



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**  
PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN GEOGRAFÍA  
GEOGRAFÍA AMBIENTAL

**Calidad Ambiental de Sistemas Ribereños del Parque Nacional Iztaccíhuatl-Popocatepetl y su zona de influencia**

**TESIS**  
QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:  
MAESTRO EN GEOGRAFÍA

PRESENTA:  
**INYASID SANTIAGO AGUILAR**

DR. GERARDO CRUZ FLORES  
FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES ZARAGOZA

SINODALES:  
DR. LORENZO VÁZQUEZ SELEM  
INSTITUTO DE GEOGRAFÍA  
DR. ARTURO GARCÍA ROMERO  
INSTITUTO DE GEOGRAFÍA  
DRA. ELOISA A. GUERRA HERNÁNDEZ  
FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES ZARAGOZA  
DR. GILBERTO VELA CORREA  
UAM XOCHIMILCO

CIUDAD UNIVERSITARIA, CD. MX., MAYO 2023



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



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

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

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

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

## Agradecimientos

En primer lugar, quiero agradecer a la Universidad Nacional Autónoma de México, por otorgarme un lugar para realizar mis estudios de licenciatura y de maestría, es un placer y un orgullo pertenecer a la máxima casa de estudios.

La Facultad de Estudios Superiores Zaragoza, por la oportunidad de formarme en la licenciatura en Biología.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT), por la beca otorgada para realizar mis estudios de maestría.

Al Dr. Gerardo Cruz Flores, por ser un gran profesor e investigador, un buen amigo y darse el tiempo para resolver mis dudas.

A la Dra. Eloisa A. Guerra Hernández, por ser una gran profesora, investigadora y por los datos proporcionados para realizar esta investigación.

A los miembros de sinodo:

Al Dr. Lorenzo Vázquez Selem, Dr. Arturo García Romero, Dra. Eloisa A. Guerra Hernández y el Dr. Gilberto Vela Correa, por sus valiosas observaciones y recomendaciones para mejorar este trabajo.

## Dedicatorias

A mi padre Ismael P. Santiago Barrios. Siempre has sido, eres y serás mi inspiración para el estudio, la vida y para superarme a mí mismo. Tus enseñanzas siempre las recordare.

A mi madre Gloria Aguilar Chavarria. Por siempre estar ahí para escucharme, la educación, las enseñanzas y los momentos tristes y alegres, siempre estarán en mi corazón.

A mis hermanos Guilebaldo, Fabiola, Rocio y Tania. Por siempre estar ahí para apoyarme, de incontables formas y en infinidad de situaciones. Sin lugar a dudas este es un logro que compartimos y siempre les estaré agradecido.

# Índice

Agradecimientos .....	I
Dedicatorias.....	II
Índice de cuadros .....	VII
Índice de figuras .....	VIII
Resumen .....	1
Abstract .....	2
Capítulo 1 .....	3
Marco Teórico.....	3
Calidad .....	3
Ambiente.....	3
Calidad ambiental .....	4
Indicadores de calidad ambiental.....	4
Calidad del agua.....	5
Calidad de suelo .....	6
Calidad de la vegetación.....	8
Ecosistemas de montaña.....	8
Ecosistemas de montaña en México.....	10
Ecosistema ribereño .....	12
Áreas Naturales Protegidas (ANP's) .....	13
Parque Nacional Iztaccíhuatl-Popocatepetl.....	15
Estrategias de conservación: Áreas Naturales Protegidas .....	15
Objetos de conservación socioambiental .....	17
Índice NDVI.....	17
Índice QBR .....	17
Caudal ecológico .....	18
Distribución normal .....	19
Normalización de datos.....	20
Estadística no paramétrica.....	20
Pruebas de dos muestras .....	20
Prueba de Kruskal-Wallis.....	21
Capítulo 2 .....	22
Antecedentes.....	22
Planteamiento del problema .....	23
Justificación .....	23

Hipótesis.....	24
Objetivos.....	24
General.....	24
Particulares.....	24
Metodología.....	25
Área de estudio.....	25
Parque Nacional Iztaccíhuatl-Popocatepetl.....	25
Hidrología.....	27
Clima.....	27
Edafología.....	28
Geología.....	28
Geomorfología.....	30
Vegetación.....	31
Fauna.....	32
Delimitación del área y selección de los sitios de estudio.....	33
Muestreo de suelo.....	34
Muestreo de agua.....	34
Bases de datos.....	34
Índices de vegetación.....	35
NDVI.....	35
QBR.....	36
Etapa de Laboratorio.....	36
Análisis de datos.....	37
Capítulo 3.....	38
Resultados.....	38
Sitios de estudio.....	38
Tochimilco Barrio San Juan (2076 m).....	40
Tochimilco Arroyo-Ciénega (2014 m).....	40
Tochimilco El Calvario (2115 m).....	40
Tochimilco Manantial (2120 m).....	40
San Pedro Atlixco (2126 m).....	41
San Baltazar Atlimeyaya Manantial (2198 m).....	41
San Baltazar Atlimeyaya Arroyo (2199 m).....	41
Nealtican (2260 m).....	42
Río Alseseca Calpan (2412 m).....	42
San Nicolás de los Ranchos (2419 m).....	42

Ixoalco 1 (2504 m) .....	43
Ixoalco 2 (2521 m) .....	43
Xalitzintla (2678 m) .....	44
Santiago Xalitzintla (2680 m) .....	44
Río Apol (3150 m) .....	44
Buenavista (3274 m) .....	44
Buenavista 1 (3300 m) .....	45
Buenavista 2 (3300 m) .....	45
Apatlaco Parque Ecoturístico (3571 m) .....	45
Apatlaco 1 (3630 m) .....	46
Apatlaco 2 (3635 m) .....	46
Vallecito (3840 m) .....	46
Apatlaco 3 (3850 m) .....	47
Manantial Volkswagen (3871 m) .....	47
Volkswagen (3883 m) .....	47
Apatlaco 4 (3956 m) .....	48
Cascada Ranita (3961 m) .....	48
Cascada Volkswagen (4010 m) .....	48
Descripción de parámetros de los sistemas ribereños .....	49
Parámetros de agua .....	49
Temperatura del Agua .....	49
Conductividad Eléctrica del Agua .....	50
pH del Agua .....	51
Oxígeno Disuelto .....	51
Alcalinidad .....	52
Amonio, Nitratos y Nitritos .....	52
Fósforo Total y Ortofosfatos .....	54
Demanda Bioquímica de Oxígeno .....	55
Parámetros de suelo .....	56
Densidad Aparente .....	56
pH del Suelo .....	57
Conductividad Eléctrica del Suelo .....	57
Carbono orgánico del suelo .....	58
Nitrógeno total del suelo .....	58
Fósforo Disponible .....	59
Relación C/N .....	60

Manejo Estadístico.....	65
Análisis de correlación canónica .....	66
Índice de calidad de ambientes ribereños (ICAR).....	67
Análisis de resultados .....	77
Parámetros de agua .....	77
Temperatura del agua.....	77
Conductividad Eléctrica del Agua.....	78
pH del Agua .....	79
Oxígeno Disuelto.....	80
Alcalinidad.....	80
Amonio, Nitratos y Nitritos.....	81
Fosforo Total y Ortofosfatos.....	83
Demanda Bioquímica de Oxígeno.....	85
Parámetros de suelo .....	85
Densidad Aparente .....	85
pH del Suelo .....	86
Conductividad Eléctrica del Suelo .....	87
Carbono Orgánico del Suelo .....	87
Nitrógeno Total .....	88
Fosforo Disponible .....	89
Relación C/N.....	89
Parámetros de Vegetación (NDVI y QBR).....	90
Estadística no Paramétrica .....	93
Índice de Calidad de Ambientes Ribereños.....	95
Conclusiones .....	97
Recomendaciones .....	99
Referencias .....	100
Anexos.....	118

## Índice de cuadros

1	Tipología de objetos de conservación	16
2	Fuentes de información	34
3	Características de las bandas Sentinel 2B	35
4	Métodos para agua y suelo	36
5	Sitios de estudio en el Parque Nacional Iztaccíhuatl-Popocatepetl	38
6	Imágenes del satélite Sentinel 2B, fecha y temporada a la que pertenece (estiaje o lluvia)	61
7	Correlaciones de Pearson con NDVI en estiaje ( $p \leq 0.05$ )	64
8	Correlaciones de Pearson con NDVI en lluvia ( $p \leq 0.05$ )	64
9	Puntuación QBR	65
10	Correlación de Pearson entre el índice QBR y NDVI	65
11	Análisis Kruskal-Wallis	66
12	Correlaciones múltiples cuadradas entre parámetros y las primeras variables canónicas de características de sitio	66
13	Correlaciones múltiples cuadradas entre características de sitio y las primeras variables canónicas de parámetros	67
14	Variables de calidad ambiental (agua y suelo) del Parque Nacional Iztaccíhuatl-Popocatepetl	67
15	Valores de calidad ambiental en sitios ribereños distribuidos en una secuencia altitudinal en el Parque Nacional Iztaccíhuatl-Popocatepetl y su área de influencia	72
16	Puntuación final y código de color de la calidad ambiental de riberas del Parque Nacional Iztaccíhuatl - Popocatepetl y su área de influencia.	75

## Índice de figuras

1	Interacción agua-suelo en una ribera degradada a 2200 m en el PNI-P, 2015	5
2	Calidad del suelo	7
3	Vegetación primaria: pino y zacatonal en el PNI-P ubicadas a 3900 m, 2015	8
4	Fisiografía de México	10
5	Ejemplo de ribera a 3300 m en el PNI-P	13
6	Ejemplo de Área Natural Protegida: PNI-P	15
7	Mapa de ubicación del Parque Nacional Iztaccíhuatl-Popocatepetl	25
8	Zonas de muestreo	39
9	Sitios de estudio de 2076-2120 m	41
10	Sitios de estudio de 2126-2260 m	42
11	Sitios de estudio de 2412-2521 m	43
12	Sitios de estudio de 2678-3274 m	45
13	Sitios de estudio de 3300-3630 m	46
14	Sitios de estudio de 3635-3871 m	47
15	Sitios de estudio de 3883-4010 m	48
16	Temperatura del agua de los arroyos en los sitios de muestreo	50
17	Conductividad eléctrica del agua de los arroyos en los sitios de muestreo	50
18	pH del agua de los arroyos en los sitios de muestreo	51
19	Oxígeno disuelto de los arroyos en los sitios de muestreo	52
20	Alcalinidad de los arroyos en los sitios de muestreo	52
21	Amonio (N-NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> ) de los arroyos en los sitios de muestreo	53
22	Nitratos (N-NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> ) de los arroyos en los sitios de muestreo	54
23	Nitritos (N-NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> ) de los arroyos en los sitios de muestreo	54
24	Fósforo total (P-PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> ) de los arroyos en los sitios de muestreo	55
25	Ortofosfatos (P-PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> ) de los arroyos en los sitios de muestreo	55
26	Demanda bioquímica de oxígeno de los arroyos en los sitios de muestreo	56
27	Densidad aparente del suelo en los sitios de muestreo	56
28	pH activo del suelo en los sitios de muestreo	57
29	Conductividad eléctrica del suelo en los sitios de muestreo	57
30	Carbono orgánico del suelo en los sitios de muestreo	58
31	Nitrógeno total del suelo en los sitios de muestreo	59
32	Fósforo disponible del suelo en los sitios de muestreo	59
33	Relación C/N del suelo en los sitios de muestreo	60
34	NDVI en temporada de estiaje	61
35	NDVI en temporada de lluvia	62
36	Comparación del promedio de NDVI en temporada de lluvia y de estiaje	62
37	Índice NDVI en las zonas ribereñas estudiadas	63
38	Conductividad eléctrica y amonio en el agua de zonas ribereñas estudiadas del PNI-P	68
39	Conductividad eléctrica en el agua de zonas ribereñas estudiadas del PNI-P	69
40	Amonio en el agua de zonas ribereñas estudiadas del PNI-P	70
41	Materia orgánica y relación C/N en suelos ribereños estudiados del PNI-P	71
42	Calidad ambiental final de riberas en el PNI-P	76

## Resumen

La intensidad y acentuada alteración de los ecosistemas ribereños ya obliga a tomar acciones encaminadas hacia la conservación, dado que estos ecosistemas, sumamente complejos por sus características físicas, químicas y biológicas, son influenciadas por su cercanía al agua y, como otros ecosistemas, son especialmente sensibles a los cambios de uso de suelo. Por ello, el objetivo de este estudio fue evaluar la calidad ambiental en los ecosistemas ribereños del Parque Nacional Iztaccíhuatl-Popocatepetl y su zona de influencia, utilizando parámetros asociados a las propiedades físicas y químicas del agua, del suelo y de la vegetación riparia.

La investigación se realizó en 28 localidades ribereñas de la subcuenca del río Nexapa, en el Parque Nacional Iztaccíhuatl-Popocatepetl. Se examinaron las bases de datos del grupo de trabajo de la Línea de Investigación Relaciones Suelo-Agua-Vegetación en el Manejo de Cuencas de la FES Zaragoza, UNAM para obtener datos de propiedades físicas y químicas de agua, de suelo y de índices de vegetación (QBR, Qualitat del Bosc de Ribera = calidad del bosque de ribera). Para el trabajo de campo se delimitaron, en cada uno de los sitios estudiados, dos transectos de 30 m de largo sobre el arroyo con un ancho de 10 m paralelos al río. Se midieron parámetros de agua *in situ* y se tomaron muestras de agua de cada sitio de estudio en botellas de acuerdo con el parámetro a evaluar. Para el caso de los suelos, se tomaron tres muestras en cada lado del río con hasta 20 cm de profundidad y se formaron muestras compuestas. También se evaluó la vegetación con el índice el índice NDVI (Normalized Difference Vegetation Index = índice de vegetación de diferencia normalizada) con imágenes satelitales Sentinel 2B.

Se evaluaron 18 parámetros de agua y suelo de ambientes ribereños del Parque Nacional Iztaccíhuatl-Popocatepetl. Los análisis estadísticos mostraron que seis parámetros (de agua y suelo) mostraron diferencias significativas ( $p \leq 0.05$ ) y altamente significativas ( $p \leq 0.0001$ ) en sus medianas para contribuir como indicadores sensibles y por lo tanto indicadores de calidad ambiental, entre dichos parámetros, se encuentran la alcalinidad, conductividad eléctrica y concentración de amonio del agua, así como la temperatura del agua y ambiental y la relación C/N de los suelos. Estas son variables que han sido reportadas por diversos autores como buenos indicadores de calidad ambiental. La vegetación ribereña, analizada con NDVI mostró promedios diferentes en temporada de lluvias de 0.65) y en estiaje de 0.55. Estos valores en conjunto con el índice QBR permitieron estimar la calidad de vegetación en de los ecosistemas ribereños. Los análisis de correlaciones canónicas arrojaron tres variables robustas útiles en la evaluación de la calidad ambiental: conductividad eléctrica y concentración de amonio del agua y la relación C/N del suelo con los que se cuantifica el valor del índice de calidad de ambientes ribereños (ICAR). De los 28 sitios ribereños estudiados, 12 presentaron calidad ambiental buena, 13 mostraron calidad ambiental intermedia, dos tuvieron calidad ambiental mala y solo un sitio tuvo una pésima calidad ambiental.

## Abstract

The intensity and alteration accentuated of the riparian ecosystems already forces to take actions directed towards conservation. These ecosystems are extremely complex because their physical, chemical, and biological characteristics are influenced by their proximity to water and, like other ecosystems, they are especially sensitive to changes in land use. For this reason, the objective of this study was to evaluate the environmental quality in riparian ecosystems of Iztaccíhuatl-Popocatepetl National Park and its influence zones.

The research was carried out in 28 riverside localities in Nexapa sub-basin, in Iztaccíhuatl-Popocatepetl National Park. Databases of Research Line, Soil-Water-Vegetation Relations in Watershed Management of FES Zaragoza, UNAM were examined to obtain data on physical and chemical properties of water, soil, and vegetation indices such as QBR (Qualitat del Bosc de Ribera = riparian forest quality). For field work, two 30 m long transects were delimited over stream, with a width of 10 m perpendicular to river. *In situ* water parameters were measured and samples were taken from each study site in bottles according to parameter to be evaluated. For soils, three samples were taken on each side of river up to 20 cm deep and a composite sample was formed. Vegetation was also evaluated with NDVI index (Normalized Difference Vegetation Index) with Sentinel 2B satellite images.

Eighteen water and soil parameters of riparian environments of the Iztaccíhuatl-Popocatepetl National Park were evaluated. The statistical analyzes showed that six parameters (of water and soil) showed significant ( $p \leq 0.05$ ) and highly significant ( $p \leq 0.0001$ ) differences in their medians to contribute as sensitive indicators and therefore indicators of environmental quality, among said parameters, the alkalinity, electrical conductivity and ammonium concentration of the water are found, as well as the water and environmental temperature and the C/N ratio of the soils. These are variables that have been reported by various authors as good indicators of environmental quality. Riparian vegetation, analyzed with NDVI, showed different averages in the rainy season of 0.65 and in dry season of 0.55. These values together with QBR index allowed estimating vegetation quality in riparian ecosystems. The canonical correlation analyzes made it possible to recognize three robust variables, useful for the evaluation of environmental quality: electrical conductivity and ammonium concentration of the water and the C/N ratio of the soil with which the value of the quality index of soil is quantified. Riparian environments (QRI). Of 28 riparian sites studied, 12 have good environmental quality, 13 have intermediate environmental quality, two have low environmental quality, and only one site has poor environmental quality.

# Capítulo 1

## Marco Teórico

### Calidad

Etimológicamente, el término calidad procede del latín (*qualitas-atis*), definido por el Diccionario de la Real Academia Española como: “*la propiedad o conjunto de propiedades inherentes a una cosa, que permiten apreciarla como igual, mejor o peor que las restantes de su especie*”. Esta es la idea que la mayoría de los individuos tienen en la mente al utilizar la palabra calidad; se trata de una noción estrechamente unida al producto (bien material o servicio), independiente de los procesos que se han llevado a cabo. Sin embargo, la norma UNE EN ISO 8402 (actualmente sustituida por la norma UNE EN ISO 9000:2005) definía la calidad como el conjunto de características de una entidad (actividad, producto, organización o persona) que le confieren la aptitud para satisfacer las necesidades establecidas y las implícitas (Miranda *et al.*, 2007).

### Ambiente

La palabra “ambiente” posee en la actualidad muy diversos significados, las diferencias en ellos radican en la interpretación, lo cual ha provocado múltiples debates. Tradicionalmente, se entiende por ambiente al conjunto de elementos abióticos (energía solar, suelo, agua y aire) y bióticos (organismos vivos) que integran la biosfera. Cifuentes (2008), cita que el medio ambiente es el entorno que afecta y condiciona la vida de las personas y de la sociedad en su conjunto, y que comprende valores naturales, sociales y culturales que coexisten en espacio y en tiempo e influyen en la vida del hombre y en las generaciones venideras. Con el paso de los años se ha sustituido en el lenguaje especializado el término de “medio ambiente” por el de “ambiente”; este cambio es el resultado de la sustitución de una noción biológica por otra, de carácter interdisciplinario, emanada del interés de las ciencias sociales por la crisis ecológica actual (Pacheco, 2005).

Aunado a lo anterior se debe de considerar que, como lo cita Cifuentes (2008), “en la década de los 90’s, la Declaración del medio ambiente proclamo que el hombre tiene derecho a un ambiente limpio y saludable y este incluye calidades del aire, del agua y de los alimentos entre otros, que incluyen la protección contra contaminación, erosión del suelo y ruido, además de la conservación de los paisajes, hábitats naturales, de la flora y de la fauna y calidad y comodidad en sus zonas residenciales. Lo anterior ejemplifica muy bien, lo que es mencionado por Pacheco (2005) sobre el concepto “ambiente” que engloba la multicausalidad de los procesos físicos, sociales, económicos, tecnológicos y biológicos, al igual que la complicada red de interrelaciones y los múltiples niveles espacio-temporales de las que estas se presentan.

## Calidad ambiental

El Observatorio Ambiental de la Unión Europea define la calidad ambiental como: “*el conjunto de propiedades, elementos o variables del medio ambiente, que hacen que el sistema ambiental tenga merito suficiente como para ser conservado*”. Es decir, las características propias del medio que, por acción de la naturaleza y el hombre, preservan sus condiciones en niveles óptimos para la vida armónica de todos los seres vivos, razón por la cual, deben ser considerados prioridad de conservación para la humanidad (Rojas, 2011).

Desde la perspectiva ecológica, la calidad vendría dada por el mantenimiento del estado de sus procesos y funciones o, en definitiva, por su integridad (Ortega *et al.*, 2003). Por otro lado, Karr (1996) define la integridad ecológica como la capacidad del ecosistema para mantener su estructura y funcionamiento, así como para absorber el estrés generado por las perturbaciones de origen natural y humano. Montes (1997) asocia la integridad ecológica al conjunto de procesos físicos, químicos y biológicos que caracterizan la organización, funcionamiento y dinámica de un ecosistema. Un atributo de los ecosistemas, relacionado con el binomio producción-conservación, es la salud ecológica o capacidad para suministrar, de forma sostenible, recursos a los sistemas humanos (Meyer, 1997). En México, la CONANP, ha venido fortaleciendo el concepto de Objetos de Conservación Socioambiental (OCSA), aunque ella misma no reconoce aun a los ecosistemas ribereños como uno de estos objetos de conservación (PR-PNUD-CONANP, 2019).

## Indicadores de calidad ambiental

Los indicadores son el parteaguas en los procesos de formulación de política ambiental, y permiten resumir gran cantidad de datos, para facilitar la comunicación de las situaciones ambientales a diferentes grupos sociales (Segnestam, 2002). Hyatt (2001) y Ebert y Welsch (2003), manifiestan que en la definición de indicadores existe confusión entre los mismos expertos, por ello, es relevante distinguir entre indicadores simples e índices. Los primeros están constituidos por la combinación de dos o más datos; y los indicadores (uno o muchos datos) son convertidos en un índice mediante una función matemática que los sintetiza (Stanners y Bourdeau, 1995).

Existen dos tipos de indicadores: los indicadores simples, que aportan información de un solo atributo o dato del fenómeno estudiado; y los indicadores sintéticos, los cuales son elaborados a partir de las variables o atributos de dos o más indicadores simples (Velázquez y Salazar, 2019). La construcción de un sistema de indicadores simples o los índices (como niveles analíticos superiores), demandan la síntesis de información que en muchas ocasiones no está disponible. Al respecto, Pena (1977) y Zarzoza (1996) sostienen que, generalmente el índice construido no da explicación de todos los factores que pueden describir una variable latente; sin embargo, son en todo momento una aproximación de ella. De acuerdo a Zarzoza (1996), los índices son una herramienta cuantitativa que simplifica a través de modelos matemáticos los atributos y pesos de múltiples variables, con la intención de proporcionar una explicación más amplia de un recurso o el atributo a evaluar y gestionar.

## Calidad del agua

En general, las aguas superficiales están sometidas a contaminación natural (arrastre de material particulado, disuelto y presencia de materia orgánica natural) y de origen antrópico (descargas de aguas residuales domésticas, escorrentía agrícola, efluentes de procesos industriales, entre otros). A pesar de la problemática en la que se encuentran sometidas las aguas superficiales, son consideradas el eje de desarrollo de los seres humanos, pues permiten el abastecimiento para las diferentes actividades socioeconómicas en los asentamientos poblacionales (Torres *et al.*, 2009).

Los recursos hídricos desempeñan un papel vital en diversos sectores de la economía, como la agricultura, la ganadería, actividades industriales, recreación entre otras. La disponibilidad y calidad del agua, ya sea superficial o subterránea, se ha deteriorado debido a factores como el aumento de la población, la industrialización y la urbanización (Tyagi *et al.*, 2013). La calidad del agua es uno de los temas más importantes en la gestión de los recursos hídricos (Sutadian *et al.*, 2016; Medeiros *et al.*, 2017), su clasificación basada en el grado de pureza y contaminación data de 1848 (Medeiros *et al.*, 2017) y se evalúa desde las características físicas, químicas y biológicas (Rangeti *et al.*, 2015). La gran variedad de factores y parámetros que afectan la calidad del agua, hace que su evaluación sea una tarea compleja (Sutadian *et al.*, 2016).

Las características físicas y químicas de las aguas, han sido utilizadas tradicionalmente como indicadores para evaluar la calidad de los ecosistemas acuáticos, existiendo una amplia bibliografía al respecto y numerosos índices de calidad más o menos utilizados en la actualidad. Las características hídricas y químicas, resultan de las complejas interrelaciones entre los componentes físicos y bióticos del sistema natural y la presión antrópica (Figura 1), por lo que es difícil establecer su calidad y valores de referencia (Barbour *et al.*, 1999).



Figura 1. Interacción agua-suelo en una ribera degradada a 2200 m en el PNI-P, 2015 (autor)

Los índices de calidad del agua surgen, como una técnica valiosa para describir su estado general en un solo término, de fácil comunicación al público y a los responsables de la toma de decisiones de políticas públicas y en el seguimiento de sus impactos. En los trabajos de Pesce y Wunderlin (2000) y Nasiri *et al.* (2007), se definen los índices de calidad del agua

como una expresión simple de una combinación más o menos compleja, de un número de parámetros que sirven como expresión de la calidad del agua, donde el índice puede ser representado por un número, un rango, una descripción verbal, un símbolo o incluso un color.

La ventaja de los métodos físicos y químicos, se basa en que los análisis suelen ser más rápidos y pueden ser monitoreados con mayor frecuencia, en comparación con los métodos biológicos, basados en la observación y medición de ciertas comunidades de seres vivos en las aguas; además, la elección de las especies debe ser cuidadosa ya que de ésta depende la evaluación de la calidad del recurso, que generalmente solo se realiza para un uso determinado. A diferencia de las físicas y químicas, que permiten una evaluación para diferentes tipos de uso (Samboni *et al.*, 2007).

En México a principios de los años 60's, ante la necesidad de encontrar un método uniforme y consistente para dar a conocer la calidad del agua de manera accesible a la población, se desarrolló un sistema estimativo de calidad del agua, que requirió la medición de los parámetros físicos de contaminación del agua y el uso de una escala estandarizada. Este sistema se denominó Índice de Calidad del Agua (ICA). El ICA se define como el grado de contaminación existente en el agua a la fecha de un muestreo, expresado como un porcentaje de agua pura. Así, agua altamente contaminada tendrá un ICA cercano a 0%, y para agua en excelentes condiciones de 100% (SEMARNAT, 2022).

El índice ICA consideraba 18 parámetros para su cálculo los cuales fueron: demanda bioquímica de oxígeno, oxígeno disuelto, coliformes fecales, coliformes totales, sustancias activas al azul de metileno (detergentes), conductividad eléctrica, fosfatos totales, grasas y aceites, nitrógeno amoniacal, nitratos, alcalinidad, color, dureza total, pH, sólidos suspendidos, cloruros, sólidos disueltos y turbiedad (SEMARNAT, 2022).

En 2021 la CONAGUA utilizó para el análisis de calidad de agua 8 indicadores: demanda bioquímica de oxígeno a cinco días, demanda química de oxígeno, sólidos suspendidos totales, coliformes fecales, *Escherichia coli*, enterococos, porcentaje de saturación de oxígeno y toxicidad (CONAGUA, 2022).

## Calidad de suelo

La calidad del suelo se define como la capacidad que tiene cualquier tipo de suelo para funcionar. Dependiendo de las condiciones en las que se encuentren las propiedades dinámicas del suelo, como materia orgánica y contenido de microorganismos, se puede deducir la salud de un suelo, con la que frecuentemente se confunde el término de calidad del mismo. A pesar de dicha confusión, la definición de calidad del suelo se entiende como la capacidad que tiene para cumplir un propósito específico durante un tiempo relativamente largo, manteniendo una productividad biológica sostenible sin perder sus propiedades físicas y químicas, y favoreciendo la salud de plantas, animales y humanos (Alomía, 2005).

Doran y Parkin (1994) mencionan que la calidad de los suelos se basa en tres ejes principales, que abarcan desde mantener las propiedades físicas, químicas y biológicas de los suelos hasta favorecer la salud de animales y humanos (Figura 2). Para esclarecer la diferencia entre salud

del suelo y calidad del suelo se pueden emplear las características que las definen. Para la calidad del suelo son las características biológicas, físicas y químicas; mientras que la salud del suelo está determinada principalmente por sus características ecológicas (Cerón y Melgarejo, 2005).

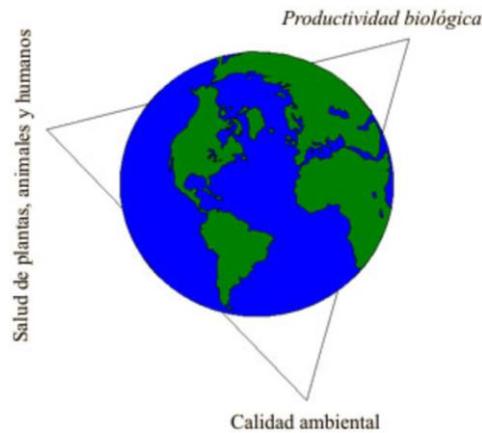


Figura 2. Calidad del suelo, tomado de Doran y Parkin (1994)

La calidad del suelo es más compleja que la calidad del aire y el agua, no solo porque el suelo se compone de fases sólidas, líquidas y gaseosas, sino también porque los suelos se puedan utilizar para una mayor variedad de propósitos (Nortcliff, 2002). Esta multifuncionalidad de los suelos también se aborda cuando la calidad de del suelo se define desde una perspectiva ambiental como: “la capacidad del suelo para promover el crecimiento de las plantas, proteger las cuencas hidrográficas regulando la infiltración y la partición de las precipitaciones, prevenir la contaminación del agua y del aire al amortiguar los contaminantes potenciales, como los productos químicos agrícolas, los desechos orgánicos y los productos químicos industriales” (Sims *et al.*, 1997).

Una versión ampliada de este concepto, la propone Karlen *et al.* (1997), donde señala que la calidad del suelo es: “la capacidad de un tipo específico de suelo para funcionar, dentro de los límites de los ecosistemas naturales o gestionados, para mantener la productividad de las plantas y los animales, mantener o mejorar la calidad del agua y el aire, y respaldar la salud humana y el hábitat”. Más recientemente se propuso el término multifuncionalidad del suelo, que no solo abarca las relaciones de producción, sino otras funciones que cumple el sistema suelo, tales como la regulación del ciclo hidrológico, contribución a la captura de carbono y mantenimiento de la biodiversidad, entre otras (Castillo *et al.*, 2021).

La evaluación de la calidad del suelo permite entender y revertir el deterioro en dicha funcionalidad ecosistémica, como sucede con: la pérdida de suelos por erosión y acumulación de sedimentos por viento e inundaciones, reducción de la infiltración, compactación de la capa superficial, pérdida de nutrientes, efecto de la presencia de pesticidas, cambios en el pH, aumento de la solubilidad de metales pesados, pérdida de la materia orgánica, reducción de la actividad biológica, infestación de organismos patógenos y reducción de la calidad del agua (Navarrete *et al.*, 2011).

## Calidad de la vegetación

En muchos marcos de evaluación de la biodiversidad, la “calidad de la vegetación” se refiere al grado en que la vegetación de un sitio se asemeja a la vegetación primaria en ausencia de perturbaciones humanas (Parkes y Newell, 2011; Gibbons y Freudenberger, 2006) (Figura 3). La vegetación estructurada por disturbios naturales (como inundaciones y avalanchas), o mantenidos por la intervención humana preeuropea (como los pastizales controlados por incendios de América del Norte y Australia), también se consideran generalmente vegetación primaria (Gibbons *et al.*, 2008). Aunque la importancia de la vegetación primaria como foco de conservación y la restauración es ampliamente reconocida y en gran medida no controvertida (Gibbons y Freudenberger, 2006), el debate todavía rodea la cuestión de cómo medir la calidad de la vegetación (McCarthy y Parris, 2004; Gibbons y Freudenberger *et al.*, 2006; Cook *et al.*, 2010).



Figura 3. Vegetación primaria: pino y zacatonal en el PNI-P ubicadas a 3900 m, 2015 (autor)

A pesar de la creciente popularidad del término, no existe una definición estándar de “condición de la vegetación”. Es un concepto que refleja el deseo de extender el manejo de la vegetación desde una preocupación por la extensión del tipo y la configuración, a una que también considere la calidad, salud, función o viabilidad. La condición de la vegetación es un concepto cargado de valores que requiere que los datos se interpreten a través de un “prisma de valores” a lo largo de un continuo de “bueno” o “malo”. Por ejemplo, una alta cobertura de malezas perennes podría constituir una condición “mala” en un contexto (por ejemplo, conservar la riqueza de especies de plantas nativas), pero una condición “buena” en otro (por ejemplo, bajar los niveles freáticos para controlar la salinidad) (Gibbons y Freudenberger, 2006).

## Ecosistemas de montaña

Aunque las montañas cubren aproximadamente un 12.5% de la superficie terrestre (sin incluir la Antártica), tiene un gran valor para la naturaleza y los seres humanos; poseen un alta diversidad de elementos abióticos y bióticos, proveen hábitat para el 33% de la biodiversidad terrestre, otorgan más del 50% del agua dulce de la Tierra, abasteciendo a más de 2 billones de habitantes, contienen el 50% de los *hots spots* de biodiversidad definidos a nivel global y entregan diversos valores culturales y espirituales para millones de personas alrededor del

mundo (Grumbine y Xu, 2021). Estas características han determinado que los ecosistemas de montaña tengan una alta relevancia para el bienestar de la población mundial, lo que se ha expresado a través de la gran diversidad de servicios ecosistémicos que nos brindan (Schirpke *et al.*, 2021).

Los servicios ambientales que proporcionan los ecosistemas de montaña incluyen hábitat y biodiversidad, provisión de recursos (hídricos, alimenticios, medicinales, energéticos, de construcción), regulación del clima y de los peligros ambientales (deslizamientos, avalanchas), secuestro de carbono, identidad cultural actividades recreativas y turismo, entre otros (Ávila *et al.*, 2020; Durán *et al.*, 2020; Li *et al.*, 2020; Schirpke *et al.*, 2020).

Estos servicios ambientales son provistos a billones de personas que habitan tanto en las montañas como en áreas adyacentes a ellas. Por ello, los ecosistemas de montaña representan áreas con un alto valor de conservación y han sido propuestos como una herencia natural a nivel global (Chakraborty, 2020).

Las montañas son importantes, en particular, para la humanidad y en general, para la biodiversidad, debido a que el 10% de la población mundial habita en regiones montañosas, los ríos mayores nacen en áreas montañosas y más de la mitad de la humanidad depende del agua que brota de ellas (Körner, 2007). Además, las montañas albergan al menos un tercio de la diversidad de especies terrestres en el mundo (Körner, 2007). Adicionalmente, por el aislamiento geográfico bajo el cual los ecosistemas montanos han evolucionado, estos biomas también albergan un gran número de especies endémicas de prácticamente todos los grupos biológicos (Steinbauer *et al.*, 2016).

La amplia variedad de especies de plantas observadas en las montañas es particularmente importante, porque la diversidad de vegetación ayuda a la preservación de los suelos en pendientes pronunciadas, esto contribuye a la protección de los paisajes naturales y poblaciones humanas contra peligros naturales y el impacto de eventos extremos (Körner *et al.*, 2016; Williams *et al.*, 2002).

Los ecosistemas de montaña son importantes como centros mundiales de diversidad biológica. La mayor diversidad de especies vegetales vasculares se da en las montañas en Costa Rica, Los Andes Orientales Tropicales, bosques atlánticos del Brasil, región oriental del Himalaya-Yunna, Borneo septentrional y Papua Nueva Guinea (Barthlott *et al.*, 1996). Muchas de estas zonas de mayor diversidad biológica están declaradas parques nacionales o gozan de otro tipo de protección (Price, 1998).

La diversidad de las especies naturales en las montañas no solo tiene valor para la humanidad, sino que, intrínsecamente y como fuente de alimentos silvestres como setas, caza mayor, aves y muchos otros productos forestales no leñosos. Las montañas son también importantes como centros de diversidad de cultivos (Barthlott *et al.*, 1996). El mantenimiento y la expansión de las poblaciones de montaña en muchas partes del mundo, han sido posibles por la introducción de la papa y del maíz de América Latina. Los precursores originales del trigo vinieron de las montañas del cercano oriente. Estas variedades originales mantienen su

importancia como material genético para nuevas variedades de los principales cultivos alimentarios (Price, 1998).

## Ecosistemas de montaña en México

La compleja fisiografía de México es el resultado de la interacción de cinco placas tectónicas, cuya acción conjunta ha originado cordilleras por plegamiento (Sierra Madre Oriental, Sierra Madre del Sur), y por vulcanismo (Sierra Madre Occidental, Eje Neovolcánico transversal); las mesetas (Altiplano Central) y depresiones (Balsas y Chiapas) que quedaron confinadas entre las principales cordilleras (Espinosa *et al.*, 2009).

A mayor altitud, la temperatura baja, incluso hasta permitir zonas de nieve perpetua en las cimas de las montañas más altas, por lo que los ecosistemas templados de México se asocian estrechamente con las zonas montañosas (Tamayo, 1990). La presencia, distribución y variabilidad de los ecosistemas templados en las sierras y serranías del país no solo depende de la existencia misma de las montañas, sino de otros factores como son la abundancia y la estacionalidad de la lluvia, el tipo de suelo, la orientación de la ladera con respecto al sol y la historia biogeográfica de la zona entre otros (Challenger, 1998).

De acuerdo con la Global Mountain Biodiversity Assessment, en México existen once regiones montañosas que representan 23% del territorio nacional, con 10% de la población humana total viviendo de ellas (Figura 4). Estas regiones son (de mayor a menor altitud) las siguientes: Eje Volcánico Transversal (elevación máxima 5469 m), Sierra madre de Chiapas (4092 m), Sierra Madre del Sur (3661 m), Sierra Madre Oriental (3643 m), Altiplano Mexicano (2849 m), Sierra de San Pedro Mártir (2838 m), Península de Baja California (2020 m), Sierra de Juárez (1904 m), montañas de los Tuxtlas (1577 m) y sierra de Tamaulipas (1308 m) (Gómez y Villalobos, 2020).

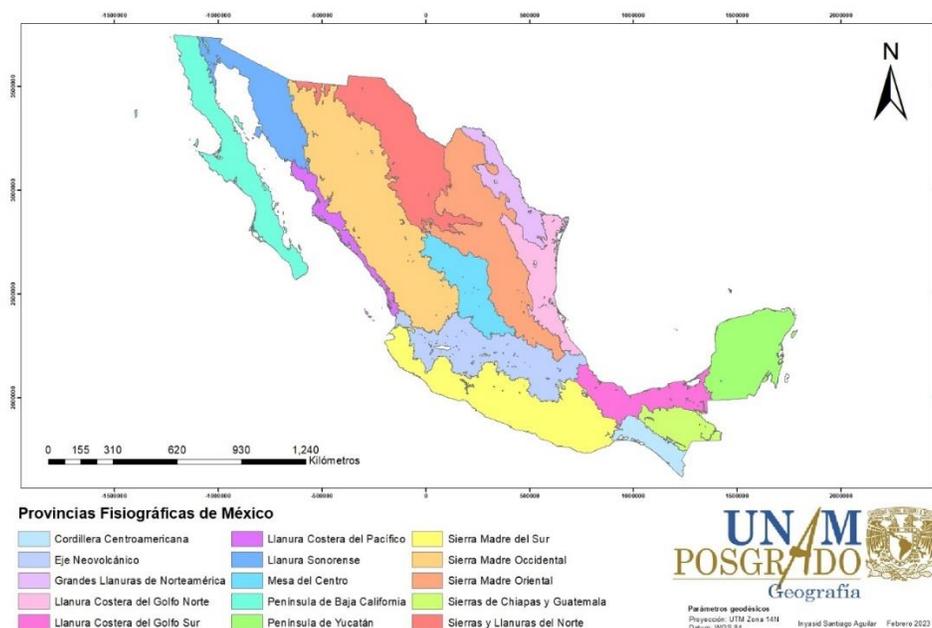


Figura 4. Fisiografía de México, elaboración propia con base en (INEGI, 2001).

La importancia para México de estas regiones montañosas radica en los múltiples servicios ambientales que proveen, los cuales pueden ser de apoyo (dispersión y reciclaje de nutrientes, producción primaria, hábitat de especies, etc.), de aprovisionamiento (alimentos, agua, farmacéuticos, etc.), de regulación (captura y almacenamiento de carbono, polinización de cultivos, purificación de agua y aire, etc.) y culturales (inspiración cultural, intelectual y espiritual, experiencias de recreación, descubrimiento científico, entre otros.) (Becker *et al.*, 2007; Bendix *et al.*, 2013; Gerold *et al.*, 2008; Grau y Aide, 2008; Homeier *et al.*, 2013; Payne *et al.*, 2017; Williams *et al.*, 2002). Además, las cuencas hidrológicas más importantes y que proveen de agua a la mayoría de las ciudades del país nacen en las zonas montañosas. Asimismo, las montañas han sido utilizadas como zonas de refugio no solo para la biodiversidad, sino también para las numerosas culturas, lenguas y cosmovisiones que aún existen en nuestro país (Aguirre, 1991).

El complejo relieve que presentan las montañas hace necesario la revisión de su geomorfología, con la finalidad de entender mejor el drenaje de las cuencas y los procesos de erosión y acumulación, característicos de zonas montañosas. La mayoría de las montañas son morfoestructuras construidas, consecuencia de un proceso geológico de carácter cortical, respuestas orogénicas, isostáticas o resultado de una actividad volcánica (Bullón, 1981).

Todas las montañas se caracterizan por un mismo abanico de causalidades, están organizadas sobre un mismo plano y funcionan de una manera idéntica. En todas ellas se producen tipos similares de modificaciones climáticas, de vegetación o geomorfológicas respecto a las zonas que las rodean, no obstante, de unas a otras varían los gradientes de estas modificaciones y su influencia en el medio físico (Bullón, 1981).

El uso de modelos geomorfológicos es importante para para entender cómo funciona las laderas en las montañas. Los modelos geomorfológicos integran los procesos formadores de (endógenos) y modeladores (exógenos) del relieve (López, 2017).

En el modelo de Rhue más común actualmente utilizado se describen cinco elementos de una catena:

- 1) Cresta o cumbre (summit), posición generalmente estable, con un mínimo de erosión o acreción.
- 2) Hombro de ladera (shoulder), en este sitio la escorrentía y erosión son máximas, la superficie es inestable y los movimientos en masa son comunes; gran parte de esta inestabilidad es iniciada por flujos laterales de agua en la sub-superficie.
- 3) Lomo de ladera (backslope), es el sitio de transporte, se ubica entre una zona dominada por la erosión y otra de acumulación. El agua y escombros se mueven sobre y a través de las dorsales, los flujos de agua dependen de la curvatura de la ladera. Los movimientos de soliluxión y reptación son característicos de esta zona.
- 4) Pie de ladera (footslope), la mayoría de las formas del relieve son cóncavas, posición que recibe sedimentos y agua, el material es acarreado en suspensión y solución a través del flujo superficial y subsuperficial.

- 5) Fondo de valle (toeslope), es la extensión del pie de ladera, es una zona de depósito aluvial, es un sitio de construcción, a partir de sedimento que proviene de ladera arriba pero también de los ríos que inundan y depositan sedimento en la llanura de inundación.

El modelo geomorfológico de Dalrimple es una extensión del modelo de Ruhe, tiene aplicación en la mayoría de los paisajes, enfatiza en los procesos de ladera: reptación, solifluxión, movimientos en masa, etc. El modelo de nueve unidades reconoce muchos procesos que operan no solo en dimensión vertical sino también paralela a la inclinación. Este modelo destaca que la catena puede estar compuesta por máximo nueve superficies interrelacionadas; cada unidad se ve afectada por interacciones entre el agua y procesos basados en la gravedad (López, 2017).

La superficie geomorfológica está formada por uno o más procesos superficiales, que pueden ser erosivos o constructivos o la combinación de ambos. El material cambia dentro de la superficie o es uniforme, además ésta puede ser plana o inclinada y presenta exposición sur o norte. Las superficies constructivas se forman por depósitos eólicos, fluviales, entre otros, del mismo modo, la erosión a gran escala puede crear una nueva superficie, la edad de las superficies geomorfológicas cambia a menudo (López, 2017).

En las cumbres, el agua tiende a infiltrarse o correr lentamente, en el hombro de ladera la pendiente es más pronunciada y con ello crece el potencial de escorrentía y es comúnmente erosionado, poseen los perfiles más delgados de suelo y son las áreas con más afloramientos rocosos. El sedimento más fino es más fácilmente erosionado mientras que los materiales más gruesos por lo regular se quedan en el hombro. A mitad del hombro de ladera se realiza el transporte, pendiente más abajo se ralentiza el flujo de escombros y la deposición de sedimentos predomina. La acumulación ocurre en el pie de ladera, la base de la pendiente es también propensa a recibir entradas de sedimento provenientes fuera del sistema, como el desbordamiento de arroyos. Durante el transporte, el “flujo” del material a la largo de la ladera es más o menos ordenado. El escurrimiento se produce cuando las entradas de la precipitación superan la infiltración del suelo, la calidad de la pendiente y la curvatura afectan la velocidad a la que el agua escurre y su dirección. La escorrentía a menudo es la fuerza impulsora del flujo de escombros (López, 2017).

## **Ecosistema ribereño**

Los ecosistemas ribereños representan la interfase entre hábitats terrestres y acuáticos (Naiman *et al.*, 1993). Esta propiedad les otorga atributos físicos y químicos específicos, propiedades bióticas y procesos de flujo de materia y energía, con interacciones únicas entre los sistemas ecológicos adyacentes (Naiman *et al.*, 1998; Risser, 1993). Diversos procesos fluviales, tales como crecidas y deposición del suelo aluvial, modelan la zona ribereña. Estos factores determinan a su vez, la formación de una flora característica, típicamente diferente en estructura y función de la vegetación terrestre adyacente (Gregory *et al.*, 1991; Naiman *et al.*, 1993; Tang y Montgomery, 1995; Prach y Straskrabová, 1996; Naiman y Décamps, 1997). Su función como proveedoras de alimentos para organismos acuáticos, moderadoras de la temperatura del agua, filtradoras de nutrientes y contaminantes (Naiman *et al.*, 1993), estabilizadoras de los bancos de los ríos (Barling y Moore, 1994; Hood y Naiman, 2000) y

como corredores para el movimiento de organismos (Naiman y Décamps, 1997), las convierten en zonas de vital importancia para el mantenimiento de la biodiversidad.

Sus límites son de naturaleza lineal, pero no siempre están claramente definidos y pueden cambiar de un año a otro dependiendo de las condiciones hidrológicas del cuerpo de agua adyacente (Figura 5) (Schultz *et al.*, 2009). Como son zonas de transición entre ecosistemas acuáticos y terrestres, conectando los cuerpos de agua con sus tierras altas adyacentes, exhiben gradientes en condiciones biofísicas, procesos ecológicos y biota (Naiman *et al.*, 2005).



Figura 5. Ejemplo de Ribera a 3300 m en el PNI-P (autor)

Las áreas ribereñas y los deltas se consideran como algunos de los ecosistemas más degradados, ya que los humanos los utilizaron durante miles de años (Naiman *et al.*, 2005). Se espera que estas presiones sobre estos ecosistemas aumenten, ya que las actividades antropogénicas continúan alterando estos paisajes naturales (Corbacho *et al.*, 2003). Los principales culpables son las actividades agrícolas, ya sea estableciendo campos de cultivo en estas áreas o mediante el pastoreo de ganado (Schultz *et al.*, 2009). La expansión continua de las áreas urbanas y la construcción de caminos en áreas ribereñas y deltas junto con usos mineros e industriales también han tenido impactos negativos importantes (Iakovoglou *et al.*, 2013; Anthony *et al.*, 2015). Finalmente, la extracción de agua superficial y subterránea también tiene un gran impacto en estos ecosistemas, ya que su nivel freático, en algunos casos, disminuye de forma alarmante y altera sus procesos naturales (CRZFAM-WST-NRC, 2002).

## Áreas Naturales Protegidas (ANP's)

A nivel mundial, las estrategias más efectivas para mitigar y prevenir los efectos derivados de amenazas por cambio en el uso del suelo, así como la deforestación, se fundamentan en el establecimiento de Áreas Naturales Protegidas (ANP) (Figuroa y Sánchez, 2008; Ochoa *et al.*, 2009). En México, las áreas naturales protegidas son espacios territoriales en donde se tiene como objetivo la preservación de la biodiversidad, y de otros servicios ambientales.

Estos espacios pretenden conservar la biodiversidad, mantener los procesos ecológicos y preservar los ecosistemas y sus recursos naturales y culturales, asociados para el bienestar social (Palomo *et al.*, 2014; Phillips, 2003). El decreto de las ANP es la estrategia de conservación y preservación preferida de los conservacionistas y, por lo menos en el discurso, es importante para el gobierno federal y parcialmente para los gobiernos estatales, y con menor relevancia para los gobiernos municipales.

Un ANP convencional corresponde a la definición establecida en la Ley General del Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente (DOF, 2012), que textualmente dice: “*Las zonas del territorio nacional y aquellas sobre las que la nación ejerce su soberanía y jurisdicción, en donde los ambientes originales no han sido significativamente alterados por la actividad del ser humano o que requieren ser preservadas y restauradas y están sujetas al régimen previsto en la presente ley*”.

El establecimiento de áreas naturales protegidas en México, tiene su sustento en la norma suprema de ordenamiento jurídico: la constitución política de los estados unidos mexicanos, artículo 4°, párrafo 5°, en el que se establece que: “*toda persona tiene derecho a un medio ambiente sano*”. Este derecho se respalda al establecer las ANP, las cuales se encuentran estrechamente relacionadas con la calidad ambiental, de tal modo que, condiciona a la categoría ANP, es decir, sin una calidad ambiental buena en algún lugar del espacio geográfico con potencial para convertirse en ANP, no se podrían designar áreas naturales protegidas, y esto a su vez no podrían proporcionar una buena calidad de vida.

De acuerdo con la normatividad de México, se tienen áreas naturales protegidas convencionales, que pueden ser federales, estatales o municipales, o bien destinadas voluntariamente para la conservación. Se han decretado 182 ANP federales, con una superficie de 90,839,521.55 hectáreas, que representan 12.1% del total del territorio nacional (CONANP, 2021). En 2009 se tenían registradas 296 ANP estatales y 98 municipales, que ocupaban una superficie aproximada de 3.3 y 0.17 millones de hectáreas, respectivamente (Bezaury y Gutiérrez, 2009). Sin embargo, en 2015 la Comisión Nacional para el conocimiento y Uso de la Biodiversidad reportó 421 ANP estatales y solamente 44 municipales (Tlapa *et al.*, 2020). Debido a los constantes cambios ocurridos en los ecosistemas en México es importante conocer las áreas destinadas a la protección, ya que en ellas se observan sus características físicas y biológicas de la región, así como las características sociales y socioeconómicas de las poblaciones humanas insertas dentro y en los alrededores de estas áreas (Pinkus *et al.*, 2014).

En cuanto a los recursos hídricos del Parque Nacional Iztaccíhuatl-Popocatepetl, presentan un incremento en su degradación, debido principalmente a dos factores: disminución de la superficie de infiltración por pérdida de bosque y la acelerada expansión de la mancha urbana que demanda más este recurso (CONANP, 2013). Cabe mencionar que el cambio de uso de suelo y la contaminación con residuos sólidos orgánicos e inorgánicos también contribuyen a esta problemática. Como consecuencia, se han tomado acciones que se enfocan más a la captación e infiltración de agua que, si bien ayudan a mitigar parte del problema, no son

suficiente, debido a que dejan de lado las dos problemáticas principales por las cuales se degrada el recurso agua.

## Parque Nacional Iztaccíhuatl-Popocatepetl

El área natural protegida Iztaccíhuatl-Popocatepetl, ha sido una de las áreas de mayor significancia histórica en México, desde su declaración el 8 de noviembre de 1935. Este parque nacional fue concebido como un motor de desarrollo dado su capacidad para proveer agua, energía y madera como servicios ecosistémicos. En el Parque Nacional Iztaccíhuatl-Popocatepetl, el término “conservación” se entendió como el desafío de mantener paisajes productivos donde se entremezclan naturaleza y cultura (Velázquez, 2013). Los principales objetivos de este Parque Nacional son la protección y conservación de las montañas que forman la Sierra Nevada en el centro oriental de Eje Volcánico Transversal. En 2010, fue declarado Reserva de la Biosfera los Volcanes por la UNESCO; esta declaración implica un reconocimiento internacional a la importancia de este territorio para la conservación y protección de la biodiversidad.

El Parque Nacional Iztaccíhuatl-Popocatepetl (PNI-P) tiene una superficie de 39,819 hectáreas (CONANP, 2013); la tenencia de la tierra es ejidal (un ejido es una propiedad social, rural y colectiva en México con personalidad jurídica y patrimonio propio, que opera de acuerdo con las normas internas de organización económica y social), comunal, privada y federal. Es un ecosistema de alta montaña, con un rango altitudinal de 2589 a 5454 m sobre el nivel del mar. En su conjunto, el ANP Iztaccíhuatl-Popocatepetl es el remanente más importante de bosques de coníferas y praderas de alta montaña en el centro de México (Figura 6) (Quiroz *et al.*, 2020).



Figura 6. Ejemplo de Área Natural Protegida: PNI-P (autor)

## Estrategias de conservación: Áreas Naturales Protegidas

Ante los problemas de degradación ambiental y pérdida de biodiversidad, entre otros asociados al proceso de desarrollo, la estrategia más generalizada ha sido la creación de áreas protegidas, bajo la presunción de que la mejor manera de conservar (Roe y Elliott, 2004) y mantener ciertos servicios vitales que solo pueden ser generados en ambientes con poca intervención humana (Alcama *et al.*, 2003). Sin embargo, tal como lo presenta Wilshusen *et al.* (2002), la importancia que se le da a las zonas protegidas desconoce que hay otras formas

de manejo de la biodiversidad, que adicionalmente la mayoría de estas se encuentra fuera de las áreas de conservación y, finalmente, que existen zonas que no son protegidas con una oferta amplia de servicios ambientales y de potenciales de conservación por uso de esos recursos biológicos. Además, las zonas protegidas no siempre se encuentran en áreas que promuevan la conservación de la biodiversidad y su persistencia, y muchas de ellas están en zonas inaccesibles y poco atractivas para actividades del mercado (Margules y Pressey, 2000).

Otro factor que debe tenerse en cuenta con la creación y mantenimiento de áreas protegidas como estrategia dominante de conservación, es la insuficiencia de conocimientos sobre la biodiversidad y la falta de claridad sobre el estado, distribución y tendencias de los organismos vivos que presiden la definición de estas áreas (Filion, 1995). Además, en muchas ocasiones, estas son impuestas en territorios de comunidades a las cuales se les restringe el uso de recursos que históricamente habían utilizado como medio de vida, y esta imposición desde arriba, sin tener en cuenta las necesidades locales, genera conflictos socioambientales que amenazan la conservación de esos recursos biológicos que la reserva busca proteger (Brown, 2001).

Le selección de lo que se quiere conservar determina el manejo y gestión de una zona protegida. La pregunta de ¿qué se quiere conservar?, básicamente se refiere a lo que la literatura científica denomina un objeto de conservación. De acuerdo con Redford *et al.* (2003), un objeto de conservación, se refiere a las entidades cuya subsistencia en el largo plazo se está tratando de asegurar con la zona de conservación. Estos objetos pueden ser especies, ecosistemas, escenografía, paisajes, biodiversidad o seres humanos y sus actividades (Cuadro 1). Sin embargo, no todos estos objetos de conservación son igualmente populares, lo que tiene implicaciones muy grandes en la gestión y manejo del área protegida.

Cuadro 1. Tipología de objetos de conservación

Especies	Explotación sostenible ha sido reemplazada por el valor intrínseco de la especie.
Ecosistemas	Conservados por sus servicios de ambientales y representatividad.
“Escenografía”	Paisajes conservados por su belleza. Primeros parques, especies y ecosistemas de forma integrada. Fue la próxima para declarar los primeros parques naturales.
Biodiversidad	Difícil de implantar por la misma ambigüedad en la definición del concepto. ¿Qué nivel de biodiversidad se protege? ¿Genes? ¿Población? ¿Especies? ¿Ecosistemas? ¿Todos estos niveles?
Paisajes	Procesos ecológicos ocurren a distintas escalas. Conservar función ecológica. En algunas circunstancias los humanos forman parte del paisaje.
Humanos y sus actividades	Incluye a la sociedad y su interacción con lo no humano del ecosistema.

Tomado de: Redford *et al.* (2003)

## Objetos de conservación socioambiental

Un objeto de conservación socioambiental es un elemento de importancia focal para la conservación de especies (especies, ecosistemas o sistemas naturales, recursos hídricos, medios de vida, entre otros), con una contribución relevante al funcionamiento de los ecosistemas o en la generación de servicios ecosistémicos prioritarios, de los cuales se benefician las comunidades humanas, y que tienen un papel relevante en vulnerabilidades climáticas identificadas (PR-PNUD-CONANP, 2019).

La selección de los objetos de conservación socioambiental de un área natural protegida, se realiza a partir de un proceso participativo y del conocimiento local, mediante el análisis integral de una cadena de sustento, donde se consideran variables que intervienen en el proceso social y económico de las comunidades (PR-PNUD-CONANP, 2019).

## Índice NDVI

Las imágenes multiespectrales de detección remota contienen una combinación de bandas que crean una imagen compuesta que se utilizara para la interpretación y el análisis. Con imágenes multiespectrales, las bandas individuales en el compuesto de bandas se pueden transformar para que ciertas características y patrones se destaquen mejor. Las nuevas imágenes generadas de esta manera mejoran las representaciones de objetos terrestres como la vegetación (Huang *et al.*, 2021).

Kriegler *et al.* (1969) propusieron una transformación de bandas simple: la radiación del infrarrojo cercano (Near infrared = NIR) menos la radiación roja (Red) dividida por la radiación del infrarrojo cercano más la radiación roja (Ecuación 1), lo que da como resultado una imagen recientemente simplificada llamada Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI). Este índice es atractivo debido a su capacidad para delimitar la vegetación y el estrés vegetativo, lo que tiene un gran atractivo para en la agricultura comercial y los estudios de uso de la tierra.

$$NDVI = \frac{NIR - Red}{NIR + Red} \quad 1$$

El propósito general de usar NDVI es mejorar el análisis de la información sobre la vegetación con datos de sensores remotos. Los estudios han demostrado que el NDVI es eficaz para diferenciar la sabana, el bosque denso, los campos no forestales y agrícolas y para determinar los tipos de bosque siempreverde (coníferas) frente a los de bosque estacional, y para estimar varias propiedades de la vegetación, incluido el índice de Área Foliar (LAI), biomasa, concentración de clorofila en hojas, productividad vegetal, cobertura vegetal fraccional y estrés de las plantas (Huang *et al.*, 2021).

## Índice QBR

De las funciones de los sistemas ribereños la más importante tiene relación con su carácter de buffer biológico, mediante el cual se minimiza la entrada al río de contaminación difusa proveniente de terrenos agrícolas adyacentes. Además, mantiene una elevada biodiversidad

y productividad, proporcionando refugio y alimento a un gran número de organismos (Suárez *et al.*, 2004). Por otro lado, controlan el régimen de temperaturas y crecidas de las aguas del cauce (Hattermann *et al.*, 2006) y evitan un incremento en la escorrentía superficial lo que contribuye a mantener un buen nivel de nutrientes en el suelo (Pimentel y Kounang, 1998).

A pesar de lo anterior, no existen muchas propuestas metodológicas para estimar la calidad de las áreas ribereñas utilizando índices de fácil manejo y de aplicación sencilla (Colwell, 2007), ya que los índices que evalúan la calidad de este sistema solo se basan en las propiedades del agua, las comunidades biológicas y sus características en tamaño y forma (Raven *et al.*, 1998).

Munné *et al.* (1998) diseñaron un índice que mide la calidad de la vegetación ribereña in situ llamado “QBR” que tiene su origen del acrónimo catalán “*Qualitat del Bosc de Ribera*” (calidad del bosque de ribera). Este índice se basa en la recopilación de diferentes atributos y componentes del área ribereña, considerando cuatro secciones: 1) grado de cobertura de la cubierta vegetal, 2) estructura de la vegetación, 3) calidad de la cubierta vegetal y 4) grado de naturalidad del canal fluvial. Cada una de estas secciones puede ser calificada entre 0 y 25 puntos, valores que luego serán sumados para obtener el valor del índice QBR que oscilara entre 0 y 100.

## Caudal ecológico

Desde el punto de vista ecológico, las cuencas hidrográficas mexicanas incluyen una rica variedad de ecosistemas acuáticos como ríos, lagos, lagunas, cenotes y humedales; algunos de ellos internacionalmente reconocidos por ser sitios “Ramsar” (sitios de importancia internacional para la conservación de la diversidad biológica, según el acuerdo intergubernamental firmado en 1971 para la protección de los humedales generador de hábitats para la vida silvestre). Este ecosistema tiene requerimientos hídricos específicos, no considerados en la administración del agua por instancias oficiales y, sostiene una diversidad de hábitats y especies que están física y biológicamente articulados al agua y su régimen dinámico (CONAGUA-WWF-AGRA, 2012). En el aspecto ecológico, es ineludible calcular el volumen requerido para la conservación de los ecosistemas, y por lo tanto de los servicios ambientales que brinda el propio ser humano. La Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), en coordinación con la Alianza WWF del World Wildlife Foundation y la Fundación Gonzalo Río Arronte, identificaron las cuencas del país con disponibilidad de agua y que, por su riqueza biológica, importancia ecológica y aun con presiones hídricas, presentan condiciones favorables para establecerse como “Reservas de Agua”, que garanticen los flujos hídricos para la protección ambiental bajo los términos de la Ley de Aguas Nacionales.

Antes de esa iniciativa no existía ninguna norma que permitiera la reservación de un volumen de escurrimiento de cualquier cuenca en México, con fines de conservación ecológica. Este vacío se resolvió a partir del establecimiento de la norma NMX-AA-159-SCFI-2012 (Gobierno de México, 2012) para la determinación del caudal ecológico, aplicable en el país para aguas tanto de condiciones prístinas, o de aquellas bajo una fuerte presión extractiva o ambiental. Esta norma, resultado del trabajo colaborativo de instituciones gubernamentales,

académicas y organizaciones de la sociedad civil, contiene las especificaciones que deben de aplicarse en los estudios para determinar el régimen del caudal ecológico en corrientes o cuerpos de agua nacionales, a nivel de cuenca hidrológica. Esta norma parte del reconocimiento de las condiciones naturales del régimen hidrológico, su estado de alteración y las posibilidades de conservación o de recuperación de los componentes del régimen, para alcanzar o mantener un estado ecológico deseado u objetivo ambiental (de la Lanza *et al.*, 2018).

## Distribución normal

Un conjunto de datos de una variable de estudio, generados de un proceso de investigación, aporta información que, después de corregir y detectar valores anómalos (que será importante eliminarlos o descartarlos), ayuda a realizar inferencias sobre los factores que sobre dicha variable influyen. En segundo lugar, sin duda será importante describir la distribución de los valores y las medidas de tendencia central básicas que muchas veces coadyuvan a un análisis exploratorio rápido y simple (Péteargas y Pita, 2001).

En este sentido la distribución normal adquiere relevancia. Esta fue reconocida por primera vez por el francés Abraham de Moivre (1667-1754). Posteriormente, Carl Friedrich Gauss (1777-1855) elaboró desarrollos más profundos y formulo la ecuación de la curva; de ahí que también se le conozca como la “campana de Gauss”. La distribución de una variable normal está completamente determinada por dos parámetros, su media y su desviación estándar, denotadas generalmente por  $\mu$  y  $\sigma$  (Péteargas y Pita, 2001).

Las propiedades a destacar para esta distribución son:

- I. Tiene una única moda, que coincide con su media y su mediana.
- II. La curva normal es asintótica al eje de las abscisas. Por ello, cualquier valor entre  $-\infty$  y  $+\infty$  es teóricamente posible.
- III. Es simétrica con respecto a su media  $\mu$ . Según esto, para este tipo de variables existe una probabilidad de un 50% de observar un dato mayor que la media, y un 50% de observar un dato menor.
- IV. La distancia entre la línea trazada en la media y el punto de inflexión de la curva es igual a una desviación típica ( $\sigma$ ). Cuanto mayor sea  $\sigma$ , más aplanada será la curva de la densidad.
- V. El área bajo la curva comprendida entre los valores situados aproximadamente a dos desviaciones estándar de la media es igual a 0.95. En concreto, existe un 95% de posibilidades de observar un valor comprendido en el intervalo  $(\mu - 1.96\sigma; \mu + 1.96\sigma)$ .
- VI. La forma de la campana de Gauss depende de los parámetros  $\mu$  y  $\sigma$ . La media indica la posición de la campana, de modo que para diferentes valores de  $\mu$  la gráfica es desplazada a lo largo del eje horizontal. Por otra parte, la desviación estándar determina el grado de apuntamiento de la curva. Cuanto mayor sea el valor de  $\sigma$ , más se dispersarán los datos en torno a la media y la curva será más plana. Un valor pequeño de este parámetro indica, por tanto, una gran probabilidad de datos cercanos al valor de la media de la distribución.

Como se deduce de este último apartado, no existe una única distribución normal, sino una familia de distribuciones con una forma común, diferenciadas por los valores de su media y su varianza. De entre todas ellas, la más utilizada es la distribución normal estándar, que corresponde a una distribución de media 0 y varianza 1 (Piña, 2011).

La propiedad explicada con anterioridad, resulta especialmente interesante en la práctica, ya que para una distribución  $N(0,1)$  existen tablas publicadas, a partir de las que se puede obtener de modo sencillo la probabilidad de observar un dato menor o igual a un cierto valor  $z$ , y que permite resolver preguntas de probabilidad acerca del comportamiento de variables de las que se sabe o asume que siguen una distribución aproximadamente normal (Piña, 2011).

## Normalización de datos

Al iniciar el análisis estadístico de una serie de datos, y después de la etapa de la detección y corrección de errores, un primer paso consiste en describir la distribución de las variables estudiadas y, en particular, de los datos numéricos. Además de las medidas descriptivas correspondientes, el comportamiento de estas variables puede explorarse gráficamente de un modo muy simple (Pétegas y Pita, 2001). La normalización de datos es necesaria para adecuarlos a los problemas de clasificación, debido a que estos no están definidos en las mismas escalas numéricas y en algunos casos siguen diferentes distribuciones (Gil *et al.*, 2014; Anil *et al.*, 2005; Snelick *et al.*, 2005).

El estadístico  $Z$  se observa en la Ecuación 1, donde  $\mu$  y  $\sigma$ , son respectivamente la media y desviación estándar poblacional (Piña, 2011).

$$Z = \frac{x - \mu}{\sigma} \quad 1$$

## Estadística no paramétrica

Las pruebas no paramétricas son una alternativa a las pruebas paramétricas cuando no se cumplen los supuestos o las condiciones para realizarlas. Las pruebas no paramétricas son procedimientos estadísticos relativamente sencillos de aplicar, con los cuales se hacen contrastes de hipótesis para una o varias poblaciones. Estas pruebas no exigen que los datos recopilados tengan una distribución normal o una distribución específica; sin embargo, estas pruebas presentan algunas desventajas frente a las pruebas paramétricas, porque en muchos casos ignoran ciertas porciones de información de la población y no tiene la eficiencia que se observa en las pruebas paramétricas (Caycho *et al.*, 2019).

## Pruebas de dos muestras

Las pruebas de dos muestras independientes comparan dos grupos de casos con una variable. Hay disponibles cuatro pruebas para ver si las dos muestras independientes (grupos) vienen de la misma población, y son las  $U$  de Mann-Whitney (Mann y Whitney, 1947), la  $Z$  de Kolmogorov-Smirnov, las reacciones extremas de Moses (Moses, 1952) y la prueba de

rachas de Wald-Wolfowitz (Ferrera y Alarcón, 2001; Armitage y Berry, 1997; Visauta, 1997; Álvarez, 1996; Pérez, 2001).

La U de Mann-Whitney es la más popular de las pruebas para el estudio de dos muestras independientes. Es equivalente a la prueba de suma de rangos de Wilcoxon y a la prueba de dos grupos de Kruskal-Wallis. Es la alternativa no paramétrica a la comparación de dos promedios independientes a través de la  $T$  de Student. Se utiliza cuando se desea efectuar la comparación de dos grupos en quienes se les ha medido una variable cuantitativa continua que no tiene una distribución normal o cuando la variable es de tipo cuantitativa discreta (Gómez *et al.*, 2003). Tiene tres asunciones: 1) La variable independiente es dicotómica, y la escala de medición de la variable dependiente es al menos ordinal; 2) Los datos son de muestras aleatorias de observaciones independientes de dos grupos independientes, por lo que no hay observaciones repetidas; 3) La distribución de la población de la variable dependiente para los grupos independientes comparte una forma similar no especificada, aunque con una posible diferencia en las medidas de tendencia central. Las observaciones de ambos grupos se combinan y se acomodan, con el rango promedio en el caso de pares. El número de pares debe ser pequeño en relación al número total de observaciones. Si las poblaciones son idénticas en situación, los rangos deben mezclarse al azar entre las dos muestras. Se calcula el número de veces que una cuenta del grupo 1 precede una cuenta del grupo 2, y el número de veces que una cuenta del grupo 2 precede una cuenta del grupo 1. La U de Mann-Whitney es el número más pequeño de estos dos números (Gómez *et al.*, 2003).

## Prueba de Kruskal-Wallis

Un método no paramétrico análogo al ANOVA unidireccional, se denomina prueba de Kruskal-Wallis, esta también se llama ANOVA no paramétrico, y fue propuesta por W.H. Kruskal y W.A. Wallis en 1952 como una extensión de la prueba de suma de rangos de Wilcoxon. Este test contrasta la hipótesis nula de que todas las poblaciones  $k$  tienen la misma distribución de probabilidad, contra la hipótesis alternativa de que las distribuciones difieren en ubicación. La ventaja de la prueba de Kruskal-Wallis sobre la prueba  $F$  es que se necesitan menos suposiciones sobre la naturaleza de las poblaciones muestreadas, y la prueba de Kruskal-Wallis se pueden aplicar a datos de distribuciones no normales o desconocidas (Jiang, 2022).

### Supuestos de la prueba Kruskal-Wallis

- Las muestras  $k$  son aleatorias e independientes.
- Hay al menos cinco observaciones en cada muestra para permitir una aproximación a la distribución  $\chi^2$ .
- Las observaciones se pueden clasificar.

# Capítulo 2

## Antecedentes

Existen evidencias que confirman en una escala de temporalidad correspondiente a tres lustros, que existe una disminución de la calidad ambiental en ecosistemas ribereños dentro y en los alrededores del Parque Nacional Iztaccíhuatl-Popocatepetl (PN-IP) (Hernández y Granados, 2006; CONANP, 2013; Guerra y Cruz, 2017; Mena, 2018). La disminución de la superficie de infiltración por pérdida de masa forestal, la acelerada expansión de la mancha urbana que demanda el recurso y la contaminación de los cuerpos de agua, son las principales causas por las cuales los ecosistemas ribereños del Parque Nacional Iztaccíhuatl-Popocatepetl se encuentran en riesgo, dejando un vacío en el rol ecológico que desempeñan estos ecosistemas.

Se han realizado diversos estudios en variadas disciplinas en el PN-IP, sin embargo, pocos se han referido al diagnóstico de la calidad de los ecosistemas ribereños. A manera de evidencia, se mencionan algunas investigaciones que dan paso a evaluar la calidad de los sistemas riparios:

En un estudio realizado por Guerra y Cruz (2017), donde evaluaron la calidad del agua en sistemas ribereños del Parque Nacional Iztaccíhuatl-Popocatepetl y su zona de influencia, se encontró que las variables evaluadas en el agua con mayor sensibilidad a los cambios en el uso de suelo fueron: la conductividad eléctrica, alcalinidad, dureza total, fósforo total, oxígeno disuelto, pH, nitratos, amonio y DBO.

En otro trabajo realizado por Ayala (2011) donde estudio variables, tanto de agua como de suelos ribereños en el PN-IP. Para suelos de ribera estableció las siguientes variables: textura, temperatura, pH potencial, cantidad de fósforo disponible, y relación C/N; mientras que para el agua en arroyos y ríos fueron: dureza total, dureza de calcio, alcalinidad, conductividad eléctrica, contenido de amonio, demanda química de oxígeno y oxígeno disuelto. Estos datos, tienen el potencial para ser utilizados para evaluar los ecosistemas ribereños en el PN-IP.

En otro estudio donde se analizaron los contenidos de carbono en ecosistemas ribereños del PN-IP y su zona de influencia, realizado por Santiago (2018), se reportó que los contenidos de carbono en biomasa vegetal (árboles y pasto), en carbono de la biomasa microbiana y del carbono orgánico en el suelo, fueron variables robustas en su estudio para evaluar los contenidos de carbono en suelo y vegetación, además que se encontraron los mayores

contenidos totales de carbono en zonas conservadas y menor cantidad de carbono en zonas degradadas.

En un estudio realizado por Cornejo (2016), se clasificó a los recursos hídricos en la subcuenca de San Martín Texmelucan. La autora encontró cuatro variables que intervienen en la formación de los grupos para su clasificación, las cuales son: oxígeno disuelto ( $O_2$ ), fosfatos ( $PO_4^{3-}$ ), alcalinidad y nitratos ( $NO_2^-$ ).

También, a nivel mundial ha surgido un interés por el estudio de los ecosistemas ribereños, donde se ha indagado el estudio de sus funciones ecológicas y paisajísticas, además del mejoramiento de métodos y técnicas empleadas para su estudio. Por mencionar algunos estudios, se encuentran los de Ye *et al.* (2019), donde investigaron la dinámica de nutrientes y materia orgánica de suelo cercanos a un embalse del río Yangtze. El estudio de Zhao *et al.* (2020), donde analizaron la distribución espacial de los suelos ribereños y la vegetación en el río Beijiang. Otras investigaciones que hablan sobre ecosistemas riparios, son los estudios de Fu *et al.* (2021), donde evaluaron cuatro aspectos a la productividad primaria neta (dinámica, estabilidad, resistencia y potencial máximo) y su relación con proyectos de rehabilitación en la cuenca del río Tarim en Xinjiang, China. También resaltan los estudios de Belcore y Latella (2022) donde utilizan vehículos aéreos no tripulados para monitorear la vegetación en corredores ribereños en Italia, y obtener información sobre el volumen y salud de la vegetación.

Además de lo expuesto, es altamente preocupante que, en el actual Programa de Manejo del Parque Nacional Iztaccíhuatl-Popocatepetl, a pesar de su importancia ecológica y económica, los ecosistemas ribereños no son considerados como objetos de conservación, además de que tampoco se han determinado criterios de conservación o recuperación para cuerpos de agua, que se sustenten en investigaciones integrales de las interacciones suelo-agua-vegetación que se presentan desde cuenca arriba.

## Planteamiento del problema

¿Es posible definir la calidad ambiental de sistemas ribereños en función del índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI) y el índice de calidad de bosque de ribera (QBR)?

Una vez evaluados algunos parámetros físicos y químicos en agua y suelos. ¿Es posible emitir un diagnóstico de la calidad ambiental de zonas ribereñas?

## Justificación

El Parque Nacional Iztaccíhuatl-Popocatepetl (PN-IP) se encuentra ubicado en el centro de la región más poblada de México, es considerado como un territorio invaluable por su multifuncionalidad ecológica, social y cultural. Por los servicios ambientales que proporcionan a la sociedad, que además son la base para el desarrollo económico dentro y en

los alrededores de esta área natural protegida, es imprescindible realizar de manera inmediata un diagnóstico de los ecosistemas ribereños del PN-IP, utilizando parámetros medibles como del índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI), el índice de calidad del bosque de ribera (QBR) y propiedades físicas y químicas medidas en agua y suelo.

## Hipótesis

La transformación de los ecosistemas ribereños, expresada en términos de reducción de la calidad del agua, suelo y la vegetación ribereña, es producto de los cambios de uso de suelo, por lo que, los valores de parámetros físicos y químicos en agua y suelo ribereño conjuntamente con los valores de NDVI y QBR, son indicadores suficientemente sensibles para identificar las diferencias en la calidad de los ecosistemas ribereños del Parque Nacional Iztaccíhuatl-Popocatepetl.

## Objetivos

### General

Evaluar la calidad ambiental de sistemas ribereños de un sistema fluvial de régimen permanente de la subcuenca del río Nexapa, en el Parque Nacional Iztaccíhuatl-Popocatepetl (PNI-P) y su zona de influencia, tomando como base al índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI), al índice de calidad del bosque de ribera (QBR), algunos parámetros físicos y químicos, tanto para agua como para suelo y los cambios de uso de suelo.

### Particulares

- Examinar en las bases de datos los siguientes parámetros: temperatura del agua, conductividad eléctrica, pH, oxígeno disuelto, alcalinidad, nitritos, nitratos, amonio, fósforo total, ortofosfatos y demanda bioquímica de oxígeno del agua, obtenidos de investigaciones realizadas en el Laboratorio de Calidad del Agua y Ecohidrología de la FES Zaragoza, UNAM.
- Examinar las bases de datos de investigaciones realizadas en el Laboratorio de Fertilidad de Suelos y Nutrición Vegetal de la FES Zaragoza, UNAM y se utilizaron las evaluaciones realizadas de los siguientes parámetros: densidad aparente, pH activo, conductividad eléctrica, carbono orgánico, nitrógeno total, fósforo disponible y relación C/N en suelos ribereños de cada sitio de estudio.
- Examinar las bases de datos de la Línea de Investigación Relaciones Suelo-Agua-Vegetación en el Manejo de Cuencas de la FES Zaragoza, UNAM para obtener datos del índice de calidad de bosque de ribera (QBR) en el PNI-P.
- Evaluar el comportamiento de los parámetros de agua, suelo y vegetación y su efecto en la calidad de los sistemas ribereños del Parque Nacional Iztaccíhuatl-Popocatepetl.
- Analizar los índices NDVI de los sistemas ribereños del PNI-P mediante un SIG e imágenes satelitales de la región de estudio.
- Proponer una clasificación de calidad ambiental de los sistemas ribereños, utilizando la información generada y analizada de las bases de datos, de la caracterización ecológica y de

las variables robustas generadas en el análisis estadístico a partir de los análisis químicos de agua y suelo realizados en cada sitio estudiado.

## Metodología

### Área de estudio

#### *Parque Nacional Iztaccíhuatl-Popocatepetl*

El Parque Nacional Iztaccíhuatl-Popocatepetl, (PNI-P) se encuentra en la parte centro-oriental del Eje Volcánico Transversal. Ocupa parte de la Sierra Nevada en su porción sur y de la Sierra de Río Frío en su porción norte. Se localiza entre las siguientes coordenadas geográficas: límite extremo norte  $19^{\circ} 28' 2''$  N y  $98^{\circ} 40' 18''$  W; límite extremo oeste  $19^{\circ} 20' 29''$  N y  $98^{\circ} 46' 40''$  W; límite extremo este  $19^{\circ} 16' 16''$  N y  $98^{\circ} 37' 28''$  W; límite extremo sur  $19^{\circ} 14' 36''$  N y  $98^{\circ} 40' 27''$  W. Abarca una superficie de 39 mil 819.086 hectáreas dividida entre los estados de México, con 28 mil 307.487112 hectáreas (71.09%); Puebla con 11 mil 072.918088 hectáreas (27.81%) y Morelos con 438.6808 hectáreas (1.10%) (Figura 7) (Bobbink *et al.*, 2003; Ayala, 2011; CONANP, 2013).

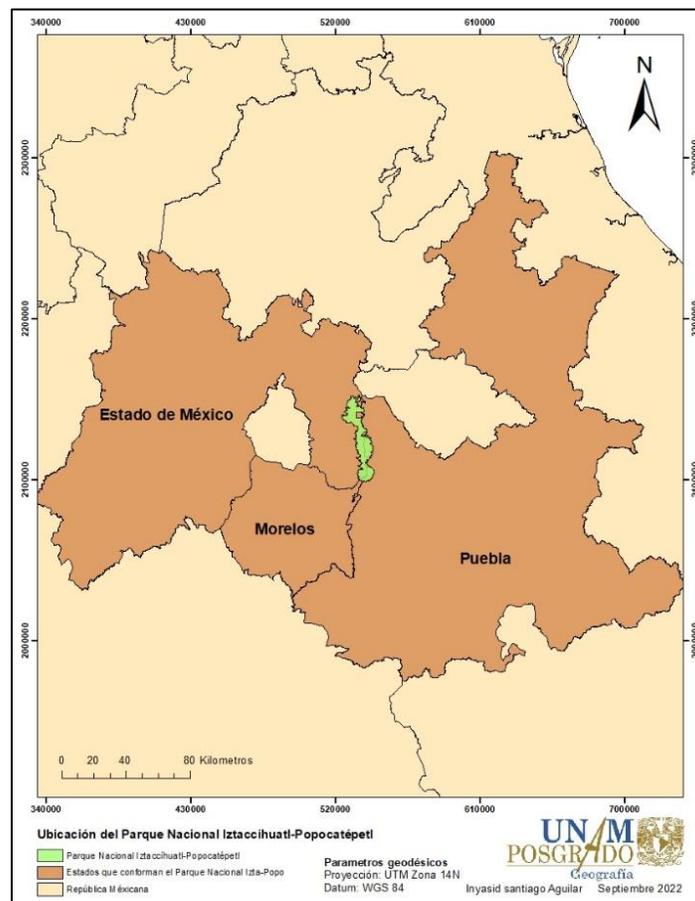


Figura 7. Mapa de ubicación del Parque Nacional Iztaccíhuatl-Popocatepetl, elaboración propia con base en (INEGI, 2021 y CONANP, 2022).

La ubicación del Parque Nacional Iztaccíhuatl-Popocatepetl, permite reconocer su importancia y lo indispensable que son sus ecosistemas para la generación de servicios ambientales en beneficio de la región más densamente poblada del país. Sus montañas y bosques captan y filtran el agua que abastece a dos importantes cuencas hidrológicas: la del Valle de México y la del alto Balsas, al mismo tiempo que generan una vigorosa red hidrográfica fundamental para el suministro de agua de las poblaciones, zonas industriales y valles agrícolas vecinos. La extensión de estos bosques es clave también para la captación de dióxido de carbono, la generación de oxígeno y la regulación del clima, son unos auténticos pulmones del centro del país (Ayala, 2011).

Por otro lado, la posición que ocupa el parque en el centro del Eje Volcánico Transversal, le confiere una serie de características propias de la confluencia de las regiones neártica y neotropical, como son la alta biodiversidad y la presencia de endemismos. Aunado a esto, su marcado gradiente altitudinal, que va de los 3600 m a los 5500 m, favoreció el desarrollo en poco espacio de una gran diversidad de ecosistemas: bosques mixtos de pino, oyamel y encino, pradera de alta montaña (muy rara en un país intertropical) y glaciares (Ayala, 2011; Guerra y Cruz, 2017).

En este Parque Nacional habitan un total de 467 especies, de las cuales 23 son endémicas y 30 se encuentran bajo algún criterio de protección en la NOM-059-SEMARNAT-2001. Se pueden encontrar especies únicas en el planeta, como el conejo zacatuche o teporingo, y es refugio de animales como el venado cola blanca, el lince, la zorra gris, el cacomixtle y el coatí. Fue catalogada por la CONABIO como área de importancia para la conservación de aves y región prioritaria para la conservación en México dada su alta diversidad; su función como corredor biológico, la presencia de endemismos, su importante función como centro de origen y diversificación natural, así como centro de domesticación o mantenimiento de especies útiles (CONANP, 2013).

Dentro de los límites del parque y en los confines de su área de influencia, es posible observar cuatro grandes fajas altitudinales, en las cuales se observa el impacto causado por los diferentes grados de aprovechamiento de los recursos naturales a través del tiempo, y que actualmente definen el patrón de actividades productivas de las comunidades:

- Sierra: Se extiende altitudinalmente de 2700 a 4000-5000 m. Separa la cuenca del Valle de México de la del Balsas. Es la zona cubierta actualmente por la vegetación arbórea, pero que en su límite inferior muestra marcadamente los efectos del deterioro en su riqueza biológica, causado por la explotación forestal intensiva, manifestando diferentes niveles de perturbación y daño, es la zona que actualmente debe ser objeto de mayor atención en cuanto a la amenaza actual y potencial (Hernández y Granados, 2006).
- Zona de erosión inducida: Se ubica entre los 2500 y 2750 m. Es un área que, por su acceso relativamente fácil y la cercanía con las comunidades, actualmente muestra los devastadores efectos por el uso indiscriminado de los recursos naturales. Las medidas que hoy se tomen para el rescate y el cambio en la manera de aprovechar los recursos, de esa y otras áreas similares, dependerá en gran parte el desarrollo sustentable de la región. Somontano, submontano o pie de monte: Es la zona en la que los cerros descienden a la llanura y en la

que se desarrollan gran parte de las actividades productivas. Los principales cultivos en pequeña escala son frutales, hortalizas, especies forrajeras y como cultivos de subsistencia maíz y frijol, principalmente. Otra de las actividades de gran impacto en esta zona es la ganadería, que se desplaza cada vez con más frecuencia a mayores altitudes (Hernández y Granados, 2006).

- Somontano. Es la zona en la que los cerros descienden a la llanura y en la que se desarrolla gran parte de las actividades productivas. Los principales cultivos en pequeña escala son diversos frutales, algunas hortalizas y especies forrajeras y como cultivos de subsistencia el maíz y el frijol, principalmente. Otra de las actividades de gran impacto en esta zona, pero que se desplaza cada vez con más frecuencia y a mayores altitudes es la ganadería.
- Llanura: Ubicación de asentamientos humanos y que, por su cercanía con la ciudad de México, principalmente, se ve sometida a fuertes presiones por el uso de suelo para la construcción de casas y servicios inherentes al desarrollo urbano, pero cuyos primeros y permanentes efectos recaen sobre los recursos naturales y la organización comunitaria tradicional (Hernández y Granados, 2006).

**Hidrología.** Los recursos hídricos que nacen en el parque nacional son originados principalmente por el deshielo de los glaciares la fusión de nieve y la precipitación pluvial abundante en la región, por arriba de los 1,000 mm anuales. Las corrientes superficiales pueden ser permanentes o intermitentes, éstas últimas son innumerables durante la época lluviosa. También se produce gran filtración de agua que va a alimentar corrientes subterráneas, los ecosistemas de la Sierra efectúan los procesos que permiten la recarga de acuíferos y mantos freáticos que abastecen buena parte de la Zona Metropolitana de la Ciudad de México, del Valle de Puebla-Tlaxcala y del valle Cuautla-Cuernavaca (CONANP, 2013).

La distribución altitudinal de los recursos hídricos se caracteriza por una pendiente pronunciada en su curso alto, arriba de los 4500 m, cada vez más atenuada conforme descienden. A la altura del parteaguas, la precipitación cae en forma de nieve o granizo, ello permite la formación de hielo o glaciares (CONANP, 2013). Desde 1958, 12 glaciares con una superficie aproximada de 1.2 km<sup>2</sup> han sido documentados, pero en 1982 solo ocho glaciares fueron reconocidos, el resto se extinguieron, lo que representa una pérdida de 0.2 km<sup>2</sup> (Delgado, 1996).

Debajo de los 4500 m y hasta los 4000 m los escurrimientos son incipientes, a partir de los vértices de los glaciares donde comienza el deshielo; en esta zona aparecen los primeros manantiales. Por debajo de los 4000 m los arroyos adquieren velocidad y volumen y los manantiales son más abundantes. Debajo de los 3500 m las aguas ejercen una fuerte erosión en el terreno ya que su caudal es la suma de los deshielos y las precipitaciones. Entre los 2500 y los 2300 m los arroyos depositan todos los azolves arrastrados a lo largo de su trayectoria, formando abanicos aluviales. En esta zona encontramos la mayoría de los aprovechamientos del agua para regadío agrícola, generación de energía eléctrica y uso doméstico (CONANP, 2013).

**Clima.** Por la latitud en la que se halla esta región se ve afectada en la época fría del año por sistemas de tiempo propios de las latitudes medias, como frentes fríos y masas de aire polar continental; en el verano influyen los sistemas meteorológicos propios de la zona

tropical como los huracanes y las ondas tropicales. Debido a su topografía y ubicación, el parque tiene una variedad de climas que van del templado húmedo a los climas frío y muy frío; la temperatura disminuye con la altura a razón de 0.68 °C por cada 100 m (CONANP, 2013).

**Edafología.** De acuerdo con la clasificación de la Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO) y basado en la Unión Internacional de Ciencias del Suelo (IUSS, 2007), las unidades de suelo presentes en el área del parque son:

- **Leptosoles:** Suelos someros, con menos de 0.1 m de espesor, formados sobre tepetates y otras rocas volcánicas (andesita, riolita, dacita) que conservan las características del material parental, generalmente son poco desarrollados debido a la velocidad de percolación del agua que impide el establecimiento de algún tipo de vegetación, lo que aunado al clima presente a altitudes mayores de 4000 m dificulta el desarrollo del suelo.
- **Regosoles:** del griego *rhegos*, manto. Son suelos formados a partir de material suelto como arena, grava o piedra; en el Parque se localizan a altitudes por debajo de los 3900 m y normalmente son pobres en materia orgánica y nutrientes.
- **Andosoles:** del japonés *an*, oscuro y *do*, suelo. Se derivan de cenizas volcánicas recientes, por lo que son suelos ligeros con alta retención de humedad y buen contenido de nutrientes, así como con un alto contenido de materia orgánica; pueden formar andosoles húmicos que se presentan en áreas forestales poco alteradas y también andosoles vítricos en zonas con vegetación de coníferas cuando presentan más del 60% de vidrios, ceniza volcánica y texturas gruesas.
- **Cambisoles:** del latín *cambiare*, cambiar. Son suelos mejor desarrollados, con horizontes A y B bien definidos, pero pobres en contenido de nutrientes; presentan potencial para el desarrollo forestal con adecuadas prácticas de manejo para la conservación de suelo y captación de humedad.
- **Fluvisoles:** del latín *fluvius*, río. Son suelos formados en cañadas, escurrimientos y zonas de depósitos de material reciente; de textura gruesa, su fertilidad es baja debido al escaso contenido de nutrimentos (IUSS, 2007).

**Geología.** El Eje Volcánico Transversal se origina por un sistema de fragmentación o fracturamiento de tipo ortogonal. En la parte central del Eje, la disposición del relieve se debe, en un inicio, a la formación de una gran falla a finales del Terciario y que continúa en el Cuaternario formando un desnivel de mil metros entre el Altiplano del Norte y la Fosa del Balsas al sur (Mooser, 1972). El extenso fallamiento, asociado al vulcanismo, trajo como consecuencia (entre otras) la formación de algunos lagos en el Plioceno y el Pleistoceno, convirtiéndose en el paisaje característico del centro del país (Ferrusquía, 1998).

Esta enorme fractura reciente determina la estructuración del relieve, la distribución de la hidrografía y las características climáticas, tanto al norte como al sur del Eje Volcánico. De esta manera, la aparición progresiva de los volcanes se convirtió en una enorme presa natural a través del país que impidió el drenaje de la parte central hacia el Pacífico (Fries, 1960).

Las primeras manifestaciones volcánicas en el área de la Cuenca de México suceden a mediados del Oligoceno superior (alrededor de 30 millones de años), cuando se constituyeron las bases de la Sierra Nevada, en un proceso que se conoce como formación Xochitepec, el

cual consiste en la acumulación de productos volcánicos por alrededor de 20 millones de años y que han formado estratos de considerable espesor, así como afloramientos en grandes superficies que se extienden hasta las aplanadas cumbres situadas al noreste de la Iztaccíhuatl (CONANP, 2013).

El Terciario es la base del relieve actual como producto de la actividad volcánica y el flujo de lavas. La sierra representa una unidad que alcanzó su forma y desarrollo actuales debido a la múltiple sobre posición de sistemas volcánicos sucesivos, en los que coexisten los flujos de erupciones andesíticas arrojadas por los grandes conos, y que se caracterizaron por su explosividad y la efusión abundante de lavas basálticas emitidas por los volcanes pequeños. Por esto, los depósitos de material clástico andesítico se intercalan en algunas regiones con los malpaíses basálticos (CONANP, 2013).

El Cuaternario (dos millones de años a la fecha), se caracterizó por movimientos tectónicos producidos por la fractura Clarión, lo que aunado a un clima lluvioso y al desarrollo de glaciares, dio origen a un proceso de erosión muy acentuado en las partes elevadas y a una gradación de depósitos aluviales, lacustres y fluviales en las partes bajas, que se conocen como formación Clástica Aluvial del Cuaternario. Con estos cambios generales, el relieve se vio afectado debido a la erosión causada por los escurrimientos superficiales que cavaron profundos barrancos, así como por los movimientos tectónicos que crearon fracturas por las que surgieron infinidad de volcanes y flujos de lava que lograron acumulaciones de 2 mil metros y aun de mayor espesor (CONANP, 2013).

Durante el Cuaternario, los primeros movimientos de la fractura Clarión originaron la Iztaccíhuatl y el Ventorrillo, hoy día el Popocatepetl, los cuales están formados por lavas de andesita porfirítica de piroxeno  $[Ca,Mg,Fe,Mn,Na,Li)(Al,Mg,Fe,Mn,Cr,Sc,Ti)(Si,Al)_2O_6]$ . Los derrames superiores de estos edificios consisten en una andesita de coloración rosácea de hornblenda  $[(Ca,Na)_{2-3}(Mg,Fe,Al)_5Si_6(Si,Al)_2O_{22}(OH)_2]$ . El espesor y la disposición estructural de los derrames son variables, de acuerdo con la topografía sobre la que se asentaron. Los derrames dacíticos y riódacíticos constituyen la unidad del Popocatepetl, pero su base está cubierta por abanicos aluviales que en su parte sur muestran un espesor considerable (CONANP, 2013).

La actividad de la Iztaccíhuatl cesó antes de la última glaciación mayor, mientras que su vecino el Popocatepetl continuó en erupción (Mooser, 1958), con actividad más reciente a partir de 1994. De acuerdo con Macías y Siebe (2005), el Popocatepetl, está formado por tres edificios volcánicos que responden a distintas fechas de origen, siendo la formación del más antiguo a mediados del Pleistoceno. El primer edificio formado fue el volcán Nexpayantla (Mooser, 1958) o volcán primitivo (Robin, 1984), mediante la emisión de una serie de derrames andesíticos y dacíticos. Una erupción ocurrida hace 200 mil años produjo el colapso de una parte de este volcán y la formación de una caldera. Al interior de esta caldera se inició la construcción de un nuevo volcán conocido como El Fraile, a través del emplazamiento de derrames andesíticos y dacíticos. Este último volcán colapsó hace 50 mil y 30 mil años, según (Boudal y Robin, 1989), debido a una erupción tipo Bezymianny, la cual destruyó la parte meridional del volcán. Estos autores estimaron un volumen excesivo para este depósito de

28 kilómetros cúbicos. La erupción generó una avalancha de escombros que se emplazó hacia el sursuroeste del cráter y fue seguida por la formación de una erupción pliniana que depositó una pómez de caída de color blanco hacia el sur del volcán y flujos piroclásticos. Después de este evento, inició la formación del cono moderno conocido como Popocatepetl. La mayor parte de los estudios geológicos realizados durante la última década han sido impulsados por la reactivación del Popocatepetl (Siebe *et al.*, 1995a; Siebe *et al.*, 1995b; Siebe *et al.*, 1996a; Siebe *et al.*, 1996b; Siebe *et al.*, 1996c). Las erupciones de Popocatepetl de los últimos 25,000 años han cubierto de cenizas volcánicas y pómez (tefras) a buena parte de la Sierra Nevada, por lo cual estos depósitos piroclásticos son los materiales parentales de los suelos por debajo de los 400 m.

**Geomorfología.** La Faja volcánica Transmexicana es un arco continental del mioceno al Cuaternario que se extiende por más de 1,000 km desde la costa del Pacífico hasta la costa del Golfo de México (Siebe y Macías, 2006; Demant, 1982); sobre ella se encuentra la tercera cumbre más alta del país: la Iztaccíhuatl (5,220 m). Muy cerca, a 14 kilómetros hacia el sur, se erige el simétrico cono del volcán Popocatepetl (5,450 m), la segunda cumbre más alta de México (CONANP, 2013).

El cráter del Popocatepetl no ocupa el punto más alto por ser de forma elíptica; su eje mayor mide 850 metros y su eje menor 750 metros. Tiene una profundidad de 500 metros y se encuentra taponado por los derrumbes de sus casi verticales paredes. La parte alta se llama Pico Mayor y la inferior Espinazo del Diablo (CONANP, 2013).

Las lavas de la Sierra Nevada se derivan de un mismo centro eruptivo, situado probablemente en la cima actual de la Iztaccíhuatl; el drenaje está bien desarrollado y recorre profundos barrancos. El límite norte de la Sierra Nevada se encuentra en un puerto montañoso bajo ocupado por Río Frío por donde cruza la autopista que comunica a las ciudades de México y Puebla (CONANP, 2013).

La Sierra de Río Frío está separada de la Sierra Nevada por una faja de flujos de lava que se derivaron de pequeños volcanes recientes; la red hidrográfica y el drenaje están poco desarrollados. En esta serranía se encuentran las otras cimas del parque: el Tláloc a 4120 m, el Telapón a 4060 m y el Papayo a 3600 m. El Tláloc y el Telapón se formaron en un proceso que se extiende desde el Mioceno tardío (cinco millones de años) hasta principios del Pleistoceno hace dos millones de años; mientras que el Papayo, que se erige solo entre la Iztaccíhuatl y el Telapón, es un volcán dacítico que surgió mucho tiempo después (CONANP, 2013).

Otras elevaciones notables del parque son el Yolotxóchitl (3900 m), los Potreros (3600 m) y el Tejolote (3020 m). Destaca en el extremo sureste el denominado talud de la Iztaccíhuatl que se caracteriza por contener varias estructuras cerriles de altitud considerable, como el Tlacachelo (3780 m), el Caluca (3780 m), las Ánimas (3740 m), los Coletos (3700 m), La Cruz de Carabaca (3700 m) y León (3520 m). (CONANP, 2013).

El accidentado relieve del parque tiene cañadas de fuerte inclinación que van de 25 a 50°; y laderas con pendientes suaves de entre 2 a 10°, las cuales dieron origen a la conformación de lomeríos intermontanos. En los extremos oriental (Puebla) y occidental (Estado de México) se ubican los denominados abanicos aluviales que forman lomeríos de topografía llana. Estos abanicos constituyen el sector de transición entre las montañas y la planicie baja de la Cuenca de México. En todo el parque existen también valles intermontanos, que son áreas de acumulación de materiales acarreados fluvialmente (CONANP, 2013).

**Vegetación.** El parque nacional es el remanente más importante de bosques de coníferas y praderas de alta montaña en el centro del país. Su importancia radica en la extensión de bosques en buen estado de conservación (más de 21000 hectáreas, que representan 52.72% de la superficie total del parque) y en la diversidad de su flora y fauna (CONANP, 2013).

La distribución de la vegetación en esta zona atiende a la altitud, de modo que pueden distinguirse tres pisos fundamentales de vegetación. Los bosques de coníferas son la vegetación dominante, seguidas por la pradera de alta montaña o pastizal montano y entre estas dos zonas existe un ecotono en buen estado de conservación. Una franja de aproximadamente 100 metros (50 hacia el bosque y 50 hacia el zacatonal) cuya principal característica es ser zona de transición entre las dos zonas de vegetación descritas. Las principales especies de este ecotono son la jarilla, cardo-santo, lupinus y gordolobo (Ayala, 2011).

Los pinos forman comunidades vegetales típicas de las laderas de las montañas que rodean la Cuenca de México, especialmente en el sur. Estas comunidades prosperan entre los 2350 y 4000 m de altura. Los pinos forman las comunidades más proclives a incendios forestales. Entre las especies más frecuentes en estas comunidades se encuentran: *Pinus montezumae*, *P. hartwegii*, *P. teocote*, *P. pseudostrobus* y *P. patula*. Su distribución está altamente influenciada por el gradiente altitudinal. Los bosques de pino más bajos están formados por *Pinus leiophylla*, que con frecuencia crece asociado con los encinos, formando así bosques abiertos (Ezcurra *et al.*, 2005).

Las asociaciones de bosques de encino son todavía más complejas que las de pino y se entremezclan con otros tipos de vegetación. De 2400 a 3100 m se encuentra la asociación de *Quercus laurina* con *Quercus crassifolia*, *Quercus rugosa*, *Abies*, *Arbutus*, *Juniperus* y *Pinus*. El ambiente en el que crecen los encinos es similar al de las especies de pino de las zonas más secas, y a menudo ambos géneros se encuentran juntos, formando bosques mixtos (Ezcurra *et al.*, 2005).

Hasta los 3100 m de altitud se encuentran asociaciones dominadas por *Pinus montezumae*. Forman un dosel de 20 a 30 m sobre el nivel del suelo frecuentemente asociado con los géneros *Quercus*, *Abies*, *Arbutus*, *Alnus*, *Salix* y *Buddleia* en la zona del Popocatepetl. En Zoquiapan la distribución del bosque de pino, dominado por las especies de *Pinus hartwegii* y *P. montezumae*, se asocia más a las condiciones de suelos profundos o someros, pero con bastante materia orgánica (Rzedowski, 2006).

En el Parque Nacional Iztaccíhuatl-Popocatepetl y su zona de influencia se establecen asociaciones vegetales de transición entre *Pinus* y *Abies* (2400 a 3500 m), lo que implica zonas de amplia diversidad florística y ecológica conformando rodales mixtos de *Pinus ayacahuite* con *Abies religiosa*. En esta zona de ecotono también es frecuente la asociación de *Pinus montezumae* con *Pinus hartwegii*. En estos bosques el dosel no es muy cerrado, lo que permite el establecimiento y desarrollo de diversas especies arbóreas, arbustivas y herbáceas. Entre los géneros mejor representados pueden citarse: *Pinus*, *Senecio*, *Ribes*, *Muhlenbergia*, *Agrostis*, *Lupinus* y *Festuca*.

La especie dominante de los bosques de oyamel es el *Abies religiosa*. Con un rango altitudinal entre 2400 a 3500 m. El dosel suele estar entre los 20 y 40 m sobre el nivel del suelo, en suelos típicamente profundos, bien drenados pero húmedos todo el año. Prácticamente se hallan limitados a cañadas o barrancas más o menos profundas que ofrecen un microclima especial. No se desarrollan sobre terrenos planos o poco inclinados (CONANP, 2013).

En las partes más elevadas, hacia los 3600 m se establece el bosque de *P. hartwegii* tolerante a las temperaturas bajas, nevadas y probablemente uno de los pinos más adaptados a los incendios superficiales. En las partes bajas de su área de distribución forma rodales abiertos con árboles entre 15 y 20 m de altura, asociados con zacatonal denso y leguminosas como *Lupinus* spp., pero hacia las partes más elevadas (4000 m), constituye un bosque achaparrado (de 5 a 8 m de alto) y más bien abierto, se pueden encontrar algunos individuos aislados en los 4200 m, límite altitudinal arbóreo en México (CONANP, 2013).

El pastizal alpino se establece entre los 4000 y los 4500 m. Bajo este rubro se consideran las asociaciones de vegetación en que dominan las gramíneas amacolladas. Así, se distinguen al menos dos grandes comunidades vegetales: el zacatonal, que se desarrolla en los llanos sobre sitios bajos y mal drenados, donde predominan gramíneas que rara vez exceden los 30 cm de alto o estoloníferas de los géneros: *Agrostis*, *Bromas*, *Calamagrostis*, *Festuca*, *Muhlenbergia* y *Poa* y ciperáceas como *Carex peucophila*, y el pastizal subalpino y alpino que se distribuye por arriba del límite arbóreo y constituye vegetación clímax. Estos se caracterizan por la presencia de gramíneas amacolladas que oscilan entre 60 y 120 cm de altura y se localizan en altitudes de 2700 a 4300 m (Rzedowski, 2006).

**Fauna.** Esta zona es un importante reservorio de fauna silvestre. Los altos endemismos de la región se atribuyen a sus características fisiográficas y topográficas. La destrucción directa por la tala, los incendios, la ganadería extensiva, la caza, el comercio ilegal e incluso las actividades turísticas mal controladas, contribuyen a diezmar las poblaciones de los animales (Ayala, 2011).

Dentro del parque se encuentran 16 familias, 37 géneros y 51 especies de mamíferos. Ocho especies son endémicas; cuatro están bajo protección especial y una está amenazada. Los roedores son los mejor representados; le sigue el orden de los carnívoros, como; gato montés, zorro, zorrillo, coyotes y mapaches; los quirópteros (murciélagos) ocupan el tercer lugar y

finalmente los lagomorfos (conejos). El conejo zacatuche o teporingo (*Romerolagus diazi*), es una especie endémica. El estado de conservación de sus poblaciones se considera de regular a buena. Está protegida por la NOM-059-SEMARNAT-2001 (CONANP, 2013).

Otras especies protegidas son: *Sorex saussurei*, *Myotis velifer* y *Dipodomys phillipsi*. Entre los mamíferos endémicos se encuentran la musaraña *Cryptotis goldmani*, los conejos *Sylvilagus floridanus* y *Sylvilagus cunicularius*, el ratón de los volcanes *Neotomodon alstoni* y *Peromyscus difficilis*; mientras que el tejón *Taxidea taxus* es una especie amenazada. Y, a pesar de ser víctima de una gran presión por parte de los pobladores de la zona, se han reportado individuos de venado cola blanca. También se tienen registros de la presencia de lince o gato montés (*Lynx rufus escuinapae*) (CONANP, 2013).

México ocupa el primer lugar en el mundo en diversidad de reptiles. En este parque los reptiles se encuentran representados por 10 especies pertenecientes a siete géneros en cinco familias. Se tienen registradas dos especies de víboras de cascabel *Crotalus triseriatus* y *Sistrurus ravus*, esta última endémica y protegida. También se distribuyen especies como el alicante del Popocatepetl o dragoncito (*Barisia imbricata*), endémica y protegida; lagartijas como *Sceloporus aeneus*, *S. mucronatus* y *S. grammicus*, protegida; víboras como *Thamnophis scalaris*, conocida como culebra listonada de montaña, especie endémica y amenazada; la culebra cola larga *Thamnophis eques* también amenazada (Hernández y Granados, 2006).

La zona de los volcanes está considerada por la CONABIO como Área de Importancia para la Conservación de las Aves (AICA) (Ayala, 2011). El grupo está representado por 10 órdenes, divididos en 31 familias, 104 géneros y 162 especies. De ellas, seis especies son endémicas y siete están protegidas por la NOM-059- SEMARNAT-2001, el halcón peregrino (*Falco peregrinus*), la codorniz coluda (*Dendrortyx macroura*); el tecolote serrano (*Glaucidium gnoma*), el vencejo nuca blanca (*Streptoprocne semicollaris*), endémico, el clarín norteño (*Myadestes townsendi*), el mirlo pinta (*Ridgwayia pinicola*) y el gorrión serrano (*Xenospiza baileyi*); mientras que el tecolote cornudo (*Bubo virginianus*), especie endémica, se encuentra amenazado (CONANP, 2013).

Debido a las restricciones provocadas por la pandemia de COVID-19, el Parque Nacional Iztaccíhuatl-Popocatepetl permaneció cerrado a las actividades turísticas, durante este periodo, se incrementó la presencia de coyotes (*Canis latrans*) en la zona de Paso de Cortés (Magallán, 2022).

## **Delimitación del área y selección de los sitios de estudio.**

En esta zona convergen varias regiones hidrológicas debido a que los volcanes son el parteaguas principal de la región. Es por ello que, para la elección de cada sitio se visualizaron datos de la subcuenca del río Nexapa en la región oriental del Parque Nacional Iztaccíhuatl-Popocatepetl, cuenca del Balsas, región hidrológica: RH18Ae; obtenidos de INEGI (SIATL) escala 1:50,000. Los datos obtenidos se visualizaron en un sistema de información geográfica (ArcGIS v.10.3). Se seleccionaron 10 arroyos pertenecientes a la Subcuenca del río Nexapa, que abarcan un rango altitudinal de 2076 a 4010 m de altitud.

## Muestreo de suelo

Se trazo un transecto paralelo al río u arroyo de 30 metros de largo evitando las caídas de agua, con un ancho de 10 m perpendicular al río. Los muestreos se realizaron en ambos márgenes, tomando tres submuestras de hasta 20 cm de profundidad y a una distancia de 0, 15 y 30 m sobre el transecto. Se formó una muestra compuesta y mediante cuarteos consecutivos, se excluyeron las partes no seleccionadas hasta quedarse con una muestra de 1 kilogramo aproximadamente. Estas muestras se almacenaron en bolsa plásticas para su transporte al laboratorio. Para la determinación de densidad aparente, la muestra se colectó introduciendo un tubo metálico de volumen conocido en el suelo (2 cm de diámetro y 7 cm de alto) en los mismos sitios donde se tomaron las submuestras.

## Muestreo de agua

Los parámetros físicos cambian inmediatamente después de ser extraídos del sistema acuático por lo cual se midieron en campo. Este fue el caso de la temperatura del agua y la conductividad eléctrica. La toma de muestras de agua se llevó a cabo de forma manual en botellas DBO de 50 mL para las determinaciones de oxígeno disuelto y demanda bioquímica de oxígeno, y en botellas de polietileno de 1L y 500 mL, las cuales fueron preservadas conforme a los requerimientos de los parámetros a analizar según lo establecido en APHA (APHA-AWWA-WEF, 2012) y conservadas a 4 °C durante su traslado al laboratorio.

## Bases de datos

Dados los impedimentos derivados del confinamiento propiciado por las sucesivas olas de contagio del COVID-19 ocurridas entre los años 2019-2021 y parte del 2022, se decidió recuperar y elaborar una base de datos de los parámetros de agua y suelo, provenientes de diversas fuentes, las cuales se enlistan en el Cuadro 2.

Cuadro 2. Fuentes de información

Autor	Título	Tipo	Referencia
Eloisa Adriana Guerra Hernández	Indicadores hídrico-edáficos de calidad para ambientes ribereños de la reserva de la biosfera “Los Volcanes”	TD	(Guerra, 2020)
Luis Fernando Monfil Hernández	Calidad ecológica de dos sistemas ribereños de montaña y su relación con el uso de suelo	TL	(Monfil, 2020)
Beatriz Carolina Mena Bailón	Infiltración de agua en suelos ribereños con distintos tipos de vegetación sobre un sistema fluvial en el Parque Nacional Izta-Popo y zonas de influencia	TL	(Mena, 2018)
Inyasid Santiago Aguilar	Contenidos de carbono orgánico y su compartimentación en sistemas ribereños adyacentes a cuatro biotopos del Parque Nacional Izta-Popo y zonas de influencia	TL	(Santiago, 2018)

Paola Magdalena Colli Cortés	Actividades Arilsulfatasa y Ureasa en la fertilidad de suelos ribereños del Parque Nacional Izta-Popo y su zona de influencia	TL	(Colli, 2015)
Juan Carlos Sandoval Aparicio	Caracterización y Clasificación de Suelos de Sistemas Ribereños del Parque Nacional Izta-Popo	TL	(Sandoval, 2016)

TD = Tesis de doctorado; TL = Tesis de licenciatura.

## Índices de vegetación

### *NDVI*

Para elaborar los índices NDVI, se emplearon al menos dos imágenes satelitales del satélite Sentinel 2B. Éstas fueron descargadas del sitio web <https://www.scihub.copernicus.eu/dhus/#/home>. Específicamente se descargaron a partir del 2017 a 2021; la temporada de estiaje correspondió a los meses de noviembre-abril, y de lluvia los meses mayo-octubre, también las imágenes tuvieron que contar con el menor porcentaje de nubes posible.

Las bandas del satélite Sentinel 2B poseen diferente resolución espacial y radiométrica, tal como se muestra en el Cuadro 3:

Cuadro 3. Características de las bandas Sentinel 2B

Numero de banda	Función	Longitud de onda	Ancho de banda	Resolución espacial
		(nm)	(nm)	(m)
1	Aerosol costero	442.3	45	60
2	Azul	492.1	98	10
3	Verde	559	46	10
4	Rojo	665	39	10
5	Vegetación Borde rojo	703.8	20	20
6	Vegetación Borde rojo	739.1	18	20
7	Vegetación Borde rojo	779.7	28	20
8	NIR	833	133	10
8a	Vegetación Borde rojo	864	32	20
9	Vapor de agua	943.2	27	60
10	SWIR – Cirrus	1376.9	76	60
11	SWIR	1610.4	141	20
12	SWIR	2185.7	238	20

Tomado de: Casella *et al.* (2018)

Las imágenes satelitales se procesaron con el software SNAP v.7.0; en este software se utilizó el plugin “Sen2Cor280” para la corrección atmosférica de las imágenes y eliminar el efecto de los aerosoles en la atmosfera, posteriormente se aplicó el plugin NDVI para hacer el cálculo. Se especificó que la banda cuatro fuera la banda roja y la ocho la banda del infrarrojo cercano.

Una vez realizado el procesamiento de las imágenes, se identificaron los pixeles más cercanos a las zonas ribereñas de estudio y se extrajo el valor de NDVI. Cabe mencionar que las zonas ribereñas que se encontraron en la intersección de dos pixeles, se utilizó el valor NDVI de ambos pixeles para obtener un promedio y este es el dato que se utilizará en los análisis.

### **QBR**

Se evaluaron los índices de calidad del bosque de ribera (QBR), como estudios de caso para evaluar el estado y calidad de la vegetación ripiara en ambos lados del río. Este índice pone énfasis en cuatro aspectos fundamentales del sistema ribereño: 1) grado de cobertura vegetal, el cual evalúa el porcentaje de cobertura de los árboles; 2) estructura de la vegetación, que califica la presencia de árboles (y en ausencia de estos) los arbustos, además de su distribución (linealidad de árboles puede indicar reforestación y manchones); 3) calidad de la cobertura vegetal, calificando el tipo geomorfológico y la vegetación ribereña (formación de túneles o galerías) y 4) grado de naturalidad del canal fluvial, por medio de la presencia de modificaciones de las terrazas adyacentes a los ríos, la presencia de infraestructura dentro y en los alrededores de los ríos y si existen signos de alteración en el canal del río. El índice QBR no está sujeto a una variabilidad estacional, debido a que utiliza como indicador biológico la vegetación (Munné *et al.*, 1998).

## **Etapas de Laboratorio**

En el Cuadro 4 se enlistan los métodos y las técnicas que se utilizaron para determinar los parámetros de agua y suelo. Todos los parámetros hídricos e hidrológicos, que aportaron información para elaborar la base de datos empleada en el análisis de resultado, se obtuvieron de las fuentes citadas en el cuadro dos. Por otro lado, los datos de los parámetros edáficos, fueron procesados en muestras de los sitios de estudio y que son parte de banco de muestras del Laboratorio de Edafología y Nutrición Vegetal de la FES Zaragoza.

Cuadro 4. Métodos para agua y suelo

Parámetro	Autor o Técnica
	Agua (físicos)
Temperatura	Multiparámetro
Conductividad eléctrica	Multiparámetro
	Agua (químicos)
pH	Multiparámetro
Oxígeno disuelto	(APHA-AWWA-WEF, 2012)
Alcalinidad	(APHA-AWWA-WEF, 2012)

Demanda bioquímica de oxígeno	(APHA-AWWA-WEF, 2012)
Fósforo total	(APHA-AWWA-WEF, 2012)
Ortofosfatos	(Strickland y Parson, 1972)
Nitratos	(Guerra y Cruz, 2014)
Nitritos	(APHA-AWWA-WEF, 2012)
Amonio	(APHA-AWWA-WEF, 2012)
	Suelo (físicos)
Densidad aparente del suelo	(USDA-ARS-NRCS-SQI, 1999)
Conductividad eléctrica del suelo	(SEMARNAT, 2000)
Textura	(SEMARNAT, 2000)
	Suelo (químicos)
Materia orgánica del suelo	(SEMARNAT, 2000)
pH activo	(SEMARNAT, 2000)
Nitrógeno total	(Bremmer, 1965)
Fósforo disponible	(Bray y Kurtz, 1945)

---

## Análisis de datos

Los resultados de los diversos parámetros hídrico-edáficos que se obtuvieron de los sitios estudiados y los parámetros de vegetación evaluados, se estandarizaron utilizando el estadístico Z. Después se realizaron análisis de correlación simple y análisis exploratorio completado con un análisis de comparación de medianas Kruskal-Wallis. Posteriormente se retomó el análisis de correlación simple y se filtró, de tal manera que se solo quedaran los parámetros con correlaciones significativas y altamente significativas. Éstas se utilizaron para realizar una vez más las pruebas de Kruskal-Wallis. Con las variables identificadas con diferencias significativas en sus medianas, se realizó un análisis de correlaciones canónicas para identificar las variables robustas, es decir, que este análisis señalará los parámetros más sensibles a los cambios en los ecosistemas ribereños de montaña, con los cuales es posible determinar su calidad ambiental. Con las variables robustas se elaboró un índice que indique la calidad ambiental en las zonas ribereñas estudiadas.

# Capítulo 3

## Resultados

### Sitios de estudio

Se seleccionaron 28 sitios ribereños de estudio distribuidos en diferentes subcuencas para cubrir un gradiente altitudinal de entre 2076 a 4010 m (Cuadro 5), que pertenecen a la subcuenca del río Nexapa en la cuenca alta del Balsas (Figura 8).

Cuadro 5. Sitios de estudio en el Parque Nacional Iztaccíhuatl-Popocatepetl

Sitio	Coordenadas UTM		Altitud m
	Este	Norte	
Tochimilco Barrio San Juan	543577	2088437	2076
Tochimilco Arroyo-Ciénega	544642	2089903	2014
Tochimilco el Calvario	544689	2089760	2115
Tochimilco Manantial	544694	2089955	2120
San Pedro Atlixco	555107	2098091	2126
San Baltazar Atlimeyaya Manantial	554440	2099623	2198
San Baltazar Atlimeyaya Arroyo	554508	2099613	2199
Nealtican	558446	2106140	2260
Río Alseseca Calpan	556635	2111635	2412
San Nicolas de los Ranchos	554726	2108585	2419
Ixoalco 1	537240	2091908	2504
Ixoalco 2	537034	2092290	2521
Xalitzintla	547792	2111726	2678
Santiago Xalitzintla	547778	2111758	2680
Río Apol	543981	2114767	3150
Buenavista	541895	2111169	3274
Buenavista 1	542037	2111204	3300
Buenavista 2	542050	2111210	3300
Apatlaco Parque Ecoturístico	539938	2112278	3571
Apatlaco 1	539298	2113136	3630
Apatlaco 2	539288	2113131	3635
Vallecito	537750	2115023	3840
Apatlaco 3	537650	2114816	3850
Manantial Volkswagen	537333	2114580	3871
Volkswagen	537010	2114406	3883

Apatlaco 4	537908	2115433	3956
Cascada Ranita	537650	2115807	3961
Cascada Volkswagen	537660	2116000	4010

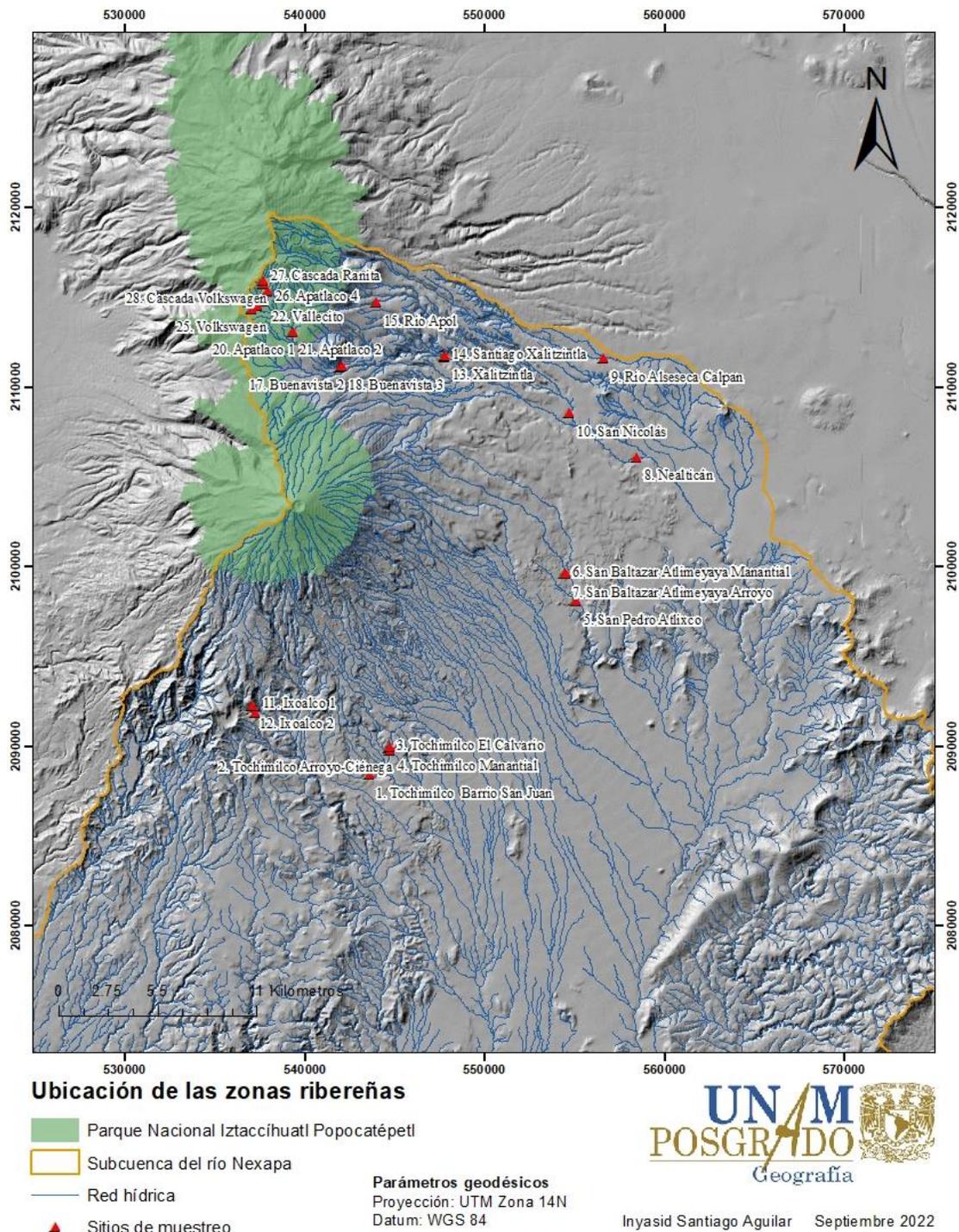


Figura 8. Zonas de muestreo, elaboración propia con base en (INEGI, 2013; CONANP, 2022; INEGI-SIATL, 2022).

Con información obtenida de las referencias citadas en el Cuadro 2 y con trabajo de campo realizado entre agosto del 2019 y marzo de 2020, se obtuvo información para realizar, la descripción ecológica de cada uno de los sitios estudiados y se presentan a continuación en un orden ascendente de altitud:

#### ***Tochimilco Barrio San Juan (2076 m)***

Se denominó Tochimilco Barrio San Juan al sitio que se ubicó aproximadamente a 2076 m de altitud, este sitio se encontró en una ladera cóncava con 6° de pendiente del terreno y se reportó una temperatura ambiental de 19.5 °C; además este sitio presentó un suelo tipo Phaeozem háplico (INEGI, 2014), con una textura arenosa franca y un uso de suelo de agricultura de temporal permanente (INEGI, 2016). En este lugar predomina la vegetación secundaria con dominancia de especies arbustivas, y también cuenta con la presencia de especies leñosas de los géneros: *Quercus* spp., *Cupressus* spp. y *Alnus* spp. (Figura 9a).

#### ***Tochimilco Arroyo-Ciénega (2014 m)***

Este sitio que presentó una geoforma semejante a un pequeño valle, se nombró Tochimilco Arroyo-Ciénega. Este lugar se encontró ubicado a 2014 m de altitud, se observó una temperatura ambiental de 20.8 °C y cuenta con un uso de suelo de agricultura de temporal permanente (INEGI, 2016); además de un tipo de suelo Cambisol éutrico (INEGI, 2014) y una textura arenosa franca, también se apreció una pendiente del terreno de 5.8°. En este sitio predominó la vegetación secundaria arbórea, arbustiva y herbácea; dentro de estos últimos, se pudieron observar abundantes y diversos helechos, además de especies leñosas de los géneros: *Quercus* spp., *Cupressus* spp. y *Alnus* spp (Figura 9b).

#### ***Tochimilco El Calvario (2115 m)***

El lugar que presentó una evidente perturbación en la zona ribereña se nombró Tochimilco el calvario. Este lugar se encontró ubicado a 2115 m de altitud, con una pendiente del terreno de 6°, una temperatura ambiental de 22 °C, el uso de suelo observado fue de agricultura de temporal permanente (INEGI, 2016) y el tipo de suelo fue Cambisol éutrico (INEGI, 2014), con una textura arenosa franca. Debido a la alteración en la zona hay poca abundancia de especies arbóreas que coexisten con la vegetación ribereña, como lo son plantas de los géneros: *Pinus* spp., *Quercus* spp., *Cupressus* spp. y *Alnus* spp; en cambio, la vegetación arbustiva y herbácea, es más abundante en este sitio (Figura 9c).

#### ***Tochimilco Manantial (2120 m)***

La zona en la que el manantial se encontró encerrado en una estructura de concreto, se denominó Tochimilco manantial. Este se ubicó a 2120 m de altitud, con una pendiente del terreno de 3.5° y se determinó una temperatura ambiental de 21.3 °C, además de un uso de suelo de agricultura de temporal permanente (INEGI, 2016) y un tipo de suelo Cambisol éutrico (INEGI, 2014), con una textura arenosa franca. En el estrato arbóreo se encontraron pocas especies vegetales de los géneros: *Quercus* spp., *Cupressus* spp. y *Alnus* spp; además de abundante cantidad de especies herbáceas, esto, debido a que es un área con abundante vegetación secundaria arbórea, arbustiva y herbácea (Figura 9d).



Figura 9. Sitios de estudio de 2076-2120 m: (a) Tochimilco Barrio San Juan; (b) Tochimilco Arroyo-Ciénega; (c) Tochimilco el Calvario y (d) Tochimilco Manantial. Fotos Tomadas de: Línea de Investigación Relaciones Suelo-Agua-Vegetación en el Manejo de Cuencas de la FES Zaragoza, UNAM.

### ***San Pedro Atlixco (2126 m)***

La localidad que presentó una pequeña cascada se denominó San Pedro Atlixco. Este sitio se ubicó a 2126 m de altitud con una temperatura ambiental de 17 °C, presentó pendiente del terreno de 6°, además de un uso de suelo de agricultura de temporal anual (INEGI, 2016) y un suelo de tipo Regosol éutrico (INEGI, 2014), con una textura arenosa franca. Al ser una zona de agricultura de temporal con cultivos de maíz y algunas leguminosas, la vegetación se encontró fragmentada, por lo que en algunos sitios específicos se pueden encontrar especies vegetales de los géneros: *Pinus* spp., *Quercus* spp. y *Alnus* spp (Figura 10a).

### ***San Baltazar Atlimeyaya Manantial (2198 m)***

El espacio caracterizado por un manantial encerrado en un muro de rocas se nombró San Baltazar Atlimeyaya Manantial. Este sitio presentó un uso de suelo de agricultura de temporal anual (INEGI, 2016) y un suelo de tipo Regosol éutrico (INEGI, 2014), con una textura franco arenosa. Este lugar se ubicó a 2198 m de altitud con una temperatura ambiental de 13.4 °C, además cuenta con una pendiente del terreno de 5°. En cuanto a la vegetación, se pudieron encontrar especies de los géneros *Taxodium* spp. y *Alnus* spp., para el estrato arbóreo; mientras que para el estrato herbáceo se encontraron plantas de los géneros *Senecio* spp., *Marchantia* spp., *Potentilla* spp., *Salix* spp. y *Salvia* spp (Figura 10b).

### ***San Baltazar Atlimeyaya Arroyo (2199 m)***

Se nombró San Baltazar Atlimeyaya Arroyo al sitio que se encontró a 2199 m de altitud, presentó una pendiente del terreno de 8° y una temperatura ambiental de 12 °C, además de un uso de suelo agricultura de temporal anual (INEGI, 2016) y un suelo de tipo Regosol éutrico (INEGI, 2014), con una textura franco-arenosa. En cuanto a la vegetación, se pudo apreciar que, al ser una zona de agricultura, la vegetación ha sido desplazada por cultivos, por lo que solo se encontraron plantas de los géneros *Taxodium* spp., *Alnus* spp., *Salix* spp. y algunos helechos (Figura 10c).

### ***Nealtican (2260 m)***

Se denominó Nealtican al sitio que se encontró cercano a una zona urbana, este se encontró ubicado a 2260 m de altitud, con una temperatura ambiental de 19 °C y una pendiente del terreno de 5°, además de un uso de suelo agricultura de temporal anual y permanente (INEGI, 2016) y un suelo de tipo Regosol éutrico (INEGI, 2014). La vegetación reportada para la zona es vegetación secundaria con dominancia en la presencia de árboles de los géneros *Pinus* spp., *Prunus* spp., *Buddleja cordata* y *Ricinus comunis*; además de gran variedad de arbustos y herbáceas (Figura 10d).



Figura 10. Sitios de estudio de 2126-2260 m. (a) San Pedro Atlixco; (b) San Baltazar Atlimeyaya Manantial; (c) San Baltazar Atlimeyaya Arroyo y (d) Nealtican. Fotos Tomadas de: Línea de Investigación Relaciones Suelo-Agua-Vegetación en el Manejo de Cuencas de la FES Zaragoza, UNAM.

### ***Río Alseseca Calpan (2412 m)***

La zona que se encontró cercana al pueblo de Calpan, se nombró Río Alseseca Calpan. Este sitio se ubicó a 2412 m de altitud, con una pendiente del terreno de 5° y una temperatura ambiental de 20 °C, se observó un suelo de tipo Regosol éutrico (INEGI, 2014) con una textura arenosa franca, y un uso de suelo de agricultura de temporal anual y permanente (INEGI, 2016). La vegetación se encontró dominada por cultivos, entre los que destaca el maíz, y en la periferia de estos la presencia de algunas especies de los géneros de *Acacia* spp (Figura 11a).

### ***San Nicolás de los Ranchos (2419 m)***

La localidad caracterizada por encontrarse en una zona de cultivos variados, incluyendo árboles frutales, se denominó San Nicolás de los Ranchos. Este sitio se ubicó a 2419 m de altitud, presentó una temperatura ambiental de 21 °C y una pendiente del terreno de 2°; el uso de suelo es de agricultura de temporal anual (INEGI, 2016), además presentó un suelo

de tipo Regosol éutrico (INEGI, 2014) y según la clasificación de suelos realizada por Sandoval (2016) para este sitio, también se presenta un Fluvisol háplico con una textura franco-arenosa. La vegetación fue representada por las especies cultivadas (*Zea mayz*, *Vicia faba* y *Medicago sativa*) y frutales (*Prunus pérsica*, *Prunus salicifolia* y *Crataegus mexicana*), además de algunas especies como *Alnus acuminata* y *Sambucus nigra* (Figura 11b).

### ***Ixoalco 1 (2504 m)***

Esta localidad ubicada cerca de un cultivo de trucha se denominó como Ixoalco A. Este lugar se encuentra a 2504 m de altitud, donde se apreció una temperatura ambiental de 12.3 °C y se observó una pendiente del terreno de 6°, también se observó un suelo de tipo Phaeozem háplico (INEGI, 2014) con una textura franco-arenosa y un uso de suelo de agricultura de temporal anual y permanente (INEGI, 2016). La vegetación se encontró conformada principalmente por árboles de *Pinus* spp. y *Abies* spp., además de abundante vegetación arbustiva (Figura 11c).

### ***Ixoalco 2 (2521 m)***

Este sitio cercano al anterior se nombró como Ixoalco B. Esta zona se encontró ubicada a 2521 m de altitud, se apreció una pendiente del terreno de 6° y una temperatura ambiental de 13.3 °C, además se observó un suelo de tipo Phaeozem háplico (INEGI, 2014) con una textura franco-arenosa y un uso de suelo de bosque de pino-encino (INEGI, 2016). La vegetación se encontró conformada con gran variedad de herbáceas, entre las que destacan los helechos, además de especies arbóreas, tales como los *Pinus* spp. y *Abies* spp., (Figura 11d).



Figura 11. Sitios de estudio de 2412-2521 m. (a) Río Alsesecca Calpan; (b) San Nicolás de los Ranchos; (c) Ixoalco 1 y (d) Ixoalco 2. Fotos (a, c y d) Tomadas de: Línea de Investigación Relaciones Suelo-Agua-Vegetación en el Manejo de Cuencas de la FES Zaragoza, UNAM. Foto (b) autor.

### ***Xalitzintla (2678 m)***

Esta zona cercana a caminos y cultivos de maíz y leguminosas se denominó Xalitzintla por estar en el pueblo de esta denominación. Este lugar presentó una pendiente del terreno de 3° y una temperatura ambiental de 13 °C, se encontró ubicada a una altitud de 2678 m, donde se observó un suelo de tipo Regosol éutrico (INEGI, 2014) y Fluvisol mólico (Sandoval, 2016), con una textura arenosa franca y un uso de suelo de agricultura de temporal anual (INEGI, 2016). La vegetación observada estuvo compuesta por especies como *Buddleja cordata*, *Salix bonplandiana* y escasos ejemplares de *Pinus ayacahuite*. En los laterales de la ribera se encuentran el camino y los cultivos (Figura 12a).

### ***Santiago Xalitzintla (2680 m)***

Este sitio ya se encontró ubicado cerca de asentamientos humanos, se nombró Santiago Xalitzintla. Esta parte de la ribera se localizó a 2680 m de altitud, donde se apreció una temperatura ambiental de 23 °C y una pendiente del terreno de 3°. En este sitio se observó un suelo de tipo Regosol éutrico (INEGI, 2014) con textura arenosa franca y también un uso de suelo de agricultura de temporal anual (INEGI, 2016). En cuanto a la vegetación, se encontró la presencia de zonas agrícolas y vegetación secundaria con algunas especies de los géneros *Pinus* spp., *Quercus* spp. y *Arbutus* spp., (Figura 12b).

### ***Río Apol (3150 m)***

La zona ribereña que se localizó cerca a unas laderas pronunciadas con un cauce hundido es la particularidad del lugar denominado Río Apol. Este sitio se ubicó a 3150 m de altitud, donde se registró una temperatura ambiental de 8 °C, también presentó una pendiente del terreno de 12° y se apreció un suelo de tipo Regosol dístrico (INEGI, 2014) y Andosol vítrico (Werner *et al.*, 1978) con una textura franco-arenosa y un uso de suelo de vegetación secundaria arbórea de bosque de pino (INEGI, 2016). La vegetación que presentó este lugar se encontró establecida por arboles de *Pinus montezumae*, *Pinus ayacahuite* y *Abies religiosa*, además de especies herbáceas como *Salvia* spp., *Senecio* spp. y *Eupatorium* spp (Figura 12c).

### ***Buenavista (3274 m)***

La zona que se caracterizó por contar con una zona turística de cabañas y criaderos de truchas, se denominó Buenavista (3274 m). Este lugar se encontró ubicado a 3274 m de altitud, presentó una pendiente del terreno de 11° y una temperatura ambiental de 12 °C, con un suelo de tipo Regosol dístrico (INEGI, 2014) y Andosol vítrico úmbrico (Sandoval, 2016), con una textura arenosa franca; además de un uso de suelo de bosque de pino (INEGI, 2016). La vegetación observada estuvo conformada por *Pinus* spp. y *Abies religiosa* (Figura 12d).



Figura 12. Sitios de estudio de 2678-3274 m. (a) Xalitzintla; (b) Santiago Xalitzintla; (c) Río Apol y (d) Buenavista. Fotos (b, c y d) Tomadas de: Línea de Investigación Relaciones Suelo-Agua-Vegetación en el Manejo de Cuencas de la FES Zaragoza, UNAM. Foto (a) autor.

### ***Buenavista 1 (3300 m)***

El sitio que se encontró en el fondo de una cañada fue nombrado Buenavista A. Esta zona se caracterizó por una pendiente del terreno fuertemente inclinada de 6° y una temperatura ambiental de 11 °C, debido a que se encontró ubicado a 3300 m de altitud; además se observó un suelo de tipo Regosol dístico (INEGI, 2014) y Andosol vítrico úmbrico (Sandoval, 2016), con una textura franco arenosa y un uso de suelo de vegetación secundaria arbórea de bosque de pino (INEGI, 2016). La vegetación observada fue *Pinus hartwegii* y pastos amacollados (Figura 13a).

### ***Buenavista 2 (3300 m)***

El sitio que se encontró en un río hundido fue nombrado Buenavista B. Esta zona fue caracterizada por un uso de suelo de vegetación secundaria arbórea de bosque de pino (INEGI, 2016) y se ubicó a 3300 m de altitud, con una pendiente del terreno fuertemente inclinada de 6°; también se observó una temperatura ambiental de 15 °C y un suelo de tipo Regosol dístico (INEGI, 2014) y Andosol vítrico úmbrico (Sandoval, 2016), con textura franco-arenosa. La vegetación estuvo constituida por *Pinus hartwegii*, algunos ejemplares de *Abies religiosa*, *Salix bonplandiana* y pastos amacollados (Figura 13b).

### ***Apatlaco Parque Ecoturístico (3571 m)***

La zona ribereña caracterizada por encontrarse cerca de un parque ecoturístico se nombró Apatlaco parque ecoturístico. Este lugar se encontró ubicado a 3571 m de altitud, donde se observó una temperatura ambiental de 11.3 °C y una pendiente del terreno de 6°. El uso de suelo fue forestal con bosque de pino (INEGI, 2016) y el suelo observado fue de tipo Regosol dístico (INEGI, 2014) y Andosol vítrico (Werner *et al.*, 1978) con textura franco-arenosa. La vegetación estuvo compuesta principalmente de *Abies religiosa*, *Pinus* spp. y pastos

amacollados, además se observó la presencia de *Lupinus* spp., *Senecio* spp. y *Cirsium* spp., (Figura 13c).

### ***Apatlaco 1 (3630 m)***

Este sitio se encuentra ubicado a 3630 m de altitud, la pendiente del terreno fue de 15° y la temperatura ambiental de 7 °C; aquí se observó un uso de suelo de bosque de pino (INEGI, 2016) y un suelo de tipo Regosol dístico (INEGI, 2014) y Andosol vítrico (Werner *et al.*, 1978) con textura franco-arenosa. La vegetación observada fueron pastos y algunos árboles, como la presencia de pastizal montano (*Festuca* spp., y *Muhlenbergia* spp.) y *Pinus hartwegii* (Figura 13d).



Figura 13. Sitios de estudio de 3300-3630 m. (a) Buenavista 1; (b) Buenavista 2; (c) Apatlaco Parque Ecoturístico y (d) Apatlaco 1. Fotos (b, c y d) Tomadas de: Línea de Investigación Relaciones Suelo-Agua-Vegetación en el Manejo de Cuencas de la FES Zaragoza, UNAM. Foto (a) autor.

### ***Apatlaco 2 (3635 m)***

El lugar que se encuentra en una zona ecoturística, cercano a una cascada de 30 m, se denominó Apatlaco B. Este sitio se encontró ubicado a 3635 m de altitud, la temperatura ambiental fue de 10 °C y la pendiente del terreno fue de 15°. Aquí se observó un uso de suelo de bosque de pino (INEGI, 2016) y un suelo de tipo Regosol dístico (INEGI, 2014) y Andosol vítrico (Werner *et al.*, 1978) con una textura franco-arenosa. La vegetación estuvo conformada por la presencia de pastizales montano (*Festuca* spp., y *Muhlenbergia* spp.) y *Pinus hartwegii* (Figura 14a).

### ***Vallecito (3840 m)***

El sitio que se encontró ubicado en una zona de relieve que tiende a ser plano, pero con una forma cóncava, como un valle, se nombró Vallecito. Este lugar se ubicó a 3840 m de altitud, la pendiente del terreno fue de 1.8° y la temperatura ambiental registrada fue de 12.5 °C, se pudo observar un uso de suelo de pradera de alta montaña (INEGI, 2016) y un suelo de tipo Regosol dístico (INEGI, 2014) y Andosol vítrico (Werner *et al.*, 1978) con textura franco-

arenosa. La vegetación estuvo compuesta de pastizal montano (*Festuca* spp., y *Muhlenbergia* spp.) y *Pinus hartwegii* (Figura 14b).

### ***Apatlaco 3 (3850 m)***

La zona caracterizada por encontrarse en la alta montaña, donde comienza a aparecer la roca desnuda, se denominó Apatlaco C. Este lugar se encontró ubicado a 3850 m de altitud, se observó un pendiente del terreno de 34° y una temperatura ambiental de 14.5 °C, se apreció un uso de suelo de bosque de pino (INEGI, 2016) y un suelo de tipo Regosol dístico (INEGI, 2014) y Andosol vítrico (Werner *et al.*, 1978) con textura franco-arenosa. La vegetación que se observó fue pastizal montano (*Festuca* spp., y *Muhlenbergia* spp.) y la presencia de *Pinus hartwegii* (Figura 14c).

### ***Manantial Volkswagen (3871 m)***

Este sitio se encontró ubicado a 3871 m de altitud, se observó una temperatura ambiental de 12 °C y presentó un uso de suelo de pradera de alta montaña (INEGI, 2016), con un suelo de tipo Regosol dístico (INEGI, 2014) y Andosol vítrico (Werner *et al.*, 1978) con textura arenosa franca. La vegetación estuvo conformada solo por herbáceas, como el pastizal montano y algunas especies de *Gnaphalium* spp., y *Lupinus* spp (Figura 14d).



Figura 14. Sitios de estudio de 3635-3871 m. (a) Apatlaco 2; (b) Vallecito; (c) Apatlaco 3 y (d) Manantial Volkswagen. Fotos Tomadas de: Línea de Investigación Relaciones Suelo-Agua-Vegetación en el Manejo de Cuencas de la FES Zaragoza, UNAM.

### ***Volkswagen (3883 m)***

La localidad caracterizada por presentar un estrato herbáceo dominante se denominó Volkswagen. Este sitio se encontró ubicado a 3883 m de altitud y presentó una temperatura ambiental de 10.8 °C, un suelo de tipo litosol (Leptosol) (INEGI, 2014) y Andosol vítrico (Werner *et al.*, 1978) con textura arenosa franca y un uso de suelo de pradera de alta montaña (INEGI, 2016). La vegetación estuvo conformada solo por herbáceas, con el pastizal montano y algunas especies de *Gnaphalium* spp., y *Lupinus* spp (Figura 15a).

### ***Apatlaco 4 (3956 m)***

El lugar dominado solo por dos tipos de estratos de vegetación, se nombró Apatlaco D. Este sitio se encontró ubicado a 3956 m de altitud, se observó una pendiente del terreno de 37° y una temperatura ambiental de 9.5 °C, presentó un suelo de tipo Regosol dístico (INEGI, 2014) y Andosol vítrico (Werner *et al.*, 1978) con textura franco-arenosa y un uso de suelo de bosque de pino (INEGI, 2016). La vegetación estuvo compuesta por la presencia de dos tipos de plantas, el pastizal montano (*Festuca* spp., y *Muhlenbergia* spp.) y *Pinus hartwegii* (Figura 15b).

### ***Cascada Ranita (3961 m)***

El sitio caracterizado por encontrarse en el fondo de un pequeño valle y dominado casi exclusivamente por herbáceas, se denominó Cascada ranita. Este lugar se ubicó a 3961 m de altitud, presentó una temperatura ambiental de 8 °C y una pendiente del terreno de 2°. Se apreció un suelo de tipo litosol (Leptosol) (INEGI, 2014) y Andosol vítrico úmbrico (Sandoval, 2016), con textura franco-arenosa y un uso de suelo de pradera de alta montaña (INEGI, 2016). La vegetación se encontró dominada exclusivamente por especies herbáceas que conforman el pastizal montano (*Festuca* spp., y *Muhlenbergia* spp.) (Figura 15c).

### ***Cascada Volkswagen (4010 m)***

La localidad caracterizada por encontrarse en una pendiente pronunciada y cerca de una cascada, se nombró Cascada Volkswagen. Esta zona se encontró ubicada a 4010 m de altitud, presentó una temperatura ambiental de 8 °C y una pendiente del terreno de entre 22°-31°, se observó un suelo de tipo litosol (Leptosol) (INEGI, 2014) y Andosol vítrico (Werner *et al.*, 1978), con uso de suelo de pradera de alta montaña (INEGI, 2016). La vegetación estuvo compuesta por pastizal montano (*Festuca* spp., y *Muhlenbergia* spp.), además de la presencia de *Pinus hartwegii* (Figura 15d).

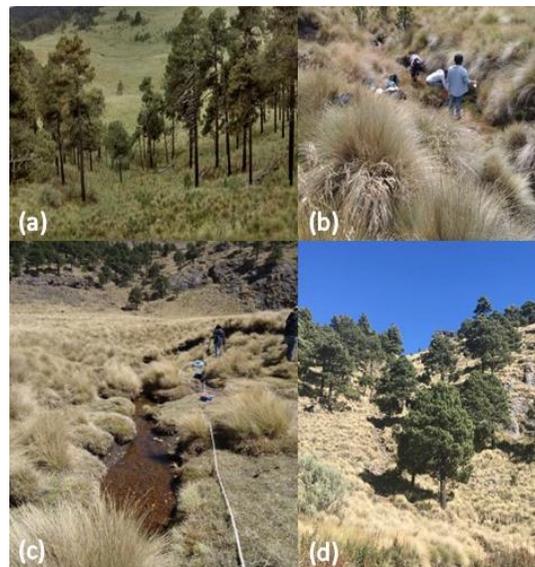


Figura 15. Sitios de estudio de 3883-4010 m. (a) Volkswagen; (b) Apatlaco 4; (c) Cascada Ranita y (d) Cascada Volkswagen. Fotos (a, b y d) Tomadas de: Línea de Investigación Relaciones Suelo-Agua-Vegetación en el Manejo de Cuencas de la FES Zaragoza, UNAM. Foto (c) autor.

## Descripción de parámetros de los sistemas ribereños

El agua que circula a través de la cuenca está en tránsito y proviene de diferentes fuentes como los deshielos, cada vez de menor efecto, del manto freático, condensación y precipitación pluvial. Sus propiedades dependen de su fuente de origen y de los procesos de mezcla entre los diferentes afluentes, donde las propiedades del agua se van modificando. Además de que en su trayectoria realiza un intercambio continuo de elementos por precipitación o disolución en lo cual intervienen diversos factores físicos, químicos y biológicos, derivados de procesos naturales y sociales (Guerra y Campos, 2017).

El agua que circula en arroyos y ríos de la alta montaña y transita a través de la cuenca, proviene de diferentes fuentes. Por su naturaleza física y química, el agua es el componente más dinámico de los sistemas ribereños, ya que los sistemas lóticos presentan alta conectividad vertical, transversal y longitudinal que, además de tener variabilidad espacial, presentan también fluctuaciones espacio-temporales a lo largo de los tipos de conectividad que tienen (Guerra y Campos, 2017).

Por otro lado, los suelos ribereños interactúan con el agua que conducen en los arroyos dependiendo del grado de estos, aportándoles minerales solubles y en suspensión además de materia orgánica por deposición. En consecuencia, de lo anterior, las propiedades físicas y químicas del suelo influyen en las del agua y todas están reguladas por la presencia o ausencia de vegetación riparia.

Las interacciones de estas propiedades físicas y químicas del agua y del suelo y las que presentan estos factores con la vegetación ribereña, se describen a continuación mediante el comportamiento estadístico de los parámetros evaluados en agua y suelo considerando las correlaciones de Pearson encontradas entre las propiedades en los 28 sitios ribereños, seleccionados entre 2076 y 4010 m de altitud, en la zona del Parque Nacional Iztaccíhuatl-Popocatepetl y su área de influencia.

### *Parámetros de agua*

Una forma eficaz y con un alto grado de certeza para evaluar la calidad ambiental en las aguas de los ríos es, hacer mediciones de sus propiedades físicas y químicas, que se encuentran estrechamente ligadas a la dinámica de procesos ecológicos, biológicos, físicos, químicos y antrópicos, y que permitan determinar los cambios en sus características y propiedades. Los parámetros evaluados en esta investigación son los siguientes:

**Temperatura del Agua.** La temperatura del agua como variable, es muy importante, debido a que regula la concentración de sales y gases, así como la descomposición de la materia orgánica, el metabolismo y respiración de los organismos que viven en el ambiente acuático. Para este parámetro, se presentan sus variaciones en el gráfico de la Figura 16, donde pudo apreciarse que los valores confirmaron el comportamiento inversamente proporcional con la altitud. Es decir, con el incremento de la altitud, disminuye la temperatura del agua en cada uno de los sitios de estudio. Los valores mínimos y máximos de esta variable fueron 5.5 °C a 3961 m de altitud y 16.1 °C en 2076 m. Estas altitudes de igual manera

correspondieron a la más alta y más baja en las cuales se realizaron los muestreos y la caracterización ecológica.

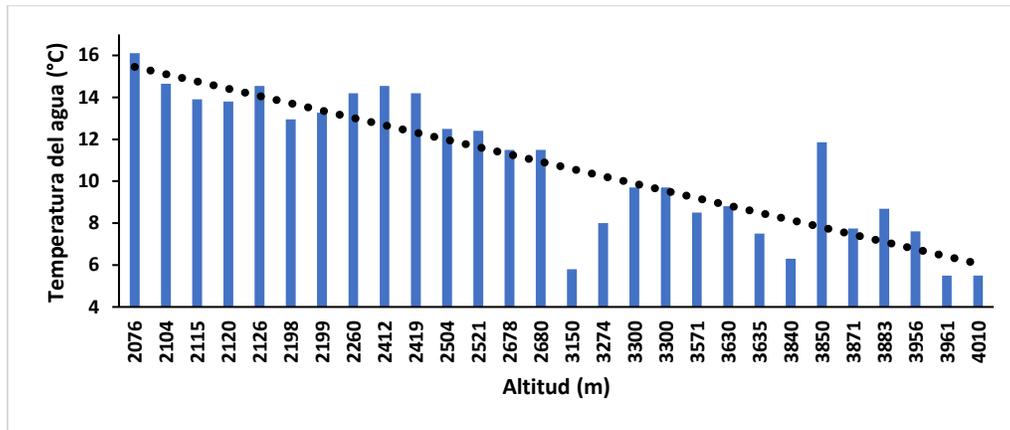


Figura 16. Temperatura del agua de los arroyos en los sitios de muestreo

El análisis de correlación de Pearson indicó que la temperatura del agua tiene una correlación con la altitud ( $r^2 = -0.88$ ,  $\alpha < 0.0001$ ), tipo de suelo ( $r^2 = -0.78$ ,  $\alpha < 0.0001$ ), uso de suelo ( $r^2 = -0.87$ ,  $\alpha < 0.0001$ ), con la temperatura ambiental ( $r^2 = 0.61$ ,  $\alpha < 0.0002$ ), la conductividad eléctrica del agua ( $r^2 = 0.76$ ,  $\alpha < 0.0001$ ) y con la alcalinidad ( $r^2 = 0.63$ ,  $\alpha = 0.0001$ ).

**Conductividad Eléctrica del Agua.** Esta es una variable que mide la capacidad de una solución para transportar una corriente eléctrica, lo cual puede traducirse como una medida de los iones en una solución, que suele relacionarse con la salinidad. Como se puede observar en la Figura 17, que muestra los valores de la conductividad eléctrica del agua, esta presenta un comportamiento inversamente proporcional respecto a la altitud, es decir, a medida que se incrementa la altitud, la conductividad eléctrica disminuye, lo que quiere decir que, en zonas bajas, se tuvieron altos valores de conductividad eléctrica. El valor máximo y mínimo de esta variable fue de  $308 \mu\text{S cm}^{-1}$ , que correspondió a las altitudes medias (2412 m), y de  $29 \mu\text{S cm}^{-1}$  en 3956 m (el mínimo reportado).

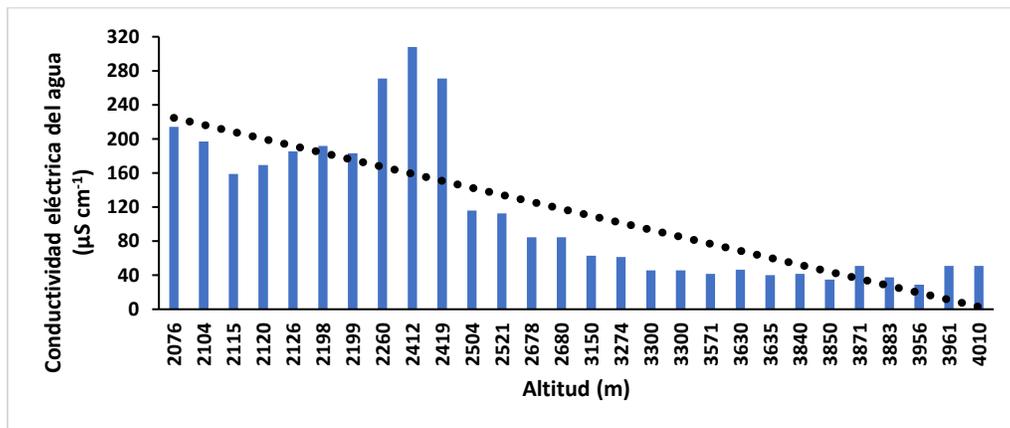


Figura 17. Conductividad eléctrica del agua de los arroyos de los sitios de muestreo

La conductividad eléctrica del agua presentó correlaciones de Pearson con parámetros de agua como la alcalinidad ( $r^2 = 0.79$ ,  $\alpha < 0.0001$ ) y el amonio ( $r^2 = 0.64$ ,  $\alpha < 0.0001$ ). También es importante resaltar que se observaron correlaciones con la altitud ( $r^2 = -0.81$ ,  $\alpha < 0.0001$ ), el tipo de suelo ( $r^2 = -0.53$ ,  $\alpha = 0.0020$ ) y el uso de suelo ( $r^2 = -0.65$ ,  $\alpha < 0.0001$ ).

**pH del Agua.** El pH del agua se puede definir como una medida de la actividad de los iones  $H^+$  y  $OH^-$ . Esta variable interviene en muchas reacciones químicas que suceden en el agua, así como en la distribución y diversidad de los organismos. El comportamiento de esta variable se puede observar en el gráfico de la Figura 18, donde se pudo apreciar que tiene una relación inversamente proporcional con la altitud, lo que significa, que a medida que se incrementa la altitud, el pH es más ácido. Los valores mínimos y máximos del pH en el agua fueron de 6 en 3150 m y de 8.1 a 2126 m.

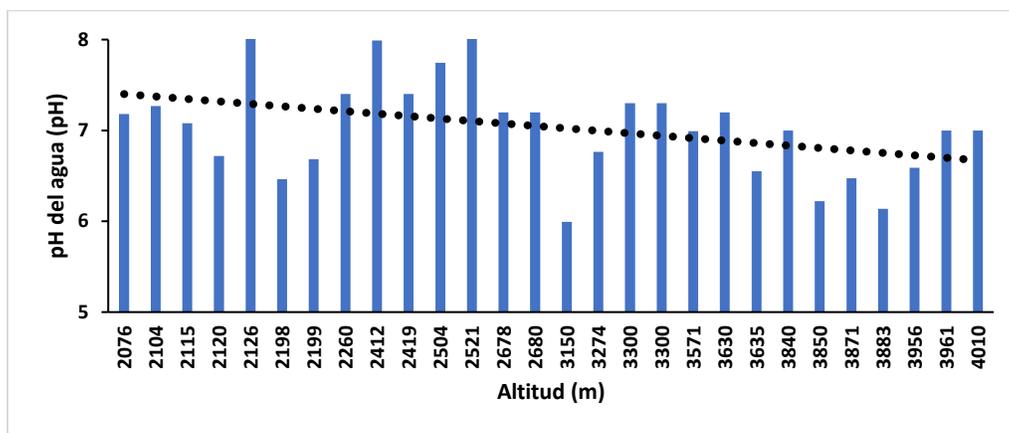


Figura 18. pH del agua de los arroyos en los sitios de muestreo

Las correlaciones de Pearson mostraron datos interesantes para parámetros de agua como la alcalinidad ( $r^2 = -0.41$ ,  $\alpha = 0.0198$ ) y la conductividad eléctrica ( $r^2 = -0.36$ ,  $\alpha = 0.0420$ ); en cuanto a los parámetros de suelo destacan el carbono orgánico ( $r^2 = 0.43$ ,  $\alpha = 0.0135$ ) y el nitrógeno total ( $r^2 = 0.52$ ,  $\alpha = 0.0081$ ).

**Oxígeno Disuelto.** Esta variable depende del proceso fotosintético de las plantas acuáticas y de su difusión desde la atmósfera. El oxígeno disuelto interviene en muchas reacciones del sistema acuático y en el funcionamiento de los organismos, como la respiración y en reacciones de óxido-reducción. El comportamiento de este parámetro se puede observar en la Figura 19, en la que se pudo apreciar una tenue relación con la altitud, en esta el contenido del oxígeno disuelto en el agua se incrementa con la altitud. Se encontraron los valores máximos ( $10.6 \text{ mg L}^{-1}$ ) en 3571 m y los mínimos ( $0.6 \text{ mg L}^{-1}$ ) a 2126 m. Las correlaciones de Pearson que destacan para el oxígeno disuelto son la temperatura ambiental ( $r^2 = -0.56$ ,  $\alpha = 0.0008$ ) y la demanda bioquímica de oxígeno ( $r^2 = 0.51$ ,  $\alpha = 0.0154$ ).

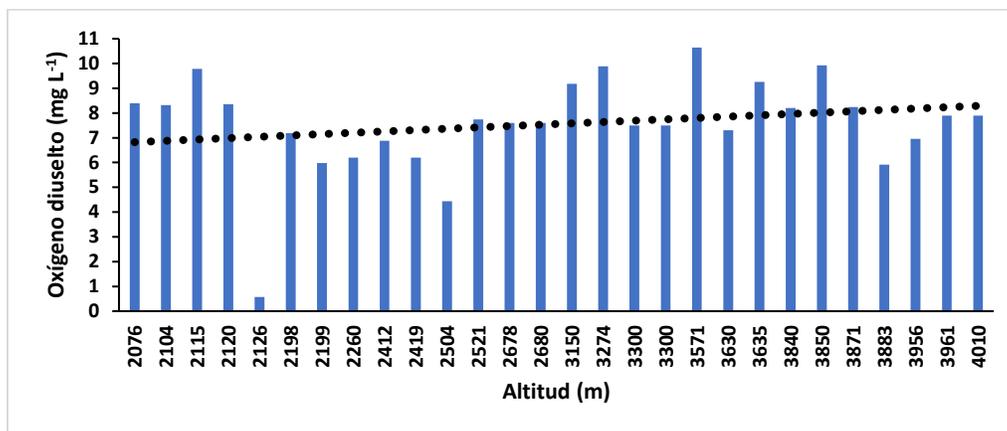


Figura 19. Oxígeno disuelto de los arroyos en los sitios de muestreo

**Alcalinidad.** La alcalinidad se puede definir como una medida de la capacidad de una muestra de agua de resistir cambios en su pH, se suele relacionar con la productividad (aunque no presente una relación directa) al incrementar la disponibilidad de algunos nutrientes. Su comportamiento se presenta en la Figura 20, donde se pudo observar que los valores tienen una relación inversamente proporcional con la altitud, es decir, en la medida que se incrementa la altitud disminuye el valor de la alcalinidad. Los valores máximos ( $142.6 \text{ mg CaCO}_3 \text{ L}^{-1}$ ) se encuentran en sitios ubicados sobre los 2260 y 2419 m, mientras que los valores mínimos ( $19.77 \text{ mg CaCO}_3 \text{ L}^{-1}$ ) se observaron en sitios altos, en torno de los 3883 m.

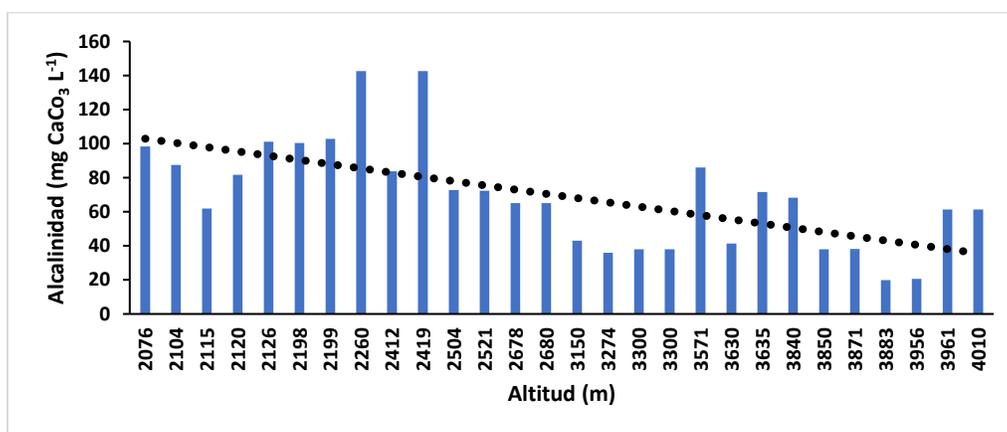


Figura 20. Alcalinidad de los arroyos en los sitios de muestreo

La alcalinidad del agua presentó correlaciones de Pearson con parámetros evaluados como el tipo de suelo ( $r^2 = -0.47$ ,  $\alpha = 0.0071$ ), el uso de suelo ( $r^2 = -0.60$ ,  $\alpha = 0.0003$ ) y la altitud ( $r^2 = -0.69$ ,  $\alpha < 0.0001$ ). También los parámetros de agua mostraron correlación con la alcalinidad, entre los que destacan la conductividad eléctrica ( $r^2 = 0.79$ ,  $\alpha < 0.0001$ ) y el pH ( $r^2 = -0.41$ ,  $\alpha = 0.0198$ ). En cuanto a los parámetros de suelo resaltan la densidad aparente del suelo ( $r^2 = 0.59$ ,  $\alpha = 0.0015$ ) y el carbono orgánico ( $r^2 = -0.39$ ,  $\alpha = 0.0272$ ).

**Amonio, Nitratos y Nitritos.** El nitrógeno se encuentra ampliamente distribuido en la naturaleza, se puede encontrar en forma orgánica e inorgánica. Una de esas formas es el

amonio ( $\text{NH}_4^+$ ), el cual es uno de los nutrientes más importantes para la productividad primaria en los sistemas acuáticos. La variación de la concentración del amonio en el sistema acuático se puede observar en la Figura 21, donde se pudo apreciar que el contenido de amonio en el agua disminuye conforme la altitud aumenta. Sin embargo, en los sitios de 2260 a 2419 m se observaron valores de 3.19 y 4.18  $\text{mg L}^{-1}$  (concentración máxima) debido a contaminación por aguas residuales, y en las altitudes de 2678 a 3274 m se reportaron valores de menores a 0.3  $\text{mg L}^{-1}$ ; el resto de los sitios presento concentraciones de amonio menores a 0.1  $\text{mg L}^{-1}$ , entre las que destacan las zonas de 3300 a 4010 m.

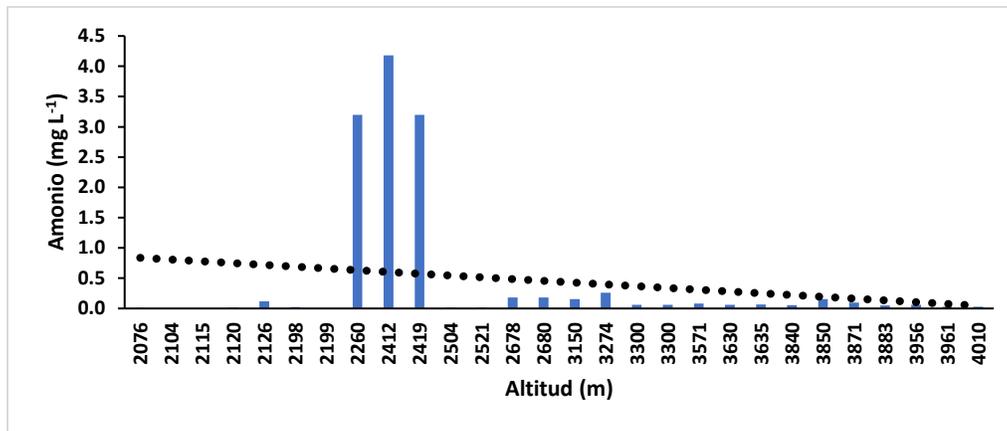


Figura 21. Amonio ( $\text{N-NH}_4^+$ ) de los arroyos en los sitios de muestreo

Las correlaciones de Pearson que se encontraron relacionadas con el amonio son la conductividad eléctrica del agua ( $r^2 = 0.64$ ,  $\alpha < 0.0001$ ), alcalinidad ( $r^2 = 0.53$ ,  $\alpha = 0.0018$ ) y nitrógeno total del suelo ( $r^2 = -0.46$ ,  $\alpha = 0.0204$ ).

La concentración de nitratos en el agua de los ecosistemas ribereños no presentó alguna tendencia definida, es decir, no existe una relación directa entre las concentraciones de este ion con la altitud (Figura 22), lo que sí se pudo observar (de manera general) es que en zonas de baja altitud las concentraciones de nitratos fueron menores, mientras que, en las zonas altas, se observaron altas concentraciones. Específicamente en 2412 m con 1.8  $\text{mg L}^{-1}$  (concentración más alta registrada), en 3850 m con 1.5  $\text{mg L}^{-1}$  y en 3956 con 1.3  $\text{mg L}^{-1}$  mientras que en las demás altitudes las concentraciones fueron menores a 1  $\text{mg L}^{-1}$ . Así mismo la concentración de nitratos más baja registrada fue de 0.03  $\text{mg L}^{-1}$  a una altitud de 2076 m.

En las altitudes de 2260 a 2419 m se observaron incrementos en las concentraciones de nitratos con valores que van desde 0.6  $\text{mg L}^{-1}$  a 1.85  $\text{mg L}^{-1}$ . Estos incrementos se atribuyen a descargas de aguas residuales debido a que se encuentran cerca de zonas urbanas. También en las altitudes de 3850, 3871 y 3956 m se observaron altas concentraciones de nitratos (valores por encima de 0.8 y hasta los 1.5  $\text{mg L}^{-1}$ ). Las correlaciones de Pearson observadas fueron con el amonio ( $r^2 = 0.46$ ,  $\alpha = 0.0079$ ).

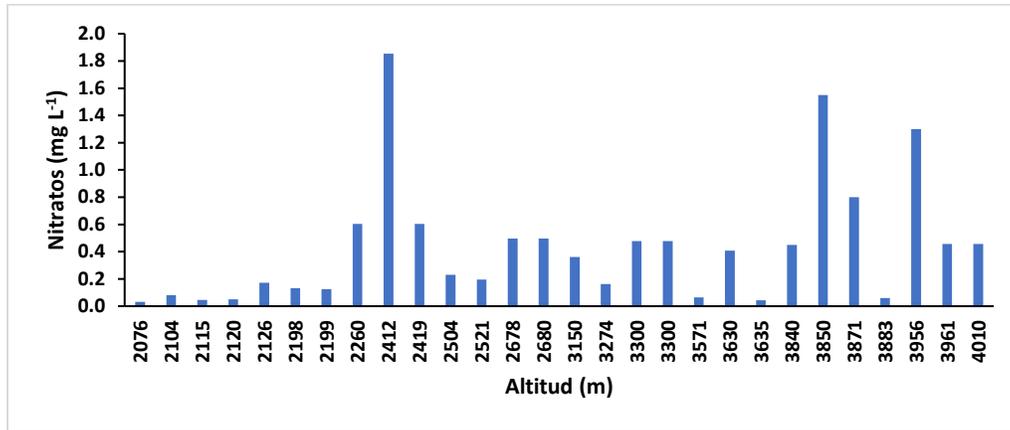


Figura 22. Nitratos (N-NO<sub>3</sub><sup>-</sup>) de los arroyos en los sitios de muestreo

En cuanto a las concentraciones de nitritos en los sistemas acuáticos ribereños, se pudo apreciar que tienen una tendencia a disminuir con el gradiente altitudinal (Figura 23), es decir, en altitudes bajas las concentraciones de nitritos fueron altas y, en sitios altos las concentraciones fueron bajas. Cabe resaltar que el mayor valor de nitritos se ubicó en sitios con altitud de 2412 m con 0.01 mg L<sup>-1</sup>, y el menor valor (0.000003 mg L<sup>-1</sup>) se observó a 2014 m. Para los nitritos se obtuvo una correlación de Pearson con el pH del agua ( $r^2 = 0.45$ ,  $\alpha = 0.0104$ ).

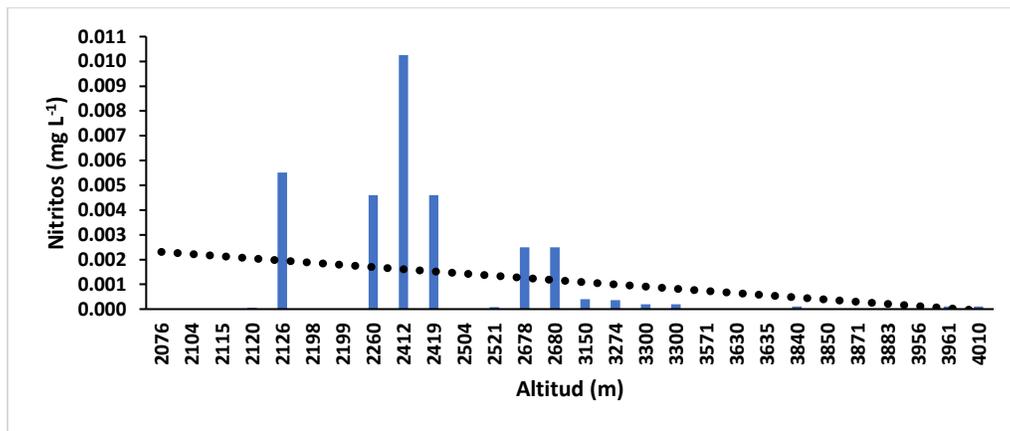


Figura 23. Nitritos (N-NO<sub>2</sub><sup>-</sup>) de los arroyos en los sitios de muestreo

**Fósforo Total y Ortofosfatos.** El fósforo es un elemento esencial para la vida en el agua, debido a que es un nutriente importante para muchos organismos, regulando el crecimiento y desarrollo de muchas especies de algas. Este elemento se puede encontrar de forma orgánica e inorgánica y sufre cambios químicos, físicos y biológicos que delimitan sus reservas y reservorio. El contenido de fósforo total en el agua se observa en la Figura 24, donde se pudo apreciar una relación inversamente proporcional con la altitud, es decir, en la medida que se incrementa la altitud, disminuye el contenido de fósforo total en el agua. Los valores mínimos fueron de 0.1 mg L<sup>-1</sup> en 3850 m y máximos de 1.5 mg L<sup>-1</sup> en 2260 m y 2419 m; cabe resaltar que, en las altitudes restantes se observaron concentraciones de fósforo total menores a 0.8 mg L<sup>-1</sup>.

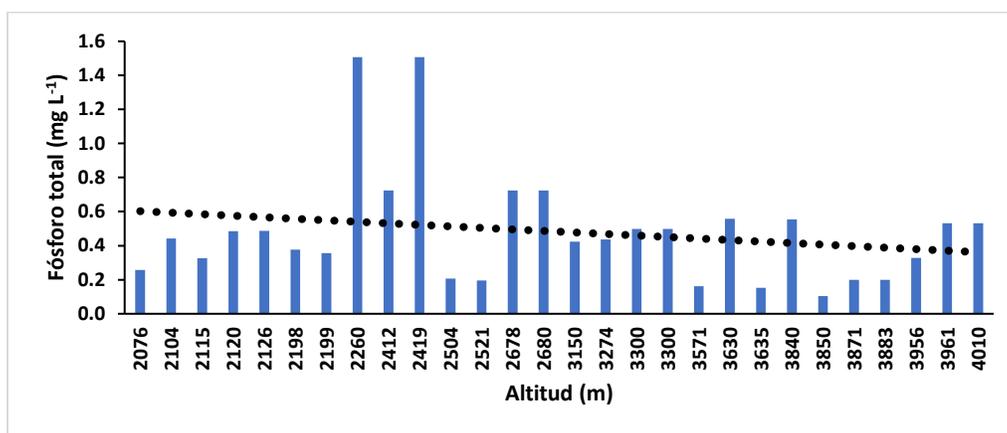


Figura 24. Fósforo total (P-PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>) de los arroyos en los sitios de muestreo

El fósforo total del agua presentó correlaciones de Pearson con parámetros de agua como la alcalinidad ( $r^2 = 0.59$ ,  $\alpha = 0.0004$ ) y la conductividad eléctrica del agua ( $r^2 = 0.48$ ,  $\alpha = 0.0055$ ). También mostró correlaciones con parámetros del suelo como el carbono orgánico ( $r^2 = 0.40$ ,  $\alpha = 0.0231$ ) y el fósforo disponible en el suelo ( $r^2 = -0.45$ ,  $\alpha < 0.0001$ ).

Los contenidos de ortofosfatos en el agua de los sistemas ribereños se pueden observar en la Figura 25, donde se apreció una tendencia a disminuir conforme se incrementa el gradiente altitudinal, es decir, menor altitud, mayor concentración de ortofosfatos y viceversa. En la altitud de 2412 m se registró el mayor valor de ortofosfatos con  $0.32 \text{ mg L}^{-1}$ ; mientras que el menor valor ( $0.02 \text{ mg L}^{-1}$ ) se observó en 3883 m. Las correlaciones de Pearson que se apreciaron con los ortofosfatos fueron con las variables como la altitud ( $r^2 = -0.57$ ,  $\alpha = 0.0006$ ), amonio ( $r^2 = 0.83$ ,  $\alpha < 0.0001$ ) y el fósforo total ( $r^2 = 0.76$ ,  $\alpha < 0.0001$ ).

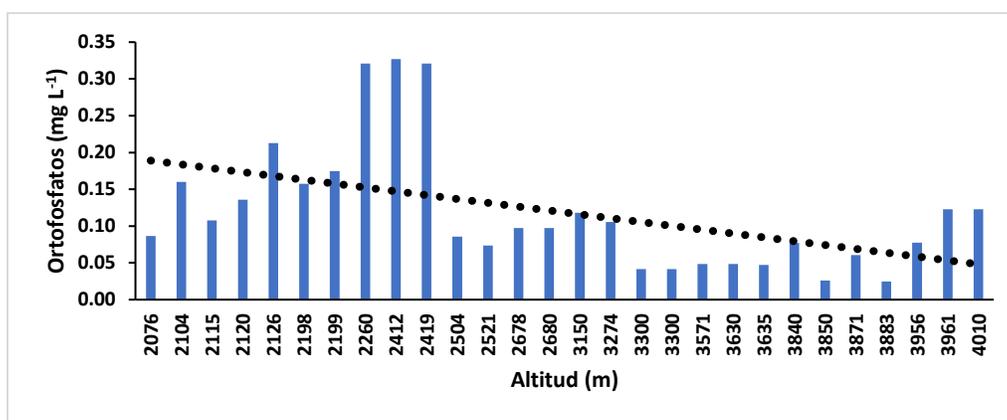


Figura 25. Ortofosfatos (P-PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>) de los arroyos en los sitios de muestreo

**Demanda Bioquímica de Oxígeno.** La demanda bioquímica de oxígeno es una variable de gran importancia, debido a que básicamente mide la cantidad de oxígeno que usan las bacterias para degradar la materia orgánica. También puede usarse como un estimador indirecto de contaminación microbiológica y de material orgánico. El

comportamiento de este parámetro se puede apreciar en la Figura 26, donde se pudo observar que tuvo una relación negativa con la altitud, es decir, en la media que se incrementa la altitud, disminuye el valor de la demanda bioquímica de oxígeno. Los valores máximos fueron de  $6.1 \text{ mg L}^{-1}$  en 3571 m y mínimos de  $0.71 \text{ mg L}^{-1}$  en 2199 m. En el caso de la demanda bioquímica de oxígeno se observó una correlación de Pearson con el oxígeno disuelto ( $r^2 = 0.51$ ,  $\alpha = 0.0154$ ).

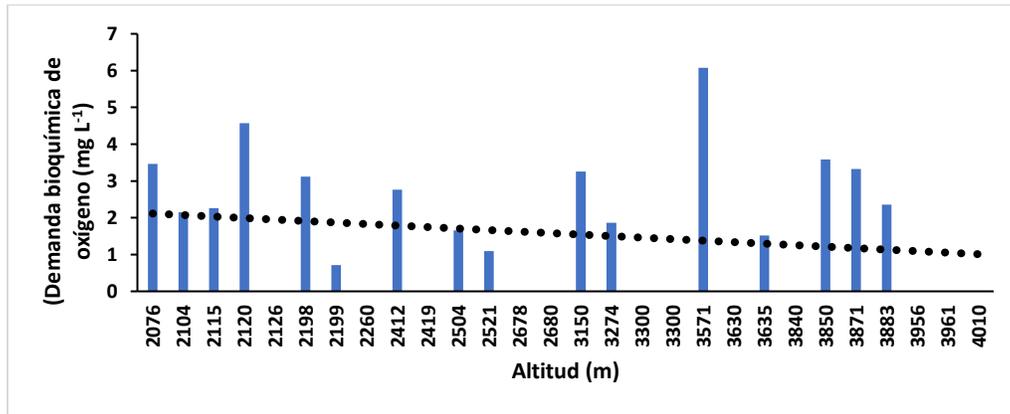


Figura 26. Demanda bioquímica de oxígeno de los arroyos en los sitios de muestreo

### Parámetros de suelo

**Densidad Aparente.** La densidad aparente de un suelo es la relación de la masa por unidad de volumen de un suelo que se ha secado hasta un peso constante. Esta variable es comúnmente utilizada para estimar la cantidad de agua que se puede almacenar en la zona radical de las plantas y para estimar la profundidad a la que pueden penetrar las raíces. Se puede observar el comportamiento de este parámetro en la Figura 27, donde se pudo apreciar que la densidad aparente del suelo tiene una relación inversamente proporcional con la altitud, de manera que, si se incrementa la altitud, disminuye el valor de la densidad aparente. El valor máximo de  $1.5 \text{ g cm}^{-3}$  fue registrado a una altitud de 2260 m; mientras que el menor dato registrado fue de  $0.71 \text{ g cm}^{-3}$  a una altitud de 3883 m. Se observaron correlaciones de Pearson con el carbono orgánico del suelo ( $r^2 = -0.56$ ,  $\alpha = 0.0027$ ) y el fósforo disponible en el suelo ( $r^2 = 0.53$ ,  $\alpha = 0.0131$ ).

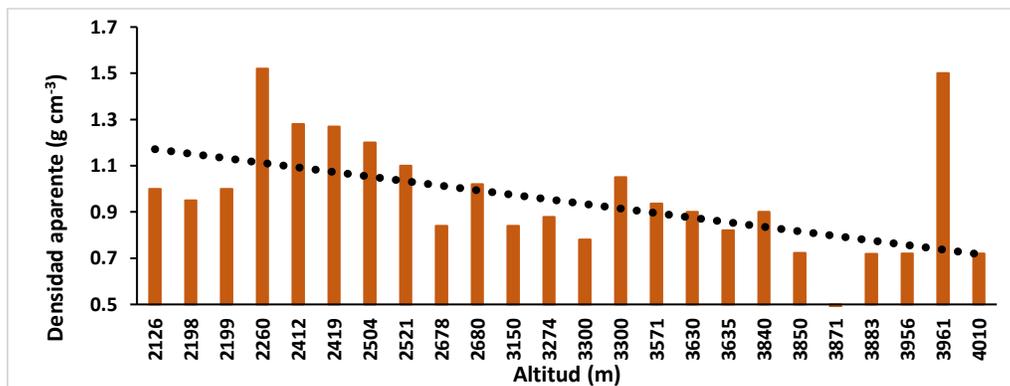


Figura 27. Densidad aparente del suelo en los sitios de muestreo

**pH del Suelo.** El pH del suelo se puede definir como una medida que se hace en la solución del suelo para saber si es ácido o alcalino. Esta medición es considerada como una variable “maestra”, debido a que el pH interviene en muchas reacciones químicas que se llevan a cabo en el suelo; entre ellas destaca la disponibilidad de los nutrientes. La variabilidad en el gradiente altitudinal de este parámetro se presenta en la Figura 28, donde se pudo apreciar una relación inversamente proporcional con la altitud, es decir, a medida que se incrementa la altitud, el pH desciende y se vuelve más ácido. En la altitud 2678 m, se observó 6.9 (valor máximo) y en la altitud 3571 se registró 4.2 (valor mínimo). En el pH activo se observó una correlación de Pearson con el fósforo total ( $r^2 = -0.42$ ,  $\alpha = 0.0273$ ).

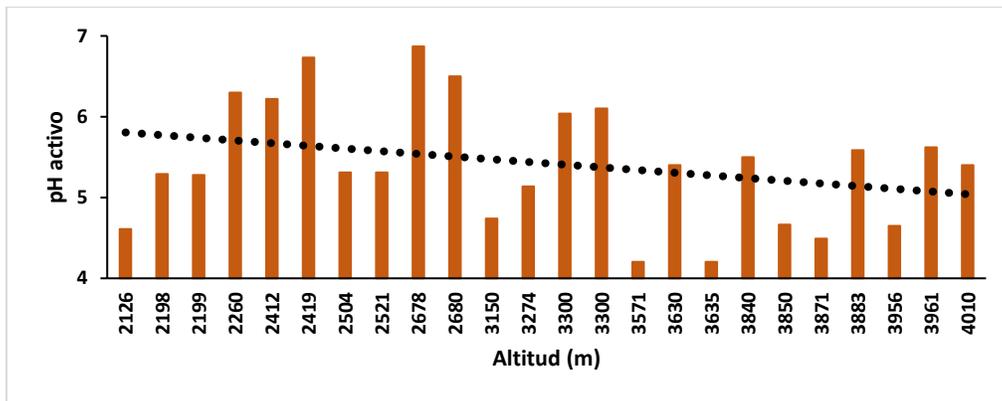


Figura 28. pH activo del suelo en los sitios de muestreo

**Conductividad Eléctrica del Suelo.** La conductividad eléctrica del suelo es la capacidad de una solución para transportar una corriente eléctrica. Comúnmente la medición de la conductividad eléctrica del suelo se utiliza para medir la concentración de sales en la solución de suelo. La medición de este parámetro y su comportamiento se pueden observar en la Figura 29, en la cual se apreció que la conductividad eléctrica del suelo tuvo una relación inversamente proporcional con la altitud, es decir, a una mayor altitud, el valor de conductividad eléctrica fue menor. Los valores máximos ( $1.3 \text{ dS m}^{-1}$ ) se observaron a una altitud de 2260 m; mientras que, el de menor valor ( $0.06 \text{ dS m}^{-1}$ ) se presentó a una altitud de 3883 m.

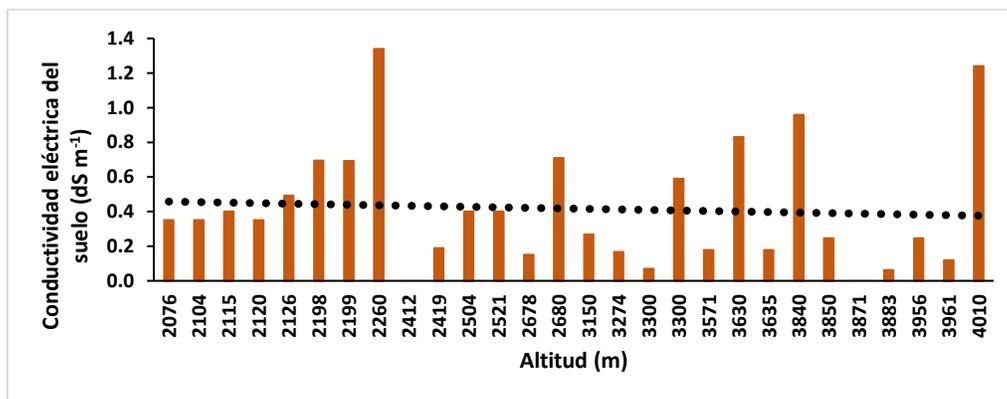


Figura 29. Conductividad eléctrica del suelo en los sitios de muestreo

Las correlaciones de Pearson que se pudieron observar para la conductividad eléctrica del suelo fueron con el nitrógeno total del suelo ( $r^2 = -0.55$ ,  $\alpha = 0.0094$ ) y el fósforo disponible en el suelo ( $r^2 = 0.65$ ,  $\alpha = 0.0019$ ).

**Carbono orgánico del suelo.** El carbono orgánico del suelo se puede definir como una mezcla heterogénea de residuos materiales vegetales o animales y se evalúa por medio del método de combustión húmeda descrita por Walkley y Black. Esta técnica solo detecta el carbono orgánico (entre 70 y 84% aproximadamente), excluyendo las formas condensadas y el carbono elemental. El comportamiento de este parámetro se puede observar en la Figura 30, donde se pudo apreciar una relación directamente proporcional con la altitud, es decir, mientras se incrementa la altitud, también se incrementa los contenidos de carbono orgánico del suelo. En las altitudes de 3883 m, se observó el mayor valor de carbono orgánico ( $99.1 \text{ Mg ha}^{-1}$ ), mientras que en 2680 m se apreció el menor valor ( $14.7 \text{ Mg ha}^{-1}$ ).

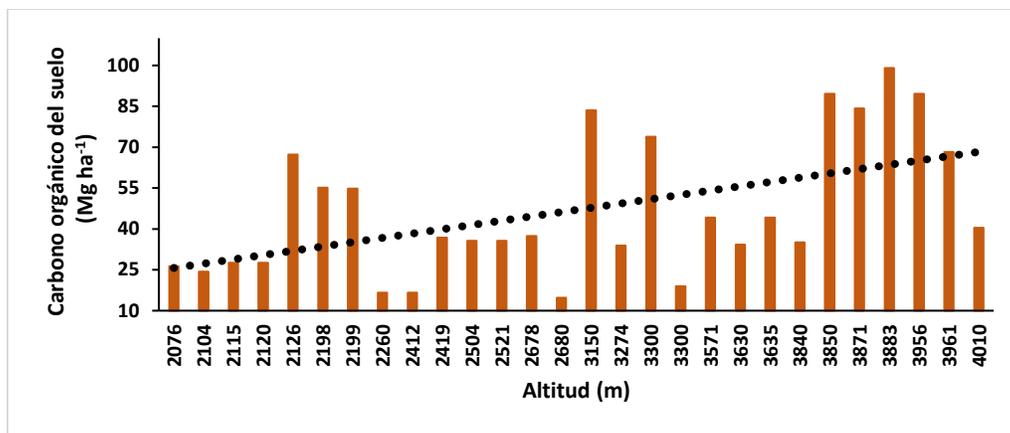


Figura 30. Carbono orgánico del suelo en los sitios de muestreo

En cuanto a las correlaciones de Pearson del carbono orgánico del suelo, se encontraron con el pH del agua ( $r^2 = 0.43$ ,  $\alpha = 0.0135$ ), alcalinidad ( $r^2 = -0.39$ ,  $\alpha = 0.0272$ ), densidad aparente ( $r^2 = -0.56$ ,  $\alpha = 0.0027$ ) y la relación C/N ( $r^2 = 0.73$ ,  $\alpha < 0.0001$ ).

**Nitrógeno total del suelo.** El nitrógeno es uno de los elementos más abundantes en la atmósfera después del C, H y O; se puede encontrar en varias formas químicas como:  $\text{N}_2$ ,  $\text{N}_2\text{O}$ ,  $\text{NO}$ ,  $\text{NO}_2^-$ ,  $\text{NO}_3^-$  y  $\text{NH}_4^+$ . Para que el nitrógeno circule en los ecosistemas y se fije en los tejidos de los organismos, lo obtienen de diferentes fuentes. En el caso de los suelos, es necesario que se lleve a cabo la fijación biológica del nitrógeno por organismos especializados como las bacterias fijadoras de nitrógeno. La variación del nitrógeno en el suelo ribereño se muestra en la Figura 31, donde se pudo observar una relación directamente proporcional con la altitud, es decir, en la medida en que se incrementa la altitud, también se incrementara el contenido de nitrógeno en el suelo. Los valores máximos (0.3%) se observaron en las altitudes 3150 m, 3871 m y 3956; los valores mínimos (0.03%) en 2412 m.

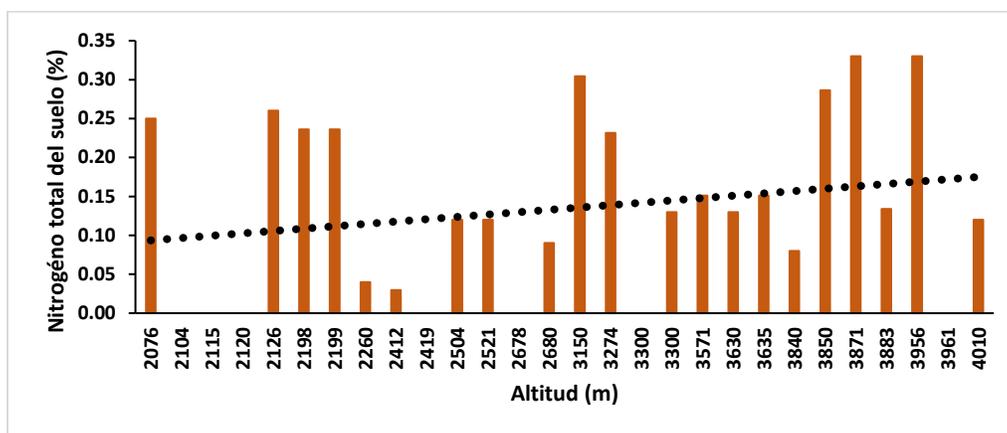


Figura 31. Nitrogeno total del suelo en los sitios de muestreo

El nitrógeno total del suelo mostró correlaciones de Pearson con el pH del agua ( $r^2 = 0.52$ ,  $\alpha = 0.0081$ ) y el amonio ( $r^2 = -0.46$ ,  $\alpha = 0.0204$ ); con la conductividad eléctrica del suelo ( $r^2 = -0.55$ ,  $\alpha = 0.0094$ ) y el fósforo disponible del suelo ( $r^2 = -0.41$ ,  $\alpha = 0.0494$ ).

**Fósforo Disponible.** El fósforo en el suelo es un elemento de gran importancia para las plantas, debido a que participa catalizando reacciones bioquímicas, como elemento estructural y como transporte de energía. En la naturaleza se puede encontrar en formas orgánicas e inorgánicas. Sin embargo, de acuerdo con el tipo de suelo este elemento puede encontrarse inmovilizado en formas inorgánicas menos solubles; en formas orgánicas es posible encontrarlo en el suelo como parte de la materia orgánica. Los contenidos de fósforo disponible en los suelos ribereños se presentan en la Figura 32, donde se pudo observar que tienen una relación directamente proporcional con la altitud, esto quiere decir que, en la media que se incrementa la altitud, también se incrementa el fósforo disponible en el suelo. Los valores máximos ( $77.8 \text{ mg kg}^{-1}$ ) se apreciaron a una altitud de 2260 m, mientras que los valores mínimos ( $1.7 \text{ mg kg}^{-1}$ ), se observaron en suelos de sitios ubicados a una altitud de 2412 m.

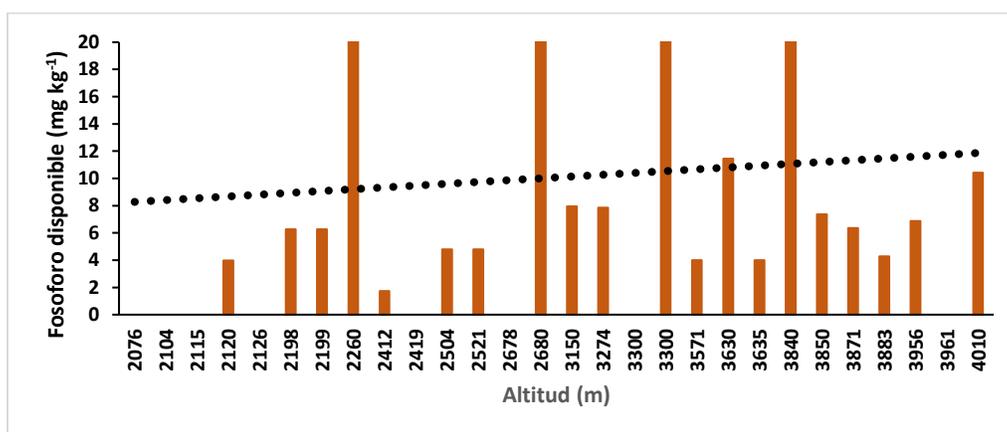


Figura 32. Fósforo disponible del suelo en los sitios de muestreo

El análisis de correlación de Pearson mostró relaciones entre el fósforo disponible en el suelo y otros parámetros, tanto de agua como de suelo; como la alcalinidad ( $r^2 = 0.42$ ,  $\alpha = 0.0399$ ), fósforo total ( $r^2 = 0.82$ ,  $\alpha < 0.0001$ ), densidad aparente ( $r^2 = 0.53$ ,  $\alpha = 0.0131$ ) y conductividad eléctrica del suelo ( $r^2 = 0.65$ ,  $\alpha = 0.0019$ ).

**Relación C/N.** La relación C/N se puede definir como un valor de proporción entre el carbono y el nitrógeno del suelo, se relaciona directamente con la mineralización de la materia orgánica y el nitrógeno en el suelo; valores muy altos o muy bajos de la relación C/N provocan liberación muy escasa o excesiva de nitrógeno. El C y el N son elementos de vital importancia para las plantas y para la vida en general, debido a que son elementos estructurales. Los resultados obtenidos para suelo ribereños se pueden observar en la Figura 33, donde se pudo apreciar que tiene una relación directamente proporcional con la altitud, es decir, a medida que se incrementa la altitud, se incrementa la relación C/N. Los valores máximos (37) se encontraron en las altitudes de 3883 m de altitud, mientras que los de menor valor (5.3), se observaron a 2076 m.

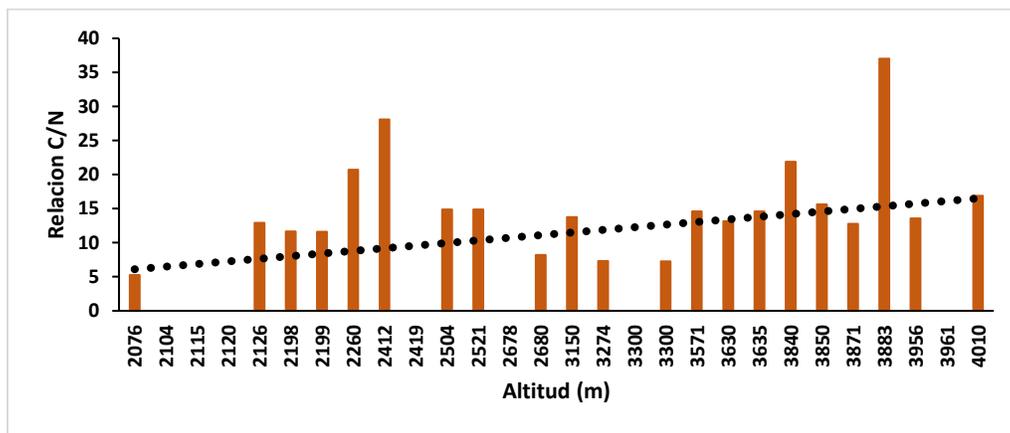


Figura 33. Relación C/N del suelo en los sitios de muestreo

La relación C/N, presentó correlaciones de Pearson con la densidad aparente del suelo ( $r^2 = -0.40$ ,  $\alpha = 0.0671$ ) y el carbono orgánico del suelo ( $r^2 = 0.73$ ,  $\alpha < 0.0001$ ).

Cabe mencionar que los tipos de suelo y usos de suelos se encuentran relacionados ( $r^2 = 0.79$ ,  $\alpha < 0.0001$ ). De esta manera se pudo apreciar que los tipos de suelo como los Phaeozem háplico, Cambisol éútrico y Regosol éútrico se relacionan más a los usos de suelo con agricultura de temporal, permanente y anual en altitudes bajas (2000-2500 m). Mientras que en las altitudes medias (2500-3500 m) se encuentran los tipos de suelos Phaeozem háplico y Regosoles éútricos y dístricos, asociados a la agricultura (solo en las partes más bajas), también la vegetación secundaria de pino, bosques de pino y oyamel. Y, por último, en el tramo más alto sobre la cuenca (3500-4000 m), se encontraron los tipos de suelo Regosol dístrico, Andosoles y litosoles (Leptosoles), que se encuentran asociados a bosques de pino y pradera de alta montaña.

### Vegetación

Para el análisis de la vegetación se obtuvieron 15 imágenes del satélite Sentinel 2B, las cuales se enlistan en el Cuadro 6.

Cuadro 6. Imágenes del Satélite Sentinel 2B, fecha y temporada a la que pertenecen (estiaje o lluvias).

Fecha	Temporada	Clave
18 de diciembre de 2017	Estiaje	NDVI 1
28 de marzo de 2018	Estiaje	NDVI 2
16 de julio de 2018	Lluvia	NDVI 3
26 de julio de 2018	Lluvia	NDVI 4
4 de septiembre de 2018	Lluvia	NDVI 5
21 de febrero de 2019	Estiaje	NDVI 6
2 de mayo de 2019	Lluvia	NDVI 7
21 de junio de 2019	Lluvia	NDVI 8
30 de agosto de 2019	Lluvia	NDVI 9
28 de noviembre de 2019	Estiaje	NDVI 10
3 de septiembre de 2020	Lluvia	NDVI 11
3 de octubre de 2020	Lluvia	NDVI 12
23 de octubre del 2020	Estiaje	NDVI 13
20 de febrero del 2021	Estiaje	NDVI 14
12 de marzo del 2021	Estiaje	NDVI 15

La vegetación como variable de estudio es muy importante, debido a que es un indicador visual que puede dar información sobre la calidad ambiental de un lugar, también es posible obtener información sobre el estado en que se encuentra el agua y el suelo. Cabe mencionar que los sitios ubicados entre 2076 y 2120 m de altitud no fue posible obtener los valores de NDVI, debido a la presencia de nubosidad en esta zona. Un parámetro valioso que indica el vigor de la vegetación y permite inferir la calidad ambiental de un sitio es el NDVI, cuyos valores obtenidos de la temporada de estiaje se observan en la Figura 34. Se reportaron como media de 0.54 y valores mínimos de 0.24 y máximos de 0.88.

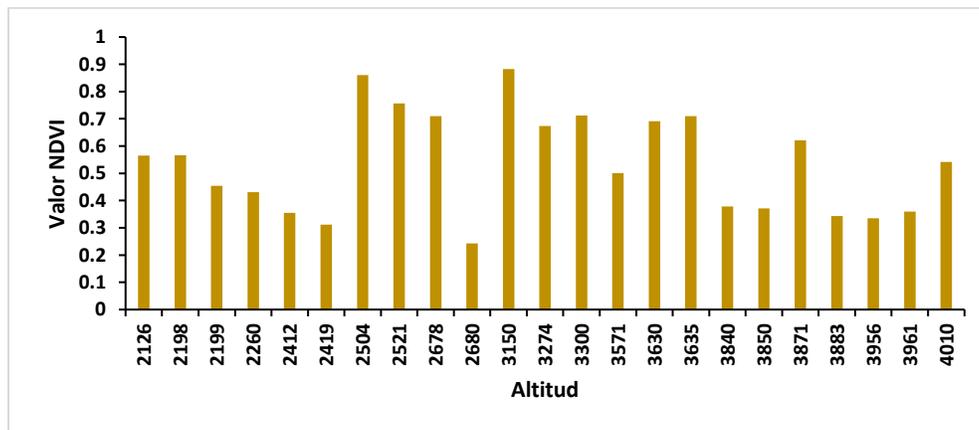


Figura 34. NDVI en temporada de estiaje

Los resultados de NDVI en la temporada de estiaje permiten apreciar que, en los sitios sobre las altitudes de 2504 m a 3635 m, se encontraron los mayores valores de NDVI, donde se encuentran los bosques de pino y la agricultura; mientras que en los sitios ubicados en los extremos del perfil inferior altitudinal (2126 a 2419 m) son menores debido a la presencia de plantas herbáceas promovidas por la agricultura. En el perfil altitudinal superior (3840 a 4010 m) se observaron los valores más bajos de NDVI probablemente por la presencia de los pastos característicos de la pradera de alta montaña.

En la Figura 35 se muestran los resultados del NDVI en la temporada de lluvias, donde se observó un promedio de 0.65, con valor mínimo de 0.44 y máximo de 0.86. También en esta figura se pudo observar que los valores de NDVI son mayores en casi en todas las altitudes, en comparación con los de la temporada de estiaje, a excepción de las altitudes de 3150 m, 3630 m, 3635 y 4010 m. otra diferencia con la temporada de estiaje se aprecia en las altitudes de 3600 m a 3900 m y de 2100 m a 2400 m, donde se elevaron los valores de NDVI.

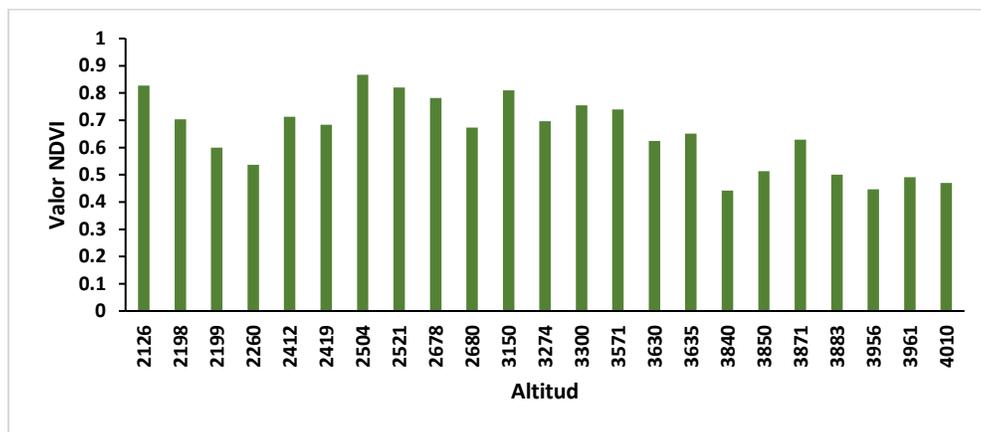


Figura 35. NDVI en temporada de lluvia

Los promedios de los valores de NDVI por temporada (lluvia y estiaje) se observan en la Figura 36, donde se pudo observar que el NDVI en temporada de lluvias fue mayor con 0.65, mientras que en temporada de estiaje el NDVI disminuyo 0.11 hasta situarse en 0.54. También en la Figura 37 se observa la distribución del NDVI, donde se puede observar que a media que se aleja del PNI-P, disminuyen los valores de la temporada de estiaje.

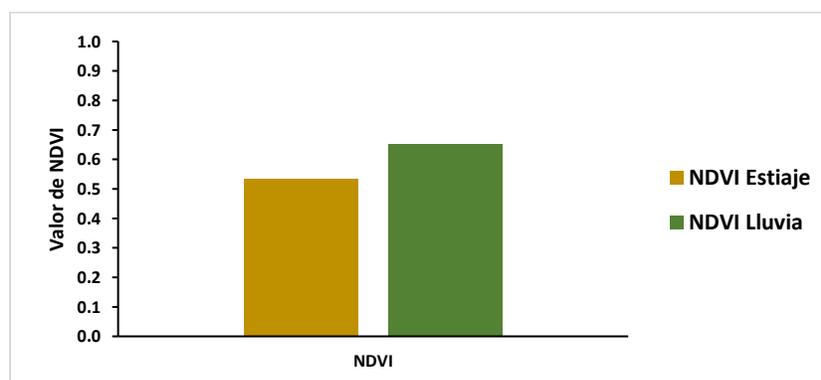


Figura 36. Comparación del promedio de NDVI en temporada de lluvia y de estiaje

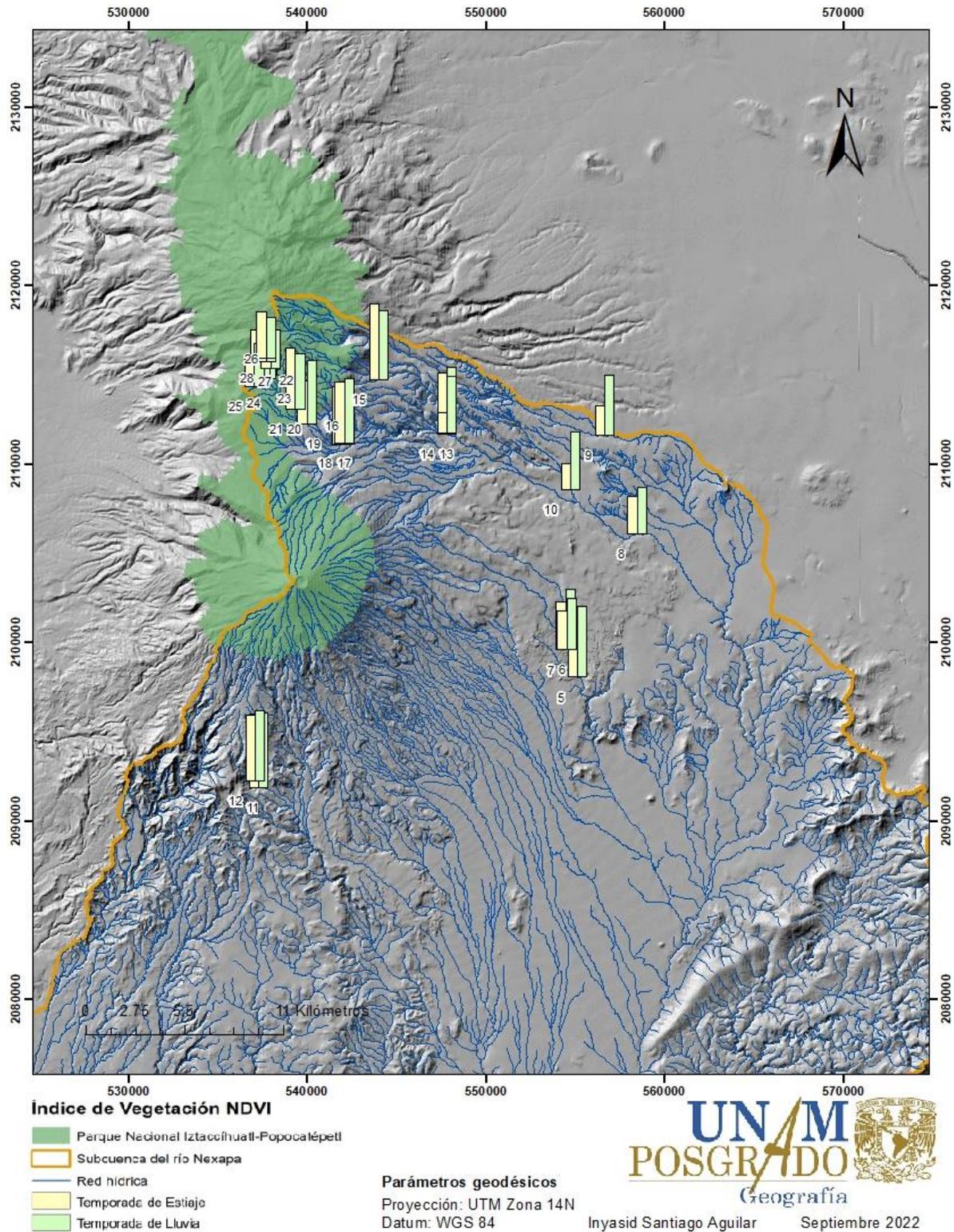


Figura 37. Índice NDVI en las zonas ribereñas estudiadas, elaboración propia con base en (INEGI, 2013; CONANP, 2022; INEGI-SIATL, 2022).

El análisis de correlación de Pearson entre los valores de NDVI con los otros indicadores hídrico-edáficos considerados en esta investigación, mostró relaciones significativas ( $p \leq 0.05$ ) con algunos parámetros de agua en la temporada de estiaje y las características de las zonas ribereñas estudiadas (Cuadro 7).

Cuadro 7. Correlaciones de Pearson con NDVI en estiaje ( $p \leq 0.05$ )

Variable	Sistema	$r^2$
Humedad ambiental	Ribera	0.58
Nitratos	Agua	-0.42
Amonio	Agua	-0.47
Fósforo total	Agua	-0.43
Ortofosfatos	Agua	-0.42
Oxígeno disuelto	Agua	0.51

También se observaron correlaciones de Pearson significativas entre el NDVI en temporada de lluvia con diferentes parámetros de agua, suelo y características de las zonas ribereñas (Cuadro 8).

Cuadro 8. Correlaciones de Pearson con NDVI en lluvia ( $p \leq 0.05$ )

Variable	Sistema	$r^2$
Altitud	Ribera	-0.62
Tipo de suelo	Ribera	-0.59
Uso de suelo	Ribera	-0.52
Temperatura del agua	Agua	0.55
Conductividad eléctrica	Agua	0.47
Nitratos	Agua	-0.46
Conductividad eléctrica	Suelos	-0.62
Relación C/N	Suelos	-0.55
Carbono orgánico	Suelos	-0.48

Los resultados de los valores del índice QBR evaluados como estudio de caso para 8 sitios ribereños se presentan en el Cuadro 9, donde se pudo apreciar que los sitios con una menor puntuación (25 o menos) indica una calidad pésima, se encuentran a menores altitudes (a excepción de Xalitzintla con calidad intermedia), mientras que los sitios de mayor puntuación (80 o más) presentaron una calidad buena.

Cuadro 9. Puntuación de QBR

Altitud (m)	Sitio	Puntuación QBR
2260	Nealtican	20
2419	San Nicolás de los Ranchos	25
2678	Xalitzintla	65
2680	Santiago Xalitzintla	25
3300	Buenavista A	90
3300	Buenavista B	80
3630	Apatlaco A	90
3840	Vallecito	90
3961	Cascada Ranita	100
4010	Cascada Volkswagen	100

Las relaciones entre los índices NDVI y QBR se presentan en el Cuadro 10, donde se puede observar que las correlaciones en la temporada de estiaje son altas en comparación con la temporada de lluvias, donde se presentaron correlaciones negativas.

Cuadro 10. Correlaciones de Pearson entre el índice QBR y NDVI

NDVI	Temporada	Coefficiente de correlación ( $r^2$ )
NDVI 2	Estiaje	0.63
NDVI 1	Estiaje	0.52
NDVI 15	Estiaje	0.51
NDVI 14	Estiaje	0.46
NDVI 6	Estiaje	0.42
NDVI 13	Estiaje	0.41
NDVI 5	Lluvia	-0.57
NDVI 4	Lluvia	-0.45
NDVI 3	Lluvia	-0.44

### ***Manejo Estadístico***

Se realizaron análisis de estadística no paramétrica de Kruskal-Wallis, los cuales mostraron los resultados que se observan en el Cuadro 11, en este se observaron que todos los

parámetros enlistados en el cuadro presentaron diferencias significativas y altamente significativas en sus medianas, entre ellas destacan la alcalinidad y el amonio del agua, además de la relación C/N del suelo.

Cuadro 11. Análisis Kruskal-Wallis

Parámetro	Chi-cuadrado	GL	Pr > Chi-cuadrado
Altitud	27.96	7	0.0002
Tipo de suelo	29.04	7	0.0001
Uso de suelo	31	7	0.0001
Temperatura ambiental	20.06	7	0.0054
Temperatura del agua	24.61	7	0.0009
Conductividad eléctrica del agua	19.96	7	0.0056
Alcalinidad	15.92	7	0.0258
Amonio	15.72	7	0.0278
Relación C/N	14.53	7	0.0426

GL=Grados de libertad

### *Análisis de correlación canónica*

El resultado del análisis de correlaciones canónicas se presenta en el Cuadro 12, donde se pudo apreciar que parámetros como la temperatura ambiental, la temperatura del agua y la conductividad eléctrica del agua se encontraron como variables robustas para evaluar la calidad ambiental. Del mismo modo, las características de los sitios de estudio, como la altitud, el tipo de suelo y el uso del suelo aparecieron como variables robustas (Cuadro 13).

Cuadro 12. Correlaciones múltiples cuadradas entre parámetros y las primeras variables canónicas de características de sitio

	Altitud	Tipo de suelo	Uso de suelo
Temperatura ambiental	0.5940	0.6047	0.6092
Temperatura del agua	0.7130	0.7133	0.8640
Conductividad eléctrica del agua	0.6841	0.7008	0.7220
Amonio	0.2107	0.2673	0.2925
Relación C/N	0.0002	0.1267	0.1386
NDVI 3	0.3076	0.3781	0.4106
NDVI 8	0.0146	0.0146	0.2036
NDVI 9	0.1924	0.2988	0.3230

Cuadro 13. Correlaciones múltiples cuadradas entre características de sitio y las primeras variables canónicas de parámetros

	Temperatura ambiental	Temperatura del agua	Conductividad eléctrica del agua
Altitud	0.9489	0.9550	0.9779
Tipo de suelo	0.6450	0.6554	0.8752
Uso de suelo	0.5686	0.6758	0.8679

### *Índice de calidad de ambientes ribereños (ICAR)*

Con los resultados del análisis de Kruskal-Wallis y de correlaciones canónicas, se encontró que las variables robustas (Conductividad eléctrica del agua, amonio, relación C/N) en conjunto con la materia orgánica del suelo, definen la calidad ambiental en los ecosistemas ribereños estudiados. En el Cuadro 14 se presenta el parámetro, su promedio y desviación estándar que se utilizaron para definir los intervalos utilizados para asignar puntaje y definir la calidad ambiental.

Cuadro 14. Variables de calidad ambiental (agua y suelo) del Parque Nacional Iztaccíhuatl-Popocatepetl.

Parámetro	Media $\pm$ DE	Valor	Puntaje
Conductividad eléctrica del agua	106.8 $\pm$ 84.5 $\mu$ S cm <sup>-1</sup> (Fig. 38 y 39)	>190.1	6.25
		184.1 - 190	12.5
		<84	25
Concentración de Amonio en agua	0.5 $\pm$ 1.1 mg L <sup>-1</sup> (Fig. 40)	>0.5	12.5
		<0.5	25
Relación C/N en suelo	15.6 $\pm$ 7.2 (Fig. 41)	> 25	6.25
		15.1 - 25	12.5
		5 - 15	25
		< 4	5
Materia orgánica del suelo	4.4 $\pm$ 2.3 % (Fig. 41)	4.1 - 6	10
		6.1 - 10.9	15
		11 - 16	20
		> 16.1	25

DE = desviación estándar

La distribución espacial de las variables robustas utilizadas para medir la calidad ambiental en agua y suelo se presentan en las figuras 38 a 41. En estos mapas se observa que los sitios ribereños 8, 9 y 10 presentaron los valores más altos para las variables de agua y para la relación C/N.

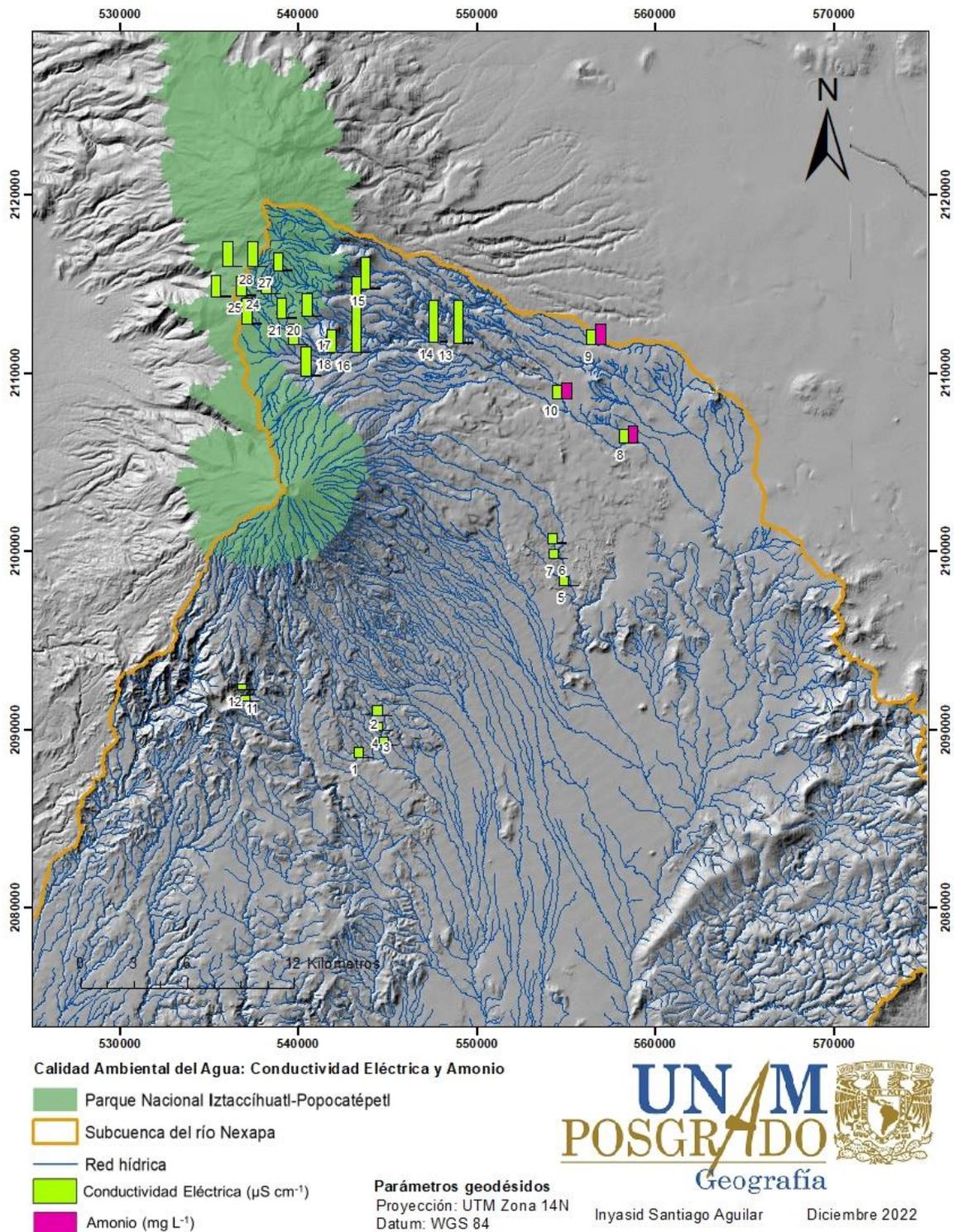


Figura 38. Conductividad eléctrica y amonio en el agua de zonas ribereñas estudiadas del PNI-P. La conductividad eléctrica está representada como notación científica, en las altitudes de 2076-2521 se usó  $\times 10^{-2}$  y de 2678-4010 se utilizó  $\times 10^{-1}$ , elaboración propia con base en (INEGI, 2013; CONANP, 2022; INEGI-SIATL, 2022).

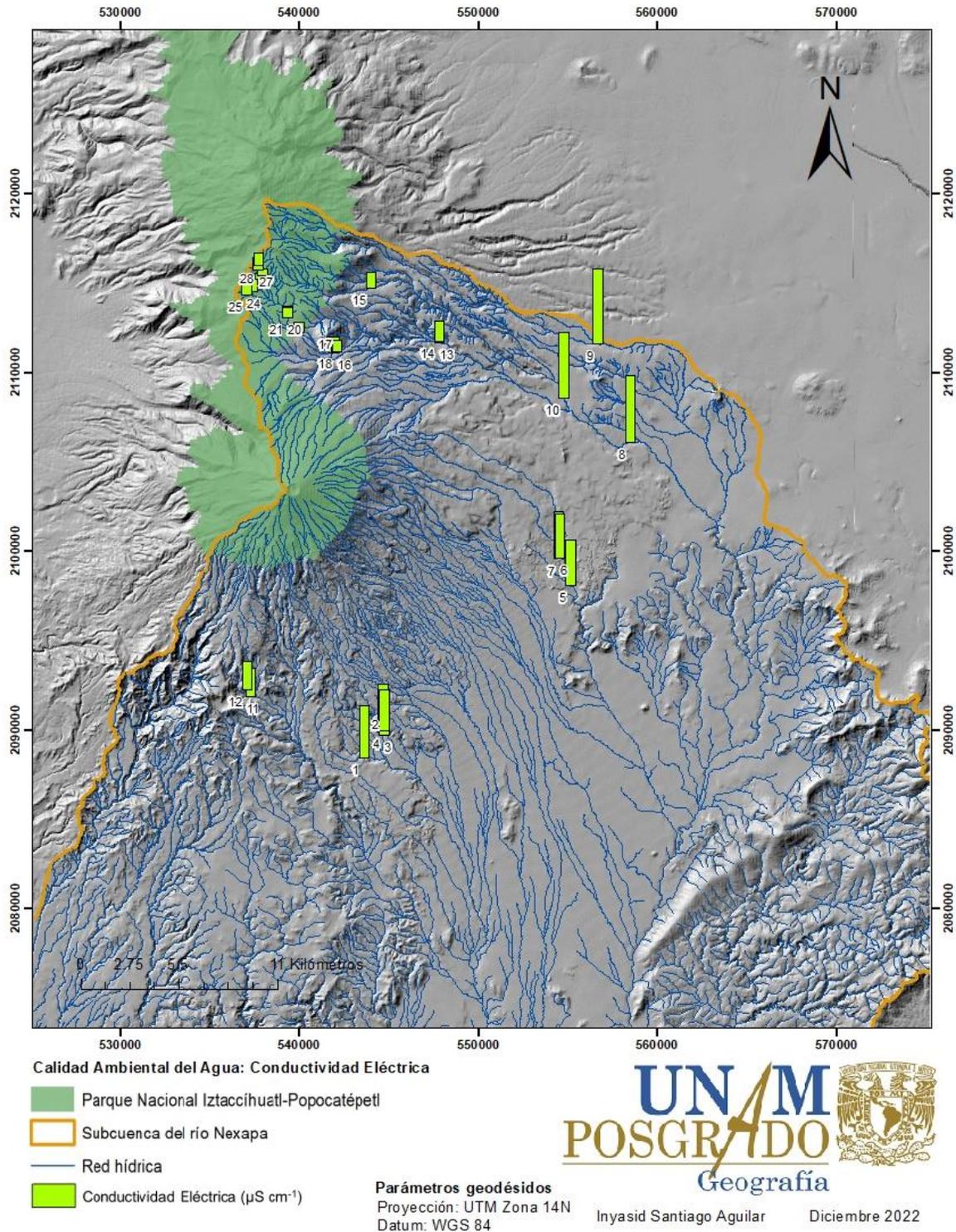


Figura 39. Conductividad eléctrica en el agua de zonas ribereñas estudiadas del PNI-P, elaboración propia con base en (INEGI, 2013; CONANP, 2022; INEGI-SIATL, 2022).

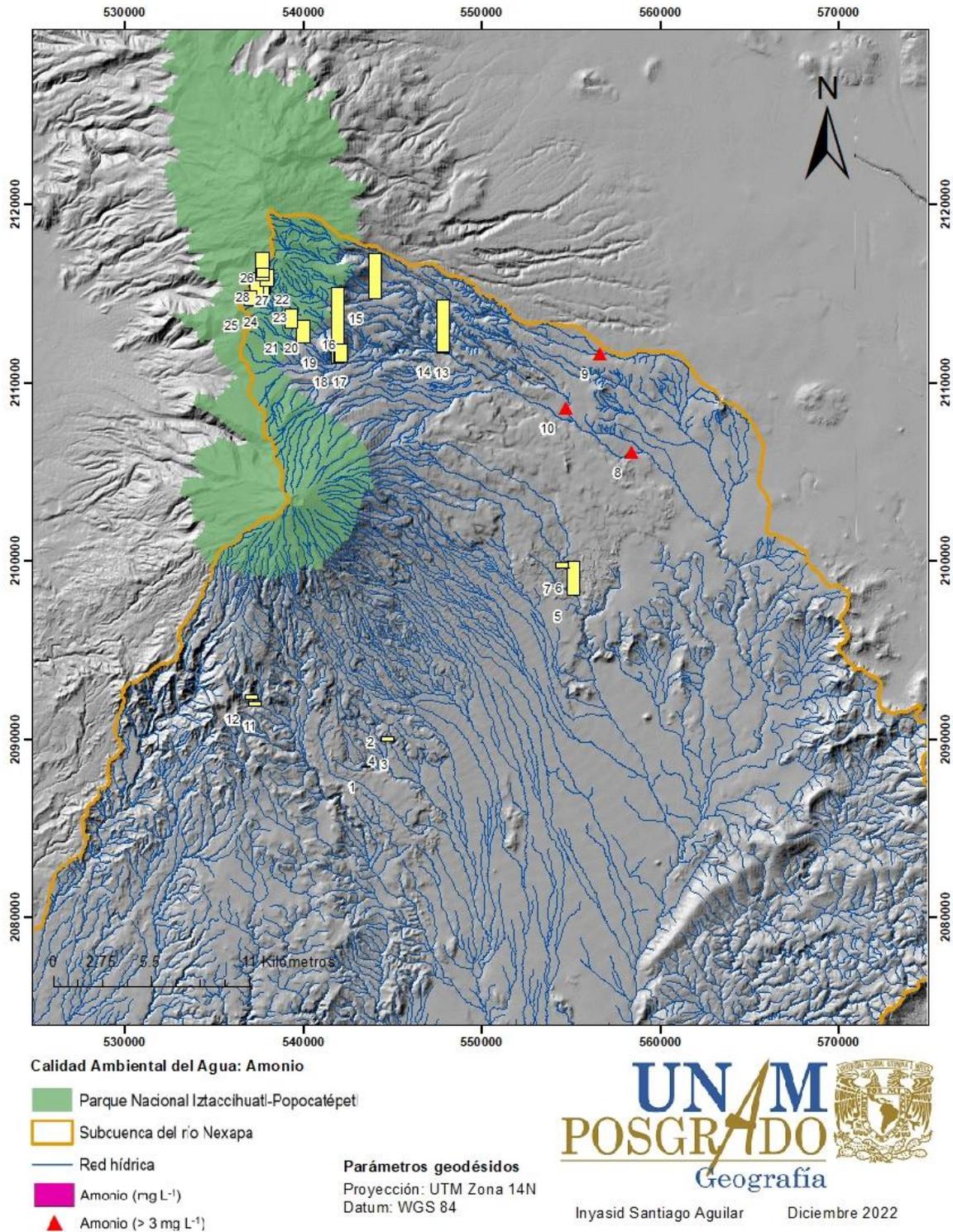


Figura 40. Amonio en el agua de zonas ribereñas estudiadas del PNI-P, elaboración propia con base en (INEGI, 2013; CONANP, 2022; INEGI-SIATL, 2022).

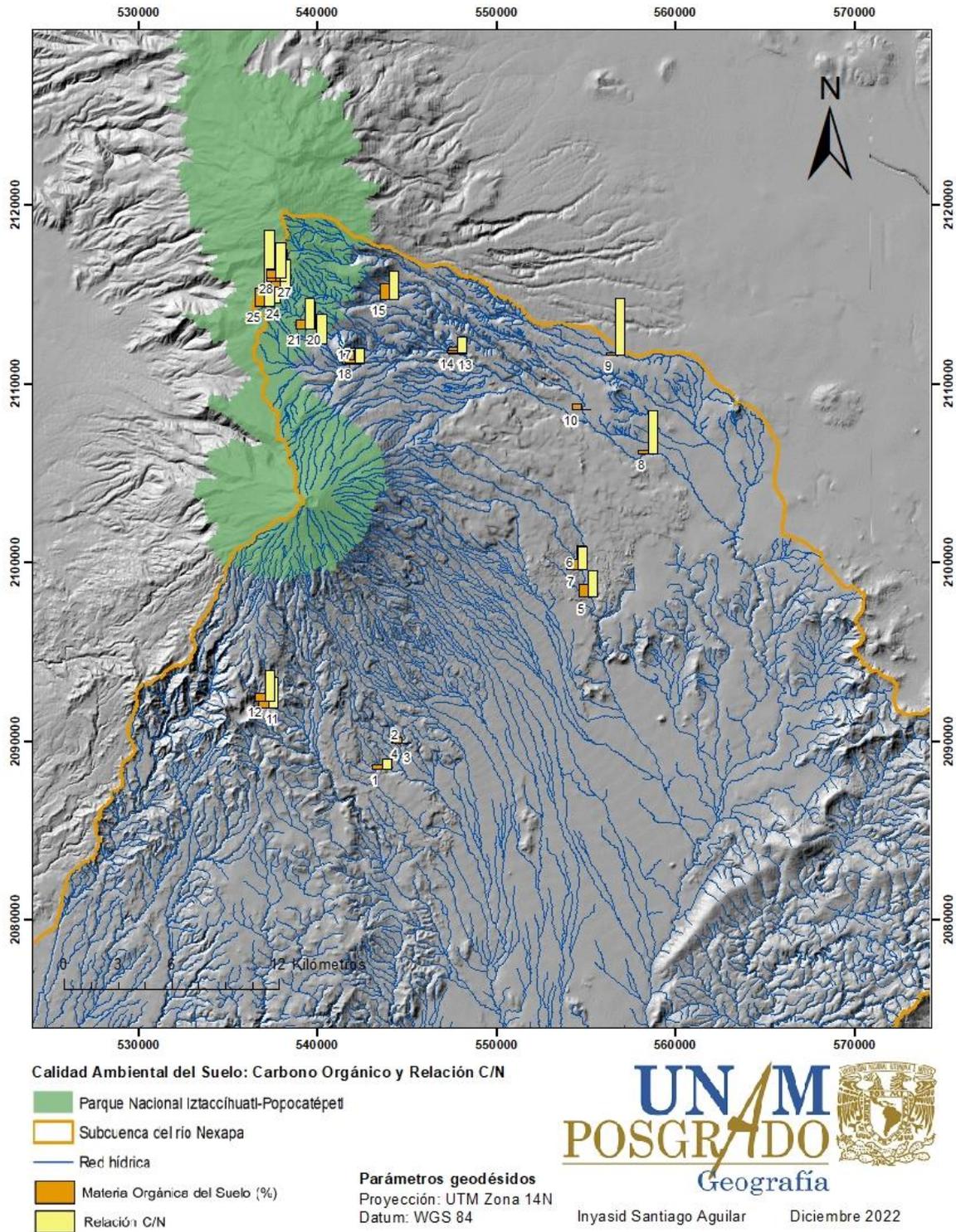


Figura 41. Materia orgánica y relación C/N en suelos ribereños estudiados del PNI-P, elaboración propia con base en (INEGI, 2013; CONANP, 2022; INEGI-SIATL, 2022).

Cuadro 15. Valores de calidad ambiental en sitios ribereños distribuidos en una secuencia altitudinal en el Parque Nacional Iztaccíhuatl Popocatepetl y su área de influencia

	Altitud	Media por parámetro	Puntuación	Calidad
Tochimilco Barrio San Juan	2076	CEA: 214	6.25	61.25
		AA: 0.005	25	
		CN: 5.27	25	
		MO: 2.27	5	
Tochimilco Arroyo-Ciénega	2014	CEA: 197	6.5	61.5
		AA: 0.001	25	
		CN: 5.27 <sup>£</sup>	25	
		MO: 2.10	5	
Tochimilco el Calvario	2115	CEA: 159	12.5	67.5
		AA: 0.005 <sup>£</sup>	25	
		CN: 5.27 <sup>£</sup>	25	
		MOS: 2.27 <sup>£</sup>	5	
Tochimilco Manantial	2120	CEA: 169.5	12.5	67.5
		AA: 0.01	25	
		CN: 5.27 <sup>£</sup>	25	
		MOS: 2.38	5	
San Pedro Atlixco	2126	CEA: 185.5	12.5	77.5
		AA: 0.11	25	
		CN: 12.93	25	
		MOS: 6.23	15	
San Baltazar Atlimeyaya Manantial	2198	CEA: 191.9	6.25	66.25
		AA: 0.02	25	
		CN: 11.67	25	
		MOS: 5.10	10	
San Baltazar Atlimeyaya Arroyo	2199	CEA: 183.1	12.5	60
		AA: 0.001	25	
		CN: 11.60	12.5	
		MOS: 5.07	10	
Nealtican	2260	CEA: 270.8	6.25	35.75
		AA: 3.19	12.5	
		CN: 20.74	12.5	
		MOS: 1.43	5	
	2412	CEA: 308	6.25	29.5

Calidad Ambiental de Sistemas Ribereños del Parque Nacional Iztaccíhuatl-Popocatepetl y su zona de influencia

Río Alseseca Calpan		AA:4.18 CN:28.10 MOS: 1.43	12 6.25 5	
San Nicolas de los Ranchos	2419	CEA: 270.8 AA:3.19 CN: 3.95 MOS: 3.20	6.25 12.5 25 5	48.75
Ixoalco 1	2504	CEA:116 AA:0.01 CN:14.87 MOS: 3.52	12.5 25 25 5	67.5
Ixoalco 2	2521	CEA: 112.5 AA:0.01 CN:14.87 MOS: 3.52	12.5 25 25 5	67.5
Xalitzintla	2678	CEA: 84.7 AA:0.18 CN: 4.8 MOS: 3.20	12.5 25 25 5	67.5
Santiago Xalitzintla	2680	CEA: 84.7 AA:0.18 CN:8.18 MOS: 1.27	12.5 25 25 5	67.5
Río Apol	3150	CEA: 63 AA:0.15 CN:13.74 MOS: 7.74	25 25 25 15	90
Buenavista	3274	CEA: 61.5 AA:0.26 CN:7.32 MOS: 3.14	25 25 25 5	80
Buenavista 1	3300	CEA: 45.8 AA:0.06 CN:14.14 MOS: 6.40	25 25 25 15	90
Buenavista 2	3300	CEA: 45.8	25	80

		AA:0.06	25	
		CN:7.27	25	
		MOS: 1.63	5	
Apatlaco Parque Ecoturístico	3571	CEA: 41.5	25	80
		AA:0.08	25	
		CN:14.59	25	
		MOS: 4.08	5	
Apatlaco 1	3630	CEA: 46.3	25	80
		AA:0.06	25	
		CN:13.16	25	
		MOS: 2.95	5	
Apatlaco 2	3635	CEA: 40	25	80
		AA:0.06	25	
		CN:14.59	25	
		MOS: 4.08	5	
Vallecito	3840	CEA: 41.5	25	67.5
		AA:0.05	25	
		CN:21.90	12.5	
		MOS: 3.02	5	
Apatlaco 3	3850	CEA: 35	25	77.5
		AA:0.15	25	
		CN:15.64	12.5	
		MOS: 8.29	15	
Manantial Volkswagen	3871	CEA:51	25	90
		AA:0.1	25	
		CN:12.76	25	
		MOS: 7.26	15	
Volkswagen	3883	CEA: 37.5	25	71.25
		AA:0.04	25	
		CN:37.01	6.25	
		MOS: 8.52	15	
Apatlaco 4	3956	CEA: 29	25	90
		AA:0.06	25	
		CN:13.58	25	
		MOS: 8.29	15	
Cascada Ranita	3961	CEA: 50.8	25	85

		AA:0.03	25	
		CN:15.90	25	
		MOS: 5.90	10	
		CEA: 50.8	25	
Cascada	4010	AA:0.03	25	67.5
Volkswagen		CN:16.87	12.5	
		MOS: 3.49	5	

CEA: Conductividad eléctrica del agua, AA: Amonio en Agua, CN: Relación C/N, MOS: Materia orgánica del suelo, <sup>£</sup>Valor obtenido de Tochimilco Barrio San Juan

En concordancia con la asignación de calidad en el tipo de vegetación, los valores del Cuadro 15, permitieron generar clases que se determinaron en función de la NOM-127-SSA1-1994 (DOF, 2000) para amonio y la NOM-021-SEMARNAT-2000 (SEMARNAT, 2000) para materia orgánica del suelo, además de la media y la desviación estándar para CEA y relación C/N. Para este último se utilizaron también los criterios descritos por: Joffre, *et al.* (2001); Baisden *et al.* (2002); Ladd *et al.* (2004); Cruz y Etchevers (2011), donde dicen que las relaciones C/N (mayores 30:1) limitan la descomposición de materiales orgánicos y la disponibilidad de nitrógeno, mientras que aquellos con relación C/N entre 15:1 y 30:1 tienen un tiempo medio de residencia menor.

Los puntajes de cada rubro para cada sitio son de 100 puntos siempre que, en todos los parámetros, la variable robusta respectiva aporte 25 puntos. En el Cuadro 15 se presentan la puntuación y el valor de calidad para cada sitio ribereño estudiado.

Con base en el Cuadro 16 y en analogía con las clases establecidas en el QBR (Munné *et al.*, 1998), se definieron cinco categorías o clases en las que se prevén las posibilidades o acciones a realizar sobre conservación, mantenimiento, recuperación o de restauración.

Cuadro 16. Puntuación final y código de color de la calidad ambiental de riberas del Parque Nacional Iztaccíhuatl Popocatepetl y su área de influencia

Observación	Nivel de calidad	Puntos	Color
Sitios ribereños sin alteraciones	Calidad muy buena, estado natural	$\geq 90$	Azul
Sitios ribereños ligeramente perturbado	Calidad buena	75 a 90	Verde
Sitios ribereños con inicio de alteración importante	Calidad intermedia	55 a <75	Amarillo
Sitios ribereños con alteración fuerte	Calidad mala	30 a <55	Naranja
Sitios ribereños con degradación extrema	Calidad pésima	$\leq 30$	Rojo

Los sitios de estudio y su calidad se pueden observar en la Figura 42, donde se puede observar que, de los 28 sitios ribereños estudiados, 12 presentaron una calidad ambiental buena, 13

con calidad ambiental intermedia, dos con calidad ambiental mala y un sitio con calidad ambiental pésima.

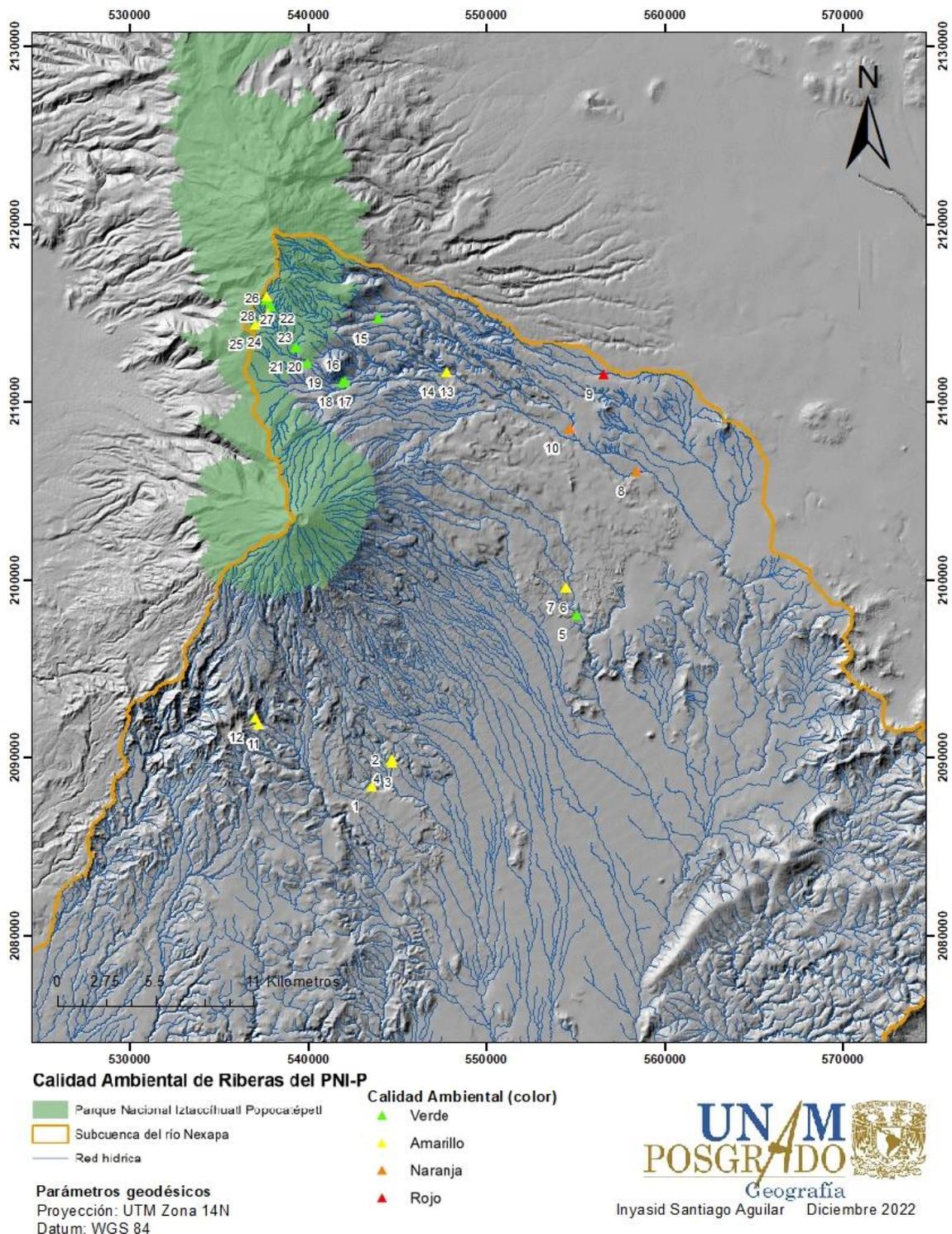


Figura 42. Calidad ambiental final de riberas en el PNIP, elaboración propia con base en (INEGI, 2013; CONANP, 2022; INEGI-SIATL, 2022).

## Análisis de resultados

Un tipo especial de ecosistemas que se encuentra estrechamente ligado a sistemas terrestres y acuáticos, son los ecosistemas ribereños, los cuales por encontrarse en la interacción de dos sistemas los hace complejos. Además, en el Parque Nacional Iztaccíhuatl Popocatepetl y en su zona de influencia con fuerte presión antrópica, son ecosistemas de zonas templadas que, por su ubicación geográfica, altitud, dinámica, estructura y fisionomía son sistemas frágiles y difíciles de estudiar. Debido a esta fragilidad, los ecosistemas ribereños son más sensibles a los cambios (de origen antrópico) en la composición y estructura de sus componentes, como la vegetación, el agua y el suelo.

### Parámetros de agua

El agua es la sustancia más importante para el origen y sustento de la vida, debido a las funciones que tiene, como hábitat para especies, como elemento estructural, como medio de transporte, como catalizador de reacciones, como regulador de temperatura, como medio de disolución, entre otras funciones. Por tales motivos, el agua propicia un funcionamiento equilibrado en los ecosistemas.

En el planeta Tierra, el agua ocupa gran parte de su superficie, pero solo una pequeña parte de ésta, es agua dulce, que se encuentra repartida dentro de las zonas continentales, entre escurrimientos superficiales y acuíferos. Esta agua dulce es agua potable que potencialmente es apta para consumo humano, sin embargo, las aguas continentales no solo tienen una función y uso para los humanos, sino que también para los demás organismos que viven y depende de ella, por lo que toma especial relevancia velar por la calidad y cantidad del agua.

### *Temperatura del agua*

En las zonas ribereñas de alta montaña las temperaturas del agua presentaron una tendencia a ser más frías a medida que se incrementa la altitud. En este efecto participan dos variables ambientales: la ubicación y topografía de las riberas. La altitud está asociada a la existencia de diferentes tipos de climas, ya que ocurre una disminución de la temperatura con la altitud, a razón de 0.68 °C por cada 100 metros que se incrementa la altitud (CONANP, 2013; Guerra y Cruz, 2017).

En el análisis de correlación de Pearson, el uso y tipo de suelo de las zonas ribereñas estudiadas se presentaron como variables que se correlacionan con la altitud. También se observó la importancia de estas variables y su influencia en la temperatura del agua, bajo la acción de la ubicación en el gradiente altitudinal, sobre el cual existe un mosaico edafológico (Sandoval, 2016) y de vegetación típico de las zonas de ribera; tal como lo menciona Granados *et al.* (2006) y en su investigación, donde afirma que las bandas de vegetación de ribera sombrea el agua y reducen su temperatura durante los días calurosos, estabilizan las orillas, reducen los riesgos de erosión y ofrecen un hábitat a muchas especies vegetales y animales.

Otros parámetros como la conductividad eléctrica del agua y la alcalinidad presentaron correlación con la temperatura del agua. Esto se confirma al observar los gráficos de los tres parámetros, los cuales presentaron la misma tendencia (a mayor altitud, menor conductividad eléctrica y alcalinidad). Las gráficas de la conductividad eléctrica y la alcalinidad presentaron un comportamiento similar, lo que se explica por qué los sitios ubicados en las zonas altas (mayores a 2700 m) no hay presencia de actividades antrópicas como la agricultura, ganadería y zonas urbanas que degradan los suelos y las aguas de zonas ribereñas. Mientras que en las altitudes menores a 2700 m donde se encuentran las zonas agrícolas y urbanas, se presenta la erosión de los suelos, los cuales provocan que se formen escorrentías temporales por la lluvia, la cual lleva consigo sales, materia orgánica y contaminantes presentes en los suelos y, a causa de su desplazamiento se vierten en el cauce principal (Hala, 2012); estas sustancias contienen iones de  $\text{Ca}^{2+}$  y  $\text{Mg}^{2+}$  que (además de intervenir en las mediciones de alcalinidad y conductividad) son los responsables de la mineralización del agua (Varol, 2020).

### ***Conductividad Eléctrica del Agua***

La conductividad eléctrica del agua de zonas ribereñas no mostró valores elevados (máximo  $308 \mu\text{S cm}^{-1}$ ). Esto coincide con lo reportado por Aveiga *et al.* (2019), en su investigación de calidad del agua, donde encontraron valores para la conductividad eléctrica del agua de entre  $245$  y  $459 \mu\text{S cm}^{-1}$ , y los clasifican como concentraciones relativamente bajas. Además, según la clasificación propuesta por Jenkins *et al.* (1983) donde relaciona la calidad del agua con la conductividad eléctrica, clasifica a los sitios estudiados con un grado excelente ( $<250 \mu\text{S cm}^{-1}$ ) o bueno ( $250-750 \mu\text{S cm}^{-1}$ ).

En las zonas de baja altitud (2260 m – 2419 m) donde se encuentran más cercanas a zonas urbanas y agrícolas altamente perturbadas, se observaron valores altos ( $270.8$  y  $308 \mu\text{S cm}^{-1}$ ) de conductividad eléctrica en agua, lo cual coincide con lo reportado por Ternus *et al.* (2011) que indica en su investigación que, en los sitios perturbados, se observaron valores más altos de conductividad eléctrica; lo cual se asocia a la mayor recarga de materia orgánica, nutrientes y elevada concentración de iones producto del impacto humano, así como también de la mayor entrada de sedimentos debido a la falta de vegetación ribereña. Otros autores que mencionan que la perturbación de los ambientes es la que provoca un aumento de la conductividad eléctrica del agua son Gómez *et al.* (2017), quienes afirman que el aumento para este parámetro es consecuencia de la mayor cantidad de sales disueltas (aniones de cloruro, nitrato, sulfato y fosfato) provenientes de efluentes ricos en materia orgánica.

Las relaciones que se señalaron en el análisis de correlación de Pearson con la conductividad eléctrica del agua fueron la altitud y el tipo y uso de suelo, aunque cabe mencionar que fueron correlaciones negativas. Las tres variables que se mencionan se encuentran estrechamente ligadas entre sí, debido a que con la altitud varían el tipo de suelo, el uso de suelo y la vegetación en las zonas de riberas. En las zonas de menor altitud se encuentran cercanos a zonas urbanas, pero sobre todo a zonas de cultivo que, en ambos casos, modifican los ecosistemas para poder darles ese uso. Esto coincide con lo mencionado por Palomino (2018), quien indica que el río Mashcon en Perú, también está influenciado por el desarrollo urbano y otras actividades, principalmente agricultura y ganadería.

Las correlaciones de Pearson señaladas como positivas para la conductividad eléctrica del agua fueron la alcalinidad y el amonio. Esto se debe a que, en ambos casos son iones que gráficamente presentaron un comportamiento similar; disminuyen conforme se incrementa la altitud, por lo que es posible afirmar que en las partes altas no hay un impacto significativo de la actividad humana, por lo tanto, la alcalinidad y el amonio se pueden asociar a contaminantes en las partes bajas. Así lo menciona Abarca (2007), al afirmar que es importante medir la alcalinidad para determinar la capacidad del agua de neutralizar los contaminantes ácidos provenientes de la lluvia o de los desechos municipales e industriales.

### ***pH del Agua***

Uno de los parámetros con un gran peso en todos los sistemas acuáticos, pero sobre todo en los ríos, es el pH. Esta variable mostró una tendencia a ser más ácido en zonas altas, mientras que en las zonas bajas el pH es más neutro o alcalino; esto se debe a que en las partes bajas de las cuencas las actividades humanas tienen un mayor desarrollo, como las zonas urbanas o la agricultura. Esto lo menciona García *et al.* (2019) en su investigación, donde afirman que existen otros factores externos que pueden causar fluctuaciones en el pH de un río, los cuales incluyen los desechos de la agricultura, los drenajes ácidos de minería y las emisiones de combustibles fósiles, como el dióxido de carbono, el cual genera un ácido débil cuando se disuelve en el agua de los ríos.

Las correlaciones de Pearson establecidas entre el pH y los parámetros de alcalinidad y conductividad eléctrica fueron negativas; por lo tanto, en bajas altitudes el pH del agua se encuentra entre neutro a alcalino, con una tendencia a altos niveles de alcalinidad y conductividad eléctrica, lo que confirma que en esas altitudes hay presencia de contaminantes, donde son más comunes las actividades agrícolas, pecuarias o urbanas. Esto lo menciona Hossain y Patra (2020) cuando dicen que el pH controla la química del agua, incluida la alcalinidad, la acidez y la especiación química. Los efectos de la contaminación del agua se pueden observar en los estudios de Matsumoto y McNeil (2019), donde afirman que los sistemas de agua dulce continentales (lagos y ríos) presentan condiciones locales únicas (por ejemplo, escorrentía, eutrofización, contaminación local, etc.), lo que provoca sobresaturación de CO<sub>2</sub> y la alteración de las tasas de fotosíntesis y productividad primaria en aguas continentales (Huisman *et al.*, 2018).

En cuanto a las correlaciones de Pearson con parámetros de suelo como el carbono orgánico del suelo y el nitrógeno total, son promovidas por la interacción entre el suelo y el agua de manera directa, es decir, sin una barrera física como la vegetación que impida su interacción y, por lo tanto, sucede el arrastre de materiales del suelo como la materia orgánica y los fertilizantes hacia los cuerpos de agua, lo que provoca cambios en su composición química, afectando el pH. La vegetación ribereña contribuye con su sistema radicular a la acumulación de contaminantes y retención de sedimentos, además interviene en el control del flujo de agua, de materia orgánica y nutrientes hacia los cursos de agua (Cummins, 1974; Naiman *et al.*, 2005; Mendoza *et al.*, 2015).

### ***Oxígeno Disuelto***

Las mediciones de oxígeno disuelto en los ecosistemas acuáticos son una parte importante en los análisis de calidad del agua y de los ambientes en general, los datos obtenidos representan un factor determinante para la biodiversidad. La determinación del oxígeno disuelto se utiliza como un indicador para conocer el estado de salud de un ecosistema acuático (Null *et al.*, 2017; Zhang *et al.*, 2015). El oxígeno disuelto de las zonas ribereñas estudiadas mostró una tendencia a incrementarse en el gradiente altitudinal, sin llegar a ser excesivo en las zonas más altas, en donde las caídas de agua la oxigenan; además es probable que exista un equilibrio entre la materia orgánica y el oxígeno disuelto. Esto lo menciona De la Mora *et al.* (2017) en su investigación, donde afirma que la presencia de la materia orgánica en el agua disminuye de manera importante la concentración de oxígeno, ya que requiere del mismo para su degradación.

Las concentraciones mínimas de Oxígeno disuelto que pueden garantizar el mantenimiento de las funciones biológicas del medio acuático dependen de la temperatura del agua; el mínimo oscila entre 4 y 9.5 mg L<sup>-1</sup> (Enderlein *et al.*, 1997). Por lo tanto, las localidades ribereñas en donde se observaron valores menores a 3.0 mg L<sup>-1</sup>, la biota puede presentar problemas de anoxia, y en los lugares con concentraciones por encima de 8.0 mg L<sup>-1</sup>, puede ser indicio de contaminación por el exceso de materia orgánica que promueve la proliferación de cianobacterias potencialmente dañinas para la biota acuática. Esto lo mencionan Iriondo y Mota (2004) en su investigación al afirmar que el agua debe contener una concentración mínima de 3.0 mg L<sup>-1</sup> para la supervivencia de la biota, al igual que Rizo y Andreo (2015) en su investigación, donde dicen que concentraciones constantes mayores de 5.0 mg L<sup>-1</sup> pueden poner en riesgo la salud del ecosistema.

La correlación de Pearson con el oxígeno disuelto en el agua y la temperatura ambiental fue negativa, sin embargo, contrasta con una investigación realizada por Muñoz *et al.* (2015), para un río en Tlaxcala, donde mencionan que no encontraron correlación entre los promedios por día de medición, entre la temperatura ambiental y la concentración de oxígeno disuelto. Otra correlación observada fue con la demanda bioquímica de oxígeno, la cual tiene especial relevancia con el oxígeno disuelto, debido a que indica la cantidad de oxígeno que necesitan los microorganismos para degradar la materia orgánica del sistema acuático. Sin embargo, esta correlación se asocia a los sitios de altitud baja, donde se encuentra mayor contenido de materia orgánica.

### ***Alcalinidad***

La utilización de parámetros que ayuden a identificar la calidad de los sistemas ribereños es relevante. Para esta investigación se analizó la alcalinidad del agua de los ríos y arroyos, donde se observó una tendencia a disminuir conforme se incrementa la altitud del sitio, esto quiere decir que, en los lugares de baja altitud donde el agua de los ríos es más propensa a descargas de aguas residuales urbanas y contaminación procedente de la agricultura, se observaron valores de alcalinidad más altos. Abarca (2007), menciona que medir la alcalinidad es importante para determinar la capacidad del agua de neutralizar los contaminantes ácidos provenientes de la lluvia o de los desechos municipales e industriales. También la alcalinidad tiene una función ecológica, esto lo menciona Boyd (2015), donde

dice que las plantas acuáticas usan bicarbonato como fuente de carbono y, la cantidad de carbono inorgánico disponible para las plantas acuáticas y el fitoplancton aumentan con una mayor alcalinidad y, por ende, una mayor productividad primaria.

En los sitios ribereños altos, se encontraron bajos valores de alcalinidad, lo cual se explica por la ausencia de sales (bicarbonatos, carbonatos e hidróxidos) y sales de ácidos débiles provenientes de la materia orgánica, descargas de aguas residuales o agua de escorrentía provenientes de la agricultura. En los sitios ribereños localizados en las altitudes de 3571, 3635, 3840, 3961 y 4010 se observaron altos valores de alcalinidad (86-61 mg CaCO<sub>3</sub> L<sup>-1</sup>). Esto sucedió por que en los sitios especificados en comparación con los demás sitios que se encuentran por encima de los 3000 m de altitud (41-19 mg CaCO<sub>3</sub> L<sup>-1</sup>), no hay fuentes de contaminación antropogénica, y estos altos valores se pueden explicar por dos razones: 1) por la presencia de sedimentos provenientes de zonas adyacentes (Boyd, 2015) o 2) la actividad microbiana en el agua, que promueve la acumulación de CO<sub>2</sub> y bicarbonatos provenientes de la descomposición aeróbica y anaeróbica (Wetzel y Likens, 2000).

Los parámetros que presentaron correlaciones de Pearson con la alcalinidad fueron la altitud y el tipo y el uso de suelo. Cabe mencionar que las relaciones observadas fueron negativas, lo que indica que las zonas ribereñas con altos valores de alcalinidad son las de menor altitud, con usos de suelo y tipos de suelo más utilizados para la agricultura, además de que en estas altitudes es común encontrar descargas de aguas residuales urbanas.

En cuanto a los parámetros de agua, se observaron correlaciones con la conductividad eléctrica y el pH. Estas relaciones se asocian a parámetros que modifican las propiedades del agua y con la presencia de sustancias con cargas eléctricas o ácidos débiles. Boyd (2016) menciona que existen muchas sustancias en el agua que reaccionan con el ion hidrogeno (H<sup>+</sup>) como: el hidróxido, carbonatos, bicarbonatos, amoníaco, fosfatos, boratos silicatos y ácidos orgánicos.

Los parámetros de suelo que presentaron correlación con la alcalinidad del agua fueron la densidad aparente y el carbono orgánico del suelo. Esta última se explica, debido a la presencia de sales disueltas en el agua de los ecosistemas ribereños, que proviene de la materia orgánica que es arrastrada por escorrentía a los cuerpos de agua. Esto lo menciona Boyd (2015) cuando afirma que, en los cuerpos de agua, la descomposición de la materia orgánica también produce dióxido de carbono y las aguas pueden estar sobresaturadas con dióxido de carbono. Este fenómeno puede dar lugar a que las aguas tengan concentraciones de alcalinidad total superiores a las esperadas, según los cálculos basados en las concentraciones de dióxido de carbono en equilibrio.

### ***Amonio, Nitratos y Nitritos***

Uno de los nutrientes más importantes en los ecosistemas acuáticos es el nitrógeno, que se puede encontrar en varias formas químicas (NH<sub>3</sub>, NH<sub>4</sub><sup>+</sup>, NO<sub>2</sub><sup>-</sup>, NO<sub>3</sub><sup>-</sup>), pero en esta sección se va a tratar el amonio. Este compuesto nitrogenado es un componente estructural para la vida en general, sobre todo para las plantas, que requieren nitrógeno para crecer; pero las

concentraciones excesivas de amonio y nitrato en los cuerpos de agua contribuyen a la densa proliferación de fitoplancton, que provoca la eutrofización (Boyd, 2015).

El comportamiento del amonio que se observó, indica que tiende a disminuir conforme se incrementa el gradiente altitudinal, sin mostrar concentraciones mayores a  $3 \text{ mg L}^{-1}$  en casi todos los sitios. Lo que concuerda por lo reportado por Vu *et al.* (2017), donde dice que el amonio es uno de los principales contaminantes que afectan tanto a las aguas subterráneas como a las superficiales, aunque el nivel natural del amonio en las aguas superficiales y subterráneas es bajo (menos de  $3 \text{ mg L}^{-1}$ ).

En las altitudes de 2260 a 2419 m se observaron las máximas concentraciones registradas de amonio en agua ( $> 3 \text{ mg L}^{-1}$ ). Debido a que en estos sitios se encuentran cercanos a zonas urbanas y agrícolas, que vierten aguas residuales y de escorrentía a los ríos y los contaminan. Esto lo menciona Huang *et al.* (2018), cuando afirma que los efluentes y escorrentías agrícolas, domésticas e industriales contribuyen sustancialmente a la contaminación por amonio de las aguas superficiales y subterráneas. Esta contaminación llega a estos recursos vitales a través de varias fuentes puntuales, como: aguas residuales municipales e industriales, lixiviados y escorrentía de vertederos, obras de construcción, corrales de engorda de animales, entre otros (Camargo y Alonso, 2006; Chen *et al.*, 2002; Jes la Cour *et al.*, 2004).

Las correlaciones de Pearson que se observaron para el amonio son con parámetros del agua como la conductividad eléctrica y la alcalinidad. La correlación con la conductividad eléctrica se explica por el aporte de amonio en forma de sales al sistema por actividades antrópicas, lo que provoca incrementos en las conductividades eléctricas en agua (Xu y Zhang, 2012). En cuanto a la relación del amonio con la alcalinidad se explica a partir de que es una sustancia derivada de la reacción del amoniaco ( $\text{NH}_3$ ) y el ion hidronio ( $\text{H}^+$ ) que, neutralizan la acidez del sistema acuático ribereño.

Las correlaciones encontradas con parámetros del suelo fueron con la densidad aparente y con el nitrógeno total del suelo; este último parámetro tiene especial relevancia porque se está hablando de nitrógeno, el cual se encuentra disperso en dos sistemas (acuático y terrestre), con propiedades diferentes y que probablemente se encuentran conectadas por la materia orgánica como principal fuente de aporte en ambos sistemas.

Dentro del sistema acuático en general, el nitrógeno es un elemento importante que pasa por diferentes procesos para que se encuentre disponible para los organismos en el agua. En este camino de transformación pasa por diferentes formas químicas, una de ellas son los nitratos, los cuales fueron evaluados en los sitios estudiados y en los cuales se observaron concentraciones elevadas en las zonas ribereñas altas, mientras que, en zonas bajas, las concentraciones no son tan elevadas y, en las altitudes medias las concentraciones de nitratos se incrementan.

Las concentraciones de nitratos en el agua de zonas ribereñas estudiadas se encontraron con un mínimo de  $0.03 \text{ mg L}^{-1}$  y máximo de  $1.8 \text{ mg L}^{-1}$ , además de una media de  $0.5 \text{ mg L}^{-1}$ .

Estos valores indican una concentración muy baja de nitratos, tomando como base lo establecido en la NOM-127-SSA1-1994 (DOF, 2000), la cual dice que el límite máximo permisible de nitratos en el agua para uso y consumo humano es de  $10 \text{ mg L}^{-1}$ .

En las zonas ribereñas de baja altitud (menores a 2260 m) las concentraciones de nitratos son bajas, probablemente por la presencia de microorganismos que mantienen un equilibrio de reacciones de oxidación y reducción del nitrógeno (Boyd, 2015), además el alto flujo de agua que pasa en el río y que evita la acumulación de contaminantes en las zonas donde se tomaron las muestras para los análisis químicos.

En las altitudes de 2260 a 2419 m se observaron altas concentraciones de nitratos ( $0.6$  a  $1.8 \text{ mg L}^{-1}$ ), debido a que estos sitios se encuentran en zonas con actividades urbanas, agrícolas, ganaderas y de explotación minera, las cuales contaminan las riberas. Esto lo menciona Zhang *et al.* (2021) en su investigación, donde afirma que, en las últimas décadas la descarga de fuentes puntuales de contaminación como aguas residuales, industriales, domésticas y numerosos fertilizantes químicos en los sistemas agrícolas han resultado en un aumento de la concentración de nitratos en el agua de los ríos.

La presencia de altas concentraciones de nitratos en las zonas ribereñas ubicadas a 3850 m ( $1.5 \text{ mg L}^{-1}$ ), 3871 m ( $0.8 \text{ mg L}^{-1}$ ) y 3956 m ( $1.3 \text{ mg L}^{-1}$ ), no son significativas, debido a que no superan el límite máximo permisible para nitratos establecido en la NOM-127-SSA1-1994 (DOF, 2000). Sin embargo, estas concentraciones de nitratos se pueden deber a que, en los ecosistemas acuáticos hay varias entradas y salidas del nitrógeno. Las entradas son la lluvia, el agua que entra en los sistemas de fuentes naturales y la contaminación (uso de fertilizantes y aditivos utilizados en la agricultura y acuicultura). Las salidas son el agua de escorrentía de la agricultura, cosecha de productos acuáticos, filtración, difusión de amoníaco a la atmósfera y la desnitrificación. Además, la contaminación puede alterar rápidamente el equilibrio entre entradas y salida y provocar mayores concentraciones de nitrógeno en el agua (Boyd, 2015).

La correlación de Pearson significativa entre el nitrato y el amonio se debe a que ambos compuestos químicos están relacionados por medio de los procesos de la nitrificación, ya que en este proceso el amonio se usa para producir nitrato (Boyd, 2015).

Los nitritos son otro compuesto químico que usa como base al nitrógeno y que también se encuentra estrechamente ligado a la química del amonio y el nitrato. Su concentración en los ecosistemas acuáticos estudiados tiende a incrementarse con la altitud, sin embargo, se encuentra en concentraciones muy bajas, lo que se traduce en un ecosistema sano y no contaminado, debido a que el nitrito es muy tóxico y nocivo para la vida acuática y cualquier otro organismo (Boyd, 2015)

### ***Fosforo Total y Ortofosfatos***

Dentro del vasto mundo de la calidad del agua se encuentran aquellos parámetros que evalúan nutrientes, su análisis es importante pues indica deficiencias o excesos, que a su vez ayuda a identificar problemas en los sistemas acuáticos como la eutrofización. En este caso en

particular, se evaluó el fósforo total del agua (elemento importante que indica eutrofización), donde se observó que la tendencia de los datos es a disminuir conforme se incrementa el gradiente altitudinal, por lo que, en las zonas ribereñas altas, donde no hay contaminación las concentraciones de fósforo son bajas ( $0.1-0.5 \text{ mg L}^{-1}$ ). Estos resultados coinciden con lo que menciona Boyd (2015), quien reporta que las concentraciones de fósforo para aguas superficiales son de  $0.5 \text{ mg L}^{-1}$ , por lo que se puede decir que no hay eutrofización en las zonas ribereñas estudiadas (Boyd, 2015).

En las zonas ribereñas bajas, específicamente en las altitudes de 2260 y 2419 m se reportaron como los sitios con altos contenidos de fósforo en el agua ( $1.5 \text{ mg L}^{-1}$ ), lo cual se atribuye a los cambios de uso de suelo y a la actividad agrícola, en particular la adición de fertilizantes, que son las actividades antrópicas más comunes en esas altitudes. Al respecto Ishee *et al.* (2015) menciona que, a los cuerpos de agua llega una gran cantidad de fosforo como fuente de contaminación difusa por el flujo superficial y la erosión de las riberas.

En cuanto a las correlaciones que se asociaron con el fósforo total, fueron con parámetros del agua como la alcalinidad y la conductividad eléctrica, las cuales son de esperarse, debido a la química del fósforo en el agua y sus funciones en la alcalinidad. El ion fosfato ( $\text{PO}_4^{3-}$ ) actúa como una base para amortiguar la acidez del sistema acuático (Boyd, 2016) o, en el pH, que indica la disociación del ácido ortofosfórico en diferentes especies químicas ( $\text{H}_3\text{PO}_4$ ,  $\text{H}_2\text{PO}_4^-$ ,  $\text{HPO}_4^{2-}$  y  $\text{PO}_4^{3-}$ ) dentro del sistema acuático (Boyd, 2015).

Los parámetros de suelo que presentaron correlación con el fósforo total fueron el carbono orgánico y el fósforo disponible en el suelo. Este último se relaciona con el sistema acuático, debido a que le suministra el fósforo proveniente de la materia orgánica del suelo. El fósforo en la materia orgánica esta mineralizado y por lo general será absorbido por los sedimentos, a menos que las plantas o las bacterias lo absorban rápidamente (Boyd, 2015).

En todos los sitios ribereños estudiados se observó que la concentración más alta de ortofosfatos fue de  $0.33 \text{ mg L}^{-1}$ , con una tendencia a disminuir conforme se incrementa el gradiente altitudinal, lo que indica que no hay una alta concentración de fósforo. Aunque hay tres sitios ribereños que resaltan con altas concentraciones ( $0.33 \text{ mg L}^{-1}$ ) y se encuentran ubicados a menos de 2500 m de altitud, donde se encuentran las zonas agrícolas y urbanas. Los altos valores de ortofosfatos en los sitios mencionados se atribuyen a las actividades antropogénicas, como la utilización de grandes cantidades de detergentes y fertilizantes que aportan fósforo a las aguas superficiales y aceleran el proceso de eutrofización (Neal *et al.*, 2006). Al respecto Boyd (2015), reporta que la mayoría de las aguas superficiales contiene menos de  $0.05 \text{ mg L}^{-1}$  de fósforo reactivo soluble y la mayoría de los cuerpos de agua no contaminados solo contienen  $0.001-0.005 \text{ mg L}^{-1}$  de esta fracción.

Las correlaciones de Pearson observadas fueron con la altitud, debido a que tiene un marcado comportamiento a tener más concentración en la parte baja de la cuenca, mientras que en las partes altas son menores las concentraciones, debido a la ausencia de actividades antropogénicas que potencialmente contaminan. Otros parámetros que presentaron correlación fueron el fósforo total, y esto debido a que los ortofosfatos son la parte disponible

del fósforo total para los microorganismos. Por último, el amonio también mostró relación, y esto se debe a que ambos son considerados los nutrientes más importantes capaces de detonar la eutrofización de los sistemas acuáticos. Boyd (2015) menciona que el nitrógeno y el fósforo son nutrientes clave que regulan la productividad de las plantas acuáticas.

### ***Demanda Bioquímica de Oxígeno***

El uso de parámetros que muestren el comportamiento biológico del sistema acuático para estimar la calidad del agua en zonas ribereñas es muy importante, debido a que da una idea de si existe contaminación biológica. Para esta investigación se evaluó la demanda bioquímica de oxígeno, la cual indicó una tendencia a disminuir conforme se incrementa el gradiente altitudinal; sin embargo, no se encontraron consumos de oxígeno mayores a 5 mg L<sup>-1</sup>, lo indicado para cuerpos de agua naturales no contaminados (Boyd, 2015), a excepción de un sitio donde se reportó un consumo de 6.08 mg L<sup>-1</sup>, probablemente por la acumulación de materia orgánica proveniente del bosque de pino.

La correlación de Pearson observada para la demanda bioquímica de oxígeno, fue con el oxígeno disuelto, la cual es relevante debido a que indica la cantidad de oxígeno que hay en el agua y toma especial relevancia debido a que es clave para la vida acuática en todos sus niveles de organización (Wahab *et al.*, 2019).

## **Parámetros de suelo**

Aunque la superficie de la tierra está conformada principalmente por agua, hay una parte que no, en la cual ocurren una serie de procesos físicos, químicos y biológicos que originan lo que conocemos como suelos. Los suelos son muy diversos en el planeta y dependiendo de su ubicación geográfica, clima, topografía y material parental, presentan diferentes características que sostiene una gran cantidad de organismos, entre ellos los humanos.

El uso y manejo de los suelos por parte de los humanos, no solo se limita a la agricultura, también está la minería, su uso para la cría de ganado, para la creación y expansión de los asentamientos humanos, para la obtención de energías limpias, para la conexión de zonas urbanas etc. El uso y manejo de los suelos implica un deterioro, que es posible diagnosticar con sus características físicas y químicas.

### ***Densidad Aparente***

La densidad aparente de los suelos ribereños se encontró entre 0.7 y 1.5 g cm<sup>-3</sup>, lo que indica que valores de densidad menores a 1 g cm<sup>-3</sup> se clasifican como suelos orgánicos y volcánicos (SEMARNAT, 2000); estos se encuentran en altitudes mayores a 2700 m, donde las zonas agrícolas están menos presentes y la zona forestal predomina. Mientras que las densidades mayores a 1 g cm<sup>-3</sup> se clasifican como suelos minerales según la NOM-021-SEMARNAT-2000 (SEMARNAT, 2000), estos se encuentran en las zonas de menor altitud (menos de 2700 m) donde la agricultura y las zonas urbanas son dominantes.

Los resultados obtenidos son similares a lo mencionado en un estudio realizado por Morocho *et al.* (2018), donde reportan densidades aparentes con intervalos de 1.2 y 1.5 g cm<sup>-3</sup> y, en

otro estudio realizado por Gantes *et al.* (2017), en zonas ribereñas de Argentina, donde encontraron densidades aparentes promedio de  $1.4 \text{ g cm}^{-3}$  y también reportan valores superiores a  $1.65 \text{ g cm}^{-3}$ , esto se lo atribuyen a una textura franco-limosa y la presencia de un horizonte argílico. Los valores antes mencionados indican que no están tan distantes de los resultados obtenidos en esta investigación, ya que son característicos de zonas ribereñas. Se atribuye las densidades aparentes altas de suelos ribereños del Parque Nacional Izta-Popo a que las texturas arenosas y arenosas francas dominan, sin embargo, estas arenas, no son arenas gruesas, son arenas finas que contribuyen a incrementar la densidad aparente.

Las correlaciones de Pearson observadas entre la densidad aparente del suelo y parámetros de suelo como el carbono orgánico y el fósforo disponible tienen diferentes explicaciones. Al prestar atención al fósforo en el suelo, su correlación se explica debido a que la mayor parte útil de este elemento proviene de la degradación de la materia orgánica del suelo, la cual contribuye a disminuir la densidad aparente. La relación con el carbono orgánico indica que, en las zonas con una densidad aparente menor, la cantidad de carbono orgánico del suelo es elevada, lo cual concuerda con los resultados reportados por Andrade *et al.* (2016) en bosques ribereños; donde reportan que la densidad aparente disminuyó con aumentos de carbono orgánico del suelo. En ambos casos el aumento del carbono orgánico y la disminución de la densidad aparente mejora la calidad del suelo, al incrementar el contenido de macroagregados y consecuentemente de los flujos de agua y nutrientes (Fassbender, 1993; Fassbender y Bornemisza, 1994; Martínez *et al.*, 2008).

### ***pH del Suelo***

El pH de los suelos ribereños es menos ácido en las altitudes menores a 3000 m, y se clasifica según la NOM-021-SEMARNAT-2000, en un intervalo que va de fuertemente ácido a neutro, mientras que, en las zonas altas mayores a 3000 m se clasifica como fuertemente ácido a moderadamente ácido (SEMARNAT, 2000). En un estudio realizado por Moreno *et al.* (2017), en zonas ribereñas del estado de Tabasco, reportan pH del suelo de entre 6.5 y 8; que atribuyen a la presencia o ausencia de rocas calizas que aportan sedimentos ricos en calcio. Lo que contrasta con lo reportado en esta investigación, en la cual el pH se encontró entre 4.2 y 6.8. Esto se atribuye a dos situaciones: 1) los suelos menos ácidos y que tienden más a ser neutros o alcalinos se encuentran en altitudes bajas, donde la presencia de zonas de cultivo y zonas urbanas que aportan sustancias (contaminantes) al suelo por descargas de aguas, o por el uso de fertilizantes son más comunes. 2) En zonas altas el pH es más ácido y es característico de zonas forestales, con suelos derivados de cenizas volcánicas (andosoles) (Cocotle *et al.*, 2022), donde además hay aporte de materia orgánica de los pinos que contienen ácidos orgánicos que provoca la disminución del pH en los suelos.

Las correlaciones observadas del pH con el fósforo disponible se deben a que el pH regula la disponibilidad del fósforo. Esto lo menciona Delgado *et al.* (2019) en su investigación, donde dice que los suelos de reacción ácida poseen  $\text{pH} < 5.5$ , donde prevalece una elevada concentración de iones hidrogeno, presentando limitaciones para el crecimiento de la mayoría de las plantas, sean forestales o cultivos, debido a que estas condiciones de pH, afectan principalmente la disponibilidad de algunos elementos como el fósforo.

### ***Conductividad Eléctrica del Suelo***

La conductividad eléctrica de las zonas ribereñas estudiadas en general, indicaron valores menores a  $1 \text{ dS m}^{-1}$  y con una tendencia a reducir su valor con una mayor altitud, lo que indicó según la NOM-021-SEMARNAT-2000 (SEMARNAT, 2000), efectos despreciables de salinidad. En las zonas de altitudes bajas menores a 3000 m de altitud, las conductividades eléctricas son relativamente altas por la meteorización geoquímica de las rocas de los estratos superiores de la Tierra, y no se descarta las actividades antropogénicas como fuentes secundarias (Corwin *et al.*, 2003), como la agricultura y el uso de fertilizantes químicos u orgánicos. Mientras que en las partes altas (mayores a 3000 m) las conductividades fueron menores, probablemente a una mayor acumulación de materia orgánica. Gallardo (2016) menciona que la materia orgánica del suelo tiene carácter ácido, por lo que libera cationes hidrogeno capaces de hidrolizar los minerales que constituyen las rocas existentes previas al suelo.

Las correlaciones de Pearson encontradas para el nitrógeno total del suelo y el fósforo disponible del suelo son atribuidos a que, la conductividad eléctrica del suelo se ve afectada por el contenido de agua, el de arcilla y la presencia de iones intercambiables en el suelo (como el nitrógeno y el fósforo en todas sus formas químicas presentes en los suelos), capaces de conducir la corriente eléctrica y que incide en las características nutritivas del suelo (Corwin *et al.*, 1999).

### ***Carbono Orgánico del Suelo***

El contenido de carbono orgánico de suelos ribereños en altitudes menores a 3000 m donde se ubican las zonas agrícolas y urbanas se encontró entre  $15$  y  $191 \text{ Mg ha}^{-1}$ . Esto coincide con los resultados obtenidos en la investigación de Loayza *et al.* (2020), donde estimaron el carbono de los suelos del Ecuador con técnicas de interpolación en SIG; obtuvieron valores de entre  $10$  a  $297.8 \text{ t ha}^{-1}$  (1 tonelada “t” = 1 Megagramo “Mg”), y mencionan que los altos contenidos de carbono los obtuvieron en las zonas altas con climas de temperaturas bajas y zonas húmedas en las sierras, mientras que, los suelos de la región de la costa presentaron menores contenidos, y se lo atribuyen al uso indiscriminado de la agricultura y la deforestación.

En altitudes menores a 3000 m se observaron contenidos de carbono frecuentemente por debajo de los  $40 \text{ Mg ha}^{-1}$ , lo que indica bajos contenidos; esto se debe a que en estas zonas hay presencia de actividades que modifican y revierten los procesos de almacenamiento de carbono orgánico del suelo, como las prácticas agrícolas insostenibles (Baker *et al.*, 2009) y en menor medida la ganadería extensiva. Estas actividades afectan el contenido de carbono presente en el suelo, convirtiéndose en una fuente significativa de emisiones de gases de efecto invernadero (Bojórquez *et al.*, 2015). A estas problemáticas se suman la erosión eólica y la explotación de suelos orgánicos.

En las zonas con altitudes superiores a 3000 m de altitud, donde predominan los bosques de pino y las praderas de alta montaña, el carbono orgánico del suelo de zonas ribereñas se encontró entre  $19$  y  $99 \text{ Mg ha}^{-1}$ , con valores más frecuentes por encima de  $80 \text{ Mg ha}^{-1}$ , lo que indica un aumento del carbono orgánico. En contraste, en las altitudes inferiores a 3000 m de

altitud se observaron valores de 15 a 67 Mg ha<sup>-1</sup>; esto se debe a que el carbono orgánico del suelo en las zonas altas, se encuentra una mayor cantidad de la fracción recalcitrante del carbono, como la lignina y los ácidos grasos comunes en las coníferas que apenas son utilizados por los microbios del suelo y, por lo tanto, promueven el secuestro de carbono (Xu *et al.*, 2015; Belay *et al.*, 2009).

Las correlaciones de Pearson entre el carbono orgánico del suelo y variables del agua como el pH y la alcalinidad se deben a que, en el carbono orgánico se encuentran los nutrientes, que una vez liberados en el carbono lábil en forma de iones como los nitratos y el amonio, llegan a arroyos por medio de la escorrentía de las zonas adyacentes y alteran la química del agua. También se observaron correlaciones con parámetros del suelo como la densidad aparente, esto se debe a que a que este parámetro es afectado por las partículas sólidas y por el espacio poroso, el cual a su vez está determinado por la materia orgánica del suelo (Stine y Weil, 2002). Otro parámetro de suelo con correlación importante fue la relación C/N, debido a que controla y determina la actividad microbiana en los suelos, específicamente la mineralización de la materia orgánica, además de que es un parámetro que indica cuando la degradación de la materia orgánica se ha estabilizado (Isaza *et al.*, 2009).

### ***Nitrógeno Total***

El contenido de nitrógeno total almacenado en los suelos ribereños estudiados se encontró entre 0.03 y 0.33%, con una tendencia a incrementarse con la altitud. Estos resultados concuerdan con lo reportado por Fassbender y Bornemisza (1994) quienes documentan que el contenido de nitrógeno total en los suelos tiene un intervalo amplio, pero es común el comprendido de 0.2 a 0.7% para la capa arable. En otra investigación donde los resultados de esta investigación también coinciden con lo reportado por los autores, fue realizada por Cantú y Yáñez (2018) sobre los cambios de uso de suelo y el contenido de nitrógeno del suelo. Reportan 0.14% de nitrógeno (en un uso de suelo agrícola y de 5-30 cm de profundidad) a 0.43% (uso de suelo matorral y de 0-5 cm de profundidad). En las zonas bajas menores a 3000 m de altitud, donde predominan las actividades agrícolas y las zonas urbanas, el contenido de nitrógeno total del suelo fue menor, debido a que el nitrógeno es necesario para el crecimiento microbiano, ya que éstos degradan la materia orgánica. Cuando la concentración de nitrógeno es baja, la velocidad de la descomposición de la materia orgánica disminuye (Salcedo *et al.*, 2019). Al ocurrir lo anterior, la mineralización del carbono orgánico dependerá de la adición de fuentes alternativas de nitrógeno (Ferrera y Alarcón, 2001) como en las zonas agrícolas con usos de fertilizantes nitrogenados.

Las correlaciones de Pearson realizadas entre el amonio y el pH del agua indicaron que el nitrógeno del suelo interviene sobre estos dos parámetros. Esto se debe a que, en el ciclo del nitrógeno, este elemento pasa por transformaciones de diferentes especies químicas (nitritos, nitratos y amonio), los cuales intervienen en las concentraciones de amonio (sea de origen natural o por la adición de fertilizantes) y en el pH del sistema acuático, debido a que el agua de escorrentía de las zonas ribereñas termina depositándose en el agua de los ríos alterando estos parámetros.

En cuanto a las correlaciones de Pearson entre el nitrógeno total con parámetros del suelo, como la conductividad eléctrica y el fósforo disponible en el suelo, se explican debido a que la disponibilidad de iones de fósforo ( $\text{HPO}_4^{2-}$  y  $\text{H}_2\text{PO}_4^-$ ) y nitrógeno ( $\text{NH}_4^+$  y  $\text{NO}_2^-$ ) dependen del pH y la adición de fertilizantes nitrogenados y fosfatados, que alteran las concentraciones de fósforo y el pH de los suelos (Leininger *et al.*, 2006; Barancíková *et al.*, 2007).

### ***Fosforo Disponible***

Los contenidos de fósforo disponible en suelos ribereños se encontraron entre 2 y 78  $\text{mg kg}^{-1}$ , con una dominancia de valores por debajo de 10  $\text{mg kg}^{-1}$ . Lo que indica en su mayoría una baja concentración de fósforo disponible en suelos ribereños según la NOM-021-SEMARNAT-2000 (SEMARNAT, 2000); mientras que en tres sitios se observaron valores superiores a 30  $\text{mg kg}^{-1}$ , lo que los clasifica con una alta concentración de fósforo disponible según la NOM-021-SEMARNAT-2000 (SEMARNAT, 2000). En un estudio realizado por Zhao *et al.* (2020) en zonas ribereñas del sur de China, los autores encontraron concentraciones de fósforo disponible en suelos ribereños menores a 0.02  $\text{g kg}^{-1}$  (20  $\text{mg kg}^{-1}$ ), con diferentes tipos de vegetación, sin embargo, estos datos no coinciden con lo encontrado en esta investigación (menores a 10  $\text{mg kg}^{-1}$ ), y esto probablemente se debe a que el fósforo se mineralice fácilmente o se encuentre adsorbido a las arcillas (Kruse *et al.*, 2015). También pueden intervenir los cambios de uso de suelos, como los de las zonas forestales a agrícolas, que provocan una disminución de la cantidad de fósforo lábil e incrementa la proporción de formas de fósforo no disponibles (Kruse *et al.*, 2015). Los sitios con altas concentraciones de fósforo disponible probablemente se explican, por el uso de fertilizantes fosfatados usados en la agricultura.

Las correlaciones de Pearson observadas entre el fósforo disponible del suelo y parámetros del agua, como la alcalinidad y el fósforo total del suelo se deben a que, el fósforo en los suelos es arrastrado en el agua de escorrentía y termina depositándose en los cuerpos de agua, donde altera la alcalinidad por ser una base que reacciona con el ion  $\text{H}^+$ , y aumenta las concentraciones del fósforo total del agua.

Las correlaciones de Pearson observadas entre el fósforo disponible del suelo y propiedades del suelo, como la densidad aparente y la conductividad eléctrica del suelo se deben, en primer lugar, al grado de compactación de los suelos y su contenido de materia orgánica, ya que esto determina si el suelo tiene espacio poroso por el que circulen gases y líquidos, como la solución del suelo. Las plantas toman de la solución del suelo los nutrientes necesarios para su desarrollo y crecimiento, por lo que, elementos que se encuentran en la solución del suelo y que están en contacto con las raíces de las plantas se ven influenciados por muchos factores, como la respiración microbiana, los exudados de la raíz, la absorción o fijación por las partículas del suelo, el drenaje, la cantidad de oxígeno, temperatura, humedad del suelo y los procesos redox, entre otros (Canales *et al.*, 2021).

### ***Relación C/N***

La relación C/N en suelos ribereños del Parque Nacional Iztaccíhuatl-Popocatepetl se encontró entre 7.3 y 66.9, con una dominancia de zonas ribereñas con relaciones C/N menores de 20, lo que indica rápida mineralización de la materia orgánica. Valores altos de

relación C/N, implican que la materia orgánica se descompone lentamente, ya que los microorganismos inmovilizan el nitrógeno, por lo que no puede ser utilizado por los vegetales. En cambio, valores entre 10 y 14 corresponden a una mineralización y ruptura de tejidos rápida, ya que la actividad microbiana se estimula, hay nutrientes suficientes para los microorganismos y para los vegetales (Gamarra *et al.*, 2018).

Son pocos los estudios que reportan datos de C/N. Sin embargo, se encontró que los datos reportados para los suelos ribereños del Parque Nacional Izta-Popo (de 3.9-37, y media de 14.6), están en intervalos cercanos a lo reportado por Meng-Fei *et al.* (2020), quien en un estudio realizado en zonas ribereñas perteneciente al sistema del río Yangtze encontraron valores de C/N entre 8 y 47 considerando suelos bajo distintas especies riparias, básicamente acuáticas o subacuáticas en sitios no mayores en altitud de 800 m y con clima monzónico por lo que las diferencias observadas pueden atribuirse a las condiciones de la zona que aquí se investigó y que en todos los casos son sitios de altitud cercana a 2000 m y llegan hasta 4000 m. Estudios realizados por Cruz y Etchevers (2011) mostraron valores de la relación C/N de diversos parques nacionales y reservas de la biosfera de México: en el Parque Nacional Zoquiapan 2800-3600 m. (13.2), Volcán Ajusco >3000-3500 m. (14), Parque Nacional Nevado de Toluca >3000-3500 m. (14.3), Parque Nacional Nevado de Colima >2600-3000 m (12.6) y Parque Nacional Iztaccíhuatl-Popocatepetl 2400-3900 m. (19). Aunque los resultados mostrados, se obtuvieron de suelos forestales y los de esta investigación son de suelos de ambientes ribereños, presentan similitud con el valor promedio que se encontró en esta investigación 14.6. Estas coincidencias se explican debido a que en las dos investigaciones, son suelos derivados de roca dacítico-andesítica y andesita (rocas volcánicas) que acumulan carbono orgánico y también nitrógeno, por lo que las relaciones C/N son cercanas a 15:1, que un tiempo de vida medio en los suelos.

Las correlaciones de Pearson observadas para la relación C/N y parámetros de suelo como la densidad aparente, se deben a su estrecha relación con el contenido de compuestos orgánicos en los suelos, que favorecen la relación C/N y la densidad aparente. Otro parámetro que mostró correlación fue el carbono orgánico del suelo; este comportamiento se debe a su contenido, que directamente suministra las fracciones lábiles de carbono y nitrógeno que son utilizadas por la biomasa microbiana para la mineralización de la materia orgánica.

## **Parámetros de Vegetación (NDVI y QBR)**

Los resultados de NDVI evaluados en dos momentos mostraron tener valor promedio más alto en la temporada de lluvias (0.65) respecto a la temporada de estiaje (0.54), lo que quiere decir que la humedad permanente del suelo, típica de las zonas ribereñas es un parámetro importante en el vigor de la vegetación. Alvarado *et al.* (2019) mencionan que, en los bofedales (humedales de alta montaña de los Andes), los valores de NDVI por encima de 0.25 indican presencia de vegetación, y cuanto más alto sea el valor, las condiciones de vigor son mejores. Esto indicó que, aunque los resultados para la temporada de estiaje fueron de 0.55, al menos se observó la presencia de vegetación que protege las riberas; mientras que, en la temporada de lluvias el vigor fue mayor, por lo tanto, la calidad de la vegetación se encontró en su máximo nivel posible.

Entre las altitudes de 2504 a 3635 (altitudes medias) se observaron los mayores valores de NDVI en temporada de estiaje a excepción del sitio ubicado a 2680 m. En las altitudes medias es posible que se encuentren zonas agrícolas de regadío mezcladas con pequeñas zonas de bosque, que impide que los valores de NDVI descieran. En el sitio que se ubicó a 2680 m es probable que solo exista vegetación por actividades agrícolas y por lo tanto presento valores bajos de NDVI (Pttorelli *et al.*, 2005).

Para las altitudes menores a 2504 m de altitud en temporada de estiaje el NDVI fue más bajo que en las altitudes medias, esto se atribuye a la mayor presencia de zonas de cultivo de temporal, que mantiene a estas zonas inactivas en este periodo (Huang *et al.*, 2021). Y en las altitudes superiores a 3635 m se en este mismo periodo se explica su bajo nivel de NDVI debido a la presencia de pastos. Sin embargo, también en estas altitudes hay excepciones, donde se elevan los valores de NDVI (3871 m y 4010 m) probablemente por la presencia de coníferas.

Los NDVI en la temporada de lluvias de manera general se posicionaron con valores mayores que la temporada de estiaje, esto sucedió por que la vegetación ribereña (que se mantiene cerca del agua) mantiene densidades vegetales más elevadas que pueden registrar una respuesta visible en las imágenes de satélite (Birtwistle *et al.*, 2016). En las altitudes donde se observó que la vegetación no presento un NDVI mayor en la temporada de lluvias (3150, 3630, 3635 y 4010 m) se debió a que no todos los eventos de lluvia generan una respuesta de vegetación notable en las imágenes de satélite (Birtwistle *et al.*, 2016) debido a que la fracción de la lluvia disponible para las plantas varía según el tipo, la cantidad y el momento de la precipitación (Brooks *et al.*, 2011).

Las correlaciones significativas de Pearson ( $p < 0.05$ ) que se observaron entre el NDVI en temporada de estiaje y parámetros de agua, como los nitratos, el amonio, el fósforo total, y los ortofosfatos, se debieron a que, son nutrientes que potencialmente pueden ser utilizados por las plantas, ya que las raíces de muchas plantas ribereñas crecen y llegan al suelo cercano al sistema acuático, para obtener nutrientes y agua de ambos sistemas (Huang *et al.*, 2021).

La correlación, también significativa con el oxígeno disuelto se explica porque en las zonas donde los valores NDVI son más altos la vegetación es más vigorosa, esta vegetación se localizó en las partes altas de la montaña, donde hay microorganismos fotosintéticos que incrementan la cantidad de oxígeno disuelto en el agua; además el relieve es irregular y los ríos presentan caídas de agua o saltos de agua, que ayudan a su oxigenación y, por lo tanto, se tienen altos niveles de oxígeno disuelto. Mientras que, en las partes bajas donde la vegetación ribereña ya no se encuentra tan presente debido a cambios de uso de suelo y la contaminación, el oxígeno disuelto se encontró en menor concentración, lo que se le atribuye a la menor concentración de microorganismos fotosintéticos que producen oxígeno, y a los procesos de oxidación de la materia orgánica en el agua que consumen este elemento.

También se observó que el NDVI en temporada de lluvias tuvo correlación significativa con parámetros de agua, como la temperatura, la conductividad eléctrica y los nitratos. Los dos primeros parámetros de agua son importantes, porque son variables que se encuentran

estrechamente ligadas a la calidad de los ríos. Las altas temperaturas del agua se relacionan más a las zonas con valores de NDVI mayores y concuerdan en que se encuentran en sitios con las menores altitudes, en estas zonas el cambio de uso del suelo es muy fuerte y domina la agricultura, lo que provoca que en muchos casos ya no esté presente la vegetación ribereña. En cambio, en las zonas donde se encontraron bajas temperaturas, donde existe la presencia de pastos y se relaciona a las zonas más altas de la montaña, se observaron los NDVIs menores; debido a que las reflectancias de los pastos son menores a las que tienen los árboles. Un comportamiento similar se observó con la conductividad eléctrica del agua, donde se pudo apreciar que las conductividades altas se encontraron con los NDVIs de mayor valor y en las menores altitudes, que corresponde a las zonas de cultivo y las conductividades bajas corresponden a las zonas de pastos con valores bajos de NDVI.

Los nitratos en el agua presentaron correlación negativa significativa con el NDVI; esto se debió a que los nitratos en las zonas altas se encontraron en menor concentración por la ausencia de contaminantes en el agua, además la baja producción de materia orgánica y el movimiento del agua evita que se eleven sus concentraciones. En las partes bajas las concentraciones de nitratos fueron más elevadas, porque los ríos no presentan el elevado movimiento que en las partes altas (caídas de agua), además de la presencia de contaminantes de descargas de aguas residuales y de agua de escorrentía de la agricultura.

Las correlaciones de Pearson observadas entre el NDVI y parámetros de suelo como la conductividad eléctrica, relación C/N y carbono orgánico fueron negativas y significativas; por lo tanto, en zonas ribereñas con NDVIs altos los parámetros mencionados son menores, y en las zonas donde se observen NDVIs menores, los parámetros mencionados se encontraron elevados. Su relación con el NDVI se explica por qué en los tres casos son parámetros que se relacionan con los nutrientes en el suelo; la conductividad eléctrica indica la posibilidad de nutrientes en la solución del suelo, mientras que el carbono orgánico indica parte de los compuestos orgánicos que pueden utilizar las plantas. Así mismo, la relación C/N indica la mineralización de la materia orgánica por parte de las bacterias, lo que condiciona la liberación de los nutrientes presentes en la materia orgánica hacia los suelos y, su posible uso por las plantas para incrementar su vigor y tener valores más elevados de NDVI.

Con referencia a los valores de los índices QBR que se describieron en ocho sitios que representan cerca de 30% de los 28 sitios de esta investigación, se tiene como caso de estudio los datos de los sitios: Nealtican, San Nicolás de los Ranchos, Xalitzintla, Santiago Xalitzintla, Buenavista A, Buenavista B, Apatlaco, Vallecito, Cascada Ranita y Cascada Volkswagen. Como se pudo observar en los datos, las localidades ubicadas en las partes bajas de la montaña presentaron calidad pésima-calidad intermedia (20-65 puntos) y en las zonas ribereñas altas, se observó una calidad buena y muy buena de la vegetación (90- 100 puntos). Esto concuerda con lo reportado por Herrera *et al.* (2022), quienes observaron que en el río Guatapurí en Colombia, la calidad de las riberas es mejor en las partes altas de este río, mientras que, en las zonas bajas donde las actividades humanas toman más relevancia cerca de las riberas, la vegetación fue calificada con mala calidad.

Los resultados de QBR son similares a lo reportado por Moreno *et al.* (2022), en su investigación sobre la aplicación del índice QBR en zonas tropicales, específicamente en la subcuenca del río Tlacotalpan en Tabasco. En su investigación indica que los valores del índice QBR, disminuye del 90.1% (mayor altitud) a 48.4% (menor altitud), siguiendo un patrón de mayor a menor calidad. Esto también confirma lo que se expuso en esta investigación, donde se afirma que la calidad de la vegetación ribereña se encuentra en las zonas ubicadas a gran altitud; y con menor calidad las que se encuentran a menor altitud.

Una parte importante en esta investigación fue establecer la relación entre los índices de vegetación NDVI y QBR. En el análisis de correlaciones de Pearson se encontraron relaciones entre el QBR y NDVI, tanto en temporada de estiaje (correlación positiva) como de lluvia (correlación negativa). Estos resultados coinciden con lo reportado por Presetyo y Ramadhan (2021) que midieron la calidad de la vegetación ribereña en el río Amprong en Indonesia. Los autores reportan que los índice QBR y NDVI presentaron una correlación positiva, además de que el índice QBR tuvo un impacto en el aumento del valor de la salud de la vegetación.

### **Estadística no Paramétrica**

El análisis de estadística no paramétrica presentó datos que sirven para puntualizar las diferencias entre las medianas de cada variable, y a su vez, mostrar la variabilidad de los datos entre los diferentes sitios, como la ubicación de los sitios ribereños estudiados a lo largo de un gradiente altitudinal, y los efectos de esta altitud en los parámetros que se utilizaron en esta investigación.

Las diferencias entre las altitudes marcan la heterogeneidad entre los distintos tipos de suelos estudiados. Generalmente en las zonas menores a 3000 m de altitud se apreciaron los Phaeozems háplicos y Cambisoles eútricos, que son ampliamente usados para la agricultura, también se encontraron los Regosoles eútricos más característicos de zonas forestales; mientras que, en las zonas ribereñas ubicadas en mayores altitudes de 3000 m de altitud, dominan los Regosoles dístricos, andosoles y los litosoles (leptosoles) característicos de zonas montañosas y forestales.

Las diferencias observadas entre las medianas de la altitud y el tipo de suelo también se presentaron en los usos de suelos. Sin embargo, van más allá de un simple número de probabilidad; en este se puede observar cómo la altitud y el suelo determinan los usos del suelo y la vegetación. En altitudes menores a 3000 m se encontraron los suelos más aptos para cultivar, entre ellos encontramos agricultura de temporal permanente, anual, de temporal anual y permanente con poca presencia de vegetación natural, como bosques de pino o pino-encino; mientras que en las altitudes mayores a 3000 m se observó la vegetación secundaria de bosques de pino, los bosques de oyamel, de pino y praderas de alta montaña, donde la presencia de actividades humanas no tiene un impacto significativo.

La temperatura ambiental de los sistemas ribereños indicó diferencias significativas ( $p \leq 0.05$ ) con diversas variables; este comportamiento confirma que los usos de suelo y la vegetación están actuando para regular la temperatura ambiental, sobre todo en las riberas,

donde se crean microclimas con tendencia a una baja de temperatura. Esta tendencia se ve influenciada por la vegetación riparia, que favorece la disminución de la temperatura. A diferencia de las zonas no ribereñas, donde la vegetación ya no está presente por prácticas agrícolas y la temperatura ambiental puede ser un poco más alta.

La temperatura ambiental y la vegetación tienen efectos sobre el agua de las zonas ribereñas, las cuales alteran sus propiedades, como en el caso de la temperatura del agua, en la que se observaron diferencias significativas ( $p \leq 0.05$ ) entre sus medianas. Las diferencias observadas fueron atribuidas a diferentes factores, entre las que destacan la altitud, el uso de suelo y vegetación y la temperatura ambiental; estos tres factores intervienen en las temperaturas del agua de diferentes formas, por ejemplo, la vegetación ribereña sombrea el agua de los arroyos o ríos y evita que la luz solar llegue directamente al sistema acuático y eleve su temperatura.

Otras propiedades del agua que se alteran por la altitud, el uso de suelo y la temperatura del agua y, además presentaron diferencias significativas ( $p \leq 0.05$ ) entre sus medianas fueron: la conductividad eléctrica y la alcalinidad. La conductividad eléctrica del agua es un parámetro que tiene dependencia con la temperatura del agua del río, ésta condiciona la solubilidad de las sales que llegan al sistema acuático por escorrentía de arrastre de las zonas ribereñas adyacentes, y que se encuentran ubicadas en altitudes menores a 3000 m de altitud. También la alcalinidad tiene una dependencia con la temperatura del agua, por la solubilidad de los carbonatos (relación con la conductividad eléctrica) y de gases como el oxígeno y el dióxido de carbono, que, por los usos de suelo en zonas menores a 3000 m de altitud, donde dominan la agricultura y las zonas urbanas, puede haber adición de materia orgánica y otras sustancias que añaden sales y ácidos débiles que alteran la alcalinidad del agua.

El amonio en el agua presentó diferencias significativas ( $p \leq 0.05$ ) entre sus medianas y también se ve influenciado por la altitud y el uso de suelo. En las zonas ribereñas menores a 3000 m de altitud, con usos de suelo agrícola, el amonio se encontró más elevado; esto por la adición de fertilizantes nitrogenados (orgánicos o inorgánicos) que se acumulan en los suelos; a diferencia de los usos forestales y con altitudes mayores a 3000 m, donde se encuentra la vegetación con menos alteraciones por actividades humanas.

En el caso de los suelos, solo la relación C/N mostró diferencias significativas entre sus medianas ( $p \leq 0.05$ ), lo que confirma que la altitud, los usos de suelo y vegetación, la temperatura ambiental y demás variables del agua con diferencias significativas, muestran un comportamiento que se encuentra tejido entre sí y sostenido por estas variables. En el caso de la relación C/N los diferentes tipos de vegetación que se encuentran a distintas altitudes, producen residuos vegetales que pueden ser de fácil o difícil degradación, por lo que condicionan la mineralización de la materia orgánica y la liberación de los nutrientes al suelo.

En cuanto al análisis de correlaciones canónicas, se pudo apreciar que los parámetros identificados como variables robustas para evaluar la calidad de las riberas fueron la temperatura ambiental, la temperatura del agua, la conductividad eléctrica y el amonio. Esto coincide con lo reportado en la investigación de Monfil (2020) de zonas ribereñas, donde

dice que encontró diez variables que describen el 75% de la variabilidad de las riberas, dentro de esas variables están el amonio, la temperatura del agua y la conductividad eléctrica del agua.

La relación C/N y los NDVIs en temporada de lluvias no se mostraron como correlaciones robustas, y esto se debe a que en el suelo y la vegetación se encuentran otros parámetros que están interviniendo en la correlación de este análisis, que impiden una correlación más alta. Como ejemplo para la vegetación (NDVI) se pueden mencionar a los macronutrientes y los micronutrientes, los cuales no fueron evaluados en este estudio y es probable que se encuentren más relacionados con la vegetación.

También se identificaron como variables robustas las características de los sitios como la altitud y el tipo y uso de suelo. Esto refuerza la idea de que los cambios en los usos de suelo tienen un efecto importante en la vegetación, al aumentar o disminuir sus áreas se pueden extender a otros tipos diferentes de suelos, y en ambos casos el tipo y uso de suelos va a cambiar a lo largo de un gradiente altitudinal.

## **Índice de Calidad de Ambientes Ribereños**

De los 28 sitios ribereños estudiados, 12 de ellos (42.8%), presentaron calidad ambiental buena; 13 sitios (46.4%) tuvieron calidad ambiental intermedia, dos sitios (7.1%) con calidad ambiental mala y un sitio (3.57%) presentó una calidad ambiental pésima. Con los resultados de esta investigación se puede inferir que, la calidad ambiental de los sistemas ribereños en el Parque Nacional Iztaccíhuatl-Popocatepetl y su zona de influencia ya es de alta degradación en al menos 10% de la superficie que cubren los mismos.

Para estimar el impacto de lo que arriba se señala respecto a porcentajes de áreas ribereñas dañadas, se muestra el ejemplo siguiente: los ambientes ribereños del río Apatlaco desde 4000 m de altitud en la exposición oriental del Parque Nacional Iztaccíhuatl Popocatepetl y parte de su zona de influencia, hasta los 2400 m en la población de San Nicolás de los Ranchos, la superficie de ecosistemas ribereños comprenden aproximadamente 51 ha (Santiago *et al.*, 2018). Esta superficie fue estimada a partir de su longitud que es aproximadamente 25.5 km y considerando una amplitud de 20 m (10 m en cada lado del río). Al ser una área natural protegida y parte de ella en su zona de influencia con bosques templados, importantes por los servicios ambientales que proporcionan, la superficie de suelos ribereños afectada está en el orden de 5 ha (50,000 m<sup>2</sup>) las que requieren de atención urgente para la conservación y restauración, y un porcentaje cercano a 25 ha (250,000 m<sup>2</sup>) también ya muestra signos evidentes de degradación ambiental.

Cabe resaltar que la mayoría de los sitios clasificados con calidad buena se encuentran en las zonas superiores a 3000 m de altitud, mientras que la calidad intermedia, calidad mala y calidad pésima se encuentran en altitudes menores a 3000 m de altitud. A excepción de un sitio con calidad buena ubicado a 2126 m.

Los resultados antes descritos obedecen a la distribución en el gradiente altitudinal de los cambios de uso de suelo y a las actividades antropogénicas (esto se refleja en casi todas las

variables estudiadas). Esto también se confirma con los resultados de QBR, los cuales se encuentran distribuidos en el gradiente altitudinal, de tal manera que las zonas con una mejor calidad en la vegetación ribereña (según lo que se observó de este índice), se encuentran distribuidas en las zonas altas, mientras que las zonas bajas presentaron una mala calidad de la vegetación.

El sitio ubicado a 2126 m de altitud destaca por presentar calidad ambiental buena, aunque se encuentra cerca de zonas con calidad media, sin embargo, lo que hace que destaque es por la acumulación de materia orgánica de difícil degradación como las hojas de pino. Al respecto, Rodríguez *et al.* (2019) menciona que el contenido de lignina y taninos en las hojas de pino incrementa el tiempo que tarda en descomponerse.

En las altitudes que se encontraron ubicadas a 3840, 3883 y 4010 m se observó una calidad ambiental intermedia, por la baja acumulación de materia orgánica, debido a que los pastos son de difícil degradación por la presencia de lignina, esto lo menciona Mack *et al.* (2001) en su investigación, donde dicen que los pastos exóticos tienen concentraciones de lignina más altas que especies nativas.

Los sitios ribereños ubicados entre las altitudes de 2260 a 2419 m se observaron las calidades ambientales mala y pésima. Esto sucedió debido a que estos sitios se encuentran ubicados en zonas urbanas y agrícolas, donde la contaminación de los sistemas terrestres es muy intensa. Al respecto Rashitan *et al.* (2019) en su investigación dice que los principales contaminantes en el agua y el suelo son los desechos hechos por el hombre como la basura doméstica, los desechos agrícolas y de fabricación, los fertilizantes utilizados por los agricultores, los derrames de petróleo y los materiales radiactivos (Simonich y Hites, 1995; Ainsworth *et al.*, 2018; Rendon-Von Osten y Dzul, 2017).

En los sitios ribereños clasificados con calidad ambiental buena, es imprescindible conservar e incluso mejorar (categoría azul,  $\geq 90$  puntos, calidad ambiental muy buena) si es posible la calidad, para mantener los importantes servicios ambientales que proporcionan las riberas. Los sitios con calidad ambiental intermedia son una fuente de señales que indican que algo no se encuentra bien en estas zonas, es debido principalmente a los cambios de uso de suelo y actividades antrópicas; bajo estas circunstancias ya es necesario promover acciones para proteger y mejorar su calidad ambiental. Por último, los sitios catalogados con calidad mala y pésima son la máxima expresión de cómo no deben encontrarse los ecosistemas riparios, y es el resultado del desinterés de los actores involucrados en su uso, tanto instituciones privadas, gubernamentales y la sociedad en general; por lo que es imprescindible la restauración de estas zonas afectadas para recuperar los valiosos servicios ambientales que proporcionan.

## Conclusiones

- Las variables medidas en agua mostraron que se encuentran en muy mala condición ambiental en las zonas de baja altitud, mientras que, en las partes altas, la condición ambiental es mejor presentando temperaturas más bajas, menor presencia de sales, pHs menos básicos, mayor concentración de oxígeno disuelto, una menor alcalinidad, nutrientes como nitrógeno y fósforo en muy baja concentración, así como una menor demanda bioquímica de oxígeno.
- Los parámetros evaluados en suelos mostraron un comportamiento similar al agua. Se encontró que los suelos ribereños de zonas bajas se encontraron en malas condiciones ambientales, mientras que, las zonas de ribera ubicadas a mayor altitud se encontraron suelos en mejores condiciones, las cuales se confirman con densidades aparentes bajas que influyen positivamente en mejor condición de aireación para las raíces y mayor captación de agua por espacios porosos favorables, pHs más ácidos pero no fuertemente ácidos que provoquen alguna carencia de nutrimentos o toxicidades de alto riesgo para las plantas, baja salinidad, nutrientes como nitrógeno y fósforo más elevados, así como carbono orgánico del suelos y relación C/N más alta.
- La vegetación ribereña presentó valores más altos de NDVI en temporada de lluvias (0.65), que la temporada de estiaje (0.55). La lluvia mejora la disponibilidad de nutrientes en los suelos e incrementa su vigor, mientras que en la temporada de sequía disminuye el NDVI debido a una baja disponibilidad de nutrientes en el suelo y la ausencia de cultivos de temporal.
- La resolución espacial de las imágenes satelitales Sentinel 2 para evaluar el NDVI (10 m para las bandas del rojo y del infrarrojo), ayuda mucho para observar detalles de la vegetación, pero para evaluar las riberas es necesaria una resolución que proporcione más detalles (5 m o menos) que es lo que aquí se recomienda.
- La vegetación evaluada con el QBR indico que sitios ribereños ubicados a más de 3900 m presentaron una calidad muy buena ( $\geq 95$  puntos); que sitios situados entre 3000 y 3850 m tienen calidad buena (75-90 puntos), el representativo de altitud sobre 2678 m presentó calidad intermedia (55-70 puntos) y los sitios más bajos ubicados por debajo de 2680 m (2260 m y 2419 m) presentaron calidad pésima ( $\leq 25$  puntos).
- Los valores de los índices QBR mostraron que en sitios con una menor puntuación (25 o menos) se encontraron a menores altitudes, donde se ubican las zonas urbanas y zonas agrícolas. Mientras que los sitios de mayor puntuación (80 o más) se encontraron a mayor altitud y con una mejor calidad, debido a que en estas zonas no hay actividades humanas que alteren los ecosistemas.

- De los resultados se concluye también que existe una relación entre los índices de vegetación QBR y NDVI, debido a que ambos evalúan, calidad o vigor de la vegetación de las plantas ribereñas y pueden en conjunto pueden identificar la calidad de las riberas por las evidencias encontradas, aunque los índices QBR no pudieron evaluarse en todos los sitios dadas las restricciones de trabajo de campo que se presentaron por la Pandemia del COVID-19.
- Con las variables seleccionadas del análisis de estadística no paramétrica (conductividad eléctrica del agua, amonio de agua y relación C/N en suelos) y la materia orgánica del suelo se propuso el índice de calidad de ambientes ribereños y encontró que, de los sitios estudiados, 12 presentaron una calidad ambiental buena (75 -90 puntos), 13 con calidad ambiental intermedia (55- < 75 puntos), dos con calidad ambiental mala (30- < 55) y solo un sitio con calidad ambiental pésima ( $\leq 30$  puntos).
- La mayoría de los sitios ribereños ubicados a más de 3000 m de altitud presentaron buena calidad debido a que no se encuentran presionados por cambios de uso de suelo y actividades antrópicas. Los sitios ubicados entre 2000-2200 m y de 2500-2700 m se observó la calidad ambiental intermedia, donde hay agricultura y aún se encuentra vegetación. Mientras que los de menor calidad se ubicaron en las zonas urbanas y agrícolas donde los cambios de uso de suelo y la contaminación son más fuertes.
- En aquellos sitios con calidad ambiental buena es necesario mantenerla y de ser posible mejorarla. En los sitios con calidad intermedia se deben de cuidar las actividades que se realizan en la zona y promover prácticas de manejo. En los sitios con calidad mala y pésima es necesario la restauración para evitar la degradación de estos sistemas.

## Recomendaciones

- Realizar conservación de la vegetación de las riberas, al menos 10 metros de ancho adyacente a los ríos como lo establece la Ley General de Aguas.
- Evitar las actividades agrícolas, pecuarias y mineras y otras actividades productivas cerca de las riberas y ríos (al menos 10 metros como área de protección y amortiguamiento).
- Evitar la depositación y acumular residuos sólidos orgánicos e inorgánicos cerca de las riberas y los ríos.
- Evitar las descargas de aguas residuales a los ríos.
- Evitar los asentamientos humanos cerca de los ríos y las riberas.

## Referencias

- Abarca, F. J. (2007). Técnicas para evaluación y monitoreo del estado de los humedales y otros ecosistemas acuáticos. En Ó. Sánchez, M. Herzig, E. Peters, R. Márquez, y L. Zambrano, *Perspectivas sobre conservación de ecosistemas acuáticos en México* (págs. 113-144). México: Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, Instituto Nacional de Ecología, U.S. Fish and Wildlife Service, Unidos para la conservación A.C., Universidad Michoacana de San Nicolás Hidalgo.
- Aguirre, G. (1991). *Regiones de refugio*. Ciudad de México: Fondo de Cultura Económica.
- Ainsworth, C. H., Paris, C. B., Perlin, N., Dornberg, L. N., Patterson III, W. F., Chancellor, E., Murawski, S., Hollander D., Daly, K., Romero, I. C., Coleman, F. and Perryman, H. (2018). Impacts of the deepwater horizon oil spill evaluated using an end-to-end ecosystem model. *PLOS ONE*, 13(1), 1-21.
- Alcamo, J., Ash, N. J., Butler, C. D., Callicott, J. B., Capistrano, D., Carpenter, S. R., Castilla J. C., Chambers, R., Chopra, K., Cropper, A., Daily, G. C., Dasgupta, P., de Groot, R., Dietz, T., Duraiappah, A. K., Gadgil, M., Hamiltom, K., Hassan, R., Lambin, E. F., Lebel, L., Leemans, R., Jiyuan, L., Malingreau, J. P., May, R. M., McCalla, A. F., McMichael, T., Moldan, B. Mooney, H., Naemm, S., Nelson, G. C., Wen-Yuan, N., Noble, I., Zhiyun, O., Pagiola S., Pauly, D., Percy, S., Pingali, P., Prescott-Allen, R., Reid, W. V., Ricketts, T. H., Samper, C., Scholes, R., Simon, H., Toth, F. L., Turpie, J. K., Watson, R. T., Wilbanks, T. J., Williams, M., Wood, S., Shidong, Z. and Zurek, M. B. (2003). *Ecosystems and human well-being: a framework for assessment*. Washington DC: Island Press.
- Alianza World Wildlife Fund, Fundación Gonzalo Río Arronte, Comisión Nacional del Agua. (2011). *Identificación de las reservas potenciales de agua para el medio ambiente en México*. México: CONAGUA, WWF.
- Alomía, M. (2005). Efectos de la producción agropecuaria en los suelos de los páramos: el caso de Guangaje. *Ecuador Debate*, 175-193.
- Alvarado, C., Leandro, A., Mayor, N. and Marcos, D. S. (2019). Comparison of vegetation index with landsat images using cloud computing: Pampa de Majes-Siguas area, Arequipa Peru. *Revista de Investigación de Física*, 22(1), 27-34.
- Álvarez, R. (1996). *Estadística multivariante y no paramétrica con SPSS, aplicación a las ciencias de la salud*. Madrid: Díaz de Santos.
- Andrade, H. J., Segura, M. A. y Rojas, A. S. (2016). Carbono orgánico del suelo en bosques riparios, arrozales y pasturas en piedras, tolima, Colombia. *Agronomía Mesoamericana*, 27(2), 233-241.
- Anil, J., Karthik, N. and Arun, R. (2005). Score normalization in multimodal biometrics systems. *Patterns recognition*, 38(12), 2270-2285.
- Anthony, E. J., Bjorkland, R. and Pringle, C. M. (2015). Wave influence in the construction, shaping and destruction of river deltas: a review. *Marine Geology*, 361, 53-78.

- APHA-AWWA-WEF. (2012). *Standard methods for the examination of water and wastewater*. Washington: American Public Health Association.
- Armitage, P. y Berry, G. (1997). *Estadística para la investigación biomédica*. Madrid: Harcourt Brace.
- Aveiga, A. M., Noles, P., De la Cruz, A., Peñarrieta, F. y Alcantara, F. (2019). Variaciones físico-químicas de la calidad del agua del río Carrizal en Manabí. *Enfoque UTE*, 10(3), 30-41.
- Ávila, D., Morató, J., Pérez, A. I., Santillán, P., Alvarado, J. and Comín, F. A. (2020). Impacts of alternative land-use policies on water ecosystem services in the Río Grande de Comitán-Lagos de Montebello watershed, México. *Ecosystems Services*, 45, 1-14.
- Ayala, M. Y. (2011). *Interacción ecológica del sistema agua-suelo en ambientes ribereños del Parque Nacional Izta-Popo y zonas de influencia*. Ciudad de México: Universidad Nacional Autónoma de México.
- Baisden, W. T., Amundson, R., Cook, A. C. and Brenner, D. L. (2002). Turnover and storage of C and N in five density fractions from California annual grassland surface soils. *Global Biogeochemical Cycles*, 16(4), 64-1 -64-16.
- Baker, C. J., Reicosky, D. C., Saxton, K. E., Riberio, M. S., Hobbs, P. R., Justice, S. E., Chamen, W. C. T. and Ritchie, W. R. (2009). *Siembra con labranza cero en la agricultura de conservación*. España: ACRIBIA.
- Barancíkova, G., Liptaj, T. and Prónayová, N. (2007). Phosphorus fractions in arable and mountain soil and humic acids. *Soil and Water Research*, 2(4), 141-148.
- Barbour, M. T., Gerristen, J., Synder, B. D. and Stribling, J. B. (1999). *Rapid bioassessment protocols for Use in Streams and Wadeable Rivers: Periphyton, Benthic macroinvertebrates and fish*. Washington: US Environmental Protection Agency .
- Barling, R. D. and Moore, I. D. (1994). Role of buffers strips in management of waterway pollution: a review. *Environmental Management*, 18, 543-558.
- Barthlott, W., Lauer, W. and Placke, A. (1996). Global distribution of species diversity on vascular plants: towards a world map of phytodiversity. *Erdkunde*, 50, 317-327.
- Becker, A., Körner, C., Brun, J., Guisan, A. and Tappeiner, U. (2007). Ecological and land use studies along elevational gradients. *Mountain Research and Development*, 27(1), 58-65.
- Belay, A., Zhou, X., Su, B., Wan, S. and Luo, Y. (2009). Labile, recalcitrant, and microbial carbon and nitrogen pools of tallgrass prairie soil in the US Great Plains subjected to experimental warming and clipping. *Soil Biology and Biochemistry*, 41(1), 110-116.
- Belcore, E. and Latella, M. (2022). Riparian ecosystems mapping at fine scale: a density approach based on multi-temporal UAV photogrammetric point clouds. *Remote Sensing in Ecology and Conservation*, 1-12.
- Bendix, J., Beck, E., Bräuning, A., Makeschin, F., Mosandl, R., Scheu, S., and Wilcke, W. (2013). *Ecosystem services, biodiversity and environmental change in a tropical mountain ecosystem of south Ecuador*. Berlin: Springer.

- Bezaury, J. y Gutiérrez, D. (2009). Áreas naturales protegidas y desarrollo social en México. En R. Dirzor, R. González y I. J. March, *Capital natural de México. Vol.2: estado de conservación y tendencias de cambio* (págs. 352-431). Ciudad de México: Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad.
- Birtwistle, A. N., Laituri, M., Bledsoe, B. and Friedman, J. M. (2016). Using NDVI to measure precipitation in semi-arid landscapes. *Journal of Arid Environments*, 13, 15-24.
- Bobbink, R., Heil, G., and Trigo, N. (2003). *Ecology and man in Mexico's central volcanoes area*. Netherlands: Kluwer Academic Publisher.
- Bojórquez, J. I., Castillo, L. A., Hernández, A., García, J. D. and Madueño, A. (2015). Cambios en las reservas de carbono orgánico del suelo bajo diferentes coberturas. *Cultivos tropicales*, 36(4), 63-69.
- Boudal, C., and Robin, C. (1989). Popocatepetl volcano: recent eruptive history and potential hazard and risk. En J. H. Latter, *Future Eruptions* (págs. 110-128). Berlín: Springer-Verlag.
- Boyd, C. E. (2015). *Water quality an introduction*. Berlin: Springer.
- Boyd, C. E. (2016). Alkalinity and hardness: critical but elusive concept in aquaculture. *Journal of the World Aquaculture Society*, 47(1), 6-41.
- Bray, R. H. and Kurtz, L. T. (1945). Determination of total, organic, and available phosphorus in soil. *Soil Science*, 59, 39-45.
- Bremmer, J. M. (1965). Organic forms of nitrogen. En C. A. Black, *Method of soil analysis Part. II* (págs. 595-624). United States of America: American Society of Agronomy.
- Brooks, P. D., Troch, P. A., Durcik, M., Gallo, E. and Schlegel, M. (2011). Quantifying regional scale ecosystem response to changes in precipitation: not all rain is created equal. *Water Resources Research*, 47(10).
- Brown, L. (2001). *Eco-economy: building an economy for the earth*. New York: Earth Policy Institute, W.W. Norton & Company.
- Bullón, T. (1981). Aportaciones recientes sobre el medio físico de montaña. *Anales de Geografía de la Universidad Complutense*, 1, 295-305.
- Camargo, J. A. and Alonso, Á. (2006). Ecological and toxicological effect of inorganic pollution in aquatic ecosystems: a global assessment. *Environmental International*, 32(6), 831-849.
- Canales, J. E., Borrego, F., Narvaez, W. A., González, S. y Benavides, A. (2021). Impacto de diferentes fertilizantes en la solución del suelo y el crecimiento de tomate. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*(26), 105-117.
- Cantú, I. y Yáñez, M. I. (2018). Efecto del cambio de uso de suelo en el contenido del carbono orgánico y nitrógeno del suelo. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 9(45), 122-151.
- Casella, A., Barrionuevo, N., Pezzola, A. y Winschel, C. (2018). *Pre-procesamiento de imágenes satelitales del sensor sentinel 2A y 2B con el software SNAP 6.0*. Buenos Aires: Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria.

- Castillo, X., Etchevers, J. D., Hidalgo, C. M. y Aguirre, A. (2021). Evaluación de la calidad del suelo: generación e interpretación de indicadores. *Terra Latinoamericana*, 39, 1-12.
- Caycho, C., Castillo, C. y Merino, V. (2019). *Manual de estadística no paramétrica aplicada a los negocios*. Lima: Universidad de Lima.
- Cerón, L. E. y Melgarejo, L. M. (2005). Enzimas del suelo: indicadores de salud y calidad. *Acta Biológica Colombiana*, 10(1), 5-18.
- Chakraborty, A. (2020). Mountains as a global heritage: arguments for conserving the natural diversity of mountain regions. *Heritage*, 3(2), 198-207.
- Challenger, A. (1998). *Utilización y conservación de los ecosistemas terrestres de México: pasado, presente y futuro*. México: CONABIO, Instituto de Biología UNAM y Agrupación Sierra Madre S.C.
- Chen, P. J., Chua, M. L. and Zhang, B. (2002). Effects of competitive ions, humic acid, and pH on removal of ammonium and phosphorus from the synthetic industrial effluent by ion exchange resins. *Waste Management*, 22(7), 711-719.
- Cifuentes, G. E. (2008). El medio ambiente un concepto jurídico indeterminado en Colombia. *Justicia Juris*, 9, 37-49.
- Cocotle, L., Ramírez, M. y Hernández, B. (2022). Impacto de la calidad del suelo medida por el cambio de uso de suelo en el Cofre de Perote, México. *Revista de la Alta Tecnología y Sociedad*, 14(1), 1-8.
- Colli, P. M. (2015). *Actividades Arilsulfatasa y Ureasa en la fertilidad de suelos ribereños del Parque Nacional Izta-Popo y su zona de influencia*. México: Universidad Nacional Autónoma de México.
- Colwell, S. (2007). *The application of the QBR index to the riparian forest of Central Ohio streams*. Ohio: Ohio State University.
- CONAGUA. (22 de 11 de 2022). *Calidad del agua en México*. Obtenido de <https://www.gob.mx/conagua/articulos/calidad-del-agua#:~:text=Los%20resultados%20para%202021%20mostraron,buena%20calidad%20a%20fuertemente%20contaminada>.
- CONAGUA-WWF-AGRA. (2012). *Norma Mexicana NMX-AA-159-SCFI-2012 que establece el procedimiento para la determinación del caudal ecológico en cuencas hidrológicas*. México.
- CONANP. (2013). *Programa de Manejo Parque Nacional Iztaccíhuatl Popocatepetl*. México: SEMARNAT, CONANP.
- CONANP. (18 de 02 de 2021). *Áreas Naturales Protegidas Decretadas*. Obtenido de *Áreas Naturales Protegidas Decretadas* Web site: [http://sig.conanp.gob.mx/website/pagsig/datos\\_anp.htm](http://sig.conanp.gob.mx/website/pagsig/datos_anp.htm)
- CONANP. (2022). *Áreas naturales protegidas federales de México, marzo 2022*. México: CONANP.
- Cook, C. N., Wardell, G., Keatley, M., Gowans, S. A., Gibson, M. S., Westbrooke, M. E. and Marshall, D. J. (2010). Is what you see what you get? visual vs. measured assessment of vegetation condition. *Journal of Applied Ecology*, 47, 650-661.

- Corbacho, C., Sánchez, J. M. and Costillo, E. (2003). Patterns of structural complexity and human disturbance of riparian vegetation in agricultural landscapes of a Mediterranean area. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 95, 495-507.
- Cornejo, C. (2016). *Clasificación de recursos hídricos de la subcuenca de San Martín Texmelucan*. Ciudad de México: Universidad Nacional Autónoma de México.
- Corwin, D. L. (2003). Soil salinity measurement. En B. A. Stewart and T. A. Howell, *Encyclopedia of water science* (págs. 852-857). New York: Marcel Dekker.
- Corwin, D. L., Loague, K. and Ellsworth, T. R. (1999). Introducción: Assessing non-point source pollution in the vadose zone with advanced information technologies. En D. L. Corwin, K. Loague, and T. R. Ellsworth, *Assessment of nonpoint source pollution in the vadose zone* (págs. 1-20). Washington: Geophysical Monograph Series.
- Cruz, G. y Etchevers, J. D. (2011). Contenidos de carbono orgánico de suelos someros en pinares y abetales de áreas protegidas de México. *AGROCIENCIA*, 45, 849-862.
- CRZFAM-WST-NRC. (2002). *Riparian areas: functions and strategies for management*. Washington: National Academy Press.
- Cummins, K. W. (1974). Structure and function of streams ecosystems. *BioScience*, 24(11), 631-641.
- de la Lanza, G., González, R., González, I. D. y Hernández, S. (2018). Caudal ecológico de ciertos ríos que descargan al Golfo de México y al pacífico mexicano. *Revista Iberoamericana del Agua*, 5, 3-15.
- De la Mora, C., Flores, J. G., Flores, H. E., Rubio, H. O., Chávez, Á. A., Ochoa, J. M. y García, J. (2017). Variaciones espacio-temporales y modelaje de la concentración de oxígeno disuelto en el lago de Chapala, México. *Tecnología y ciencias del agua*, 9(1), 39-52.
- Delgado, H. (1996). Los glaciares del Popocatepetl: ¿huespedes efimeros de la montaña? *Ciencias*, 41, 24-32.
- Delgado, J. A., Valdez, J. V. y Incio, F. A. (2019). Influencia de la dilución y concentración de los electrolitos en la medición del pH en suelos ácidos. *Revista Científica Pakamuros*, 7(2), 13-21.
- Demant, A. (1982). Interpretación geodinámica del volcanismo del Eje Neovolcánico Transmexicano. *Instituto de Geología Revista*, 5(2), 217-222.
- DOF. (2000). *Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-1994, Salud ambiental. Agua para uso y consumo humano. Límites permisibles de calidad y tratamientos a que debe someterse el agua para su potabilización*. Distrito Federal: Estados Unidos Mexicanos.
- DOF. (2012). *Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente*. Ciudad de México: Diario Oficial de la Federación.
- Doran, J. W. and Parkin, B. T. (1994). *Defining soil quality for a sustainable environment*. Wisconsin: Soil Science Society of America.
- Durán, M., Canals, R. M., Sáez, J. L., Ferrer, V. and Lera-López, F. (2020). Disruption of traditional land use regimes causes an economic loss of

- provisioning services in high-mountain grasslands. *Ecosystem Services*, 46, 1-15.
- Ebert, U. and Welsch, H. (2003). Meaningful environmental indices: a social choice approach. *Journal Environmental Economics and Management*, 47, 270-283.
- Enderlein, U. S., Enderlein, R. E., and Williams, W. P. (1997). Chapter 2 - Water Quality Requirements. En I. Helmer, *Water pollution control - A guide to the use of water, quality management principles*. Bury St Edmunds: Edmunsbury Press.
- Espinosa, D., Ocegueda, S., Aguilar, C., Flores, Ó., Llorente, J. y Vázquez, B. (2009). El conocimineto biogeográfico de las especies y su regionalización natural. En J. Sarukhán, *Capital Natural de México* (págs. 33-65). México: CONABIO.
- Ezcurra, E., Mazari, M., Pisanty, I. y Aguilar, A. G. (2005). *La cuenca de México, aspectos ambientales críticos y sustentabilidad*. México: Fondo de Cultura Económica.
- Fassbender, H. (1993). *Modelos edafológicos de sistemas agroforestales* (Segunda ed.). Turrialba: CATIE.
- Fassbender, H. W. y Bornemisza, E. (1994). *Química de suelos con énfasis en suelos de América Latina*. San José: IICA.
- Ferrera, C. y Alarcón, R. A. (2001). La microbiología del suelo en la agricultura sostenible. *CIENCIA ergo-sum*, 8(2), 175-783.
- Ferrusquía, V. I. (1998). Geología de México: una sinopsis. En T. P. Ramamoorthy, R. Bye, A. Lot y J. Fa, *Diversidad biológica de México. Orígenes y distribución* (págs. 3-108). México: UNAM.
- Figuroa, F. and Sánchez, V. (2008). Effectiveness of natural protected areas to prevent land use and land cover change in Mexico. *Biodiversity and Conservation*, 17(13), 3223-3240.
- Filion, F. (1995). A socio-economics context and rationale for integrating biodiversity conservation and sustainable uses of natural resources. En J. Bissonette, and P. Krausman, *Integrating people and wildlife for a sustainable future* (págs. 103-106). Bethesda MD: Wildlife Society.
- Fries, E. (1960). Geología del estado de Morelos y partes adyacentes de México y Guerrero, Región central Merdional. *Boletín del Instituto de Geología*, 60-236.
- Fu, A., Li, W., Chen, Y., Wang, Y., Hao, H., Li, Y., Sun, F., Zhou, H., Zhu, C. and Hao, X. (2021). The effects of ecological rehabilitation projects on the resilience of an extremely drought-prone desert riparian forest ecosystems in the Tarim River Basin, Xinjiang, China. *Scientific Reports*, 11.
- Gallardo, J. (2016). *La materia orgánica del suelo: residuos orgánicos, humus, compostaje y captura de carbono*. Salamanca: Sociedad Iberoamericana de Física y Química Ambiental.
- Gamarra, C. C., Díaz, M. I., Vera, M., Galeano, M. P. y Cabrera, A. J. (2018). Relación carbono-nitrógeno en suelos de sistemas silvopastoriles del Chaco paraguayo. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 9(46), 4-26.

- Gantes, P., Falco, L. y Sánchez, A. (2017). Diversidad de la vegetación y características morfoedáficas de las riberas de arroyos pampeanos. *Ecología Austral*, 27, 85-93.
- García, S. L., Arguello, A. y Parra, R. (2019). Factores que influyen en el pH del agua mediante la aplicación de modelos de regresión lineal. *INNOVA Research Journal*, 4(2), 59-71.
- Gerold, G., Schawe, M. and Bach, K. (2008). Hydrometeorologic, pedologic and vegetation patterns along an elevational transect in the montane forest of the Bolivian Yungas. *Erde*, 139(1-2), 141-168.
- Gibbons, P. and Freudenberger, D. (2006). An overview of methods used to assess vegetation condition at the scale of the site. *Ecological Management & Restoration*, 7, S10-S17.
- Gibbons, P., Briggs, S. V., Ayers, D. A., Doyle, S., Seddon, J., McElhinny, C., Jones, N., Sims, R. and Doody, J. S. (2008). Rapidly quantifying reference conditions in modified landscapes. *Biological Conservation*, 141, 2483-2493.
- Gil, W. J., Mora, J. J. y Pérez, S. M. (2014). Análisis del procesamiento de los datos de entrada para un localizador de fallas en sistemas de distribución. *Tecnura*, 18(41), 64-75.
- Gobierno Mexicano. (2012). *Norma Mexicana NMX-AA159-SCFI-2012*. México: Gobierno Mexicano.
- Gómez, J. A. y Villalobos, F. (2020). Montañas: cómo se definen y su importancia para la biodiversidad y la humanidad. *CIENCIA ergo-sum*, 27(2), 1-7.
- Gómez, J. A., Novelo, R. y Astudillo, M. R. (2017). Efecto de las descargas domésticas y de beneficio de café sobre la calidad del agua y la diversidad de larvas de Odonata (insecta) en un arroyo del bosque mesófilo de montaña en Veracruz, México. *Revista Mexicana de Biodiversidad*, 88(2), 372-380.
- Gómez, M., Danglot, C. y Vega, L. (2003). Sinopsis de pruebas estadísticas no paramétricas, cuándo usarlas. *Revista Mexicana de Pediatría*, 70(2), 91-99.
- Granados, D., Hernández, M. Á. y López, G. F. (2006). Ecología de las zonas ribereñas. *Revista Chapingo. Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, 12(1), 55-69.
- Grau, H. R. and Aide, M. (2008). Globalization and land use transitions in Latin America. *Ecology and Society*, 13(2), 16.
- Gregory, S. V., Swanson, F. J., McKee, A. W. and Cummins, K. W. (1991). An ecosystem perspective of riparian zones. *Bioscience*, 41(8), 540-551.
- Grumbine, R. E. and Xu, J. (2021). Mountain futures: pursuing innovative adaptation in coupled social ecological systems. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 19(6), 342-348.
- Guerra, E. A. (2020). *Indicadores Hídrico-edáficos de calidad para ambientes ribereños de la reserva de la biosfera "Los Volcanes"*. Ciudad de México: Universidad Nacional Autónoma de México.
- Guerra, E. A. y Campos, L. S. (2017). Conectividad fluvial. En G. Cruz, y E. A. Guerra, *Ecosistemas ribereños de montaña* (págs. 75-87). Ciudad de México: UNAM.

- Guerra, E. A. y Cruz, G. (2014). *Métodos de evaluación y diagnóstico para agua y suelo*. Ciudad de México: Universidad Nacional Autónoma de México.
- Guerra, E. A. y Cruz, G. (2017). Uso de suelo y calidad del agua, caso de estudio: Reserva de la Biosfera los Volcanes. *Revista Latinoamericana el Ambiente y las Ciencias*, 8(18), 41-67.
- Hala, Z. (2012). *Análisis mediante modelado avanzado de procesos de eutrofización en lagunas litorales: aplicación a masas de agua y mediterráneas*. Santander: Universidad de Cantabria.
- Hattermann, F. F., Krysanova, V., Habeck, A. and Bronstert, A. (2006). Integrating wetlands and riparian zones in river basin modelling. *Ecological Modelling*, 199, 379-392.
- Hernández, M. A. y Granados, D. (2006). El Parque Nacional Iztaccíhuatl-Popocatepetl-Zoquiapany el impacto ecológico de su deterioro. *Revista Chapingo, Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, 12(2), 101-109.
- Herrera, J. R., Navarro, B. A., Torres, K. P., Martínez, N., Royero, A. y Cahuana, A. (2022). Determinación de los índices BMWP/COL, (QBR), (IHF) e ICO en Valledupar, Colombia. *Revista Politécnica*, 18(35), 110-127.
- Homeier, J., Werner, F. A., Gawlik, J., Peters, T., Diertl, K. J. and Richter, M. (2013). Plant diversity and its relevance for the provision of ecosystem services. En J. Bendix, E. Beck, A. Bräuning, F. Makeschin, R. Mosandl, S. Scheu y W. Wilcke, *Ecosystems services, biodiversity and environmental change in a tropical mountain ecosystem of South Ecuador* (págs. 93-106). Berlin: Springer.
- Hood, W. G. and Naiman, R. J. (2000). Vulnerability of riparian zones to invasion by exotic vascular plants. *Plant Ecology*, 148, 105-114.
- Hossain, M. and Patra, P. K. (2020). Water pollution index - A new integrated approach to rank water quality. *Ecological Indicators*, 117, 1-9.
- Huang, J., Kankanamge, N. R., Chow, C., Welsh, D. T., Li, T. and Teasdale, P. R. (2018). Removing ammonium from water and wastewater using cost-effective adsorbents: a review. *Journal of Environmental Science*, 63, 174-197.
- Huang, S., Tang, L., Wang, Y. and Shao, G. (2021). A commentary review on the use of normalized difference vegetation index (NDVI) in the era of popular remote sensing. *Journal of Forestry Research*, 32, 1-6.
- Huisman, J., Codd, G. A., Paerl, H. W., Ibelings, B. W., Verspagen, J. M. and Visser, P. M. (2018). Cyanobacterial blooms. *Nature Reviews Microbiology*, 16, 471-483.
- Hyatt, E. (2001). Editorial. *Ecological Indicators*, 1, 1-2.
- Iakovoglou, V., Zaimis, G. N. and Gounaridis, D. (2013). Riparian areas in urban settings: two case studies from Greece. *International Journal of Innovation and Sustainable Development*, 7, 271-288.
- INEGI. (2001). *Conjunto de Datos Vectoriales Fisiográficos. Continuo Nacional. Escala 1:1,000,000. Serie I*. Aguascalientes: INEGI.
- INEGI. (2013). *Continuo de elevaciones mexicano*. México: INEGI.

- INEGI. (27 de 01 de 2014). *Conjunto de datos vectoriales edafológico, escala 1:250000, serie II (continuo nacional)*. Obtenido de Portal de Geoinformación 2021: <http://www.conabio.gob.mx/informacion/gis/>
- INEGI. (16 de 12 de 2016). *Uso de Suelo y Vegetación, escala 1:250000, serie VI (continuo nacional)*. Obtenido de Portal de Geoinformación 2021: <http://www.conabio.gob.mx/informacion/gis/>
- INEGI. (2021). *División política estatal, 1:250000. 2020*. Aguascalientes: INEGI.
- INEGI-SIATL. (14 de 02 de 2022). *Simulador de flujos de agua de cuencas hidrográficas*. México.
- Iriondo, A. y Mota, J. (2004). *Desarrollo de una red neuronal para estimar el oxígeno disuelto en el agua a partir de instrumentación de EDAR*. Ciudad Real, España: XXV Jornadas de Automática.
- Isaza, G. C., Pérez, M. A., Laines, J. R. y Castañón, G. (2009). Comparación de dos técnicas de aireación en la degradación de la materia orgánica. *Universidad y Ciencia*, 25(3), 233-243.
- Ishee, E. R., Ross, D. S., Garvey, K. M., Brougault, R. R. and Ford, C. R. (2015). Phosphorus characterization and contribution from eroding streambank soil of Vermont's Lake Champlain basin. *Journal of Environmental Quality*, 44(6), 1745-1743.
- IUSS. (2007). *World Soil Resource Reference Base*. Italy: FAO.
- Jenkins, D., Snoeyink, V., Ferguson, J. y Leckie, J. (1983). *Química del agua: manual de laboratorio*. México: Limusa.
- Jes la Cour, J., Spliid, H., Hansen, T. L., Svärd, A. and Christensen, T. H. (2004). Assessment of sampling and chemical analysis of source-separated organic household waste. *Waste Management*, 24(6), 541-549.
- Jiang, J. (2022). *Applied Medical Statistics*. New Jersey: John Wiley and Sons.
- Joffre, R., Göran, I. A., Gillon, D. and Bosatta, E. (2001). Organic matter quality in ecological studies: theory meets experiment. *OIKOS*, 93(3), 451-458.
- Karlen, D. L., Mausbach, M. J., Doran, J. W., Cline, R. G., Harris, R. F. and Schuman, G. E. (1997). Soil quality: a concept, definition and frameworks for evaluation. *Soil Science Society of America Journal*, 61(1), 4-10.
- Karr, J. R. (1996). Ecological integrity and ecological health are not the same. En P. C. Schulze, *Engineering Within Ecological Constraints* (págs. 97-109). Washington: National Academy Press.
- Körner, C. (2007). The use of altitude in ecological research. *Trends in Ecology & Evolution*, 22(11), 569-574.
- Körner, C., Jetz, W., Paulsen, J., Payne, D., Rudmann, K. and Spehn, E. (2017). A global inventory of mountains for bio-geographical applications. *Alpine Botany*, 127(1), 1-15.
- Körner, C., Jetz, W., Paulsen, J., Payne, D., Rudmann-Maurer, K. and Spehn, E. M. (2016). A global inventory of mountains for bio-geographical applications. *Alpine Botany*, 127, 1-15.
- Kriegler, F. J., Malila, W. A., Nalepka, R. F. and Richardson, W. (1969). Preprocessing transformation and their effect on multispectral recognition. *Remote Sensing Environment*, 6, 97-132.

- Kruse, J., Abraham, M., Amelung, W., Baum, C., Bol, R., Kühn, O., Lewandowski, H., Niederberg, J., Olleman, Y., Rüger, C., Santner, J., Siebers, M., Siebers, N., Spohn, M., Vestergren, J., Vogts, A. and Leinweber, P. (2015). Innovative methods in soil phosphorus research: a review. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 178(1), 43-88.
- Ladd, J. N., Amato, M. and Veen, H. A. (2004). Soil microbial biomass: its assay and role in turnover of organic matter C and N. *Soil Biology and Biochemistry*, 36(9), 1369-1372.
- Leininger, S., Urich, T., Schloter, M., Schwark, L., Qi, J., Nicol, G. W., Prosser, J. I., Schuster, S. C. and Schleper, C. (2006). Archaea predominate among ammonia-oxidizing prokaryotes in soils. *Nature*, 442(7104), 806-809.
- Li, J., Bai, Y. and Alatalo, J. M. (2020). Impacts of rural tourism-driven land use change on ecosystems services provision in Erhai Lake Basin, China. *Ecosystems Services*, 42, 1-10.
- Loayza, V., Sevilla, V., Olivera, C., Guevara, M., Olmedo, G., Vargas, R., Oyonarte, C. y Jiménez, W. (2020). Mapeo digital de carbono orgánico en suelos de Ecuador. *Ecosistemas*, 29(2), 1-13.
- López, A. B. (2017). Control geomorfológico en el drenaje superficial de laderas y ríos de montaña. En G. Cruz, y E. A. Guerra, *Ecosistemas ribereños de montaña: descripción y estudio* (págs. 29-51). México: Universidad Nacional Autónoma de México.
- Macías, J. L. and Siebe, C. (2005). Popocatepetl's crater filled to the brim: significance for hazard evaluation. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 327-330.
- Mack, M. C., D'Antonio, C. M. and Ley, R. E. (2001). Alteration of ecosystem nitrogen dynamics by exotic plants: a case study of C<sub>4</sub> Grasses in Hawaii. *Ecological Applications*, 11(5), 1323-1335.
- Magallán, D. (14 de 01 de 2022). Población de coyotes aumentó en el Parque Nacional Izta-Popoa raíz de la pandemia. *El Universal Puebla*. Obtenido de <https://www.eluniversalpuebla.com.mx/estado/poblacion-de-coyotes-aumento-en-el-parque-nacional-izta-popo-raiz-de-la-pandemia>
- Mann, H. B. and Whitney, D. R. (1947). On a test of whether one of two random variables is stochastically larger than the other. *The Annals of Mathematical Statics*, 18, 50-60.
- Margules, C. R. and Pressey, R. L. (2000). Systematic conservation planning. *Nature*, 405, 243-253.
- Martínez, E., Fuentes, J. P. y Acevedo, E. (2008). Carbono orgánico y propiedades del suelo. *Revista de la ciencia del suelo y nutrición vegetal*, 8(1), 69-96.
- Matsumoto, K. and McNeil, B. I. (2019). 1- The changing ocean and freshwater CO<sub>2</sub> system. En M. Grosell, P. L. Munday, A. P. Farrell, and C. J. Brauner, *Carbon Dioxide* (Vol. 37, págs. 1-32).
- McCarthy, M. and Parris, K. (2004). The habitat hectares approach to vegetation assessment: An evaluation and suggestions for improvement. *Ecological Management & Retoration*, 5, 24-27.

- Medeiros, A. C., Freitas, K. R., Freitas, K. C., Silva, I. D., Oliveira, M., Mendonça, R. and Mendonça, N. M. (2017). Quality index of the surface water of Amazonian rivers in industrial areas in Pará, Brazil. *Marine Pollution Bulletin*, 123(1-2), 156-164.
- Mena, B. C. (2018). *Infiltración de agua en suelos ribereños con distintos tipos de vegetación sobre un sistema fluvial en el Parque Nacional Izta-Popo y zonas de influencia*. Ciudad de México: Universidad Nacional Autónoma de México.
- Mendoza, R. E., García, I. V., Cabo, L., Weigandt, C. F. and de Iorio, A. F. (2015). The interaction of heavy metals and nutrients present in soil and native plants with arbuscular mycorrhizae on the riverside in the Matanza Riachuelo River Basin (Argentina). *Science of the Total Environment*, 55(1), 555-564.
- Meng-Fei, Y., Yongxia, T., Wenzhi, L., Wei, X., Guihua, L., Lai, W. and Lin, M. (2020). C, N, and P stoichiometry and their interaction with different plant communities and soil in subtropical riparian wetlands. *Environmental Science and Pollution Research*, 27, 1024-1034.
- Meyer, J. L. (1997). Stream health: incorporating the human dimension to advance stream ecology. *Journal of the North American Benthological Society*, 16, 439-447.
- Miranda, F. J., Chamorro, A. y Rubio, S. (2007). *Introducción a la gestión de la calidad*. Madrid: DELTA.
- Monfil, L. F. (2020). *Calidad ecológica de dos sistemas ribereños de montaña y su relación con el uso de suelo*. Ciudad de México: Universidad Nacional Autónoma de México.
- Montes, C. (1997). Los humedales españoles: un desafío para la conservación de paisajes del agua amenazados. En M. A. Soler, *Manual de gestión del medio* (págs. 101-115). Barcelona: Ariel.
- Mooser, F. (1958). Active volcanoes of Mexico. *IAVCEI*, 2-36.
- Mooser, F. (1972). The Mexican volcanic belt, structure and tectonics. *Geofísica Internacional*, 12(2), 55-70.
- Moreno, V., Castillo, O., Gama, L., Zavala, J. y Ortiz, M. A. (2017). Relación de vegetación ribereña y propiedades del suelo en un afluente del río Tacotalpan, Tabasco, México. *Madera y Bosques*, 23(1), 91-109.
- Moreno, V., Gama, L. M., Ochoa, S., Contreras, W., Mata, E. E., Jiménez, N. C., y Ávalos, A. A. (2022). Evaluación de un bosque ribereño mediante la aplicación del índice de calidad de bosque (QBR) para su adaptación en zonas tropicales de México. *Caldasia*, 44(2), 421-431.
- Morocho, F., Santin, J. R., Ruiz, L., Alvarado, V. y Rengel, E. (2018). Evaluación de la calidad de las riberas en cuencas prioritarias del cantón Loja, provincia de Loja, Ecuador. *Bosques Latitud Cero*, 8(2), 91-106.
- Moses, L. E. (1952). Non-parametric statistics for psychological research. *Psychological Bulletin*, 49(2), 122-143.
- Munné, A., Solá, C. y Prat, N. (1998). QBR: Un índice rápido para la evaluación de la calidad de los ecosistemas de ribera. *Tecnología del Agua*, 175, 20-37.

- Muñoz, H., Orozco, S., Vera, A., Suárez, J. y Jiménez, J. (2015). Relación entre oxígeno disuelto, precipitación pluvial y temperatura: río Zahuapan, Tlaxcala, México. *Tecnología y ciencias del agua*, 6(5), 59-74.
- Naiman, R. J. and Décamps, H. (1997). The ecology of interfaces: riparian zones. *Annual Review of Ecology and Systematics*, 28, 621-658.
- Naiman, R. J., Décamps, H. and Pollock, M. (1993). The role of riparian corridors in maintaining regional biodiversity. *Ecological Applications*, 3(2), 209-212.
- Naiman, R. J., Décamps, H., McClain, M. E. and Likens, G. E. (2005). *Riparian ecology, conservation, and management of streamside communities*. San Diego, California: Elsevier.
- Naiman, R. J., Décamps, H., Pastor, J. and Johnston, C. A. (1998). The potential importance of boundaries to fluvial ecosystems. *Journal of the North American Benthological Society*, 7(4), 289-306.
- Nasiri, F., Maqsood, I., Huang, G. and Fuller, N. (2007). Water quality index: a fuzzy river-pollution decision support expert system. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 133(2), 95-105.
- Navarrete, A., Vela, G., López, J. y Rodríguez, M. L. (2011). Naturaleza y utilidad de los indicadores de la calidad del suelo. *ContactoS*, 80, 29-37.
- Neal, C., Huose, W. A., Jarvie, H. P., Neal, M., Hill, L. and Wickham, H. (2006). The water quality of the river Dun and the Kennet and Avon Canal. *Journal of Hydrology*, 330(1-2), 155-170.
- Nortcliff, S. (2002). Standardisation of soil quality attributes. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 88, 161-168.
- Null, S. E., Mouzon, N. R. and Elmore, L. R. (2017). Dissolved oxygen, stream temperature, and fish habitat response to environmental water purchases. *Journal of Environmental Management*, 197, 559-570.
- Ochoa, L., Urbina, J. N., Bernardo, L., Flores, O. and Bezaury, J. (2009). The effects of governmental protected areas and social initiatives for land protection on the conservation of Mexican amphibians. *PLOS ONE*, 4(9), e6878.
- Ortega, M., Martínez, F. y Padilla, F. (2003). Aspectos metodológicos para evaluar la calidad ambiental de los humedales. En M. Paracuellos, *Ecología, manejo y conservación de los humedales* (págs. 125-137). España: Instituto de Estudios Almerienses.
- Pacheco, M. F. (2005). El ambiente, más allá de la naturaleza. *Elementos: Ciencia y cultura*, 21(57), 29-33.
- Palomino, P. D. (2018). Evaluación de la calidad del agua en el río Mashcón, Cajamarca, 2016. *Anales Científicos*, 79(2), 298-307.
- Palomo, I., Montes, C., Martín, B., González, J. A., García, M., Alcorlo, P., and García, M. R. (2014). Incorporating the social-ecological approach in protected areas in the anthropocene. *BioScience*, 64(3), 181-191.
- Parkes, D. and Newell, G. (2011). Assessing the quality of native vegetation: the "habitat hectares" approach. *Ecological Management & Restoration*, 144, 2991-2999.

- Payne, D., Spehn, E. M., Snethalge, M. and Fischer, M. (2017). Opportunities for research on mountain biodiversity under global change. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 29, 40-47.
- Pena, J. B. (1977). *Problemas de la medición del bienestar y conceptos afines*. España: Instituto Nacional de Estadística.
- Pérez, C. (2001). *Técnicas estadísticas y SPSS*. Madrid: Prentice Hall.
- Pesce, S. F. and Wunderlin, D. A. (2000). Use of water quality indices to verify the impact of Cordoba City (Argentina) on Suquía river. *Water Research*, 34(11), 2915-2926.
- Pétegas, S. y Pita, S. (2001). La distribución normal. *Cadernos de Atención Primaria*(8), 268-274.
- Phillips, A. (2003). Turning ideas on their head: the new paradigm for protected areas. *The George Wright Forum*, 20(2), 8-32.
- Pimentel, D. and Kounang, N. (1998). Ecology of soil erosion in ecosystems. *Ecosystems*, 17, 416-426.
- Pinkus, M. J., Pikus, M. A. and Ortega, A. (2014). Recomendaciones para el manejo sustentable en las áreas naturales protegidas de México. *Investigación y Ciencia de la Universidad Autónoma de Aguascalientes*, 60, 102-110.
- Piña, M. R. (2011). Desarrollo de la función densidad de probabilidad (PDF) de la distribución normal y su aplicación. *Cultura Científica y Tecnológica*(45), 139-146.
- Prach, K. and Straskrabová, J. (1996). Restoration of degraded meadows: an experimental approach. En K. Prach, J. Jenik and A. R. Large, *Floodplain ecology and management. The lunice river in the Trebon Biosphere Reserve* (págs. 87-93). Amsterdam: central Europe SPB Academic Publishing.
- Presetyo, H. D. and Ramadhan, M. (2021). Quality profile of riparian zone and vegetation quality in Amprong river, Tumpang district based on QBR index and NDVI. *BIOTROPIKA*, 9(3), 229-236.
- Price, M. F. (1998). Las montañas: ecosistemas de importancia mundial. *UNASYLVA*, 49, 1-10.
- PR-PNUD-CONANP. (2019). *Resiliencia, áreas naturales protegidas: soluciones naturales a retos globales*. México: Proyecto Resiliencia, Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo, Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas.
- Pttorelli, N., Vik, J. O., Mysterud, A., Gaillard, J. M., Tucker, C. J. and Stenseth, N. C. (2005). Using the satellite-derived NDVI to assess ecological responses to environmental change. *Trends in Ecology & Evolution*, 20(9), 503-510.
- Quiroz, A., Torres, P. and Conway, K. (2020). Community adaptive capacity in peri-urban natural protected areas: a case study near Mexico City. *Sustainability*, 12(11), 1-17.
- Rangeti, I., Dzwauro, B., Barratt, G. J. and Otieno, F. O. (2015). Ecosystem-specific water quality indices. *African Journal of Aquatic Science*, 40(3), 227-234.
- Rashitan, J., Chavkin, D. E. and Merhi, Z. (2019). Water and soil pollution as determinant of water food quality/contamination and its impacts on female fertility. *Reproductive Biology and Endocrinology*, 17(5), 1-13.

- Raven, P. J., Holmes, N. T., Dawson, F. H. and Everard, M. E. (1998). Quality assessment using river habitat survey data. *Aquatic Conservation. Marine and Fresh Ecosystems*, 8, 477-499.
- Redford, K. H., Coppolillo, P., Sanderson, E. W., Da Fonseca, G., Dinerstein, E., Groves, C., Mace, G., Maginnis, S., Mittermeier, R. A., Noss, R., Olson, D., Robinson, J. G., Vedder, A. and Wright, M. (2003). Mapping the conservation landscape. *Conservation Biology*, 17, 116-131.
- Rendon-von Osten, J. and Dzul, R. (2017). Glyphosate residues in groundwater, drinking water and urine of subsistence farmers from intensive agriculture localities: a survey in Hopelchén Campeche, Mexico. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 14(6), 595.
- Risser, P. G. (1993). Ecotones. *Ecological Applications*, 3, 369-445.
- Rizo, L. D. and Andreo, B. (2015). Water quality assessment of the Santiago river and attenuation capacity of pollutants downstream Guadalajara city, Mexico. *River Research and Applications*, 32(7), 1505-1516.
- Robin, C. (1984). Le volcán Popocatepetl (Mexique): structure, evolution pétrologique et risques. *Bulletin of Volcanology*, 47, 1-23.
- Rodríguez, P. C., González, H., Cantú, I., Pando, M., Marmolejo, J. G., Gómez, M. V. and Lazcano, J. (2019). Modelos de degradación de la hojarasca en bosques de encino y de pino en Nuevo León. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 10(55), 39-55.
- Roe, D. and Elliott, J. (2004). Poverty reduction and biodiversity conservation: rebuilding the bridges. *Oryx*, 38(2), 137-139.
- Rojas, A. (2011). Calidad de vida, calidad ambiental y sustentabilidad como conceptos urbanos complementarios. *Fermentum. Revista Venezolana de Sociología y Antropología*, 21(61), 176-207.
- Rzedowski, J. (2006). *Vegetación de México*. México: CONABIO.
- Salcedo, E., Ruiz, B. A., Hernández, E., González, R., Bernabé, A., Orozco, E., Ramírez, C. B., Anzaldo, J. y Delgado, E. (2019). Propiedades del suelo y nitrógeno como indicadores del crecimiento en plantaciones comerciales de teca. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 10(52), 33-54.
- Samboni, N. E., Carvajal, Y. y Escobar, J. C. (2007). Revisión de parámetros fisicoquímicos como indicadores de calidad y contaminación del agua. *Revista Ingeniería e Investigación*, 27(3), 172-181.
- Sandoval, J. C. (2016). *Caracterización y clasificación de suelos de sistemas ribereños del Parque Nacional Izta-Popo*. México: Universidad Nacional Autónoma de México.
- Santiago, I. (2018). *Contenidos de carbono orgánico y su compartimentación en sistemas ribereños adyacentes a cuatro biotopos del Parque Nacional Izta-Popo y zonas de influencia*. Ciudad de México: Universidad Nacional Autónoma de México.
- Santiago, I., Cruz, G., Guerra, E. A., López, A. B. y Valderrábano, J. M. (2018). Contenido de carbono en biomasa forestal en buffers de 20 m de amplitud en sistemas ribereños del Parque Nacional IZTA-POPO (estimación y

- modelaje). *TIP Revista Especializada en Ciencias Químico-Biológicas*, 21, 27.
- Schirpke, U., Scolozzi, R., Dean, G., Haller, A., Jäger, H., Kister, J., Kovács, B., Sarmiento, F. O., Sattler, B. and Schleyer, C. (2020). Cultural ecosystems services in mountain regions: conceptualising conflicts among users and limitations of use. *Ecosystems Services*, 46, 1-13.
- Schirpke, U., Wang, U. and Padoda-Schioppa, E. (2021). Editorial: Mountain landscapes: Protected areas, ecosystems services, and future challenges. *Ecosystem Services*, 49, 1-6.
- Schultz, R. C., Udawatta, R. P., Isenhardt, T. M., Colletti, J. P. and Simpkins, W. W. (2009). Riparian and upland buffer practices. En H. E. Garrett, *North America agroforestry: an integral science and practice* (págs. 163-218). Madison: Agronomy Society of America.
- Segnestam, L. (2002). Indicators of environment and sustainable development: theories and practical experience. *Environmental Economics Series*, 89.
- SEMARNAT. (2000). *Norma oficial Mexicana NOM-021-SEMARNAT-2000 que establece las especificaciones de Fertilidad, Salinidad y clasificación de suelos, estudio, muestreo y análisis*. Ciudad de México: Diario Oficial de la Federación.
- SEMARNAT. (22 de 11 de 2022). *Compendio de Estadísticas Ambientales Edición 2013*. Obtenido de [https://apps1.semarnat.gob.mx:8443/dgeia/compendio\\_2013/dgeiawf.semarnat.gob.mx\\_8080/ibi\\_apps/WFServlet28b9.html](https://apps1.semarnat.gob.mx:8443/dgeia/compendio_2013/dgeiawf.semarnat.gob.mx_8080/ibi_apps/WFServlet28b9.html)
- Siebe, C. and Macías, J. L. (2006). Volcanic hazards in Mexico city metropolitan area from eruptions at Popocatepetl, Nevado de Toluca and Jocotitlán stratovolcanoes and monogenetic scoria cones in the Sierra Chichinautzin Volcanic Field. En C. Siebe, J. L. Macías, and J. Aguirre, *Neogene-Quaternary Continental Margin Volcanism: A perspective from México* (págs. 253-329). Geological Society of America.
- Siebe, C., Abrams, M. and Macías, J. L. (1996a). Derrumbes gigantes, depósitos de avalanchas de escombros y edad del actual cono del volcán Popocatepetl. En SNPC, y CENAPRED, *Volcán Popocatepetl. Estudios realizados durante la crisis de 1994-1995* (págs. 195-220). México: UNAM.
- Siebe, C., Abrams, M., Macías, J. L. and Obenholzner, J. (1996b). Repeated volcanism disasters in prehispanic at Popocatepetl, Central Mexico: Past key to the future? *Geology*, 24(5), 399-402.
- Siebe, C., Delgado, H., González, G., Valdés, C. and Martín del Pozo, A. L. (1996c). Popocatepetl (Mexico): high steam column and variable fumarolic activity. *Global Volcanic Network Bulletin*, 21(1), 9-10.
- Siebe, C., Macías, J. L., Abrams, M., Obenholzner, J. and Vázquez, L. (1995a). *Plinian eruptions and pre-columbian volcanic disasters at Popocatepetl volcano, central Mexico*. Cordillera GSA Alaska Meeting.
- Siebe, C., Macías, J. L., Abrams, M., Rodríguez, S., Castro, R. and Delgado, H. (1995b). *Quaternary explosive volcanism and pyroclastic deposits in east*

- Central Mexico: implications for future hazards*. New Orleans: Field Trip Guide Book 1.
- Simonich, S. L. and Hites, R. A. (1995). Global distribution of persistent organochlorine compounds. *Science*, 269(5232), 1851-1854.
- Sims, J. T., Cunningham, S. D. and Summer, M. E. (1997). Assessing soil quality for environmental purposes: roles and challenges for soil scientist. *Journal of Environmental Quality*, 26, 20-25.
- Snelick, R., Uludag, U., Mink, U., Indovina, M. and Jain, A. (2005). Large-scale evaluation of multimodal biometric authentication using state-of-the-art systems. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 27(3), 450-455.
- Stanners, D. and Bourdeau, P. (1995). *Europe's environment: the dobris assessment*. Copenhagen: Commission for Environmental Cooperation.
- Steinbauer, M. J., Field, R., Grytnes, J. A., Trigas, P., Ah-Peng, C., Attorre, F., Birks, H. J. B., Borges, P. A. V., Cardoso, P., Chou, C. H., De Sanctis, M., de Sequeira, M. M., Duarte, M. C., Elias, R. B., Fernández, J. M., Gabriel, R., Gereau, R. E., Gillespie, R. G., Greimler, J., Harter, D. E. H., Huang, T. J., Irl, S. D. H., Jeanmonod, D., Jentsch, A., Jump, A. S., Kueffer, C., Nogué, S., Otto, R., Price, J., Romerais, M. M., Strasberg, D., Stuessy, T., Svenning, J. C., Vetaas, O. R. and Beierkuhnlein, C. (2016). Topography-driven isolation, speciation and a global increase of endemism with elevation. *Global Ecology and Biogeography*, 25(9), 1097-1107.
- Stine, M. A. and Weil, R. R. (2002). The relationship between soil quality and crop productivity across three tillage systems in south central Honduras. *American Journal of Alternative Agriculture*, 17(1), 2-8.
- Strickland, J. H. and Parson, T. R. (1972). *A practical handbook of seawater analysis*. Ottawa: Fisheries Research Board of Canada.
- Suárez, M. L., Vidal, M. R., Sánchez, M. M., Alba, J., Alvarez, M., Avilés, J., Bonada, N., Casas, J., Jáimez, P., Munné, A., Pardo, I., Prat, N., Rieradevall, M., Salinas, M. J., Toro, M. y Vivas, S. (2004). Las riberas de los ríos mediterráneos y su calidad: el uso del índice QBR. *Limnetica*, 21, 135-148.
- Sutadian, A. D., Muttill, N., Yilmaz, A. G. and Perera, B. C. (2016). Development of river quality indices-a review. *Environmental Monitoring and Assessment*, 188(1), 58.
- Tamayo, J. L. (1990). *Geografía moderna de México*. Ciudad de México: Trillas.
- Tang, S. M. and Montgomery, D. R. (1995). Riparian buffers and potentially unstable ground. *Environmental Management*, 19(5), 741-749.
- Ternus, R. Z., Souza, G. M., Krombauer, M. E., Carlos, D. J. and Dal Magro, J. (2011). Influence of urbanisation on water quality in the basin of the upper Uruguay River in western Santa Catarina, Brazil. *Acta Limnologica Brasiliensia*, 23(2), 189-199.
- Tlapa, M., Bustamante, A., Vargas, S., Ramírez, B., Cervantes, V. y Cruz, G. (2020). Factores del deterioro de las áreas naturales protegidas periurbanas del Valle de Puebla, México. *Estudios Demográficos y Urbanos*, 35(1), 51-82.

- Torres, P., Hernán, C. y Patiño, P. J. (2009). Índices de calidad de agua en fuentes superficiales utilizadas en la producción de agua para consumo humano. Una revisión crítica. *Revista Ingenierías Universidad de Medellín*, 8(15), 79-94.
- Tyagi, S., Sharma, B., Singh, P. and Dobhal, R. (2013). Water quality assessment in terms of water quality index. *American Journal of Water Resources*, 1(3), 34-38.
- USDA-ARS-NRCS-SQL. (1999). *Soil Quality Test Kit Guide*. United States of America: United States Department of Agriculture.
- Varol, M. (2020). Spatio-temporal changes in surface water quality and sediment phosphorus content of a large reservoir in Turkey. *Environmetnal Pollution*, 259.
- Velázquez, A. (2013). Review of revolutionary parks: conservation, social justice an Mexico's National Parks. *Studies in Social Justice*, 7(1), 169-171.
- Velázquez, A. C. y Salazar, V. (2019). Indicadores de calidad ambiental urbana: una revisión. *Gestión y Ambiente*, 22(2), 303-312.
- Visauta, B. (1997). *Análisis estadístico con SPSS para Windows, estadística básica*. Madrid: McGraw-Hill.
- Vu, T. M., Doan, D. P., Van, H. T., Nguyen, T. V., Vigneswaran, S. and Ngo, H. H. (2017). Removing ammonium from water using modified corncob-biochar. *Science of The Total Environment*, 579, 612-619.
- Wahab, N. A., Kamarudin, M. A., Toriman, M. E., Juahir, H., Saad, M. M., Ata, F. M., Ghazali, A., Hassan, A. R., Abdullah, H., Maulud, K. N., Hanafiah, M. M. and Harith, H. (2019). Sedimentation and water quality deterioration problems at Terengganu river basin, Terengganu, Malaysia. *Desalination and Water Treatment*, 149, 228-241.
- Werner, G., Aeppli, H., Miehlich, G. y Schönhals, E. (1978). *Los suelos de la cuenca alta Puebla-Tlaxcala y sus alrededores: comentarios a un mapa de suelos, con 4 mapas* (Vol. VI). Fundación Alemana para la Investigación Científica.
- Wetzel, R. G. and Likens, G. E. (2000). *Limnological analyses* (Tercera ed. ed.). New York: Springer.
- Williams, G., Manson, R. H. y Isunza, E. (2002). La fragmentación del bosque mesófilo de montaña y patrones de uso del suelo en la región oeste de Xalapa, Veracruz, México. *Madera y Bosques*, 8(1), 73-89.
- Wilshusen, P. R., Brechin, S. R., Fortwangler, C. L. and West, P. C. (2002). Reinventing a square wheel: critique of a resurgent "protection paradigm" in international biodiversity conservation. *Society and Natural Resource*, 15, 17-40.
- Xu, G., Chen, J., Berninger, F., Pumpanen, J., Bai, J., Yu, L. and Duan, B. (2015). Labile, recalcitrant, microbial carbon and nitrogen and the microbial community composition at two *Abies faxoniana* forest elevations under elevated temperatures. *Soil Biology and Biochemistry*, 91, 1-13.
- Xu, J. and Zhang, M. (2012). Primary consumers as bioindicator of nitrogen pollution in lake planktonic and benthic food webs. *Ecological Indicators*, 14, 189-196.
- Ye, C., Chen, C., Butler, O. M., Rashti, M. R., Esfandbod, M., Du, M. and Zhag, Q. (2019). Spatial and temporal dynamics of nutrients in riparian soils after nine

- years of operation of the Three Gorges Reservoir, China. *Science of The Total Environment*, 664, 841-850.
- Zarzoza, P. (1996). *Aproximación a la medición del bienestar social*. Valladolid: Universidad de Valladolid.
- Zhang, X., Zhang, Y., Shi, P., Bi, Z., Shan, Z. and Ren, L. (2021). The deep challenge of nitrate pollution in river water of China. *Science of The Total Environment*, 770.
- Zhang, Y., Wu, Z., Liu, M., He, J., Shi, K., Zhou, Y., Wang, M. and Liu, X. (2015). Dissolved oxygen stratification and response to thermal structure and long-term climate change in a large and deep subtropical reservoir (Lake Qiandaohu, China). *Water Research*, 75, 249-258.
- Zhao, Q., Ding, S., Liu, Q., Wang, S., Jing, Y. and Lu, M. (2020). Vegetation influences soil properties along riparian zones of the Beijiang River in Southern China. *PeerJ*, 8, 1-16.

## Anexos

### Formato de metodología del Índice QBR

Río:		Localidad:	
Fecha:		Observador:	

#### Clasificación de las zonas de ribera de los ecosistemas fluviales

La puntuación de cada uno de los cuatro apartados no puede ser negativa ni exceder de 25

Grado de cubierta de la zona ribereña Entre 0 y 25  
 Estructura de la cubierta (se contabiliza toda la zona de ribera) Entre 0 y 25

Puntuación:	
25	Cobertura de los árboles superior al 75%
10	Cobertura de los árboles entre 50 y 75%, o cobertura de los árboles entre 25 y 50% y en el resto de la cubierta los arbustos superan el 25%
5	Cobertura de los árboles inferior al 50% y el resto de la cubierta con arbustos entre 10 y 25%
0	Sin árboles y arbustos por debajo del 10%
+10	Si en la orilla la concentración de helófitos o arbustos es superior al 50%
+5	Si en la orilla la concentración de helófitos o arbustos es entre 50 y 25 %
+5	Si existe una conexión entre la zona de arbustos y el de los árboles con sotobosque
-5	Si existe una distribución regular (linealidad) de los árboles y el sotobosque recubre más del 50%
-5	Si los árboles y arbustos se distribuyen en manchas, sin una continuidad
-10	Si existe una distribución regular (linealidad de los árboles y el sotobosque recubre menos del 50%)

Calidad de la cubierta (véase, la determinación del tipo geomorfológico de la zona de ribera (entre 0 y 25).

Puntuación:		Tipo 1	Tipo 2	Tipo 3
25	Número de especies diferentes de árboles y arbustos autóctonos	>1	>2	>3
10	Número de especies diferentes de árboles y arbustos autóctonos	1	2	3
5	Número de especies diferentes de árboles y arbustos autóctonos	-	1	2
0	Sin árboles autóctonos			
+10	Si existe una continuidad de la comunidad a lo largo del río como mínimo 3 m de ancho, uniforme y ocupando más del 75% de la ribera.			
+5	Si existe una continuidad en la comunidad a lo largo del río (entre 50 y 70% de la ribera)	>2	>3	>4
+5	Si existe una disposición en bandas paralelas al río			
+5	Número de especies de arbustos			

+5	Si existen estructuras construidas por el hombre			
-5	Si existe alguna especie de árboles introducida (alóctona)* aislada			
-5	Si existen especies de árboles alóctonas* formando comunidades			
-10	Si existen vertidos de basura			

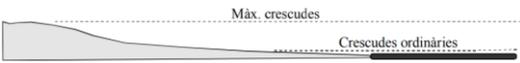
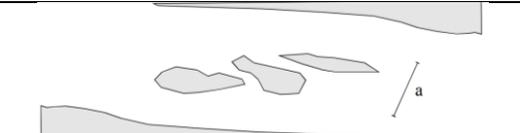
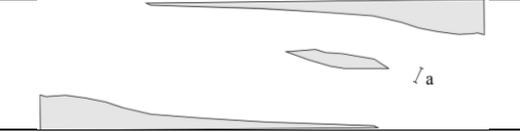
Grado de naturalidad del canal fluvial

Puntuación:	
25	El canal del río no ha sido modificado
10	Modificaciones de las terrazas adyacentes al lecho del río con reducción del canal
5	Signos de alteración y estructuras rígidas intermitentes que modifican el canal del río
0	Río canalizado en la totalidad del tramo
+10	Si existe alguna estructura solida dentro del lecho del río
-10	Si existe alguna presa u otra infraestructura transversal en el lecho del río

Determinación del tipo geomorfológico de la zona de ribera

Sumar el tipo de desnivel de la derecha y la izquierda de la orilla, y sumar o restar según los otros dos apartados.

Tipo de desnivel de la zona de ribera		Izquierda	Derecha
Vertical/cóncavo (pendiente >75°), con una altura no superable por las máximas avenidas		6	6
Igual, pero con un pequeño talud u orilla inundable periódicamente (avenidas ordinarias)		5	5
Pendiente entre el 45 y 75°, escalonado o no. La pendiente se cuenta con el ángulo entre la horizontal y la recta entre el lecho y el ultimo sitio de la ribera $\Sigma a > \Sigma b$		3	3
Pendiente de entre 20 y 45°, escalonado o no $\Sigma a > \Sigma b$		2	2

Pendiente < 20°, ribera uniforme y plana		1	1
Existencia de una isla o islas en medio del lecho del río			
Anchura conjunta "a" > 5 m		-2	
Anchura conjunta "a" entre 1 y 5 m		-1	
Capacidad potencial para soportar una masa vegetal de ribera. Porcentaje de sustrato duro con incapacidad para que arraigue una masa vegetal permanente			
> 80%	No se puede medir		
60-80%	+6		
30-60%	+4		
20-30%	+2		
Puntuación total del tipo geomorfológico			

Tipos geomorfológicos según la puntuación

> 8	Tipo 1	Riberas cerradas, normalmente de cabecera, con baja potencialidad para poseer un bosque extenso
Entre 5 y 8	Tipo 2	Riberas con potencialidad intermedia para soportar una zona con vegetación, tramo medio de los ríos
< 5	Tipo 3	Riberas extensas, tramos bajos de los ríos, con elevada potencialidad para poseer un bosque extenso

Puntuación final: \_\_\_\_\_ puntos.

Nivel de calidad	QBR	Color representativo
Bosque de ribera sin alteraciones, calidad muy buena, estado natural	≥ 95	AZUL
Bosque ligeramente perturbado, calidad buena	75-90	VERDE
Inicio de alteración importante, calidad intermedia	55-70	AMARILLO
Alteración fuerte, mala calidad	30-50	NARANJA
Degradación extrema, calidad pésima	≤ 25	ROJO