ± 0.01 | 1.60 ± 0.02 | 1.20 ± 0.03 | 1.58 ± 0.00 | 0.60 ± 0.06 | 19.07 ± 0.23 | 28 | 34 | 38 | Franco arcillosa |
| | | Maíz | 8.60 ± 0.37 | 0.33 ± 0.02 | 5.5 ± 0.010 | 0.001526 ± 0.03 | 1.60 ± 0.34 | 2.20 ± 0.12 | 1.67 ± 0.05 | 0.80 ± 0.18 | 13.47 ± 0.23 | 58 | 26 | 16 | Franco arenosa |
| | | Papa | 14.41 ± 0.37 | 0.28 ± 0.03 | 5.33 ± 0.01 | 0.0011443 ± 0.15 | 1.40 ± 0.03 | 1.30 ± 0.02 | 1.57 ± 0.00 | 0.50 ± 0.06 | 18.66 ± 0.61 | 40 | 40 | 20 | Franca |
| | | Haba | 6.02 ± 0.74 | 0.32 ± 0.02 | 4.88 ± 0.005 | 0.00043533 ± 0.15 | 0.50 ± 0.04 | 1.10 ± 0.02 | 1.54 ± 0.05 | 0.60 ± 0.02 | 14.26 ± 0.46 | 46 | 30 | 24 | Franca |
| | | Bosque | 4.73 ± 0.37 | 0.15 ± 0.08 | 4.41 ± 0.005 | 0.0011657 ± 0.05 | 0.60 ± 0.08 | 1.00 ± 0.02 | 1.54 ± 0.03 | 0.50 ± 0.06 | 9.06 ± 0.23 | 58 | 26 | 16 | Franco arenosa |

*Valores interpretados de acuerdo a la NORMA Oficial Mexicana NOM-021-RECNAT-2000

Interpretación de los resultados del análisis post-hoc de Tukey (95% de confianza) para la materia orgánica en suelos bajo diferentes usos y zonas altitudinales

Los resultados del análisis de comparaciones múltiples revelaron diferencias significativas ($p < 0.05$) en el contenido de materia orgánica (MO) entre los distintos sistemas de uso del suelo y zonas altitudinales (Cuadro 24). Los tratamientos se agruparon en 11 categorías significativas (A-K), mostrando un claro gradiente descendente en los contenidos de MO desde los bosques conservados hasta los cultivos intensivos.

Cuadro 24. Diferencias significativas en materia orgánica del suelo entre sistemas de uso agrícola y zonas altitudinales.

Agrupar información utilizando el método de Tukey y una confianza de 95%

| Factor | N | Media | Agrupación |
|---------------------|---|--------|------------|
| Media-Bosque | 3 | 27.320 | A |
| Baja-Manzana-Maíz | 3 | 15.280 | B |
| Baja-Durazno-Maíz | 3 | 14.630 | B |
| Baja-Papa | 3 | 14.410 | B |
| Alta-Manzana-Maíz | 3 | 13.120 | C |
| Media-Durazno-Maíz | 3 | 11.830 | D |
| Media-Manzana-Maíz | 3 | 11.190 | D |
| Baja-Manzana | 3 | 10.760 | D E |
| Media-Maíz | 3 | 9.890 | E F |
| Alta-Bosque | 3 | 9.890 | E F |
| Media-Papa | 3 | 9.250 | F G |
| Baja-Aguacate-Maíz | 3 | 8.820 | F G |
| Alta-Papa | 3 | 8.820 | F G |
| Baja-Maíz | 3 | 8.600 | G H |
| Alta-Aguacate-Maíz | 3 | 8.600 | G H |
| Media-Manzana | 3 | 8.180 | G H |
| Alta-Manzana | 3 | 7.530 | H |
| Baja-Haba | 3 | 6.020 | I |
| alta-Durazno-Maíz | 3 | 5.160 | I J |
| Baja-Bosque | 3 | 4.730 | J K |
| Media-Aguacate-Maíz | 3 | 4.730 | J K |
| Alta-Maíz | 3 | 4.470 | J K |
| Alta-Haba | 3 | 4.300 | J K |
| Media-Haba | 3 | 3.950 | K |

Las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes.

El tratamiento que presentó el mayor contenido de MO fue el bosque de la zona media (27.32%), el cual difirió significativamente de todos los demás sistemas (Grupo A). Este valor excepcionalmente alto sugiere que las condiciones edafoclimáticas de la zona media, combinadas con la ausencia de perturbación antropogénica, favorecen la acumulación de carbono orgánico en el suelo. Estos resultados concuerdan con estudios previos en ecosistemas montañosos tropicales, donde los bosques nativos actúan como importantes reservorios de MO (Díaz et al., 2022).

Los sistemas agroforestales de la zona baja mostraron contenidos intermedios de MO, formando el Grupo B:

- Manzana-Maíz (15.28%)
- Durazno-Maíz (14.63%)
- Papa (14.41%)

Estos valores no presentaron diferencias significativas entre sí, pero sí fueron inferiores al bosque de zona media (Fig. 22). La relativa alta MO en estos sistemas sugiere que las prácticas agroforestales en zonas bajas pueden mantener una buena fertilidad edáfica, posiblemente debido a:

1. Mayor aporte de biomasa desde los componentes arbóreos
2. Menor labranza comparado con cultivos anuales
3. Microclimas más favorables para la descomposición

Los cultivos tradicionales mostraron una marcada reducción en MO, particularmente en la zona alta:

- Maíz (4.47%)
- Haba (4.30%)

Estos valores fueron significativamente menores (Grupos J-K) que los sistemas agroforestales y bosques, reflejando el impacto negativo de:

1. Remoción continua de biomasa

2. Exposición del suelo a procesos erosivos
3. Mineralización acelerada de la MO

Un hallazgo relevante fue la diferencia significativa entre el bosque de zona media (27.32%, Grupo A) y el bosque de zona baja (4.73%, Grupo J), lo que sugiere fuertes gradientes altitudinales en los procesos de acumulación de MO, posiblemente relacionados con:

- Diferencias en temperatura y precipitación
- Variación en la composición florística
- Historia de uso del suelo

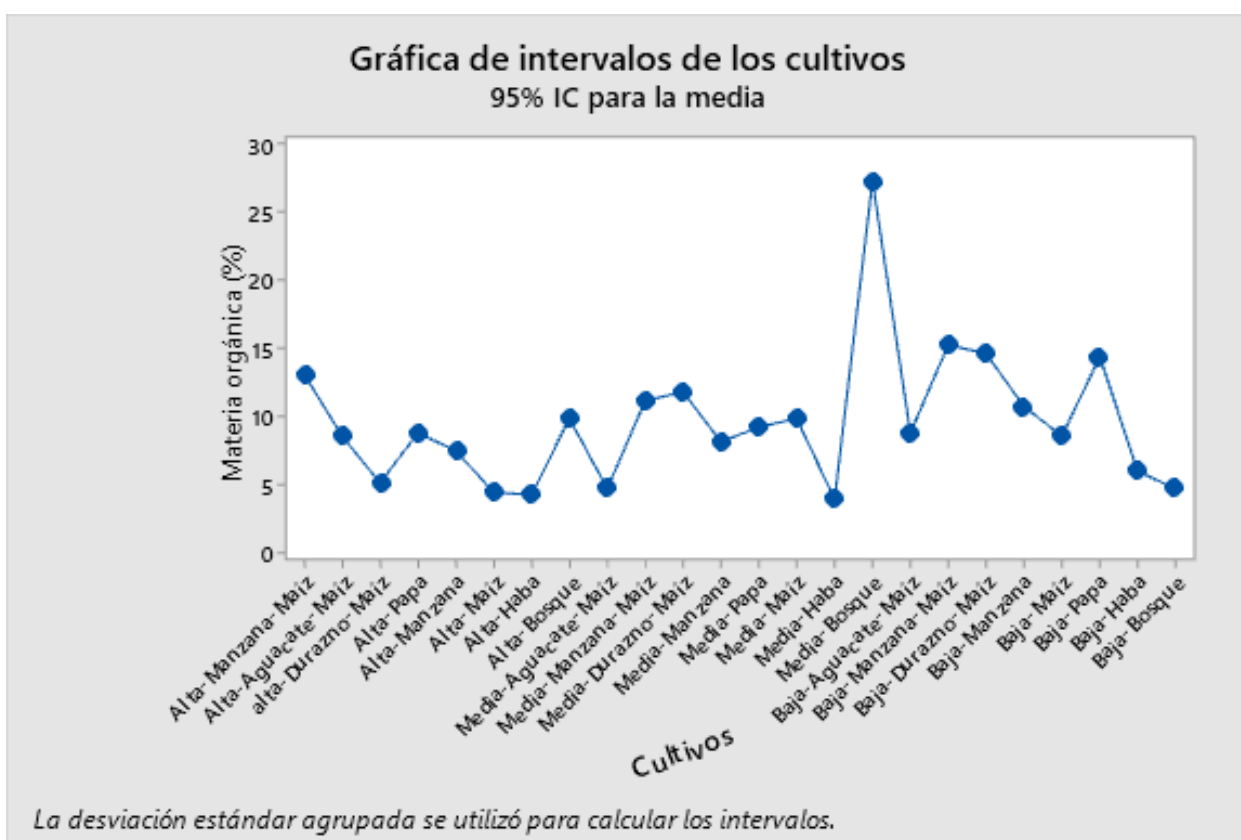


Figura 22. Intervalos de confianza (95%) del contenido de materia orgánica en sistemas de uso del suelo agrupados por el método de Tukey.

Estos resultados proporcionan evidencia cuantitativa para guiar políticas de uso del suelo que prioricen la conservación de la MO como indicador clave de salud edáfica en ecosistemas

montañosos. Futuras investigaciones deberían evaluar los mecanismos específicos que explican las diferencias altitudinales observadas, particularmente en los sistemas boscosos.

14. Análisis integral mediante el marco DPSIR para la gestión sostenible de la microcuenca Hueyateno

La microcuenca del río Hueyateno, ubicada en la región hidrológica Tuxpan-Nautla, representa un socioecosistema complejo donde interactúan dinámicas naturales y antrópicas. Este capítulo aplica el marco conceptual DPSIR (Fuerzas Motrices, Presiones, Estado, Impactos, Respuestas) para organizar la información diagnóstica obtenida, con el objetivo de analizar las causas subyacentes de la degradación ambiental, evaluar su estado actual y proponer lineamientos para una gestión orientada a la sostenibilidad y la justicia ambiental. El análisis incorpora de manera explícita las dimensiones espacial y social, lo que revela las discrepancias críticas entre los orígenes de las presiones y la localización de las respuestas de gestión (Fig. 23).

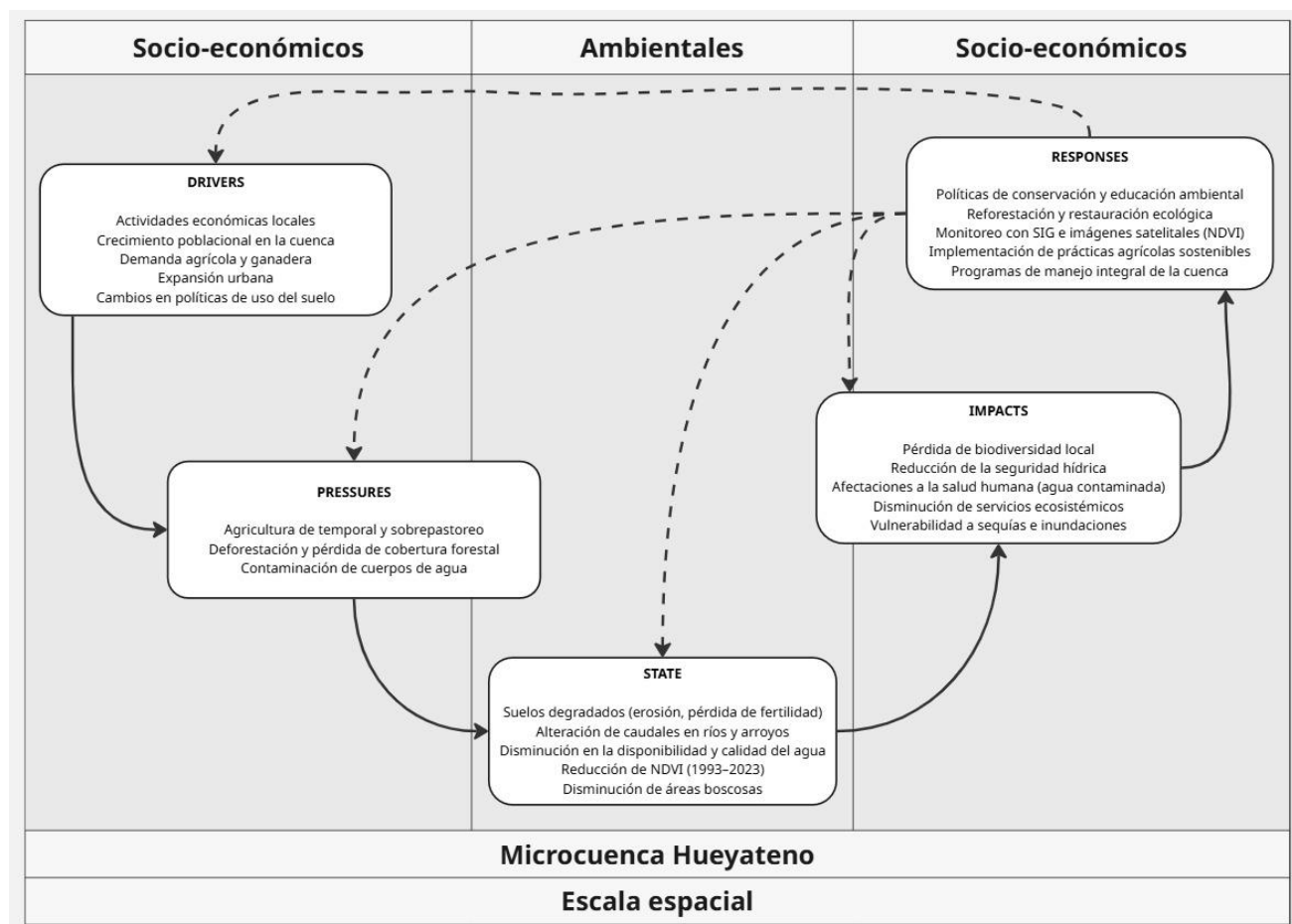


Figura 23. Modelo conceptual DPSIR aplicado a la microcuenca del río Hueyateno.

14.1 Fuerzas motrices (Drivers)

Las fuerzas motrices que impulsan los cambios en la microcuenca son predominantemente socioeconómicas y demográficas. La expansión urbana desplanificada, sustentada por una población de 57,887 habitantes y una alta densidad (327.9 hab/km²), ejerce una presión constante sobre el territorio. Esta fuerza se materializa en un incremento neto de 1,601.67 hectáreas en superficie urbana entre 1993 y 2023.

La actividad agrícola, pilar de la economía local basada en monocultivos de maíz, haba y papa, se intensificó y expandió en 935.15 hectáreas a expensas de la cobertura forestal. Estas fuerzas operan en un contexto de vulnerabilidad socioeconómica caracterizado por un alto grado de marginación y un índice de desarrollo humano medio (0.65), lo que condiciona las prácticas productivas y limita las alternativas de desarrollo sostenible para la población local.

14.2 Presiones (Pressures)

Las fuerzas motrices generan presiones ambientales concretas y espacialmente explícitas. La contaminación difusa por nutrientes y materia orgánica, derivada de la escorrentía agrícola, queda estadísticamente confirmada por las fuertes correlaciones positivas entre DBO₅ y fosfatos ($\rho = 0.961$), lo que indica una fuente de contaminación sincronizada de origen antrópico. Las descargas de aguas residuales domésticas se asocian al crecimiento de los núcleos urbanos dentro de la cuenca.

El cambio de uso de suelo y la deforestación, con una pérdida neta de 2,519 hectáreas de bosque principalmente en las zonas norte y central, constituyen una presión crítica que altera el régimen hidrológico, incrementa la erosión y reduce la resiliencia del ecosistema. El análisis cartográfico evidencia que estas presiones se originan de manera particularmente intensa en las zonas de reciente expansión agrícola y urbana identificadas en el sur y centro de la microcuenca.

14.3 Estado (State)

El estado ambiental de la microcuenca refleja el efecto acumulado de las presiones. La calidad del agua presentó un gradiente espacial de degradación: la parte alta muestra calidad variable, la parte media resulta aceptable y la parte baja registra calidad mala, lo que indica la acumulación y el efecto acumulativo de las cargas contaminantes aguas arriba. Este diagnóstico queda corroborado por el Índice Biótico BMWP, que muestra una respuesta significativamente negativa a los incrementos de DBO₅, nitrógeno amoniacal y fosfatos.

El valor del NDVI reveló una degradación severa, con valores que caen hasta -0.65 en 2023 desde un rango de 0.67 a 0.02 en 1993, lo que confirma la transición de una cobertura vegetal continua y saludable a la presencia de suelos desnudos y superficies artificiales. El análisis edáfico demostró que los suelos bajo monocultivo presentan baja fertilidad en toda la cuenca, mientras que los manejados bajo sistemas MIAF (Milpa Intercalada con Árboles Frutales) muestran condiciones más favorables, lo que destaca que la presión no depende solo del uso agrícola, sino del tipo de manejo.

14.4 Impactos (Impacts)

Los cambios en el estado generan impactos tanto ecológicos como sociales. Los impactos ecológicos incluyen la pérdida de biodiversidad acuática (reflejada en el BMWP), la degradación de la integridad del ecosistema terrestre (pérdida de bosque y salud de la vegetación) y el riesgo de eutrofización. Los impactos sociales recaen con mayor severidad sobre las comunidades locales, que enfrentan una doble vulnerabilidad: por un lado, su contexto socioeconómico las impulsa a actividades que degradan el ambiente; por otro, son las más perjudicadas por el deterioro de los recursos naturales (agua y suelo) del cual dependen directamente para su salud, seguridad alimentaria y sustento económico. La baja productividad de los monocultivos impacta negativamente su economía.

14.5 Respuestas (Responses) y análisis de gobernanza

El análisis de las respuestas institucionales revela una significativa desconexión espacial y de gobernanza. El programa “Sembrando Vida” (Gobierno Federal) representa una respuesta acertada al dirigirse a una fuerza motriz (el manejo agrícola insostenible) mediante la capacitación para mejores prácticas, y resulta la medida más alineada con un enfoque de

sostenibilidad. El Plan de Reforestación Municipal, diseñado como respuesta al impacto (deforestación), ejemplifica, por su aplicación poco efectiva, la descoordinación y la falta de capacidad de gestión a escala local, precisamente donde se originan las presiones. Esta brecha evidencia una estructura de gobernanza deficiente, donde existe una jerarquización de actores que margina al nivel municipal y una desconexión espacial donde se implementan las respuestas y donde se generan las presiones. Una autoridad de cuenca que coordine de manera efectiva a los cinco municipios involucrados no existe.

14.6 Evaluación del marco DPSIR y perspectivas

En la microcuenca Hueyateno, el análisis mediante el marco DPSIR permitió identificar que las principales fuerzas motrices corresponden a las actividades económicas predominantes en la región, particularmente la agricultura y la ganadería, además de la creciente demanda agropecuaria y la expansión urbana. Estas fuerzas han detonado presiones como la agricultura de temporal con prácticas poco sostenibles, la deforestación de áreas boscosas y la contaminación del río Hueyateno, derivada principalmente del uso de agroquímicos y descargas domésticas. Como consecuencia, se manifiestan impactos en la calidad del agua y en la integridad de los ecosistemas acuáticos, concentrándose en la parte baja de la cuenca, donde se acumulan contaminantes y sedimentos.

Este patrón de desconexión espacial entre el origen de las presiones (zonas de agricultura y expansión urbana en partes medias y altas) y la manifestación de los impactos (acumulación de contaminantes en la parte baja) coincide con lo reportado en otras cuencas de Latinoamérica y Asia. Por ejemplo, en la cuenca Katari, Bolivia, se identificó que los impactos se concentran en comunidades vulnerables aguas abajo, mientras que las respuestas institucionales no logran abordar de forma focalizada las zonas de origen de las presiones (Agramont et al., 2021). Una situación similar se documentó en la cuenca del río Talgua, Honduras, donde la deforestación y las actividades agrícolas han generado deterioro de la calidad del agua, afectando a poblaciones ribereñas que dependen directamente del recurso (Saravia-Maldonado et al., 2024). En ambos casos, al igual que en Hueyateno, los impactos se intensifican por la vulnerabilidad social, pues las comunidades más expuestas suelen carecer de capacidades adaptativas y alternativas económicas.

La comparación con otros estudios también evidencia que la gobernanza insuficiente es un factor recurrente. En la microcuenca Hueyateno, aunque las respuestas federales son más robustas, carecen de una focalización espacial efectiva; mientras que los municipios, muestran limitaciones de capacidad institucional y, en muchos casos, de voluntad política. Esta situación refleja lo observado en la cuenca hidrográfica de Lengan (Indonesia), donde se señaló que los gobiernos locales carecen de mecanismos eficaces para atender el cambio de cobertura y la degradación del suelo (Rahmawaty et al., 2022). Asimismo, en la cuenca hidrográfica de Gorganroud (Irán), se detectó que las respuestas no lograron frenar la erosión y la pérdida de recursos hídricos, a pesar de que las presiones eran conocidas desde décadas anteriores (Mosaffaie et al., 2021).

El caso de la microcuenca Hueyateno no es aislado, sino que forma parte de un patrón común en la gestión de cuencas, donde las presiones ligadas a actividades económicas locales generan impactos desproporcionados en zonas bajas, y donde los marcos de gobernanza muestran limitaciones para responder de manera eficaz. Esto refuerza la utilidad del marco DPSIR como herramienta analítica, ya que no solo permite identificar los vínculos causales entre fuerzas motrices, presiones e impactos, sino que también evidencia las brechas institucionales y espaciales de las respuestas actuales.

Por lo tanto, se recomienda:

- Focalizar las respuestas espacialmente: Dirigir acciones de conservación, reforestación y agricultura sostenible a las áreas críticas de expansión identificadas en los mapas.
- Fortalecer la gobernanza local: Capacitar y dotar de recursos a los gobiernos municipales para que ejecuten sus planes de manejo y regulen el uso del suelo.
- Priorizar la justicia ambiental: Diseñar políticas que alivien la presión sobre los recursos naturales al tiempo que mejoran las condiciones socioeconómicas de las comunidades más vulnerables, particularmente aquellas asentadas en la parte baja de la cuenca, que soportan la carga de la contaminación generada aguas arriba.

14.7 Diagnóstico integral mediante triangulación metodológica

El empleo de la triangulación metodológica permitió integrar resultados dispersos en un diagnóstico coherente y de alta confiabilidad, al superar las limitaciones inherentes a un enfoque unidimensional. La convergencia de evidencias establece de manera robusta que el estado socioambiental de la microcuenca Hueyateno resulta de la interacción compleja entre fuerzas motrices de origen antrópico, las cuales generan presiones espacialmente explícitas que se traducen en impactos tanto ecológicos como sociales.

La triangulación metodológica demostró ser una herramienta óptima para desentrañar la complejidad del socioecosistema de la microcuenca Hueyateno. Este enfoque, al evitar la dependencia de una sola métrica o método, construye un diagnóstico sólido, creíble y multidimensional que sirve como base fundamental para proponer estrategias de gestión efectivas y contextualmente apropiadas.

XI. CONCLUSIONES

- Los datos obtenidos en el río Hueyateno revelan un deterioro progresivo y espacialmente definido de la calidad del agua a lo largo de la microcuenca Hueyateno. Este deterioro se manifiesta en un gradiente descendente de oxígeno disuelto (desde 7.9 mg/L en la zona alta hasta 2.1 mg/L en la zona baja) y valores críticos de DBO₅ (hasta 78 mg/L), junto con correlaciones negativas altamente significativas entre el índice BMWP y contaminantes como nitrógeno amoniacal ($\rho = -0.556$) y fosfatos ($\rho = -0.442$). Estos resultados demuestran un impacto negativo directo sobre la biodiversidad acuática, particularmente en las comunidades de macroinvertebrados, esenciales para la salud ecológica del río. La implementación urgente de medidas de manejo y conservación resulta imprescindible para mitigar estos impactos y restaurar la calidad del agua en la región.
- Los valores del NDVI en la microcuenca Hueyateno muestran una degradación severa de la cobertura vegetal entre 1993 y 2023, con una reducción drástica que alcanza valores de hasta -0.65 en zonas previamente saludables (rango inicial de 0.67 a 0.02). Esta pérdida refleja la influencia dominante de factores antrópicos, como la expansión agrícola y urbana, sobre procesos naturales. Los resultados evidencian la transición de un paisaje con cobertura vegetal continua a uno fragmentado y con suelos expuestos, lo que compromete la resiliencia ecosistémica. La adopción de estrategias de manejo sostenible del territorio se revela esencial para frenar esta tendencia y promover la recuperación vegetal en la microcuenca.
- La comparación cartográfica de los mapas de uso del suelo de 1993 y 2023 revela cambios significativos en la microcuenca Hueyateno, caracterizados por una pérdida neta de 2,519 hectáreas de cobertura boscosa, reemplazada principalmente por expansión agrícola (935.15 hectáreas) y urbana (1,601.67 hectáreas). Estos cambios destacan una transformación sustancial del paisaje impulsada por actividades humanas, con impactos concentrados en las zonas norte, central y sur. La implementación de políticas de gestión sostenible del territorio resulta crucial para equilibrar el desarrollo socioeconómico con la conservación ambiental y prevenir mayor fragmentación ecosistémica.

- El análisis edáfico demuestra que los suelos bajo monocultivo de temporal presentan baja fertilidad general en la microcuenca, con valores particularmente bajos de calcio, mientras que el potasio y el magnesio se mantienen en rangos aceptables. Los suelos manejados bajo sistemas MIAF (Milpa Intercalada con Árboles Frutales) exhiben condiciones notablemente más favorables, lo que evidencia que el tipo de manejo agrícola influye decisivamente en la salud del suelo más allá del uso en sí. Estos hallazgos subrayan la necesidad de promover prácticas agroecológicas para mantener la productividad y prevenir la degradación edáfica en la región.
- El enfoque DPSIR, integrado con la teoría de sistemas complejos, proporciona una visión holística y dinámica de la microcuenca Hueyateno como socioecosistema. Este marco permite identificar con precisión las fuerzas motrices antrópicas, las presiones espaciales y los impactos ecológicos y sociales interconectados, al tiempo que revela brechas críticas en la gobernanza actual. Su aplicación fomenta la priorización de respuestas integrales y contextualmente apropiadas, orientadas a un desarrollo sostenible que armonice las necesidades humanas con la conservación de los recursos naturales.

XII. LITERATURA CITADA

- Abdu, A., Laekemariam, F., Gidago, G., & Getaneh, L. (2023). Explaining the Soil Quality Using Different Assessment Techniques. *Applied and Environmental Soil Science*, 2023, 1–15. <https://doi.org/10.1155/2023/6699154>
- Agramont, A., van Cauwenbergh, N., van Griesven, A., & Craps, M. (2021). Integrating spatial and social characteristics in the DPSIR framework for the sustainable management of river basins: Case study of the Katari River Basin, Bolivia. *Water International*, 47(1), 8–29. <https://doi.org/10.1080/02508060.2021.1997021>
- Albrecht, G. A., Higinbotham, N., Connor, L., & Ellis, N. (2017). Social and Cultural Perspectives on Ecology and Health. *International Encyclopedia of Public Health*, 551–556. doi:10.1016/b978-0-12-803678-5.00414-8.
- Alfaro, C.W. (2005). Conceptos básicos para el análisis social, económico, ambiental e institucional de la desertificación. Morales, C. y Prada, S. (2005). Pobreza, desertificación y degradación de

- los recursos naturales. *Comisión Económica para América Latina y el Caribe. CEPAL*. Santiago de Chile, Chile.
- Allan, J. D. & Castillo, M. M. (2007). *Stream Ecology: Structure and Function of Running Waters*, 2nd ed. Chapman and Hall, New York.
- Allesina, S., & Bodini, A. (2008). Ascendency. *Encyclopedia of Ecology*, 254–263. doi:10.1016/b978-008045405-4.00086-0.
- Arenas-Navarro, M., & García-Oliva, F. (2024). Bosques de Michoacán: Guardianes del carbono contra el cambio climático. *Revista Digital Universitaria*, 25(1). <https://doi.org/10.22201/cuaieed.16076079e.2024.25.1.5>
- Arnold, M. y Osorio, F. (1998). Introducción a los conceptos básicos de la teoría general de sistemas. *Cinta moebio* 3, 40-49.
- Asio, V. B., Jahn, R., Perez, F. O., Navarrete, I. A., & Abit, S. M., Jr. (2009). A review of soil degradation in the Philippines. *Annals of Tropical Research*, 31(2), 69–94. <https://doi.org/10.32945/atr3124.2009>
- Barbour, M. T., Gerritsen, J., Zinder, D., & Stribling, J. B. (1999). *Revision to rapid bioassessment protocols for use in streams and rivers: Periphyton, benthic macroinvertebrates, and fish* (2nd ed., EPA 841/D-97-002). Washington, DC: United States Environmental Protection Agency, Office of Water.
- Bella, C. D., Posse, G., Beget, M., Fischer, M., Mari, N., & Veron, S. (2008). La teledetección como herramienta para la prevención, seguimiento y evaluación de incendios e inundaciones. *Ecosistemas*, 17(3), 39-52.
- Bennett, M. G., Schofield, K. A., Lee, S. S., & Norton, S. B. (2017). Response of chlorophyll a to total nitrogen and total phosphorus concentrations in lotic ecosystems: a systematic review protocol. *Environmental Evidence*, 6(1). doi:10.1186/s13750-017-0097-8
- Berkes, F., Folke, C., & Colding, J. (Eds.). (1998). *Linking social and ecological systems: Management practices and social mechanisms for building resilience*. Cambridge, United Kingdom: Cambridge University Press.
- Bickham, J. (2000). Effects of chemical contaminants on genetic diversity in natural populations: implications for biomonitoring and ecotoxicology. *Mutation Research/Reviews in Mutation Research*, 463(1), 33–51. Doi: 10.1016/s1383-5742(00)00004-1
- Burkhard, B., Müller, F., & Lill, A. (2008). Ecosystem Health Indicators. *Encyclopedia of Ecology*, 1132–1138. doi:10.1016/b978-008045405-4.00312-8.
- Burkhard, B., Müller, F., & Lill, A. (2008). Ecosystem Health Indicators. *Encyclopedia of Ecology*, 1132–1138. doi:10.1016/b978-008045405-4.00312-8.

- Buytaert, W., Célleri, R., De Bièvre, B., Cisneros, F., Wyseure, G., Deckers, J., & Hofstede, R. (2006). Human impact on the hydrology of the Andean páramos. *Earth-Science Reviews*, 79(1–2), 53–72. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2006.06.002>
- Can-Chulim, Á., Ortega-Escobar, H. M., Sánchez-Bernal, E. I., & Cruz-Crespo, E. (2014). Calidad del agua para riego en la Sierra Norte de Puebla, México. 20.
- Carrión, D. A. D., Huaraca, S. A. S., Llerena, M. V. R., Rivera, A. C. R., & Catagna, F. E. C. (2016). Morphometric analysis of micro watersheds in achupallas parish, Sangay nationalpark, Ecuador using gis techniques. *Perfiles*, 1(15).
- Comisión Nacional del Agua (CONAGUA). (2016). Servicio Meteorológico Nacional. Visto en: http://smn1.conagua.gob.mx/index.php?option=com_content&view=article&id=178:puebla&catid=14:normales-por-estacion
- Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO). (1998). 'Curvas de nivel para la República Mexicana'. Escala 1:250000. Extraído del Modelo Digital del Terreno. Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEG). México.
- Consejo Nacional de Población (CONAPO). (2015). Índices de marginación 2015. Disponible en: <https://www.gob.mx/conapo/documentos/indice-de-marginacion-2015-284579>
- Cotler, H. (2007). El manejo integral de cuencas en México. Estudios y reflexiones para orientar la política ambiental. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. Instituto Nacional de Ecología. México.
- Cruz-Romero, B., Gaspari, F.J., Rodríguez-Vagaría, A.M., Carrillo-González, F.M. y Téllez-López, J. (2015). Análisis morfométrico de la cuenca hidrográfica del río Cuale, Jalisco, México. *Investigación y Ciencia*, 23 (64), 26-34.
- Cruz-Romero, B., Gaspari, F.J., Rodríguez-Vagaría, A.M., Carrillo-González, F.M. y Téllez-López, J. (2015). Análisis morfométrico de la cuenca hidrográfica del río Cuale, Jalisco, México. *Investigación y Ciencia*, 23 (64), 26-34.
- Dominguez Cortazar, M. A. (2003). Introducción al ordenamiento de cuencas. Apuntes del módulo 1. Maestría en Gestión Integrada de Cuencas. Universidad Autónoma de Querétaro.
- Doran, J. W., & Parkin, T. B. (1994). Defining and assessing soil quality. In J. W. Doran, D. C. Coleman, & D. F. Bezdicek (Eds.), *Soil Science Society of America Book Series: Vol. 35. Defining soil quality for a sustainable environment* (pp. 3–21). Madison, WI: John Wiley & Sons.
- Escobar, J., Betancur, T., Palacio, C. A., & Darío Muriel, R. (2008). Los retos de la enseñanza de los sistemas de información geográfica integrados a la gestión del medio ambiente y los recursos naturales. *Gestión y Ambiente*, 11(3), 125-136.

- Estrada-Herrera, I.R. & Hidalgo-Moreno, C. & Guzmán-Plazola, R. & Suárez, J.J. & Navarro-Garza, Hermilio & Etchevers, J. (2017). Soil quality indicators to evaluate soil fertility. *Agrociencia*, 51, 813-831.
- Fatoki, S. O., Muyima, N. Y. O., and Lujiza, N. (2001). Situation analysis of water quality in the Umtata river catchment. *Water S.A.*, 27: 467-474.
- Galicia, L., Gamboa Cáceres, A. M., Cram, S., Chávez Vergara, B., Peña Ramírez, V., Saynes, V., & Siebe, C. (2016). Almacén y dinámica del carbono orgánico del suelo en bosques templados de México. *Terra Latinoamericana*, 34(1), 1–29. http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0187-57792016000100001&lng=es&tlng=
- Gallopín, G. (1997). Indicators and their use: Information for decision-making. Part one— Introduction. In B. Moldan & S. Bilharz (Eds.), *Sustainability indicators: A report on the project on indicators of sustainable development* (pp. 13–27). Chichester, England: Wiley, SCOPE 58.
- García, E. – Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO), (1998). "Climas (Clasificación de Koppen, modificado por García)". Escala 1:1 000 000. México.
- García, E. & Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO), (1998). 'Climas' (clasificación de Koppen, modificado por García). Escala 1:1000000. México.
- García, M., & López, M. (2015). Land use and land cover change in the Ebro Basin: Analyzing the impact on NDVI. *Journal of Environmental Management*, 150, 211-220.
- García, R. (1994). Interdisciplinariedad y sistemas complejos. Leff, E. *Ciencias Sociales y Formación Ambiental*. Ed. Gedisa, UNAM. (1994), Barcelona, España. Recuperado de: <http://www.ambiente.gov.ar/infoteca/aea/descargas/garcia01.pdf>
- García, R. (1994). Interdisciplinariedad y sistemas complejos. Leff, E. *Ciencias Sociales y Formación Ambiental*. Ed. Gedisa, UNAM. (1994), Barcelona, España. Recuperado de: <http://www.ambiente.gov.ar/infoteca/aea/descargas/garcia01.pdf>
- García, R. (2006). Sistemas complejos. Conceptos, método y fundamentación epistemológica de la investigación interdisciplinaria. Ed. Gedisa. Barcelona, España.
- Giri, I., K.C. R., & Khadka, U. R. (2022). Chapter 23—Water quality status in Bagmati river of Kathmandu valley, Nepal. En S. Madhav, S. Kanhaiya, A. Srivastav, V. Singh, & P. Singh (Eds.), *Ecological Significance of River Ecosystems* (pp. 481–502). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-85045-2.00017-0>

- Haggar, J., Ayala, A., & Díaz, B. (2001). Participatory design of agroforestry systems: Developing farmer participatory research methods in Mexico. *Development in Practice*, 11(4), 417–424. <https://doi.org/10.1080/09614520120066701>
- Instituto Nacional de Estadística y Geográfica (INEGI). (2010). Censo de Población y Vivienda 2010. Tabulados del cuestionario básico.
- Instituto Nacional de Estadística y Geográfica (INEGI). (2016). Carta catastral del Estado de Puebla 2016.
- Instituto Nacional de Estadística y Geográfica (INEGI). (2020). Censo de Población y Vivienda 2020. Tabulados del cuestionario básico.
- Instituto Nacional de Estadística y Geográfica (INEGI). (2021). 'Conjunto de Datos Vectoriales de Uso de Suelo y Vegetación. Escala 1:250 000, Serie VII. Conjunto Nacional.', escala: 1:250 000. edición: 1. Instituto Nacional de Estadística y Geografía. Aguascalientes, México.
- Instituto Nacional de investigaciones Forestales y Agropecuarias (INIFAP) - Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO), (1995). “Mapa edafológico”. Escalas 1:250 000 y 1:1 000 000. México.
- Instituto Nacional de investigaciones Forestales y Agropecuarias (INIFAP) & Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO), (1995). 'Edafología'. Escalas 1:250000 y 1:1000000. México.
- Kareem Jebur, A. (2021). Uses and Applications of Geographic Information Systems. *Saudi Journal of Civil Engineering*, 5(2), 18–25. <https://doi.org/10.36348/sjce.2021.v05i02.001>
- Kattan, GH. (2001). Extinción de especies y fragmentación del hábitat en el Neotrópico. In: Primack R., Rozzi R., Feinsinger P., Dirzo R. Y Massardo F. *Fundamentos de Conservación Biológica. Perspectivas latinoamericanas*. Cap. 6, pp. 205–211.
- Kruse, M. (2018). Ecosystem Health Indicators. Reference Module in Earth Systems and Environmental Sciences. doi:10.1016/b978-0-12-409548-9.11200-x.
- Lambin, E. F., Geist, H. J., & Lepers, E. (2003). Dynamics of land-use and land-cover change in tropical regions. *Annual Review of Environment and Resources*, 28, 205–241. <https://doi.org/10.1146/annurev.energy.28.050302.105459>
- Leaño S., Juan J., & Pérez Barriga, D. (2020). Determinación de la Calidad del Agua mediante el índice BMWP/BOL (bioindicadores ecológicos) del Rio Trancas, Municipio de Entre Ríos - Tarija. *Acta Nova*, 9(4), 567-591. Recuperado en 18 de mayo de 2022, de http://www.scielo.org.bo/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1683-07892020000100007&lng=es&tlng=es.

- Luo, L., Zhang, Y., & Xu, G. (2020). How does nitrogen shape plant architecture? *Journal of Experimental Botany*, 71(15), 4415–4427. <https://doi.org/10.1093/jxb/eraa187>
- Marín Ortega, V. (2018). Macroinvertebrados acuáticos como indicadores de la calidad del agua del río Amanalco. Universidad Autónoma del Estado de México. Centro interamericano de recursos del agua (CIRA).
- Marisa, M.H., Adrián, F.R., Jannice, A.V., Sebastián, G.-H. M., & Diego, D.-V. (2024). Water quality management in a tropical karstic system influenced by land use in Chiapas, Mexico. *Environmental Challenges*, 16, 100981. <https://doi.org/10.1016/j.envc.2024.100981>
- Martínez-Duarte, J.A. (2006). Enfoque sistémico en la investigación de cuencas hidrográfica. *Universidad Nacional de Misiones*, pp.1-12.
- Medina-Tafur, C., M. Hora-Revilla, I. Asencio-Guzmán, W. Pereda-Ruíz y R. Gabriel-Aguilar. (2010). “El índice Biological Monitoring Working Party (BMWP), modificado y adaptado a tres microcuencas del Alto Chicama. La Libertad. Perú. 2008”. *SCIENDO*, Vol. 13. 1-15.
- Mesa, L. M. (2010). Hydraulic parameters and longitudinal distribution of macroinvertebrates in a subtropical andean basin. 35, 6.
- Monreal, C. M., J. D. Etchevers, M. Acosta, C. Hidalgo, J. Padilla, R. M. López, L. Jiménez, and A. Velázquez. (2005). A method for measuring above– and below–ground C stocks in hillside landscapes. *Can. J. Soil Sci.* 85: 523–530.
- Morin, E. (2009). *Introducción al pensamiento complejo*. Ed. Gedisa. España.
- Mosaffaie, J., Salehpour Jam, A., Tabatabaei, M. R., & Kousari, M. R. (2021). Trend assessment of the watershed health based on DPSIR framework. *Land Use Policy*, 100, 104911. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2020.104911>
- Mugagga, F., Kakembo, V., & Buyinza, M. (2012). Land use changes on the slopes of Mount Elgon and the implications for the occurrence of landslides. *Catena*, 90, 39–46. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2011.11.004>
- Muralikrishna, I. V., & Manickam, V. (2017). Introduction. *Environmental Management*, 1–4. [doi:10.1016/b978-0-12-811989-1.00001-4](https://doi.org/10.1016/b978-0-12-811989-1.00001-4).
- Niemeijer, D., & de Groot, R. S. (2008). A conceptual framework for selecting environmental indicator sets. *Ecological Indicators*, 8(1), 14–25. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2006.11.012>
- Ostrom, E. (2009). A general framework for analyzing sustainability of social-ecological systems. *Science*, 325(5939), 419–422. <https://doi.org/10.1126/science.1172133>
- Pathak, K., Jha, M., Tignath, S., & Sharma, S. K. (2019). Hypsometric Analysis of the Berne River Watershed using Geographical Information System. 4(9), 6.

- Patrício, J., Elliott, M., Mazik, K., Papadopoulou, K.-N., & Smith, C. J. (2016). DPSIR—Two Decades of Trying to Develop a Unifying Framework for Marine Environmental Management? *Frontiers in Marine Science*, 3. doi:10.3389/fmars.2016.00177
- Perez, J. (1979). *Fundamentos del ciclo hidrológico*. Universidad Central de Venezuela. Facultad de Ingeniería Departamento de Meteorología e Hidrología. Caracas, Venezuela. PP 38.
- Pettorelli, N., Vik, J. O., Mysterud, A., Gaillard, J.-M., Tucker, C. J., & Stenseth, N. C. (2005). Using the satellite-derived NDVI to assess ecological responses to environmental change. *Trends in Ecology & Evolution*, 20(9), 503–510. <https://doi.org/10.1016/j.tree.2005.05.011>
- Pineda-Pineda, J. J., Rosas, J. L., Sigarreta, J., Hernández-Gómez, J. & Umaña, M. (2018). Biotic indices to evaluate water quality: BMWP.
- Poulenard, J., Podwojewski, P., & Herbillon, A. (2003). Characteristics of non-allophanic Andisols with hydric properties from the Ecuadorian Paramos. *Geoderma*, 117(3–4), 267–281. [https://doi.org/10.1016/S0016-7061\(03\)00128-9](https://doi.org/10.1016/S0016-7061(03)00128-9)
- Rahmawaty, R., Rauf, A., Harahap, M. M., & Kurniawan, H. (2022). Land cover change impact analysis: An integration of remote sensing, GIS and DPSIR framework to deal with degraded land in Lengan Watershed, North Sumatra, Indonesia. *Biodiversitas: Journal of Biological Diversity*, 23(6). <https://doi.org/10.13057/biodiv/d230627>
- Ramakrishna, B. (1997). Estrategias de extensión para el manejo integrado de cuencas hidrográficas: conceptos y experiencias. *Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura. IICA*. San José, Costa Rica. Archivo obtenido el 27/11/15 en: <http://orton.catie.ac.cr/repdoc/A9786e/A9786e.pdf>
- Rayo, I., José, J., & Suárez, A. (2017). Indicadores de calidad de suelo para evaluar su fertilidad.
- Rushemuka, N. P., Bizozza, R. A., Mowo, J. G., & Bock, L. (2014). Farmers' soil knowledge for effective participatory integrated watershed management in Rwanda: Toward soil-specific fertility management and farmers' judgmental fertilizer use. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 183, 145–159. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2013.10.020>
- Saalidong BM, Aram SA, Otu S, Lartey PO (2022) Examining the dynamics of the relationship between water pH and other water quality parameters in ground and surface water systems. *PLOS ONE* 17(1): e0262117. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0262117>
- Sanchez-Velez, A. S., Garcia-Nuñez, R. M., & Palma Trujano, A. (2003). *La cuenca hidrográfica: Unidad básica de planeación y manejo de recursos naturales* (1. ed). Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales.
- Saravia-Maldonado, S. A., Fernández-Pozo, L. F., Ramírez-Rosario, B., & Rodríguez-González, M. Á. (2024). Analysis of deforestation and water quality in the Talgua River Watershed (Honduras):

- Ecosystem approach based on the DPSIR model. *Sustainability*, 16(12), 5034. <https://doi.org/10.3390/su16125034>
- Schlegel B. (2001). Estimaciones de biomasa y carbono en bosques del tipo forestal siempreverde. In *Simposio Internacional Medición y Monitoreo de la Captura de Carbono en Ecosistemas Forestales*. Valdivia, Chile. 18 al 20 de octubre del 2001. 13 p.
- Shetty, S. S., D. D., S. H., Sonkusare, S., Naik, P. B., N, S. K., & Madhyastha, H. (2023). Environmental pollutants and their effects on human health. *Heliyon*, 9(9), e19496. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e19496>
- Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP). (2020). Secretaría de agricultura y desarrollo rural. Datos agrícolas municipal 2020.
- Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP). (2020). Secretaría de agricultura y desarrollo rural. Datos pecuarios municipal 2020.
- Smeets, E. & Weterings, R. (1999). *Environmental Indicators: Typology and Overview*; European Environment Agency: Copenhagen, Denmark, 1999.
- Song, X., & Frostell, B. (2012). The DPSIR Framework and a Pressure-Oriented Water Quality Monitoring Approach to Ecological River Restoration. *Water*, 4(3), 670–682. doi:10.3390/w4030670
- Strahler, A. (1964) Quantitative Geomorphology of Drainage Basins and Channel Networks. In: Chow, V., Ed., *Handbook of Applied Hydrology*, McGraw Hill, New York, 439-476.
- Takahashi, T., & Shoji, S. (2001). Distribution and classification of volcanic ash soil. *Global Environmental Research*, 6(2), 83–97.
- Turner, B. L., II, Kasperson, R. E., Meyer, W. B., Dow, K. M., Golding, D., Kasperson, J. X., Mitchell, R. C., & Ratick, S. J. (1990). Two types of global environmental change. *Global Environmental Change*, 1(1), 15–22. [https://doi.org/10.1016/0959-3780\(90\)90004-S](https://doi.org/10.1016/0959-3780(90)90004-S)
- USGS Earth Explorer. (2021). Imágenes del satélite Landsat 8 año 2021. Consultado en: <https://earthexplorer.usgs.gov/>
- Veneros, J., García, L., Morales, E., Gómez, V., Torres, M., & López-Morales, F. (2020). Aplicación de sensores remotos para el análisis de cobertura vegetal y cuerpos de agua. *Idesia (Arica)*, 38(4), 99–107. <https://doi.org/10.4067/S0718-34292020000400099>
- Yang, J., Li, J., Vliet, M. T. H. van, Jones, E. R., Huang, Z., Liu, M., & Bi, J. (2024). Economic risks hidden in local water pollution and global markets: A retrospective analysis (1995–2010) and future perspectives on sustainable development goal 6. *Water Research*, 252, 121216. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2024.121216>

