



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES ZARAGOZA

B I O L O G Í A

INTERACCIÓN ECOLÓGICA DEL SISTEMA AGUA-SUELO EN AMBIENTES
RIBEREÑOS DEL PARQUE NACIONAL IZTA-POPO Y ZONAS DE
INFLUENCIA

TESIS

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE

B I Ó L O G O

PRESENTA:

MITZI YANIN AYALA CAMPOS

DIRECTOR DE TESIS: BIOL. ELOISA ADRIANA GUERRA HERNÁNDEZ

ASESOR: DR. GERARDO CRUZ FLORES

JUNIO 2011

MÉXICO D.F.





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.

La imaginación es más importante que el conocimiento. El conocimiento es limitado, la imaginación da la vuelta al mundo.

Albert Einstein

La lectura forma al hombre, las conferencias lo alistan y la escritura lo perfecciona.

Sir. Francis Bacon

Un libro, como un viaje, se comienza con inquietud y se termina con melancolía

José Vasconcelos

DEDICATORIAS

A mis padres

Guillermina Campos Lince y Luis Mauricio Ayala Rebollo, por haber estado siempre conmigo durante todo este tiempo, su apoyo ha sido fundamental para mí, los amo!!!!. Mami, gracias por tu consejo, por tu paciencia, por tu dedicación, por tu tiempo, por tu ejemplo, eres mi pilar. Apá, gracias por tu cariño, por tus regaños, por tu presencia, gracias por enseñarme el valor de la tenacidad y por ser mi gran ejemplo a seguir. Es un gran orgullo ser su hija !!!!.

A mi hermana

Cintli Yuritzi Ayala Campos, por su compañía en los desvelos y nuestras fiestas nocturnas, las voy a extrañar!!!! Bebe, sabes lo mucho que te quiero, este trabajo es lo primero de todas las ilusiones y metas que juntas nos hemos propuesto y que nos llevarán hasta donde siempre hemos querido, para ti, con todo mi amor, espero a mi DCV eh!!!

A mis abues

Margarita Lince Gallegos[†] y Luis Ayala Reséndiz[†], porque su recuerdo y enseñanzas me acompañan día con día, son mis angelitos.

A mis niñas

Laura Anahí Campos Lince y Guerra, Tania Alejandra Campos Lince y Guerra y Karla Mariana Lince Campos. Porque espero haber sido y seguir siendo un buen ejemplo para ustedes, son mis hermanitas pequeñas !!!!

A mis tíos

Luis y Eloísa, por apoyarme en esta aventura, por sus consejos, por su atención, por los regaños, por las pláticas, por todo, después de todo son mis padrinitos no!!!

A mi familia

Mis tías y tíos que de alguna forma han estado ahí, siempre presentes, los quiero, a pesar de todos los momentos difíciles, siempre contarán conmigo.

A mis amigas

La Lic. Hazel Marlen Castro Tovar y la Lic. Alejandra Medellín Luque, cómo no!!!! Por todo mujeres, por dejarme conocerlas, por ser mis amigas prácticamente hermanas, por las discusiones, las aventuras y los momentos, porque juntas hemos llegado hasta aquí y porque espero que así, juntas, lleguemos mucho más lejos. Las amo!!!!

AGRADECIMIENTOS

A la vida, por haberme dejado llegar hasta aquí y darme esta satisfacción.

A la Universidad Nacional Autónoma de México, UNAM, gracias por ser mi segundo hogar durante todo este tiempo, gracias por dejarme pertenecer a tu comunidad, a la comunidad de la mejor Universidad de México y Latinoamérica.

A la Facultad de Estudios Superiores, FES Zaragoza, por darme las armas para enfrentarme al mundo como profesionalista, por acogerme en su seno durante todos estos años, por cultivar mi espíritu y por hacerme sentir por siempre Orgullosamente Zaragozana.

A la dirección del Parque Nacional Izta-Popo, especialmente al Lic. Miguel Ángel Rodríguez, al Geog. Agustín Tagle, a la Lic. Gabriela Becerra y al Biól. Omar Maldonado por su invaluable apoyo para la realización de este trabajo.

A mi directora de Tesis la Biól. Eloísa Adriana Guerra Hernández, por confiar en mí para la realización de este trabajo, por su ayuda, su atención, su tiempo y su consejo, los cuales han sido y serán siempre valiosos y apreciados.

A mi asesor, el Dr. Gerardo Cruz Flores, por su ayuda incondicional, por compartirme parte de su conocimiento como profesor y asesor, por ayudarme a adquirir experiencia como profesionalista y sobre todo por sus porras continuas, su apoyo y amistad, sabe que se le quiere.

Al M. en C. Jorge Alberto Gutiérrez Gallegos, por su tiempo, apoyo y ayuda para la determinación de mis ejemplares botánicos y sus aportaciones a mi trabajo en este tema.

A cada uno de los miembros de mi jurado, M. en C. María de Jesús Sánchez Colín, Biól. Eloísa Adriana Guerra Hernández, Dr. Gerardo Cruz Flores, Dr. Justo Salvador Avilés y M. en C. Jorge Alberto Gutiérrez Gallegos, por su tiempo invertido durante la revisión y sus muy valiosas aportaciones para mejorar este trabajo.

A todos los que fueron mis profesores, durante mi paso en esta Facultad y a los que hicieron la diferencia en mi formación básica, por sus enseñanzas y en algunos casos por su consejo y apoyo, todos fueron fundamentales de alguna manera para llegar a esto.

A Manuelito, por ayudarme en esos arduos muestreos en campo y por brindarme su amistad durante todo este tiempo, en serio gracias, tu ayuda y apoyo fue fundamental para mí, te quiero mucho.

A mis compañeros de laboratorio, Manuel, Viri, Sergio, Alex, Emilio, Nancy, Liss, Laura, Ernesto, Ely, Kari, Dafne, Beyi, Miguel, gracias por su ayuda, su apoyo, sus consejos, su compañía, sus porras y por todo el tiempo que pasamos juntos por culpa del laboratorio y gracias también a los profesores Juan Manuel y Efraín, por brindarme su amistad y confianza y por arroparme como parte de este equipo de trabajo.

A Denisse, Soledad (Dulce), Pavel y Ferchito, porque siempre estuvieron en los momentos exactos, los adoro !!!!. A Esme, Cristóbal, Luis y Osvaldo, por su compañía y conversación, en serio fue indispensable; a Fabis, Vic, Esthelita, Paula y Lauris, por adoptarme en su grupo de amigos, fue una gran experiencia!!!!. A Poncho y Carlitos siempre fueron mis amigos y mi equipo a pesar de todo. A Lalo, Oscarito, Damián, Carmelo, Eliseo y Armando por aparecer y hacer diferencia durante el último jalón, los quiero chamacos !!!!.

Y gracias también a todas las personas que conocí durante mi estancia en esta Facultad, así sean amigos o simplemente compañeros, todas las experiencias vividas con ustedes me dejaron un aprendizaje o recuerdo que llevare en mi memoria.

Mitzi Yanin Ayala Campos



INDICE

ÍNDICE DE TABLAS	3
ÍNDICE DE FIGURAS.....	4
RESUMEN	6
ABSTRACT	7
1. INTRODUCCIÓN	8
2. ANTECEDENTES.....	11
3. MARCO TEÓRICO.....	14
3.1. CUENCAS HIDROGRÁFICAS	14
3.1.1. PROBLEMÁTICA DE LAS CUENCAS	16
3.2. CUENCA DEL VALLE DE MÉXICO	18
3.3. MICROCUENCAS.....	19
3.4. SUELO	20
3.4.1. DEGRADACIÓN DEL SUELO	22
3.5. AGUA.....	23
3.5.1. EL AGUA COMO ELEMENTO UNIFICADOR.....	24
3.5.2. ARROYOS DE MONTAÑA.....	25
3.6. INTERACCIÓN SUELO AGUA	26
3.7. ECOSISTEMAS RIBEREÑOS	27
4. JUSTIFICACIÓN.....	29
5. OBJETIVOS	30
☐ GENERALES.....	30
☐ PARTICULARES.....	30
6. HIPÓTESIS	30
7. ÁREA DE ESTUDIO	31
7.1. HIDROLOGÍA	34
7.2. CLIMA	34
7.3. EDAFOLOGÍA	35
7.4. VEGETACIÓN.....	36
7.4.1. BOSQUES.....	36
7.4.2. ZACATONAL Y PASTIZALES ALPINO Y SUBALPINO	37
7.5. FAUNA.....	38
7.6. PROBLEMÁTICA DEL PNI-P.	39
8. MÉTODOS.....	40
8.1. DELIMITACIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO	40



8.2. MUESTREO	40
8.2.1. TOMA DE MUESTRAS DE SUELO.....	40
8.2.2. TOMA DE MUESTRAS DE AGUA	41
8.2.3. MUESTREO DE VEGETACIÓN	42
8.3. ANALISIS DE MUETRAS.....	42
8.3.1. DETERMINACIÓN DE PARÁMETROS <i>In situ</i>	42
8.3.2. DETERMINACIÓN DE PARÁMETROS EN LABORATORIO	43
8.3.2.1. Análisis de agua.....	43
8.3.2.2. Análisis de suelo	45
8.4. PROCESAMIENTO DE DATOS.....	47
9. RESULTADOS.....	48
9.1. VEGETACIÓN	52
9.2. ANÁLISIS DE CORRELACIÓN MÚLTIPLE	58
9.2. ANALISIS DE COMPONENTES PRINCIPALES	79
9.3. ANÁLISIS DE CORRELACIONES CANONICAS.....	81
10. ANÁLISIS DE RESULTADOS	84
10.1. VEGETACIÓN.....	84
10.2. CORRELACIONES MÚLTIPLES	85
10.3. ANALISIS DE COMPONENTES PRINCIPALES.....	93
10.4. ANALISIS DE CORRELACIONES CANONICAS	94
11. CONCLUSIONES	96
12. RECOMENDACIONES.....	99
13. REFERENCIAS	100
ANEXO I.....	105



ÍNDICE DE TABLAS

Cuadro 1. Problemas centrales en microcuencas.....	17
Cuadro 2. Cantidades porcentuales del contenido de elementos en el suelo.....	21
Cuadro 3. Tipos de degradación del suelo.....	23
Cuadro 4. Climas dominantes en los sitios de muestreo.	34
Cuadro 5. Condición fisiográfica y biológica de los sitios estudiados dentro del PNI-P.....	49
Cuadro 6. Propiedades físicas y químicas determinadas para agua y suelo y las abreviaturas para cada una de ellas.	50
Cuadro 7. Propiedades del suelo ribereño del PNI-P.	51
Cuadro 8. Propiedades de las corrientes muestreadas en el PNI-P.	51
Cuadro 9. Plantas ribereñas adyacentes a afluentes permanentes del PNI-P.....	52
Cuadro 10. Abundancia de las familias de plantas ribereñas del PNI-P.....	53
Cuadro 11. Análisis de Componentes Principales para las variables de suelo y agua.	79
Cuadro 12. Tabla de Pesos de los Componentes de agua y suelo.	79
Cuadro 13. Correlaciones Canónicas entre las variables de suelo y agua.....	82
Cuadro 14. Coeficientes de Variables Canónicas del Primer Conjunto (suelo).	82
Cuadro 15. Coeficientes de Variables Canónicas del Segundo Conjunto (Agua).	82
Cuadro 16. Fechas de muestreo en cada sitio.	105



ÍNDICE DE FIGURAS

Fig. 1 Cuenca del Valle de México	19
Fig. 2 Composición del suelo	22
Fig. 3 Algunas especies de: animales, vegetales y hongos encontrados dentro del PNI-P.	31
Fig. 4 Área del Parque Nacional Izta-Popo.	33
Fig. 5 Bosques de coníferas en el PNI-P.	36
Fig. 6 Pastizales alpinos dentro del PNI-P.	38
Fig. 7 Problemática del PNI-P.	39
Fig. 8 Localización de los sitios de muestreo.	40
Fig. 9 Diagrama del muestreo de suelo.	40
Fig. 10 Muestreo de suelo.	41
Fig. 11 Muestreo de agua.	41
Fig. 12 Muestreo de vegetación.	42
Fig. 13 Determinaciones <i>In situ</i> de parámetros físicos.	42
Fig. 14 Determinaciones <i>In situ</i> de parámetros químicos.	43
Fig. 15 Análisis de agua en el laboratorio.	44
Fig. 16 Determinaciones en laboratorio de parámetros físicos de suelo.	45
Fig. 17 Determinaciones en laboratorio de parámetros químicos del suelo.	47
Fig. 18 Sitios de muestreo dentro del PNI-P.	48
Fig. 19 Especies vegetales colectadas y determinadas.	54
Fig. 20 Especies vegetales colectadas y determinadas.	55
Fig. 21 Especies vegetales colectadas y determinadas.	56
Fig. 22 Especies vegetales colectadas y determinadas.	57
Fig. 23 Uso de suelo en relación con la altitud.	58
Fig. 24 Porcentajes de uso de suelo.	59
Fig. 25 Parámetros relacionados con el uso de suelo.	60
Fig. 26 Parámetros físicos relacionados con la altitud.	61
Fig. 27 Parámetros nutrimentales del agua relacionados con la altitud.	62
Fig. 28 Parámetros relacionados con la temperatura ambiental.	63
Fig. 29 Relación entre el % de humedad del suelo y el de la capa de fermentación.	64
Fig. 30 Parámetros del agua en relación con la temperatura del agua.	65
Fig. 31 Parámetros relacionados con la temperatura del suelo.	66
Fig. 32 Parámetros relacionados con el porcentaje de humedad de la hojarasca.	67
Fig. 33 Relación entre los sólidos totales disueltos y el pH de agua.	68
Fig. 34 Parámetros relacionados con el pH del agua.	69
Fig. 35 Parámetros relacionados con el pH activo.	70
Fig. 36 Parámetros relacionados con el pH potencial.	71
Fig. 37 Relación entre el % de N del suelo y el % de C del suelo.	71
Fig. 38 Parámetros relacionados con la conductividad del agua.	72
Fig. 39 Parámetros relacionados con la cantidad de Nitratos.	73
Fig. 40 Parámetros relacionados con la cantidad de Amonio.	74



Fig. 41	Parámetros relacionados con la relación C:N.	75
Fig. 42	Parámetros relacionados con el Fósforo total del agua.	76
Fig. 43	Relación entre los ortofosfatos del agua y el fósforo disponible del suelo.	76
Fig. 44	Relación entre el Oxígeno disuelto y la Demanda bioquímica de oxígeno.	77
Fig. 45	Velocidad de corriente en relación con la Demanda bioquímica de oxígeno.	77
Fig. 46	Parámetros relacionados con la Demanda química de oxígeno.	78
Fig. 47	Relación entre la alcalinidad y la Dureza total y de calcio.	78
Fig. 48	Gráfica de pesos de los componentes 1 y 2.	80
Fig. 49	Gráfica de pesos de los componentes 3 y 4.	80
Fig. 50	Gráfica de pesos de los componentes 5 y 6.	81
Fig. 51	Gráficas de las variables canónicas 1-4.	83



RESUMEN

En México el estudio de los ecosistemas terrestres y acuáticos se han tratado de forma independiente y pocas veces se considera su interacción en zonas denominadas ambientes ribereños los cuales, como ecosistemas naturales, limitan los márgenes fluviales, tienen un eficiente poder amortiguador que contribuye en la absorción y retención de elementos como nitrógeno y fósforo transportados por las escorrentías. Estos ambientes son fundamentales para regular la erosión y los efectos de avenidas al favorecer la retención del agua en los suelos, donde la vegetación permite regular la temperatura del efluente, facilita la captura de sólidos suspendidos y nutrimentos mejorando así la calidad del agua, por lo que se deben realizar estudios que permitan conocer su estado actual y tomar medidas que beneficien su conservación o restauración. Actualmente las propuestas de restauración de sistemas fluviales, al tratar de mejorar su calidad ecológica enfatizan la importancia de las interacciones entre el río, la zona de ribera y el área de cuenca; a pesar de su importancia, estos ecosistemas han sido poco estudiados. En la presente investigación se caracterizaron ecológicamente 18 sitios ribereños, de corrientes superficiales permanentes, con diferente uso de suelo en la región occidental del Parque Nacional Izta-Popo y áreas de influencia. Con la finalidad de evaluar la relación existente entre los sistemas suelo, agua y vegetación en la zona de ribera, se identificaron taxonómicamente las especies vegetales más abundantes y se determinó su densidad en transectos de 25 m, estableciendo franjas de amplitud de 1 y 5 m a ambos lados del cauce. En ellas se tomaron muestras de suelo para determinar pH activo y potencial, CE, densidad aparente, porcentajes de espacio poroso, humedad, materia orgánica del suelo, nitrógeno total y P-disponible. Para la caracterización física y química del agua se determinaron: temperatura, CE, pH, STD, oxígeno disuelto, DBO₅, alcalinidad, dureza total y de calcio, N-NO₃⁻, N-NO₂⁻, N-NH₄⁺, P-PO₄⁻³ y fósforo total, además de las variables hidrológicas como velocidad y aforo del caudal. Mediante el análisis de correlación múltiple, se seleccionaron las variables con mayor relación y con estas se realizó un análisis de componentes principales que aportó 6 componentes, que explican 86.6% de la varianza total y muestran distintas relaciones entre ambos sistemas; la influencia del medio terrestre en la dinámica y calidad de los sistemas acuáticos; la relación entre compactación del suelo y oxígeno disuelto en agua; la calidad del suelo, en función de la altitud y la influencia de la velocidad de corriente; la estructura del suelo debida a su uso y grado de conservación, la fertilidad del suelo en relación con el grado de conservación y finalmente la influencia del uso del suelo en la estructura y calidad del mismo, así como en la demanda bioquímica de oxígeno. Una vez conocidas las variables con mayor peso estadístico, se realizó un análisis de correlaciones canónicas para identificar asociaciones entre el conjunto de variables de agua y suelo donde se encontraron cuatro con significancia estadística ($P \leq 0.05$) que en conjunto explican 57.7% de la varianza total de los datos originales, y a partir de ellas, se obtuvieron las más relevantes en la interacción entre el ecosistema acuático y el terrestre en esta región; con lo cual se muestra que el bosque de ribera sustenta la conectividad entre ambos y es elemento clave para la evaluación del estado ecológico de los ríos y arroyos.

Palabras clave: Sistemas fluviales, vegetación riparia, calidad del agua, calidad edáfica, bosques de ribera



ABSTRACT

In Mexico, the study of terrestrial and aquatic ecosystems have been treated independently and rarely consider their interaction in areas known as riparian environments which, like natural ecosystems, limiting the river banks, have an efficient absorber contributes to the absorption and retention of elements such as nitrogen and phosphorus carried by runoff. These environments are essential to regulate erosion and flood effects by promoting water retention in the soil where the vegetation to regulate the temperature of the effluent, easy to capture suspended solids and nutrients thereby improving water quality, so that studies should be conducted to determine its current status and take actions that benefit conservation and restoration. Currently the proposed restoration of river systems, to try to improve their ecological quality emphasize the importance of interactions between the river, the riparian area and watershed area, despite their importance, these ecosystems have been little studied. In this study 18 sites were characterized ecologically coastal perennial surface streams with different land use in the western region of Izta-Popo National Park and areas of influence. In order to evaluate the relationship between soil systems, water and vegetation in the riparian zone, were taxonomically the most abundant plant species and their density was determined in sections of 25 m, establishing broad bands of 1 and 5 m both sides of the channel. They took soil samples to determine pH and potential asset, CE, bulk density, percentage of pore space, moisture, soil organic matter, total nitrogen and P-available. For physical characterization and water chemistry were determined: temperature, EC, pH, TDS, dissolved oxygen, BOD₅, alkalinity, total hardness and calcium, N-NO₃⁻, N-NO₂⁻, N-NH₄⁺, P-PO₄⁻³ and total phosphorus, as well as the hydrological variables such as speed and flow capacity. By multiple correlation analysis, we selected the variables with more respect and these are performed principal component analysis which provided 6 components, which account for 86.6% of the total variance and show different relationships between the two systems, the influence of the terrestrial environment the dynamics and quality of aquatic systems, the relationship between soil compaction and oxygen dissolved in water, soil quality, depending on the altitude and the influence of flow velocity, the soil structure due to its use and degree of conservation, soil fertility in relation to the degree of conservation and finally the influence of land use in the structure and quality, as well as biochemical oxygen demand. Once we know the variables with greater statistical weight, we performed a canonical correlation analysis to identify associations between all variables of water and soil where they found four statistically significant ($P \leq 0.05$) that explained 57.7% of the variance total of the original data, and from them, they were the most important in the interaction between aquatic and terrestrial ecosystem in this region thus shows that the riparian forest supports connectivity between them, is key to assessment of ecological status of rivers and streams.

Keywords: river systems, riparian vegetation, water quality, soil quality, riparian forests.



1. INTRODUCCIÓN

El agua es un bien utilizado para distintas actividades; su calidad es variable en función de su origen, recorrido, uso y confinamiento. En la República Mexicana existe un gran número de cuerpos de agua continentales que incluyen lagos, lagunas, presas y pequeños embalses; además de los ríos y arroyos, que conforman una red hidrográfica de 633 mil kilómetros, en la que destacan cincuenta ríos que constituyen el 87% del escurrimiento superficial del país y el área de sus cuencas abarca el 65% de la superficie continental (CONAGUA, 2010).

De toda el agua del mundo sólo un 2.5 % es dulce y potencialmente aprovechable por los seres humanos, plantas y animales terrestres; y sólo el 1 % (0.01 % del total del agua de la Tierra) se encuentra disponible, el resto conforma los glaciares de la Antártida y Groenlandia o acuíferos muy profundos (Gleick, 2000).

La disponibilidad de agua para uso humano disminuye día a día debido a la contaminación continua y los cambios en el régimen climático. Mundialmente mil millones de personas no tienen acceso a agua potable y casi tres mil millones no cuentan con sistemas de tratamiento de aguas negras (Manson, 2004).

Actualmente, las cuencas hidrográficas están sometidas a una fuerte presión antrópica que se traduce en la degradación de los recursos naturales, contaminación de cuerpos de agua, pérdida de biodiversidad, disminución de la productividad del suelo, vulnerabilidad ante sequías e inundaciones, incremento del riesgo de desastres naturales y disminución en la calidad de vida de la población (Ortiz-Arrona *et al.*, 2005).

Las propiedades físicas y químicas de las aguas, subterráneas y superficiales, son resultado de su alta capacidad de disolución y las características geológicas de la cuenca, esto determina la concentración de sustancias o iones disueltos, algunos de gran importancia como son: nitratos, nitritos, amonio, ortofosfatos, sulfatos, cloruros, carbonatos, bicarbonatos, calcio y magnesio, la concentración en la que se encuentren, aunada a otros parámetros básicos como temperatura, pH, conductividad y oxígeno disuelto, permiten inferir la calidad del recurso desde un punto de vista medioambiental.

Evaluar la calidad física, química y biológica del agua en las principales regiones del país, contribuye a establecer la relación entre su disponibilidad y calidad, identificando factores que provocan su deterioro, son acciones que al ser analizadas permiten establecer mejores estrategias para el manejo del recurso hídrico.

En México existen 13 regiones Hidrológico-administrativas, las cuáles se clasifican, de acuerdo a la calidad del agua, en: excelentes, buenas, aceptables, contaminadas y altamente contaminadas. Solo dos de estas regiones, presentan alta calidad (excelente y aceptable), lo que demuestra que, la mayoría tienen problemas de contaminación en diferentes grados. La región centro del país (Región Valle de México) se encuentra clasificada como altamente contaminada (INE, 2000).

La morfología del relieve, topografía, características físicas y químicas de los suelos, tipo de vegetación, uso del suelo y otros elementos que operan a nivel de paisaje son factores determinantes en la estructuración de los diferentes patrones de funcionamiento en los ríos de zonas templadas (Segnini y



Chacón, 2005). Para este trabajo se define el patrón de funcionamiento en términos de la situación ambiental de la zona de ribera.

La etimología que da origen al término “ribereño”, corresponde al latín *riparius*, “perteneciente a la ribera u orilla del río”, y está referido a comunidades bióticas que viven en bordes de ríos, arroyos, estanques, lagos y algunos humedales. Sin embargo, el mayor enfoque se ha dado para zonas de ribera de ríos (Morales y Fernández, 2005).

Para el presente trabajo, y de acuerdo con Morales y Fernández, (2005), se enfatizan dos definiciones importantes:

- **La zona de ribera:** Corresponde al área adyacente a un arroyo o río, con inundaciones periódicas, cuyo ambiente es distintivamente influenciado por dicha proximidad, son considerados ecotonos entre las zonas terrestre y acuática o corredores entre regiones. La mayoría de los estudios revisados resaltan el carácter dinámico de la zona de ribera ante la presencia continua de procesos de cambio.
- **El ecosistema de ribera:** Se conforma con la compleja relación de organismos cercanos al flujo de agua y su ambiente, en aquellos ecosistemas adyacentes al río, arroyo o corriente. Los vínculos ecológicos que se producen en la interfase entre ecosistemas terrestres y acuáticos pueden estudiarse dentro del contexto de los procesos geomorfológicos y dinámica fluvial que los crean; esta definición funcional es la más utilizada y cercana a los múltiples objetivos de los planes de manejo de la ribera.

De esta manera, la zona riparia o ribereña puede considerarse como el borde inmediato al agua, donde algunas plantas y animales se establecen y desarrollan mecanismos de adaptación especializados para su permanencia, generando una comunidad distinta al resto del bosque, en donde influyen diversos factores como la intensidad luminosa, la calidad y cantidad de agua y la granulometría del suelo. Estas áreas de transición poseen alto “poder amortiguador”, por su capacidad para absorber y almacenar nutrimentos, retienen parte del nitrógeno y fósforo transportados por la escorrentía, desde los cultivos hasta los cursos de agua (Granados *et al.*, 2006). Los ecosistemas riparios tienen muchos atributos que realzan su importancia en cuanto a la diversidad biológica: límites, patrones sucesionales, disposición vertical en estratos y microhábitats especiales, los cuales definen y reflejan la complejidad del sistema.

Se han hecho intentos para definir la zona de ribera con base en el tipo de vegetación presente, pero no ha sido un enfoque al cual se la haya dado amplio uso, debido a la gran diversidad de tipos de vegetación existentes. El término “bosque de galería” es específico para pequeñas zonas con vegetación de ribera en climas semiáridos, mientras que el término “bosque de ribera” es más genérico, adecuado para todo clima y tipo de bosque en el área. Los bosques de ribera son comunidades vegetales muy diversas en relación con su entorno, caracterizadas por su mayor altura, densidad, cantidad de biomasa, complejidad estructural y número de especies siempre verdes (Morales y Fernández, 2005).

Las dinámicas de la vegetación dentro del corredor de ribera están claramente influenciadas por los cambios en el régimen hidrológico, su heterogeneidad espacial se da como resultado de la combinación de fuerzas externas (hidráulica del cauce, erosión, sedimentación, entre otras) con procesos internos



(condiciones del suelo y la hidrología). La vegetación controla fuertemente los vínculos cauce-llanura de inundación, así como la interacción entre el corredor de ribera y las laderas de partes altas, al amortiguar el depósito de sedimentos y las fuentes de nutrientes para las cuencas vecinas, al favorecer la captura de los sólidos suspendidos, el mejoramiento de la calidad del agua y regular la temperatura del río.

La vegetación de ribera estabiliza los márgenes de los ríos debido a dos efectos: el **mecánico** o reforzamiento por su sistema radical, debido a la fuerza de tracción que ejerce sobre el suelo; el otro efecto es el **hidrológico** que se da por la reducción de la presión positiva de agua en los poros del suelo y del incremento de la succión matricial, debido a que las plantas interceptan la lluvia, transpiran e incrementan el drenaje del suelo. Los efectos hidrológicos son tan importantes como los mecánicos, sin embargo han sido mucho menos cuantificados (Morales y Fernández, 2005). El agua que fluye a través de la zona riparia también facilita el reciclamiento de los nutrientes y el desarrollo de las plantas mediante el movimiento del oxígeno a través del suelo y la remoción del CO₂.

Los sólidos que ingresan a un curso de agua están sometidos a los mismos procesos de transporte y dispersión que los compuestos disueltos, además están sujetos al movimiento vertical, debido a la sedimentación de las partículas y material suspendido; si estos llegan a la zona de interacción agua/lecho del río, pueden abandonar o no la columna de agua; incidiendo en la calidad de la misma, conforme a las condiciones hidrológicas, biológicas y las características del sedimento (Zunino y Currie, 2005).

En décadas pasadas, se han realizado estudios sobre las condiciones tróficas de los ríos estimando los parámetros físicos, químicos del agua y sedimentos para determinar en cierta medida la dinámica de estos factores en la columna de agua. En la interfase agua-sedimento se llevan a cabo reacciones de liberación de nutrientes mediante mecanismos de óxido-reducción y actividad bacteriana principalmente; el conocer los procesos que se efectúan en esta zona, por medio de la evaluación de dichos parámetros, permite establecer algunas relaciones de productividad y aprovechamiento de los nutrientes suspendidos y sedimentados del sistema, que sustentan la productividad primaria y proporcionan los elementos esenciales para el desarrollo de organismos autótrofos y heterótrofos, primordiales para el funcionamiento del ecosistema. Para lograr esto es indispensable realizar evaluaciones en campo directamente del río o arroyo y tomar muestras para su análisis y medición en el laboratorio, datos que permitirán conocer las características específicas de las áreas de ribera en la región occidental del PNI-P.



2. ANTECEDENTES

La ZMVM es una de las regiones más pobladas del mundo, encierra una de las problemáticas más complejas respecto a la degradación ambiental y la necesidad impostergable de encontrar soluciones viables a corto y largo plazo para la regulación de procesos fundamentales para la vida; tales como el ciclo hidrológico, el clima, la generación e intercambio de gases, la proporción entre el bióxido de carbono producido por actividades naturales y antropogénicas y el oxígeno generado por la cubierta vegetal, así como el mantenimiento de la cubierta forestal y la biodiversidad.

El PNI-P y sus áreas aledañas, que constituyen la zona de estudio, tuvieron el primer antecedente de protección ecológica en 1933 al declararse como zona protectora forestal a los terrenos situados en las vertientes y planicies que forman parte de la Gran Cuenca de México. Posteriormente, el 8 de noviembre de 1935 el presidente Lázaro Cárdenas declara como primer Parque Nacional de su administración (tercero en el país), al Iztaccíhuatl y al Popocatepetl, para la protección de las cuencas altas hidrográficas, conservación de los suelos, vegetación forestal, flora y fauna. El objetivo era evitar alteraciones hidrológicas, impedir las lluvias torrenciales y los cambios en el régimen climático; además de preservar la belleza natural de la zona y favorecer su importante potencial turístico. El decreto estableció como límite inferior del parque la curva de nivel de los 3,000 m snm, sin especificar superficie.

En 1937, se concede mayor precisión a la región que por su ubicación geográfica, riqueza natural e importancia ecológica debería formar parte del área protegida, mediante un decreto que declara la pertenencia de los terrenos de la Hacienda Zoquiapan y Anexas al Parque Nacional Izta-Popo (Granados *et al.*, 2006). Finalmente, el 11 de febrero de 1948, el presidente Miguel Alemán emite un decreto para establecer una Unidad Industrial de Explotación Forestal en la región, para lo cual se modifican los linderos del parque subiendo su cota a los 3,600 m snm con lo que se redujo la superficie de conservación en menos de la mitad del territorio original.

A partir del 2 de junio del 2010, el PNI-P fue incluido en la lista de la Red Mundial de Reservas de la Biósfera de la UNESCO, durante la 22ª reunión del Consejo Internacional de Coordinación del Programa de Hombre y la Biósfera (MAB), celebrada en París, Francia; dándole el nombre de Reserva de la Biósfera Los Volcanes.

Con respecto a los sistemas acuáticos, en 1971, se realizó, en Ramsar, Irán, la “Convención relativa a los humedales de importancia internacional, especialmente como hábitat de aves acuáticas”, después conocida como la Convención sobre los Humedales o Ramsar. En ese evento, los países participantes, entre ellos México, adquirieron el compromiso de conservarlos debido a su importancia y con el propósito de lograr un desarrollo equitativo a nivel mundial, mediante acciones nacionales y de cooperación internacional (Velasco, 2008). De acuerdo con la Convención Ramsar, las riberas están consideradas como humedales; la protección de los humedales tiene repercusiones mundiales en el problema del agua y pese a su importancia, más de la mitad de ellos en el mundo han sido destruidos. La preocupación por conservarlos es relativamente reciente, inició hace tres décadas, cuando se entendió la importancia de las funciones de estos ecosistemas y las consecuencias de su deterioro, por ello diversos



sectores de la comunidad internacional unieron esfuerzos para formar una organización mundial que cuidara de ellos.

El estudio de las interacciones agua-suelo en la zona de ribera ha evolucionado, desde su rol como recurso de materia y energía para los sistemas acuáticos, posteriormente su capacidad para amortiguar los aportes de la ladera hacia el río y, desde finales de la década de los 90's, el papel del cauce sobre la vegetación, con respecto a los daños físicos que causan las perturbaciones hidrológicas en escala local (Morales y Fernández, 2005).

La falta de atención en aspectos como: el desmonte extensivo de tierras, pastoreo de ganado, agricultura y desarrollo urbano e industrial han conducido a la degradación sustancial de las riberas, del hábitat interior de los ríos y de la calidad del agua en muchos arroyos y ríos del mundo (Kennard *et al.*, 2006).

La falta de estudios sobre este tipo de sistemas, ha radicado desde la dificultad mundial para definir el término “ripario” y el establecimiento de métodos y técnicas de estudio. Kobiyama (2003), presenta diversos términos y sus definiciones, donde discute los fenómenos en el espacio próximo al cuerpo de agua y puntualiza un término único, “zona riparia”, para hablar de la extensión (delimitación) de ese espacio y “ecosistema ripario” para hablar sobre los procesos que se desarrollan en esta zona.

La mayoría de los trabajos realizados para estos ecosistemas, son de tipo cualitativos, presentan información sobre las propiedades de las riberas, su estado ecológico actual y las presiones antrópicas a las que han sido sometidas (González del Tánago *et al.*, 1996; Álvarez y Oria De Rueda, 2004; Feijó, 2009).

Entre los trabajos importantes para estas zonas, se encuentra el de González del Tánago *et al.* (1996), quienes presentan un análisis de la problemática de estos ecosistemas, con el fin de plantear un plan de restauración para las riberas del Río Segura en España. Otros trabajos más actuales, proponen acciones para la restauración y manejo de los mismos, y toman en cuenta las interacciones ocurridas dentro de estos ecosistemas por algunos de sus componentes, vegetación, calidad del agua, morfología, relieve, calidad del suelo, diversidad, entre otras (Gayoso y Gayoso, 2003; Morales y Fernández, 2005; Feijó, 2009).

Gayoso (2003) menciona en su trabajo el término “franja de protección”, con el cuál define a los corredores ribereños, con un énfasis en su importancia e intenta analizar, a partir de información ya existente y debido a la falta de trabajos cualitativos, el ancho más adecuado de estas franjas, para mantener a los ecosistemas en buen estado ecológico y proveer cierta protección a las tierras agrícolas cercanas.

Uno de los primeros trabajos sobre la calidad de los bosques de ribera, fue publicado por Fernández y colaboradores (1986), con el fin de establecer la posible relación existente entre la composición química del suelo aluvial y del agua en el río Bernesga, realizaron diferentes análisis de correlaciones canónicas entre las variables físico-químicas medidas en los dos ambientes, en la provincia de León en España. Las correlaciones explican, por un lado el enriquecimiento de la fracción mineral del suelo y el empobrecimiento en materia orgánica debido a la eutrofización y la mineralización del agua, y, por otro,



la relación entre un aumento de la dureza del agua y la alcalinidad y una disminución de la acidez del suelo.

Más recientemente Segnini y Chacón (2005) realizaron la caracterización del hábitat de los ríos de la cuenca alta del Rio Chama en Venezuela, a través de todas las características físico-químicas propias del cuerpo de agua y del hábitat ribereño que afectan la estructura y función de la comunidad acuática. Chará y colaboradores (2007), evaluaron las características bióticas y abióticas de quebradas, también denominadas cañadas, que drenan en micro-cuencas con dominancia de pasturas en el Rio La vieja, Colombia y se compararon las características en quebradas con protección de corredores ribereños y sin ellos. Kutschker *et al.* (2009), evaluaron la calidad de los bosques de ribera en ríos del noreste del Chubut en relación con los distintos usos de suelo, a través de una versión del Índice de Calidad de Bosques de Ribera (QBR) adaptada a ríos andino-patagónicos (QBRp).

La historia del manejo de estos ecosistemas en México se remonta al florecimiento de las civilizaciones que desde la antigüedad ocuparon el territorio nacional como los olmecas en Tabasco, los aztecas en Tenochtitlán y los mayas alrededor de sus místicos cenotes; sin embargo, los estudios sobre su conservación en nuestro país son recientes y muy limitados. En 1985 México firmó el Memorandum de Entendimiento con Canadá y Estados Unidos en relación con el Acta para la Conservación de los Humedales de Norteamérica. Dicho documento se convirtió en un acuerdo trilateral para la conservación de ecosistemas y vida silvestre, para lo cual México recibe aproximadamente millón y medio de dólares al año (Velasco, 2008).

Sin embargo, en el país, los estudios realizados sobre las riberas han sido pocos y principalmente de tipo teórico-informativo, a pesar de la importancia de estos ecosistemas en el mantenimiento de la biodiversidad regional y la generación de servicios ambientales (Camacho *et al.*, 2006).

El trabajo de Palacio *et al.* (2002), es uno de los primeros en describir la importancia de todos los componentes del paisaje, destacando el papel de la vegetación como indicador de la dinámica del sistema, para describir el paisaje conocido como “bajos inundables” en Campeche.

A partir de este último, que se han realizado diferentes estudios con la finalidad de restaurar, no solo las tierras ribereñas, si no, además, llevar estos planes de manejo a nivel de cuenca. Estos trabajos incluyen la caracterización ecológica y descripción de la dinámica, la estructura y la composición vegetal de las zonas ribereñas (Ortiz-Arrona *et al.*, 2005; Granados *et al.*, 2006; Camacho *et al.*, 2006; Galván y Márquez, 2006).

De los trabajos mencionados anteriormente, el único que presenta la descripción biofísica de la cuenca y de los sistemas productivos que inciden en las modificaciones de los parámetros biofísicos (suelo, agua y vegetación), como parte de las evaluaciones necesarias para la planificación de la explotación de esos recursos, es el realizado por Galván y Márquez (2006).



3. MARCO TEÓRICO

México, a lo largo de su territorio tiene 314 cuencas hidrográficas definidas, agrupadas en 37 regiones Hidrológicas, sin embargo, la distribución natural del agua en el ámbito mundial y regional es desigual, mientras en algunas regiones es abundante, en otras es escasa o inexistente, la disponibilidad del líquido depende del ciclo hidrológico en el cual los procesos de evaporación, precipitación e infiltración están regulados por el clima, las características del suelo y la ubicación geográfica (CONAGUA, 2010).

Toda porción de tierra por pequeña que sea y en el lugar dónde se encuentre, forma parte de una cuenca hidrográfica, que se define como el área surcada por un sistema de corrientes formadas por los escurrimientos generados a partir de la precipitación que fluye hacia un cauce común, obedeciendo a las variaciones topográficas del terreno (Ayala, 2007).

La cuenca como unidad hidrográfica debe ser estudiada desde diferentes aspectos, ya que no basta con especificar su delimitación topográfica, su extensión y forma; es necesario efectuar su caracterización integral para definir su funcionalidad, desde el punto de vista de las prácticas de uso del suelo y la adecuada administración de los recursos naturales, para lo cual el agua es el elemento integrador del estudio. Todo esto conlleva a la necesidad de caracterización de una cuenca antes de iniciar otro tipo de actividades, como manejo, monitoreo, rehabilitación y recuperación.

3.1. CUENCAS HIDROGRÁFICAS

Son unidades naturales que contienen un cúmulo de componentes que interactúan como un sistema, es decir, sus entradas y salidas tanto de agua como de energía dependen de factores naturales como clima, topografía, suelo, vegetación, fauna; y no naturales como el uso del suelo y el desarrollo de la comunidad humana (Dourojeanni *et al.*, 2002).

Las cuencas presentan interés como espacios multifuncionales en los que se desarrolla la vida y actividad del hombre, creando una compleja relación de entrada y salida de materia y energía, por lo que resulta muy apropiado tomarla como modelo de estudio para la implementación de proyectos productivos, de conservación y desarrollo entre otros (Ayala, 2007).

Según Sánchez (1987), las cuencas hidrográficas se encuentran integradas por cuatro unidades funcionales básicas:

- * El parteaguas: definido como la línea altimétrica de mayor elevación, que delimita orográficamente a cuencas vecinas. Este lindero real marca las variaciones de la conducción del drenaje superficial que por efectos de la pendiente confluyen hacia la parte baja de ambas vertientes.
- * Las vertientes: son las áreas de captación y se constituyen como las zonas estratégicas de la cuenca, dado que en ellas la susceptibilidad a la erosión es altamente significativa y el



mantenimiento de una cubierta vegetal de calidad es definitivamente indispensable para el equilibrio de los valles.

- * El valle o cuenca baja: es la zona de menor altitud, dónde generalmente se encuentran los cultivos agrícolas y los asentamientos humanos, aquí la conjunción de las corrientes tributarias han formado un río o arroyo de regular caudal y divaga en las planicies de leve pendiente.
- * La red de drenaje: es resultado de la disposición de los cauces y lechos por donde, de manera superficial y aparente, corre el agua excedente, producto de la precipitación hacia un depósito natural y/o artificial.

La cuenca es un espacio geográfico definido que permite delimitar territorio y una superficie de drenaje común, donde interactúan aspectos físicos, biológicos y sociales. (Villanueva, 2008). Puede compararse con un organismo vivo que posee una serie de caracteres susceptibles de ser controlados por el hombre.

Para facilitar el estudio de los componentes de una cuenca se agrupan de la siguiente forma:

- * Factores físicos.
- * Factores biológicos.
- * Factores humanos o socioeconómicos.
- * Factores ambientales.

A excepción del tipo de vegetación y su diversidad, que pertenecen a los componentes biológicos, para hablar de las interacciones entre el sistema suelo-agua, es necesario conocer los elementos físicos, debido a su relación con la morfología de la corteza terrestre y los elementos naturales que la modifican; dentro de ellos tenemos:

- * El relieve: es la forma del terreno; sus elevaciones y desigualdades, tienen gran importancia cuando se refieren al manejo de cuencas hidrográficas, por estar íntimamente ligadas a la formación de los suelos, drenaje superficial e interno, erosión, entre otros; y determina consecuentemente la clase de cultivo, uso pecuario o forestal que se le debe dar.
- * La topografía: está estrechamente relacionada con el relieve; las diferencias de elevación y pendiente, aun cuando sean demasiado pequeñas, dan lugar a la red de drenaje, que tienen influencia en la formación de los suelos y en los usos que de este deban hacerse. En una cuenca usualmente hay variaciones de terreno que comprenden desde plano hasta escarpado. La topografía determina una serie de unidades tales como valles, colinas, mesetas, montañas y demás, que definen en forma más concreta el relieve y da elementos de juicio para el uso adecuado del área.
- * La hidrología: Hace referencia al régimen de caudales o sea al volumen de escorrentía, sedimentación y clasificación de corrientes.
- * La hidrografía: En este caso se refiere a las subcuencas que forman parte de la cuenca, sus sectores, su forma y en general el análisis morfométrico del área de captación de la cuenca y su red de drenaje.



- * La geología: Determina la red hidrológica, el tipo de roca y suelo que predominan en una región. El desarrollo de prácticas de conservación, rehabilitación o restauración de suelos, requiere conocer primordialmente el material de origen de los suelos y su edad.
- * La geomorfología: Trata de la forma que posee la corteza terrestre y se relaciona estrechamente con algunos factores formadores del suelo (clima, relieve, material parental, tiempo de formación del suelo); suministra datos de carácter práctico como condiciones de drenaje, peligro de erosión o derrumbamiento, presencia de materiales de construcción, entre otras.
- * El clima: Condiciona los usos que se le pueden dar a una región determinada y es uno de los agentes que favorece la erosión y degradación de suelos. Debe considerar: la precipitación, temperatura, vientos, humedad relativa y nubosidad. (Gómez-Tagle. 2000 en Ayala, 2007).

Conocer las características del suelo y el agua es fundamental dentro de las cuencas hidrográficas para definir su estado, degradación y pérdida, y transitar hacia un desarrollo sustentable (Villanueva, 2008).

3.1.1. PROBLEMÁTICA DE LAS CUENCAS

La cuenca, como un sistema sometido a un proceso productivo, proporciona una serie de beneficios que se traducen fundamentalmente en el aporte de agua, generación de suelos fértiles, obtención de productos agrícolas, pecuarios y forestales, entre otros.

En la cuenca ocurren procesos indeseables como: deforestación, pérdida de la cobertura vegetal, desaparición de fauna silvestre, erosión, disminución de la productividad agrícola, alteración del régimen hidrológico y degradación del valor turístico de los paisajes que la circundan. Estos procesos negativos impactan a los recursos naturales y poblaciones ubicadas en su entorno, disminuyendo consecuentemente la productividad del sistema dando lugar a daños económicos y ambientales. Este desequilibrio que expresa la crisis del sistema productivo exige, que a partir del ordenamiento de las diversas variables y el manejo de las mismas, oriente y controle el desarrollo de esta unidad en beneficio para la sociedad (Ayala, 2007).

México vive un deterioro significativo de sus cuencas hidrográficas. La problemática general y diversa de pérdida y degradación del suelo, así como el mal uso del agua y su contaminación por desechos industriales y domésticos; la pérdida masiva de cubierta vegetal en casi todos los ecosistemas forestales provocada por la deforestación y el atraso de la producción primaria en el campo deben ser motivo de una seria preocupación (Villanueva, 2008).

Recientemente, dentro de un contexto de desarrollo social, la cuenca se ha planteado como una unidad lógica para la comprensión y la realización de políticas públicas. Este redimensionamiento de la cuenca como una unidad de desarrollo, está estrechamente relacionado con los aspectos económicos, pero también con los cambios en la tecnología y las demandas de los principales productos derivados de las aguas fluviales: energía hidroeléctrica, agua, madera, animales domésticos, cosechas agrícolas, recreación, educación ambiental y diversiones. (Granados *et al.*, 2006)



Al mismo tiempo, es importante darse cuenta de que los problemas de las tierras no se derivan de las limitantes físicas ni de la falta de conocimientos técnicos. Las acotaciones en el aprovechamiento, en la producción y en la distribución, se encuentran en las estructuras económicas, políticas y sociales existentes.

El manejo de la cuenca, con el fin de alcanzar los objetivos mencionados deberá sustentarse en: aumentar las cantidades de agua, proveer un suministro de agua seguro para su uso en las partes bajas, mejorar la producción del bosque, el campo y las pequeñas explotaciones agropecuarias, mantener un determinado nivel en la cantidad de agua, reducir, los peligros de erosión e inundación, aumentar los medios de recreación y la fauna silvestre, hasta convertirse en un proceso que podría incluir la selección de los más apropiados tipos de cubiertas vegetales, los métodos de cosecha adecuados, los tipos de plantas y sistemas de manejo y recolección, pero también la incorporación activa y participante de los integrantes de las comunidades (Ayala, 2007).

Actualmente México vive una crisis ecológica diversa y expansiva que se ha convertido en una preocupación nacional. Dentro de esta situación ecológica, relacionada con el deterioro de los ecosistemas y recursos naturales en áreas de un máximo de ganancias y de una agudización de las condiciones de vida de la población, es posible destacar la problemática relacionada con las cuencas hidrográficas. La enorme diversidad de problemas que viven las cuencas hidrográficas, la necesidad de darles solución, el fracaso de proyectos, etc., son algunas de las razones que obligan a hacer de la problemática un concepto digno de destacar, estudiar y practicarse (Villanueva, 2008).

La experiencia que se tiene en microcuencas posibilita destacar los problemas esenciales y por lógica los secundarios en el interior de una microcuenca (cuadro 1):

Cuadro 1. Problemas centrales en microcuencas (tomado de Villanueva, 2008).

CAUSAS	PROBLEMAS	EFECTOS
Mal manejo del suelo	Tradicionalismo Atraso cultural	Degradación y pérdida del suelo Baja producción
Pobreza de las comunidades campesinas	Baja producción Poca ganancia de los productores	Migración Abandono de tierras
Pérdida de la fertilidad de la tierra	Manejo inadecuado del suelo y del agua	Baja producción
Deforestación	Tala irracional	Perdida de cubierta vegetal
Poca y mala producción de productos primarios	Pérdida de la fertilidad de la tierra Falta de agua	Migración Abandono de tierras Desnutrición Poco ingreso económico
Falta de agua	Manejo y protección inadecuadas	Baja producción Problemas de salud
Desnutrición	Baja y mala producción Atraso cultural	Problemas de salud (enfermedades)
Baja ganancia de los productores	Intermediarismo Poca y mala producción	Abandono de tierras Migración
Agotamiento de recursos naturales	Aprovechamiento irracional	Desequilibrio de ecosistemas Carencia de recursos Baja producción
subutilización de recursos naturales	Atraso cultural Desconocimiento de tecnologías	No aprovechamiento de recursos naturales
Desempleo	Baja producción	Migración



Atraso cultural	Agotamiento de recursos naturales Marginación Tradicionalismo Falta de centros educativos Programas culturales deficientes.	Abandono de tierras Estancamiento
Contaminación de agua y aire Problemas de salud	Industrialización inadecuada Marginación Desnutrición	Enfermedades Enfermedades
Explosión demográfica	Problemas económicos Industrialización Nacimientos	Presión sobre los recursos naturales. Desequilibrio de ecosistemas. Aumento de las necesidades. Consumismo
Burocratización	Apoyo y justificación del Estado	Atraso y deformación en la solución de problemas
Erosión de suelos Pastoreo extensivo	Deforestación Ganancia Supervivencia	Pérdida y degradación de suelo Destrucción de ecosistemas y recursos naturales

3.2. CUENCA DEL VALLE DE MÉXICO

La Cuenca de México es una formación hidrológica endorreica (ahora drenada artificialmente), cuya extensión es de aproximadamente 9600 km². Su parte más baja, una planicie lacustre, tiene una elevación de aproximadamente 2250 m snm; está rodeada en tres de sus lados por una sucesión de cordilleras volcánicas de más de 3500 m: el Ajusco hacia el sur, la Sierra Nevada al este y la Sierra de las Cruces al oeste. Al norte, la cuenca está limitada por una serie de colinas y cordilleras bajas. Las cumbres más altas, Popocatepetl e Iztaccíhuatl, con una elevación de 5465 y 5230 m, respectivamente, se encuentran en el sureste de la cuenca, en la Sierra Nevada.

Geológicamente, la cuenca se encuentra en el Eje Neo-volcánico Transversal, su proximidad con la fosa del Pacífico, la conexión directa con la fosa proporcionada por el Eje Volcánico y las numerosas fallas geológicas que se presentan a lo largo del eje, han hecho de los terremotos, las erupciones volcánicas y la inestabilidad tectónica en general, un rasgo sobresaliente en la historia de la región (Mooser, 1987 en Ezcurra *et al.*, 2006).

La Cuenca de México con solo 0.48% del territorio nacional, es el hábitat de aproximadamente 20% de la población mexicana y constituye un problema ambiental, social y político de grandes proporciones. Es una unidad muy extensa, hidrológicamente definida e integrada por 86 municipios y delegaciones de cinco diferentes entidades: el Distrito Federal, el Estado de México, Hidalgo, Puebla y Tlaxcala. La Ciudad de México, que concentra 93% de la población total de la cuenca, representa la unidad social, económica y espacial de mayor importancia. Así, la cuenca de México y la ciudad de México casi son sinónimos en términos demográficos, pero la última es una unidad de la primera en términos geográficos (Ezcurra *et al.*, 2006).

Fue con el presidente Miguel Alemán (1947) cuando se inició el programa integrado de las cuencas hidrográficas (CH). En este sentido se crearon cinco comisiones de cuencas con las que se intentó el desarrollo integral de regiones mediante prácticas científicas de manejo y conservación de los recursos naturales y de la ecología con un enfoque integral. El programa tuvo una serie de limitaciones ya que el enfoque por macrocuencas o grandes cuencas que abarcan amplias regiones no funciona plenamente en México, este debe ser impulsado mediante la estrategia de microcuencas, abocadas directamente al



desarrollo del municipio y con ello de los ejidos. La macrocuenca por la microcuenca y la región por el municipio, tal es el sentido que debe seguirse, estructurarse y ponerse en práctica (Villanueva, 2008).

A pesar de constituir una estrategia adecuada para el tratamiento integral de los recursos naturales, particularmente del suelo y el agua, dentro de la actividad productiva de las comunidades, las microcuencas trabajadas en México, principalmente por la SARH, hoy SAGARPA, no han sido entendidas ni tratadas adecuadamente en la práctica.



Fig. 1 Cuenca del Valle de México (Foto tomada por Mitzi Y. Ayala C.)

3.3. MICROCUENCAS

La microcuenca, por sus características propias, tanto estructurales como funcionales, constituye la única alternativa a través de la cuál es posible el tratamiento integral de los recursos naturales, y particularmente del suelo y el agua. Para la FAO, la microcuenca es el ámbito territorial donde los recursos naturales interactúan de manera más sencilla, clara y comprensible; es el área donde se pueden observar y medir más claramente las relaciones entre la actividad humana y los recursos naturales.

La microcuenca no solo representa un ámbito geográfico con características propias, sobre todo significa una unidad ecológica y productiva de interés para el hombre. El carácter funcional de la microcuenca no es estadístico ni cerrado, al contrario, debe presentarse dinámico y abierto para su relación hacia adentro con la comunidad y el predio, y hacia afuera con otras microcuencas.



Una característica destacada de la microcuenca radica, sin lugar a dudas, en su tamaño, según los técnicos que se han dedicado a estos trabajos, constituye el nivel mínimo de desgravación geográfica en el que no se pierden las características propias de la cuenca hidrográfica.

El tamaño de la microcuenca debe estar en función de que se comprenda o se contemplen las partes estructurales básicas que la caracterizan: parteaguas, afluentes tributarios, vertiente principal y valle. Un rasgo básico de esta estrategia de planeación radica en que la microcuenca no pierde la naturaleza integral que caracteriza la cuenca hidrográfica, esto es, la relación existente entre los factores físicos, biológicos y sociales. Con base en lo anterior, el tamaño de la microcuenca no debe ser superior a las 2000 hectáreas, ni inferior a las 500.

El impulso de la estrategia de microcuencas debe estar relacionado con otras dos estrategias básicas: la planeación participativa y la agricultura conservacionista. Sólo en su relación y especificidad es posible la reordenación y el manejo adecuado del suelo y el agua, y con ello de los demás recursos naturales para la producción primaria.

La microcuenca como espacio geográfico productivo nos muestra que no puede ser considerada en forme de una serie de recursos naturales solos e independientes, sino de ecosistemas y sobre todo, de áreas relacionadas, que configuran dicho espacio geográfico.

Los problemas sobre los recursos naturales en una microcuenca se presentan en forma integral, por lo que deberán tener respuestas integrales. Su ordenación y manejo constituye la única alternativa para el tratamiento integral de los recursos naturales y particularmente del suelo y el agua. Cuando esto se realiza bajo el enfoque conservacionista, es básico contar con un conocimiento de cuatro factores ecológicos, que existen y se desarrollan integralmente: agua, aire, planta y suelo.

De acuerdo a Villanueva (2008), comprender dichos factores ecológicos en relación con el suelo, visto este como elemento unificador de los demás recursos naturales que existen en las microcuencas, proporciona sin lugar a dudas una base científica en cuanto al desarrollo práctico de una agricultura y ganadería conservacionista en el manejo de una microcuenca.

3.4. SUELO

“El suelo es el material no consolidado, mineral u orgánico sobre la superficie de la Tierra, que ha sido sometido e influenciado por factores genéticos y ambientales: material parental, topografía, clima (incluyendo efectos causados por el agua y la temperatura), macro y microorganismos; todos actuando a través del tiempo y dando lugar al producto “suelo” diferente al material del cual se derivó, en muchas de sus características químicas, físicas y biológicas”.

La ciencia moderna, considera al suelo como un medio complejo en constante actividad que nace y se desarrolla. Esta característica dinámica del suelo es posible sólo en su relación con el agua, el aire y las plantas.

Una de las definiciones que se le ha dado al suelo forestal es la siguiente “Es parte de la superficie terrestre que sirve como un medio para el sostenimiento de la vegetación de un lugar en particular”. Manifiesta características peculiares adquiridas bajo tres factores: Hojarasca o humus forestal, raíces de árboles y organismos específicos. El suelo forestal es un sistema altamente complejo, componente clave



de las áreas boscosas; en él se llevan a cabo los procesos de descomposición de la materia orgánica, y sirve como medio de nutrición y soporte de la vegetación y es ahí donde se realiza el reciclado de nutrientes (Chavarría, 2005).

Aproximadamente el 98% de la corteza terrestre está constituida por ocho elementos, de los cuales el oxígeno y el silicio constituyen cerca del 75%. Otros elementos importantes para el desarrollo de plantas y animales están presentes en cantidades muy pequeñas.

Cuadro 2. Cantidades porcentuales del contenido de elementos en el suelo (tomado de Chavarría, 2005).

Elementos	Contenido en porcentaje
Oxígeno	46.6%
Silicio	27.7%
Aluminio	8.1%
Hierro	5.0%
Calcio	3.6%
Sodio	2.8%
Potasio	2.6%
Magnesio	2.1%

Estos son derivados del desgaste del lecho rocoso o material parental fundamentalmente, o de la acumulación de diferentes materiales derivados de locaciones distantes. Otros constituyentes resultan de la descomposición de la materia de plantas y animales.

El suelo tiene como origen la roca madre o material original; esta suministra al descomponerse los elementos minerales; por otro lado los vegetales y animales proporcionan la materia orgánica y la acción conjunta del clima y la vegetación realiza con el tiempo una mezcla de estos elementos más o menos alterada que constituye el suelo (Villanueva, 2008).

El suelo presenta ciertas características básicas de las cuales se pueden destacar:

1. Partículas minerales: derivados de la roca madre, de composición y tamaños muy variados. Constituyen la mayor parte del suelo (50-60% en volumen), y son modificadas con el tiempo por diversos factores.
2. Materia orgánica: formada por los residuos vegetales y animales, más o menos descompuestos por los microorganismos. Generalmente es una parte pequeña del suelo (0.5-10%). Donde el suelo guarda una estrecha relación con los diferentes organismos vivos que se encuentre inmersos en el suelo.
3. Aire: de composición parecida a la atmósfera aunque con mucho mayor contenido de anhídrido carbónico y menos oxígeno (15-25%).
4. Agua: entre esta y el aire ocupan aproximadamente la mitad del volumen del suelo. Cuando no existe exceso de agua, ésta ocupa los poros o espacios más pequeños entre las partículas del suelo (25-30%).



5. Microorganismos y otros seres vivos: bacterias, levaduras, algas, hongos y otros minúsculos seres vivos habitan el suelo en grandes cantidades. También existen otros seres conocidos como gusanos, lombrices, insectos y otros.



Fig. 2 Composición del suelo

En el suelo se encuentran diversas cantidades de elementos los cuales han sido clasificados dependiendo su rol o función que desempeñan en él mismo. En un primer grupo se encuentran los nutrientes minerales (C, N, H, O, P y S) elementos químicos formadores de casi toda la materia viva. En un segundo grupo se encuentran los cationes (K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} y en ocasiones Na^+), los cuales se denominan Macroelementos o Polielementos minerales Nutritivos ya se precisan en altas cantidades. El tercer grupo de elementos es denominado como Microelementos u oligonutrientes los cuales son requeridos en pequeñas cantidades expresados en mg/kg. Dentro de este grupo se encuentran los siguientes elementos: B, Zn Cu, Co, Mo, V y el anión Cl. Y por último el cuarto grupo denominados Mesoelementos, Fe y Mn, los cuales ocupan una posición intermedia (Chavarría, 2005).

La pérdida y degradación del suelo no solo tiene causas y factores hídricos o eólicos, sino también otros procesos no menos importantes como la salinización, acidificación, compactación y la pérdida de componentes orgánicos, además de la contaminación provocada por fertilizantes, pesticidas y residuos originados por las industrias (Villanueva, 2008).

3.4.1. DEGRADACIÓN DEL SUELO

El proceso de degradación del suelo se relaciona con el desequilibrio de nutrientes, compactación y pulverización del suelo así como la disminución de los contenidos de materia orgánica y de actividad biológica. En este sentido pueden identificarse tres tipos básicos de degradación del suelo: físico, químico y biológico (Cuadro 3).

Etapas de la degradación del suelo por el uso inadecuado

- * Las características originales del suelo son destruidas gradualmente por el mantenimiento de la productividad a través del uso de correctivos y abonos químicos.



- * Ocurre pérdida acentuada de materia orgánica del suelo, así como captación superficial que impide la infiltración del agua y la penetración de las raíces. La erosión aumenta y las plantas tienen poca respuesta a la aplicación de abonos químicos.
- * Pérdida de la estructura del suelo; la erosión es acelerada y la productividad baja a niveles mínimos.

Cuadro 3. Tipos de degradación del suelo (tomado de Villanueva, 2008).

Tipo de degradación	Características
Física	Suelo descubierto Impacto de gota de lluvia Compactación Arrastre
Química	Pérdida de materia orgánica Pérdida de componente mineral Pérdida por lixiviación Pérdida de respuesta a los fertilizantes Pérdida del pH Salinización
Biológica	Actividad microbiana afectada Carencia de lombrices en la tierra Dificultad de crecimiento de plantas Culminación de la degradación física y química

Indicadores de la degradación del suelo

- * Poca información del agua en el perfil y por ende una mayor escorrentía superficial con el arrastre del suelo hacia las partes bajas (arroyos, presas y lagos) y hacia afuera de la microcuenca.
- * El suelo se presenta duro y compactado.
- * La vida biológica desaparece (lombrices, insectos, entre otros).
- * Los colores originales del suelo cambian (predominan colores más claros)
- * Con facilidad se observan surcos causados por la erosión y luego cárcavas
- * Las raíces de las plantas se atrofian, orillando a un crecimiento lento y una disminución de la producción en grano y forrajes.
- * En estado avanzado de degradación no hay respuesta a la aplicación de abonos químicos.
- * Aparecen especies vegetales de naturaleza exótica que dominan el área.

3.5. AGUA

En la división de los ambientes acuáticos continentales, Person (1936) distingue los cuerpos de agua estancada y de corriente como sigue: loticos, que corresponden a las aguas corrientes que se desplazan en una dirección definida; este flujo se realiza por un canal y todas las condiciones físicas, químicas y biológicas cambian desde su nacimiento hasta las desembocaduras en un gradiente bien definido, como ocurre en los ríos y arroyos. Lenticos, son los cuerpos de agua estancada, en los que el agua no fluye ni corre, no hay gradientes horizontales de las condiciones fisicoquímicas y biológicas en una dirección definida y su evolución en el tiempo se realiza *in situ*, como ocurre en lagunas y lagos.



El ciclo del agua está controlado por la energía del sol y por la fuerza de gravedad, que hacen que se evapore el agua del mar y que al precipitarse fluya por las pendientes. Una gota de agua pasa de 8 a 10 días en la atmósfera, de dos a tres semanas en un curso fluvial, 100 años en un glaciar, de unas semanas a millones de años en un lago, o de 100 a 40 mil años bajo tierra. Cada gota puede seguir un ciclo diferente. Una parte de la lluvia se evapora de nuevo o llega hasta los cursos de agua. Otra parte penetra en el suelo cerca de la superficie; las plantas la absorben con sus raíces y la devuelven a la atmósfera con la transpiración. Otra parte se infiltra hasta las capas subterráneas profundas de las que nacen los manantiales. De ésta, una pequeña fracción del agua que se extrae y se consume en usos “no consuntivos” (generación hidroeléctrica, recreación y acuicultura) poseen atributos físicos, químicos y biológicos que son dependientes del caudal que varían en espacio y tiempo, sin embargo el resto retorna a la corriente ya sea en forma directa (escorrentía superficial) o indirecta (mantos freáticos) por lo que se aprovecha reiteradamente hasta llegar aguas abajo. No obstante, el uso del agua depende de la cantidad, calidad y tiempo de los sobrantes de los caudales de retorno o las pérdidas por los usos de los usuarios situados aguas arriba (Hernández y Herrerías, 2001). Las interrelaciones e interdependencias de estos usos se internalizan en la cuenca, lo que la convierte en la unidad territorial apropiada de análisis (Dourojeanni *et al.*, 2002).

3.5.1. EL AGUA COMO ELEMENTO UNIFICADOR

El agua es sin duda un elemento natural de gran trascendencia en la ordenación y manejo de la cuenca hidrográfica, como elemento unificador del cual depende toda la vida existente en ella. Algunos aspectos que se pueden destacar en este sentido son:

- * La funcionalidad de los sistemas productivos primarios.
- * La degradación y pérdida del suelo en el interior de la microcuenca en función de los escurrimientos por precipitación pluvial.
- * Para la fertilidad de las tierras.
- * Su conjunción con la temperatura define el clima y éste a su vez, los tipos de vegetación en el interior de la microcuenca.
- * Como medio de transporte de los desechos urbanos e industriales producidos por el hombre.
- * El agua considerada como elemento de diversión y esparcimiento.

Es por ello, que en la Ley de Aguas Nacionales, en su Artículo 3º fracción IV definen a la cuenca como “la unidad de gestión del recurso hidráulico para la planificación, conservación y desarrollo sostenido de los recursos naturales, ya que además permite integrar la dimensión social con la productiva y ambiental”. Cualquier actividad humana requiere de agua, sin ella no puede haber desarrollo y su escasez es cada vez más evidente en gran parte de nuestro país debido a tres factores principales: la notoria concentración e incremento demográfico en las zonas urbanas, la distribución inequitativa en la República Mexicana como consecuencia de la topografía y diversidad climática y el inadecuado uso de los recursos naturales (Hernández y Herrerías, 2001). Este último, se observa en el surgimiento de la contaminación a consecuencia de la deficiente planeación y manejo, lo que afecta a muchos cuerpos de agua (Ramírez, 2007).

Si se mantiene la actual práctica imperfecta en el aprovechamiento y protección de los recursos hídricos, llegaremos inevitablemente a una disponibilidad baja en relación a las necesidades y una crisis hídrica es



inevitable. En algunas regiones esta crisis se crea precisamente porque el aprovechamiento actual de este recurso es muy deficiente y la distribución irregular dificulta su optimización; la situación implica una prudente planeación de la actividad productiva que debería basarse en la cuantía, calidad y distribución de nuestros recursos hídricos (Villanueva, 2008).

Abordar la crisis del agua en México es tarea de gran complejidad, que exige superar los enfoques tradicionales y explorar nuevos planteamientos interdisciplinarios. Se necesita un nuevo pensamiento colectivo, abocado a la revisión y exploración de políticas públicas y la identificación de un conjunto de estrategias prácticas de solución. Además, es necesario rebasar el ámbito estricto de la investigación, pura o aplicada, para tender puentes de diálogo entre los diversos actores que intervienen en el problema y que pueden ser parte de la solución. La superación de la crisis del agua en nuestro país no depende tan sólo de voluntad política; sino de la progresiva construcción de consensos basados en el más sólido conocimiento de nuestra realidad ambiental, económica y social (Ramírez, 2007).

3.5.2. ARROYOS DE MONTAÑA

Los pequeños arroyos de montaña (en su mayoría de primer a tercer orden) constituyen la base de los sistemas de drenaje de las cuencas, además ocupan la mayor superficie del área de drenaje y son los que aportan la mayor cantidad de agua para la formación de los grandes ríos. Para el funcionamiento normal de un arroyo es necesario que se mantenga un corredor de vegetación natural a lo largo de este, lo cual permite una baja iluminación y un ambiente fresco durante los meses cálidos, evitando pérdidas por evaporación y garantizando buena calidad de hábitat para la fauna silvestre (González del Tánago *et al.*, 1995).

Un río está definido por su grado y secuencia de unión en donde el tributario más pequeño sin brazos en las fuentes es designado de primer orden, cuando solo tiene tributarios de orden uno es llamado de segundo orden, un río de tercer orden es aquel en el que todos los tributarios son de segundo orden o menores. El flujo de corriente de los tributarios será efímero, intermitente o permanente (perenne) dependiendo de la geología, geomorfología y cobertura arbórea del área ribereña (Zepeda *et al.*, 2002).

Un arroyo estable se caracteriza por tener la capacidad de mantener una constante en el transporte de su descarga de sedimentos (tipo y tamaño) asociados a deposición y lavado local, desarrollando una dimensión y un perfil transversal; si estas características son mantenidas el sistema ribereño se conservará. La estabilidad de un río es lograda cuando éste mantiene constante su índice ancho/profundo y el ancho del banco de orilla aunque presente migración lateral, sin embargo siempre será considerado un sistema “activo” y “dinámico” (Ramírez, 2007).

El perfil longitudinal del río corre del parteaguas hacia aguas abajo, éste es equivalente al sitio de muestreo y permite conocer la pendiente de la superficie del agua y el índice de sinuosidad, comprende tres secciones transversales. Una *sección transversal* se entiende como el corte del cauce transversalmente y es la base para concebir mediciones fundamentales que determinan su morfología, cada sección tiene dos bancos de orilla. El *banco de orilla* es la proporción de suelo que se mantiene húmedo por estar en contacto permanente con el espejo de agua y se define por indicadores como: el cambio en la vegetación (especialmente bajo el límite de especies perennes), el cambio en el tamaño de partículas del material del banco (como la línea divisoria entre los conglomerados o la grava con arena



fina o arcilla), el quiebre de la pendiente a lo largo de los flancos que limita el banco del plano de inundación (al que corresponden la *huella mínima* y *máxima*), entre otros (Ramírez, 2007). Las condiciones del cauce como la morfología del lecho (anchura, profundidad y pendiente), la hidrología (velocidad de corriente) y el sustrato (granulometría) son factores trascendentales para la definición de la calidad potencial de un tramo fluvial y del ecosistema ribereño.

A lo largo de los sistemas fluviales se dan importantes interacciones entre la tierra y el agua, que se refleja en la entrada de materia orgánica por la captación, filtración de sedimentos y remoción de nutrientes, lo que favorece el tratamiento final de las aguas mejorando su calidad, el control del flujo y las inundaciones. La velocidad de corriente ejerce un estrés mecánico sobre la biota, no obstante ésta turbulencia proporciona nutrientes, ayuda al intercambio de gases y eliminación de detritos; lo cual es fundamental para mantener diversos microambientes en donde las comunidades acuáticas se pueden establecer además de que determina su composición, la división de zonas de ribera y terrenos aluviales, que constituye el tipo morfológico de un arroyo (Ramírez, 2007).

3.6. INTERACCIÓN SUELO AGUA

Es necesario señalar que los problemas en torno a los recursos naturales actualmente se presentan en forma integral, por lo que deberán tener respuestas integrales, lo que obliga a superar ya la tendencia dominante de los problemas y soluciones aisladas.

Si la cuenca hidrográfica es donde se capta y distribuye el agua de lluvia, entonces esta se convierte en el elemento integrador que puede dirigir de manera óptima, en términos ecológicos y económicos, el aprovechamiento de los recursos naturales. En este sentido se puede entender que dependiendo de cómo se ordene y maneje el agua va a ser la ordenación y el manejo del suelo y, por lo tanto, la ordenación y, manejo de los sistemas productivos que se englobarían en la ordenación y el manejo de la microcuenca.

Por esto el agua, junto con el suelo, constituye uno de los criterios esenciales para comprender el carácter integral en el trabajo de microcuencas. Contemplar el suelo y el agua es considerar el criterio propio de la especificidad de la cuenca hidrográfica. A través del suelo y del agua se ubica el espacio geográfico donde se desarrolla la actividad productiva primaria del hombre en el interior de la misma. Si no se consideran el suelo y el agua no podríamos hablar de un manejo de cuenca hidrográfica (Villanueva, 2008).

Si bien es cierto que sin suelo y agua no puede haber producción primaria, esto a fin de cuentas señala la íntima relación que existe entre dichos aspectos, pero no la determinación social de la propia producción. El suelo y el agua dentro de la microcuenca tienen su lugar y función en relación con los elementos básicos de una cuenca hidrográfica (parteaguas, corrientes tributarias, río principal).

Cualquier tipo de suelo no perturbado responde adecuadamente al tipo de lluvia y escurrimiento a que está condicionado; esto tiene sentido ya que el suelo y el agua de los ecosistemas áridos, templados y húmedos actúan equilibradamente. Así, se puede ver que diferentes condiciones topográficas, exposiciones y texturas contienen diferentes propiedades para captar humedad o producir escurrimiento.



Normalmente, entre el suelo y el agua se establece el equilibrio, que se perturba con el mal uso y manejo que se hace de ellos. La degradación, pérdida y compactación son los problemas centrales que afectan la relación y coordinación entre ambos sistemas y la vegetación, alterándose el propio ciclo hidrológico, dentro del cual es posible identificar la coordinación entre el movimiento del agua y el suelo, cuya estructura (partículas, minerales, materia orgánica y microorganismos) funciona adecuadamente.

Para una relación adecuada del suelo y el agua en la microcuenca hace falta la presencia en ella de las plantas, la cobertura vegetal juega un papel importante en el impacto de la lluvia sobre el suelo, permitiendo así su infiltración y la vida del propio suelo, el control de los escurrimientos, así como la recarga de los mantos acuíferos básica para la vida del hombre. (Villanueva, 2008).

Entre el agua y el aire se mantiene un equilibrio que proporciona a las plantas la humedad y la aireación adecuada. El agua de lluvia que recibe el suelo ocupa parte de los espacios libres (macro-microporos) existentes en la estructura del suelo, desplazando por tanto el aire.

El agua que ocupa los espacios grandes desciende a través de ellos por su propio peso (agua de gravedad) hacia el subsuelo y hasta encontrar las aguas subterráneas. Esto constituye el drenaje del suelo, por el cual se elimina el exceso de agua, una vez que esta es retenida y almacenada por el suelo en los macroporos que gozan de propiedades capilares, moviendo el agua en este sentido. El drenaje del suelo, depende de la mayor o menor penetración del agua, es decir, de su permeabilidad. Una vez efectuando el drenaje, el suelo va perdiendo su humedad por la acción del calor que evapora el agua de la superficie del suelo, por último, las plantas absorben agua del suelo. De este modo el suelo se va desgastando o desecando progresivamente debido a la evaporación, que es más intensa cuanto mayor es la temperatura, y a la transpiración (evapotranspiración), aunque también interviene la luz y el tipo de planta o cultivo.

3.7. ECOSISTEMAS RIBEREÑOS

El ambiente ribereño es el ecosistema natural que limita los márgenes fluviales, zona ocupada por formaciones arbustivas y arbóreas que conforman el bosque de ribera en función de la geomorfología de la cuenca. Estos ecosistemas presentan alta sensibilidad a la degradación y son el reflejo de los procesos que ocurren en la cuenca que los rodea, de tal manera que permiten identificar de forma rápida y confiable el estado de salud de las partes que la componen (Zepeda *et al.*, 2002).

En la actualidad se considera importante la conservación y restauración del ecosistema ribereño por su función contra la erosión, la regulación de avenidas (control del flujo e inundaciones) en suelos permeables y bajo coeficiente de escurrimiento (dispersa, amortigua flujo y sedimento), como filtro verde (favorece la depuración del agua) y el almacenamiento de agua en los suelos que la liberan lentamente manteniendo el flujo perenne de alta calidad. Esto significa el mantenimiento del hábitat durante todo el año para muchas especies de peces, flora acuática y terrestre, siendo reservorio natural de germoplasma nativo y corredor biológico (González del Tánago *et al.*, 1995).

El suelo de ribera posee ciertas propiedades físicas (densidad aparente, densidad real y textura) y químicas (contenido de carbono orgánico) que mantienen el óptimo funcionamiento del ecosistema ribereño. El color ayuda a inferir propiedades físicas, químicas y biológicas de la relación suelo-planta (Aguilera, 1989), además el oscurecimiento de la superficie del suelo disminuye el albedo en relación con



el contenido de materia orgánica, incidiendo sobre las propiedades térmicas del mismo. Las funciones del suelo se ven directamente afectadas por la cantidad y la calidad de la materia orgánica que contiene. Por ello, la materia orgánica es un constituyente y un indicador de la calidad del suelo, su importancia radica su influencia sobre múltiples propiedades de los suelos como la porosidad, aireación y la infiltración, que a su vez dependen de las proporciones relativas de arena, limo y arcilla (Aguilera, 1989).

Las áreas de ribera han sido objeto de destrucción sistemática por el aprovechamiento agrícola de las fértiles llanuras aluviales (Zepeda *et al.*, 2002), aun cuando son consideradas como ecosistemas claves para la sobrevivencia y el desarrollo de las sociedades humanas. En ocasiones, los ríos han sido delimitados con materiales ajenos a ellos a causa de los buenos propósitos hidráulicos de control de flujo y drenaje, empinados, ramificados, y alterados de manera que decrece su función y estabilidad natural.

En México, la diversidad orográfica ha favorecido la existencia de los ecosistemas ribereños, identificándose alrededor de 172 grandes ríos perennes que transportan un promedio de 375 billones de metros cúbicos de agua anualmente. Sin embargo, muchas áreas de ribera del país han sufrido diversos grados de disturbio, resultando en la pérdida de vegetación natural, volumen y calidad del agua (Ramírez, 2007).

La pérdida de cuerpos de agua en la República Mexicana es un hecho innegable y lamentable que aumenta la desertificación. El mantener los cuerpos de agua es producto de la sinergia entre bioma, clima y manantiales o arroyos; para ello basta mencionar que la humedad guardada en el suelo cercano a las riberas se drena lentamente aguas abajo y se mantiene por las poblaciones vegetales. Sin embargo, la vegetación ribereña disminuye por el pastoreo, perforación de pozos, construcción de canales, entubamiento de manantiales y ríos (Ramírez, 2007).

En pleno siglo XXI, persiste el gran desconocimiento de la importancia, el manejo y la sostenibilidad de los ecosistemas ribereños. Ni siquiera se conoce la superficie total que ocupan y lo que significan cuantitativamente en términos ecológicos y económicos para el país, a pesar de ser zonas federales y estar considerados como áreas de reserva permanentes en la Ley de Aguas Nacionales (Zepeda *et al.*, 2002).



4. JUSTIFICACIÓN

Ante los problemas ambientales que se enfrentan hoy en día, el mantenimiento y restauración de bosques son actividades de primordial importancia para la conservación de la biodiversidad y el manejo, por esto son sujetos de atención en los programas de gestión sustentable de las cuencas en México (Ortiz-Arrona *et al.*, 2005).

Al interior del Parque Nacional Iztaccíhuatl-Popocatepetl-Zoquiapan, se localiza el parteaguas de una amplia zona de captación que alimenta y distribuye sus recursos hídricos tanto a la cuenca de México, formación hidrológica endorreica, en el occidente, como al oriente a la cuenca exorreica del Balsas. La conservación de la cubierta vegetal y el sustrato edáfico, es de importancia trascendental para regular la infiltración de agua al subsuelo y la intensidad de los escurrimientos, así como para suministrar el líquido a las numerosas comunidades establecidas en las partes bajas para su consumo doméstico y la realización de actividades agrícolas, pecuarias e industriales (Hernández y Granados, 2006).

La combinación de diversos factores ecológicos e históricos, en la cuenca de México, han permitido el desarrollo de diferentes tipos de vegetación. Entre los más importantes están los bosques de coníferas y de encinos, que en las últimas décadas han sido profundamente perturbados. Desde que los primeros asentamientos aparecieron en la cuenca, estos bosques fueron utilizados como fuente de madera para la construcción, como combustible, materia prima para la fabricación de papel y como carbón.

El deterioro en la calidad del agua representa uno de los problemas ambientales críticos en esta zona, debido a las modificaciones en el uso de suelo, la expansión urbana y la contaminación generada por múltiples y diversas fuentes, así como por la explotación excesiva de los sistemas de agua subterránea. Su calidad y disponibilidad es un problema que afecta cada vez más a la Ciudad de México y zona conurbada.

El estudio del estado ecológico actual de los corredores ribereños es un elemento clave para la integración de un plan de restauración, así mismo la identificación del contexto cultural y social en el cual se ha dado la degradación de este recurso y los factores sociales juegan un rol “importante” en la planificación (Ortiz-Arrona *et al.*, 2005). En el país existen diversos estudios acerca de la calidad de suelo y agua, sin embargo, siempre se han tratado como ecosistemas independientes y pocas veces se considera la relación existente entre ellos, a pesar de la evidente interacción entre ambos. A través de una representación jerárquica de la correlación entre los procesos fluviales y los ecológicos a diferentes escalas en el ambiente fluvial, se ha considerado la hipótesis de que los procesos a escala de ribera son aquellos cuya manipulación puede ser más exitosa en el contexto de procesos de restauración integrada, ya que es ésta la escala en donde los vínculos son más fuertes. Las propuestas de restauración de los sistemas fluviales más recientes apuntan a mejorar su calidad ecológica y enfatizan la importancia de las interacciones entre el río, la zona de ribera y el área de cuenca (Morales y Fernández, 2005). Debido a esto, este trabajo identificará la relación que existe en la zona ribereña de los sistemas fluviales permanentes del Parque Nacional y su área de influencia entre los sistemas suelo, agua, vegetación y sus propiedades físicas y químicas.



5. OBJETIVOS

▣ GENERALES

- Evaluar la relación del sistema agua-suelo en la zona de ribera de distintas corrientes superficiales permanentes en la región occidental del Parque Nacional Izta-Popo.
- Contribuir a la caracterización ecológica de la cuenca hidrográfica del Valle de México en la región del Parque Nacional Izta-Popo y áreas de influencia.

▣ PARTICULARES

- Caracterizar física y químicamente el agua en sistemas lóticos permanentes de la región occidental del Parque Nacional Izta-Popo.
- Analizar las características físicas y químicas del suelo adyacente a los sistemas lóticos mencionados en el objetivo anterior.
- Conocer la riqueza vegetal presente en cada sitio de muestreo.
- Definir los parámetros de interacción más significativos en el sistema agua-suelo.

6. HIPÓTESIS

El agua y el suelo como sistemas independientes presentan una continua interacción; si se identifican las propiedades físicas y químicas de cada uno de estos sistemas y se analizan sus patrones de variación, se podrán definir los indicadores de interacción más significativos entre ambos sistemas y el efecto que tienen sobre la vegetación.



7. ÁREA DE ESTUDIO

El Parque Nacional Izta-Popo, Zoquiapan (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° 28' 2" N y 98° 40' 18" W; límite extremo oeste 19° 20' 29" N y 98° 46' 40" W; límite extremo este 19° 16' 16" N y 98° 37' 28" W; límite extremo sur 19° 14' 36" N y 98° 40' 27" W. Abarca una superficie de 40,008 hectáreas dividida entre los estados de México, con 28,461 hectáreas (71.14%); Puebla con 11,047 hectáreas (27.61%); y Morelos con 499 hectáreas (1.25%) (Fig. 4). El trabajo se realizó en la zona occidental del Parque, que incluye los municipios de: Chalco, Tlalmanalco, Amecameca, Atlautla y Ecatzingo, en el Estado de México y Tetela del Volcán, en Morelos. Sus geoformas (sierra, conos volcánicos y laderas) son de origen volcánico, predominando rocas basálticas y andesíticas. En él se encuentran la segunda y tercera cumbres más altas de México: el Popocatepetl (5,452 m snm) y la Iztaccíhuatl (5,280 m snm) que dan nombre al parque nacional (CONANP, 2009).

La ubicación del Parque Nacional Izta-Popo, Zoquiapan lo hace indispensable 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.

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 3,600 m.s.n.m. a los 5,500 m.s.n.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.



Fig. 3 Algunas especies de: animales

a) Mariposa, b) oruga, c) renacuajo; vegetales, d) *Polystichum sp.*, e) *Eryngium sp.*, f) *Cirsium sp.*; y hongos (g y h) encontrados dentro del PNI-P. (Fotos tomadas por Mitzi Y. Ayala C.).



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 linco, 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.

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.
- **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.
- **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).

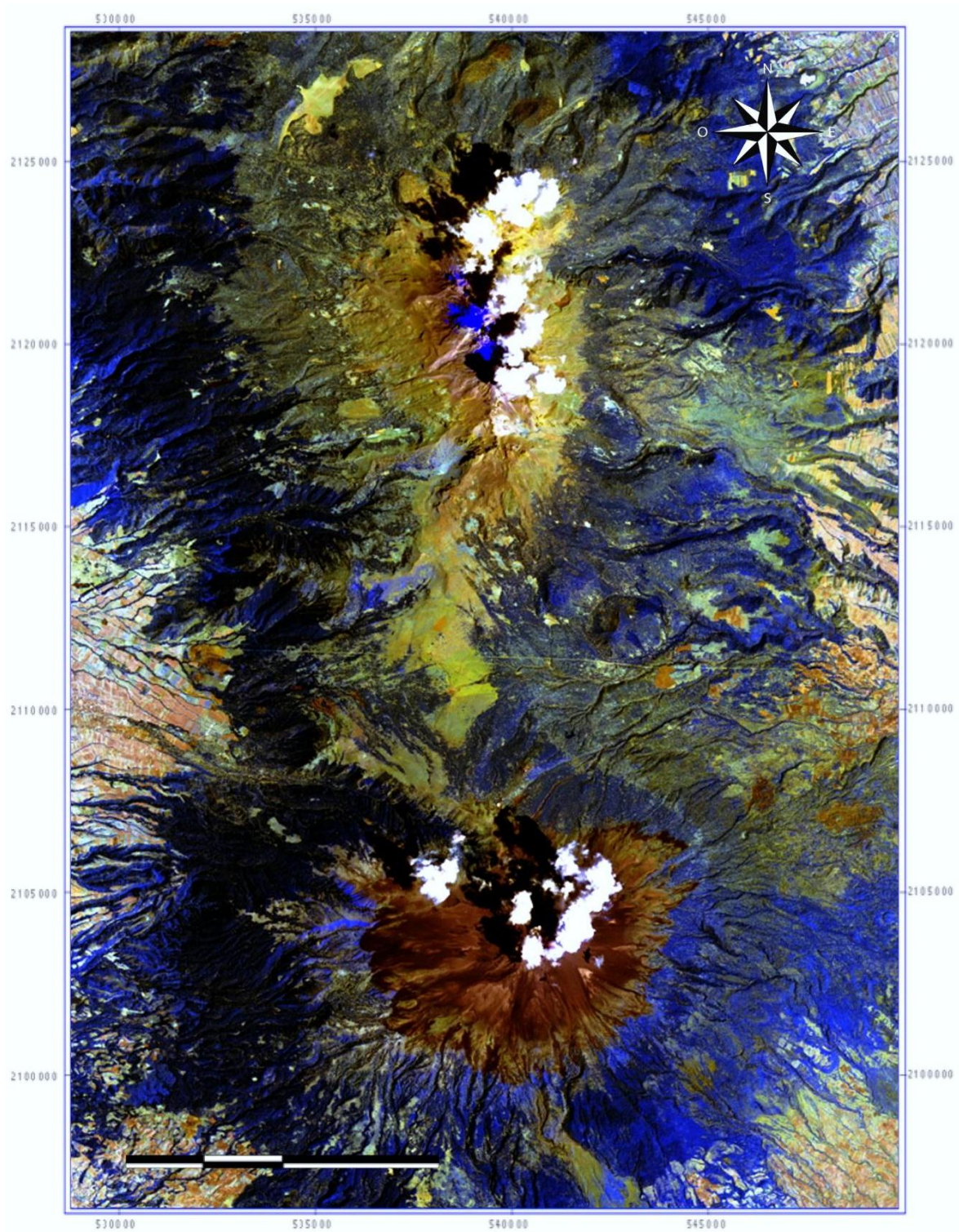


Fig. 4 Área del Parque Nacional Izta-Popo.



7.1. HIDROLOGÍA

Los recursos hídricos que nacen en el parque nacional son originados principalmente por el deshielo de los glaciares 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.

La distribución altitudinal de los recursos hídricos se caracteriza por una pendiente pronunciada en su curso alto, arriba de los 4,500 m snm, 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. Debajo de la cota mencionada y hasta los 4,000 m snm 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 4,000 m snm los arroyos adquieren velocidad y volumen y los manantiales son más abundantes. Debajo de los 3,500 m snm las aguas ejercen una fuerte erosión en el terreno ya que su caudal es la suma de los deshielos y las precipitaciones. Entre los 2,500 y los 2,300 m snm 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, 2009).

7.2. 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. El parque se ubica en la región de los vientos alisios, donde predominan las circulaciones de tipo convectivo local, lo cual hace posible una gran estabilidad meteorológica durante la mayor parte del año. 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.

Cuadro 4. Climas dominantes en los sitios de muestreo (CONANP, 2009).

ESTACIÓN	CLAVE CLIMÁTICA	DESCRIPCIÓN
Chalco	C(m)(w)b(e)g	Clima templado, húmedo, con lluvias de verano; con una temperatura media anual entre 12 y 18 ° C y una temperatura del mes más frío de 11.2 ° C; la precipitación media anual es de 659.3 mm y la precipitación del mes más seco mayor de 40 mm; el porcentaje de lluvia invernal menor de 5% de la anual. El verano es fresco y largo, donde el mes más cálido presenta temperaturas de 18.4 ° C; el mes más caliente es mayo.
San Rafael	C(w2)(w)big	Clima templado, subhúmedo, con lluvias de verano, con temperatura media anual de 13.2° C y la temperatura del mes más frío menor de 10.9° C y la del mes más cálido de 15.4° C. La precipitación anual de 1092 mm, siendo febrero el mes más seco y julio el más húmedo con 228 mm de precipitación; el porcentaje de lluvia invernal es de 3.57%.



San Pedro Nexapa	Cb(w)kig	Clima templado subhúmedo con lluvias de verano; temperatura media anual de 13.5° C, con temperatura del mes más frío de 11.4° C en diciembre y enero y en el mes más cálido de 15.9° C en mayo. La precipitación anual es de 910 mm, con un porcentaje de lluvia invernal de 5 %. Con una oscilación térmica de 4.5, se le considera un clima isotermal, semifrío, con verano fresco.
Amecameca	Cb(w2)(w)' gw''	Clima templado subhúmedo, con lluvias de verano, cuya temperatura media anual es de 14° C; siendo el mes más frío enero con 10.8° C y el más cálido mayo con 16.2° C. La precipitación media anual es de 928 mm; el mes más seco es febrero con una precipitación de 6.9 mm y el más húmedo, septiembre con una precipitación de 185.6 mm. El porcentaje de lluvia invernal es de 3.4%. Con una oscilación térmica de 5.4, se le considera templado con verano fresco largo.
Tetela del Volcán	Cb(m)(w)ig	Clima templado húmedo con lluvias de verano, cuya temperatura media anual es de 17.2° C, siendo diciembre el mes más frío con 15.6° C y el más cálido mayo con 19.8° C. La precipitación media anual es de 1885 mm, con febrero como mes más seco pues recibe una precipitación de 1.3 mm y julio como el mes más húmedo con 368.5 mm de precipitación. Por las condiciones de la temperatura se le considera templado con verano fresco largo y por la precipitación como húmedo.

7.3. EDAFOLOGÍA

De acuerdo con la clasificación de la Organización Mundial para la Alimentación y Agricultura (FAO), las unidades de suelo presentes en el área del parque son:

- * **Litsoles:** Suelos someros, con menos de 0.1 m de espesor, formados sobre tepetates y 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 4,000 m snm 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 3,900 m snm y normalmente son pobres en contenido de 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.



7.4. 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 21,000 hectáreas, que representan 52.72% de la superficie total del parque) y en la diversidad de su flora y fauna.

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 alpino 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 (CONANP, 2009).

7.4.1. BOSQUES

Hasta los 3,100 m de altitud se encuentran asociaciones dominadas por *P. 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.

Los pinos forman comunidades vegetales típicas de las laderas de las montañas que rodean la cuenca del Valle 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 o praderas leñosas (Ezcurra et al., 2006).



Fig. 5 Bosques de coníferas en el PNI-P.



Dentro del parque se establecen asociaciones vegetales de transición entre *Pinus* y *Abies* 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*.

En las partes más elevadas, hacia los 3,600 m snm 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* sp., pero hacia las partes más elevadas (4,000 m snm), constituye un bosque achaparrado (de 5 a 8 m de alto) y más bien abierto, se pueden encontrar algunos individuos aislados en los 4,200 m snm, límite altitudinal arbóreo en México.

La especie dominante de los bosques de oyamel es el *Abies religiosa*. Con un rango altitudinal entre 2,400 a 3,500 m snm. 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.

Las asociaciones de bosques de encino son todavía más complejas que las de pino y se entremezclan con otros tipos de vegetación. De 2,400 a 3,100 m snm se encuentra la asociación de *Q. laurina* con *Q. crassifolia*, *Q. rugosa*, *Abies*, *Arbutus*, *Juniperus* y *Pinus* (CONANP, 2009). 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. Sin embargo, los encinos forman frecuentemente bosques bajos, de 5 a 12m de altura, y por regla general constituyen manchones densos en el piso altitudinal inmediatamente inferior a los bosques de pino. (Ezcurra et al., 2006)

7.4.2. ZACATONAL Y PASTIZALES ALPINO Y SUBALPINO

El pastizal alpino se establece entre los 4,000 y los 4,500 m snm. 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 2,700 a 4,300 metros (Rzedowski, 2006).



Los zacates del parque se consideran en buen estado; hay una combinación de zacatonales primigenios y secundarios como consecuencia de la introducción de zacatales destinados a la ganadería.



Fig. 6 Pastizales alpinos dentro del PNI-P.

7.5. 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.

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 zacatucho 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. 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 linco o gato montés (*Lynx rufus escuinapae*).

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.



La zona de los volcanes está considerada por la CONABIO como Área de Importancia para la Conservación de las Aves (AICA). 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.

7.6. PROBLEMÁTICA DEL PNI-P.

Este parque nacional padece, como todas las áreas protegidas de nuestro país, amenazas de diverso tipo que atentan contra su conservación. Algunos de los aspectos principales que generan presión sobre el parque y frenan el buen manejo del mismo son:

- Tenencia de la tierra
- Tala clandestina
- Incendios forestales
- Ganadería
- Extracción de recursos silvícolas
- Crecimiento urbano
- Cambio de uso de suelo
- Cercanía con la gran metrópoli



Fig. 7 Problema del PNI-P.

a) Cambio de uso de suelo, b) Tala clandestina, c) Contaminación de sistemas acuáticos, d) Ganadería y e) Incendios forestales. (Fotos tomadas por Mitzi Y. Ayala C.)

8. MÉTODOS

Se realizó una revisión bibliográfica y cartográfica para elegir corrientes hídricas permanentes que presenten influencia de diferentes actividades antrópicas y realizar la elección de sitios de muestreo.

8.1. DELIMITACIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO

Debido a que los ecosistemas forestales se caracterizan por poseer una gran biodiversidad, producción de biomasa, favorecer la calidad del suelo, mitigar el impacto de la erosión e inundaciones, formar parte del paisaje y áreas de recreación (Spurr y Barnes, 1982). Se eligieron sitios de muestreo en áreas boscosas y agrícolas dentro del PNI-P, aledañas a los cauces de sistemas hídricos, con variedad en los tipos de vegetación, uso de suelo y grado de conservación, este último se asignó en base a la presencia o ausencia de actividades antrópicas como la ganadería, agricultura, recreación, cambio de uso de suelo, entre otras y se representó con un 1 para los sitios conservados y 2 para los perturbados.

8.2. MUESTREO

En campo, se ubicaron y realizaron colectas de muestras de suelo, agua y vegetación en 18 localidades diferentes y se obtuvieron para cada una los datos de georeferencia correspondientes mediante un GPS (Sistema de Posicionamiento Global) GARMIN etrex-vista (2000) en unidades UTM NAD27. En cada uno de los sitios analizados, se tomaron datos meteorológicos que pudieran influir en cada muestreo, como son: la nubosidad, dirección del viento y temperatura ambiental.



Fig. 8 Localización de los sitios de muestreo.

8.2.1. TOMA DE MUESTRAS DE SUELO

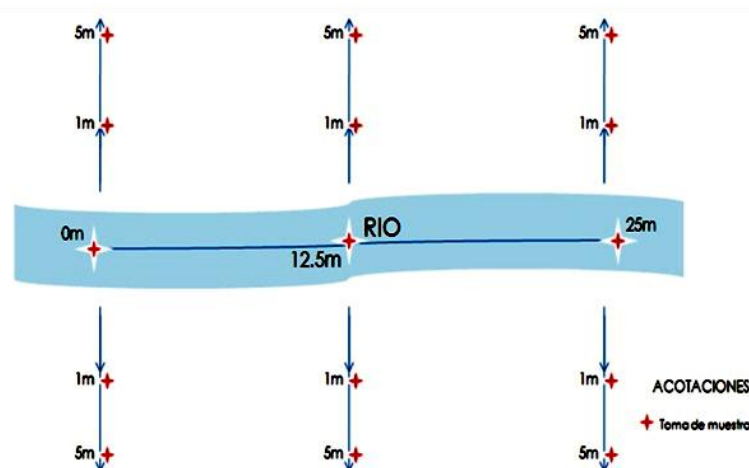


Fig. 9 Diagrama del muestreo de suelo.

El muestreo de suelo se realizó a lo largo de cada transecto, midiendo 25m a lo largo del cauce; se midió 1 y 5m de forma perpendicular a ambos lados del arroyo y en ambas líneas se tomaron muestras con una profundidad de 0 a 20 cm, a distancias de 0, 12.5 y 25 m sobre el transecto, las muestras fueron separadas en contenedores diferentes por zona perturbada y zona no perturbada (Fig. 9).

Bajo este esquema y al mismo tiempo se tomó una muestra enterrando de forma vertical un tubo de PVC, de aproximadamente 6 cm de altura, en cada punto, con la finalidad de obtener una muestra conservando la estructura del suelo para determinar la densidad aparente y el porcentaje de humedad; posteriormente en cada uno de estos sitios se midió la temperatura del suelo. En estos mismos sitios se colectó también en un cuadrante de 25 cm² la hojarasca y el mantillo presentes en la capa superficial del suelo. Se etiquetó cada una de estas muestras con claves específicas de cuerdo al sitio de muestreo, el tipo de zona, la distancia al río, la distancia a lo largo del transecto y fecha en la que se colectó la muestra.



Fig. 10 Muestreo de suelo.

a) Medición de temperatura, b) toma de muestras en tubos de PVC, c) toma de muestras de mantillo, d) toma de muestras de suelo, e) delimitación del transecto. (Fotos tomadas por Mitzi Y. Ayala C.).

8.2.2. TOMA DE MUESTRAS DE AGUA

La toma de muestras de agua se llevó a cabo de forma manual, con diferentes botellas, según el análisis a realizar, DBO, para el análisis de oxígeno y en botellas de polietileno de 1 L, 500 mL (con H₂SO₄ como conservador) y 125 mL (acetato de zinc como conservador), el transporte y conservación se realizó a 4°C, de acuerdo al APHA-AWWA-WPCF (1992). En cada una de estas corrientes se midió, además, el ancho, el perfil batimétrico y la velocidad de corriente, según el método de Sección-Velocidad.



Fig. 11 Muestreo de agua.

a) muestreo en botellas de polietileno, b) muestreo para COP, c) y e) muestreo en botellas DBO y d) medición del perfil batimétrico. (Fotos tomadas por Mitzi Y. Ayala C.).

8.2.3. MUESTREO DE VEGETACIÓN

Para la vegetación se realizó la colecta de las especies más representativas encontradas en el primer metro perpendicular a lo largo del arroyo, dentro del transecto, estas fueron prensadas de acuerdo a la metodología convencional y posteriormente identificadas en el laboratorio, con ayuda de claves taxonómicas (Rzedowski *et al.*, 2005; Mickel y Smith, 2004). También se llevó a cabo un conteo del número de individuos de cada una de estas especies en cuadrantes de 1 m², para la determinación de la densidad.



Fig. 12 Muestreo de vegetación.
a) y c) delimitación de cuadrantes y b) Selección de individuos para colecta. (Fotos tomadas por Mitzi Y. Ayala C.)

8.3. ANALISIS DE MUETRAS

8.3.1. DETERMINACIÓN DE PARÁMETROS *In situ*

Posterior a la colecta de las muestras, algunos de los parámetros del análisis de agua se determinaron en campo:

- **Parámetros físicos:**
 - **Temperatura:** Fue determinada debido a su influencia en las especies acuáticas determinando su metabolismo, respiración, así como la precipitación y la descomposición de materia orgánica, afectando la adecuada solubilidad de gases y aumentando la de las sales. Se midió instrumentalmente, con un termómetro de inmersión parcial con mercurio y precisión de 0.1°C.
 - **Conductividad Eléctrica:** A través de ella se mide el contenido total de sales en el agua, siendo una expresión numérica de la capacidad de una solución para transportar la corriente eléctrica. Fue medida instrumentalmente con un conductímetro digital de campo (Combo HANNA modelo HI-98129).
 - **pH:** El pH óptimo de las aguas debe estar entre 6,5 y 8,5, es decir, entre neutra y ligeramente alcalina. Es una medida indirecta de la concentración de iones Hidrógeno ($\text{pH} = \text{Log } 1/ [\text{H}^+]$), se midió instrumentalmente con un



Fig. 13 Determinaciones *In situ* de parámetros físicos.
a) pH, conductividad y STD, b) temperatura. (Fotos tomadas por Mitzi Y. Ayala C.)

potenciómetro digital de campo (Combo HANNA modelo HI-98129).

- **Sólidos Totales Disueltos:** Es el total de residuos sólidos filtrables (sales y residuos orgánicos) disueltos en un medio acuoso, medido instrumentalmente con un conductímetro digital de campo (Combo HANNA modelo HI-98129).

Entre los parámetros químicos, que fueron determinados en campo, debido a su sensibilidad a la luz o su rápida descomposición respectivamente, se encuentran:

- **Parámetros químicos:**

- **Oxígeno Disuelto:** es indispensable para la vida acuática y depende de las condiciones ambientales, ya que su cantidad aumenta al disminuir la temperatura o aumentar la presión. Este se determinó en botellas DBO por el Método de Winkler con la modificación de la azida de sodio (APHA-AWWA-WPCF, 1992).
- **Alcalinidad:** La alcalinidad es su capacidad para reaccionar o neutralizar iones hidronio, (H_3O^+), hasta un valor de pH igual a 4.5. Se debe principalmente a la concentración de bicarbonatos, carbonatos e hidróxidos presentes en solución. Fue determinada por el método de los indicadores (APHA-AWWA-WPCF, 1992).
- **Dureza:** Existen dos tipos:
 - **Parcial o de calcio** (cantidad de carbonato de calcio). Se determinó con el método complejométrico (APHA-AWWA-WPCF, 1992).
 - **total** (cantidad de carbonato de calcio y de magnesio). Esta fue determinada usando el método titulométrico (APHA-AWWA-WPCF, 1992).



Fig. 14 Determinaciones in situ de parámetros químicos.
a) Dureza, b) Alcalinidad y c) DBO. (Fotos tomadas por Mitzi Y. Ayala C.).

8.3.2. DETERMINACIÓN DE PARÁMETROS EN LABORATORIO

8.3.2.1. Análisis de agua

La calidad del agua suele basarse en el uso al cual será destinada y en la medición conjunta de distintos parámetros. Las muestras tomadas en campo se conservaron en refrigeración a 4°C y posteriormente fueron analizados en el laboratorio, realizando tres repeticiones por muestra, los siguientes parámetros según las técnicas de APHA-AWWA-WPCF (1992):

- **Parámetros químicos:**

- **Demanda Bioquímica de oxígeno (DBO₅):** es la cantidad de oxígeno necesaria para la oxidación de compuestos orgánicos y la actividad respiratoria de los microorganismos presentes. Esta fue valorada por el método de Winkler con la modificación de la azida



- de sodio, después de una incubación a los cinco días a una temperatura de 20°C y en oscuridad total.
- **Demanda Química de oxígeno DQO:** Es la cantidad de oxígeno que se necesita para oxidar los materiales contenidos en el agua. Suministra información sobre la velocidad de degradación en condiciones naturales. Se determinó por reflujo cerrado, usando el método colorimétrico.
 - **Sólidos sedimentables:** Son aquellos que sedimentan cuando el agua se deja en reposo durante 2 horas, se determinaron volumétricamente mediante el uso del cono Imhoff.
 - **Cloruros:** Son de los aniones inorgánicos principales en el agua natural y residual. Para su determinación se empleó el método argentométrico.
 - **Sulfatos:** se encuentran en las aguas naturales en un amplio intervalo de concentraciones. Es uno de los principales constituyentes disueltos de la lluvia. Se evaluó la concentración de estos mediante el método turbidimétrico.
 - **Sulfuros:** Su determinación fue mediante el método yodométrico.
- **Nutrientos**
 - **Nitritos:** Suelen ser el resultado de la contaminación con estiércol de ganado y orinas. Se usó el método del ácido sulfanílico, para su evaluación.
 - **Nitratos:** Suelen ser el resultado de la contaminación con residuos de Fertilizantes o con aguas residuales de las composteras. Es uno de los más frecuentes contaminantes de aguas subterráneas en áreas rurales. Este se determinó mediante el método del ácido fenoldisulfónico.
 - **Amonio:** Las aguas superficiales generalmente contienen poco amonio. La principal fuente de contaminación de amonio son las aguas residuales. El método empleado para conocer su concentración fue el del fenato o azul de indofenol.
 - **Fosfatos:** Son el resultado de la contaminación con Detergentes, aunque también con estiércol y heces. Producen eutrofización de los cuerpos de agua. Los fosfatos fueron valorados mediante el método del fosfomolibdato.
 - **Fósforo total:** Para su evaluación se realizó una digestión con persulfato y posteriormente se le aplica a las muestras el método del fosfomolibdato.



Fig. 15 Análisis de agua en el laboratorio.

a) Nitritos, b y e) Fósforo, c y g) DQO, d) lecturas en espectrofotómetro y f) COP. (Fotos tomadas por Mitzi Y. Ayala C.).

- **Material Particulado**

- **Carbono Orgánico Particulado (COP):** Para la cuantificación del COP, se empleó una oxidación con dicromato de acuerdo con el Manual of Chemical and Biological Methods for Seawater Analysis, (Parsons et al., 1984).

8.3.2.2. Análisis de suelo

Una vez en el laboratorio, las muestras de suelo se secaron al aire libre, ya secas, se tamizaron con malla de 2mm de abertura y se guardaron en frascos, para su posterior análisis.

Los análisis y técnicas empleadas, se realizaron siguiendo la NORMA OFICIAL MEXICANA NOM-021-RECNAT-2001, QUE ESTABLECE LAS ESPECIFICACIONES DE FERTILIDAD, SALINIDAD Y CLASIFICACIÓN DE SUELOS, ESTUDIO, MUESTREO Y ANÁLISIS.

A cada una de las muestras de suelo se les determino algunas de sus propiedades físicas y químicas, enlistadas a continuación:

- **Propiedades físicas**

- **Textura:** se denomina así a la relación existente entre los contenidos de las diferentes fracciones granulométricas que constituyen el suelo. Esta se determinó a través del método de Boyoucos con la previa desintegración de materia orgánica con H_2O_2 .
- **Densidad:** Dado su carácter poroso, conviene distinguir entre la densidad de sus componentes sólidos y la del conjunto del suelo, incluyendo los espacios, por ello nos referiremos a dos tipos de densidad.



Fig. 16 Determinaciones en laboratorio de parámetros físicos de suelo.
Textura (a, b y c); Densidad aparente, porosidad y % de humedad (d, e, f, g, h).
(Fotos tomadas por Mitzi Y. Ayala C.).



- **Densidad real:** Se designa de esta forma a la densidad de la fase sólida. (No determinada)
- **Densidad aparente:** Refleja la masa de una unidad de volumen de suelo seco y no perturbado, para que incluya tanto a la fase sólida como a la gaseosa englobada en ella. Esta se determinó junto con el porcentaje de humedad gravimétricamente utilizando tubos de PVC que se pesaron con todo y suelo, posteriormente se pesó el suelo en vasos de precipitados previamente desecados. Se procedió a secar a 80°C en estufa, el suelo seco se pesó nuevamente y se calculó por diferencia la densidad aparente y el porcentaje de humedad.
- **Porosidad:** En el suelo viene representada por el porcentaje de huecos existentes en el mismo frente al volumen total. El cálculo de la porosidad total puede hacerse mediante los valores de los dos tipos de densidad. Fue determinada de manera aproximada usando los datos de densidad real y porcentaje de humedad determinados a partir de las muestras en tubos de PVC.
- **Propiedades químicas**
 - **Materia Orgánica del Suelo (MOS):** Son los residuos de plantas y animales en descomposición o degradación, proporciona al suelo algunos nutrientes que las plantas necesitan para su crecimiento y producción y de ella depende la buena constitución de los suelos. Esta fue determinada con el método de Walkley-Black.
 - **Fertilidad:** Es una propiedad que se refiere a la cantidad de nutrientes que contiene el suelo.
 - **NITRÓGENO (N):** Ayuda al buen desarrollo de las plantas y es el principal formador de proteínas. El contenido de Nitrógeno total fue cuantificado usando el método Semimicro-Kjeldhal.
 - **FÓSFORO (P):** Indispensable en la formación de semillas y ayuda al buen crecimiento de las plantas. Para la determinación del fósforo extractable se utilizó el método Bray-I
 - **pH:** En este parámetro se mide la concentración de iones hidrógeno [H⁺] en el suelo. El pH es un indicador de la actividad química y biológica del suelo. Esta determinación se trabajó con una relación 1:2, tanto en agua (pH activo) como en KCL 1N (pH potencial) con un método instrumental.
 - **Salinidad del suelo:** La Conductividad eléctrica es consecuencia de la presencia de sales en el suelo. El contenido salino del suelo suele medirse de forma indirecta y para obtener valores comparables siempre se mide a una temperatura fija de 25° C. Para su medición, se realizó una solución 1:5 en agua con un conductivímetro.

Las muestras de hojarasca y mantillo se pesaron, posteriormente se secaron en la estufa a 85° C hasta obtener peso constante, con la finalidad de eliminar toda el agua presente en las muestras, finalmente se secaron y se registró el peso seco de cada una de las muestras.



Fig. 17 Determinaciones en laboratorio de parámetros químicos del suelo. Nitrógeno (a, c, d), Fósforo (b, e, g), Conductividad eléctrica (f, h) y MOS (i, j). (Fotos tomadas por Mitzi Y. Ayala C.).

8.4. PROCESAMIENTO DE DATOS

Una vez realizados los análisis químicos, se construyó una base que incluía los datos de agua y suelo y un listado de las especies encontradas junto con su densidad por sitio. El análisis estadístico se trabajó con ayuda de los programas de SAS y Statgraphics Centurion XV en estos se realizó primeramente y un análisis de correlación múltiple con todas las variables determinadas para ambos sistemas, como un primer acercamiento para demostrar las interacciones presentes entre las propiedades del suelo y el agua.

Posteriormente, a partir de los valores que presentaron correlaciones más altas, se realizó un análisis de Componentes principales con la finalidad de reducir el número de variables con mayor peso estadístico, extrayendo los componentes que explique el mayor porcentaje del funcionamiento del ecosistema.

Por último, usando las variables de mayor peso estadístico, determinadas a partir de la prueba de componentes principales, se realizó un análisis de Correlaciones canónicas para identificar el tipo de interacciones que se presentan entre el sistema terrestre y acuático y las propiedades de cada uno que intervienen en estas interacciones. Finalmente se realizaron gráficas para una mejor comprensión de nuestros parámetros, en función de la altitud a la que se encuentran nuestros sitios y otras para observar el comportamiento mensual.



9. RESULTADOS

Los 18 sitios de muestreo utilizados para este estudio, se indican en la Figura 18, las fechas de muestreo de cada uno de los sitios se encuentran en el Anexo I.

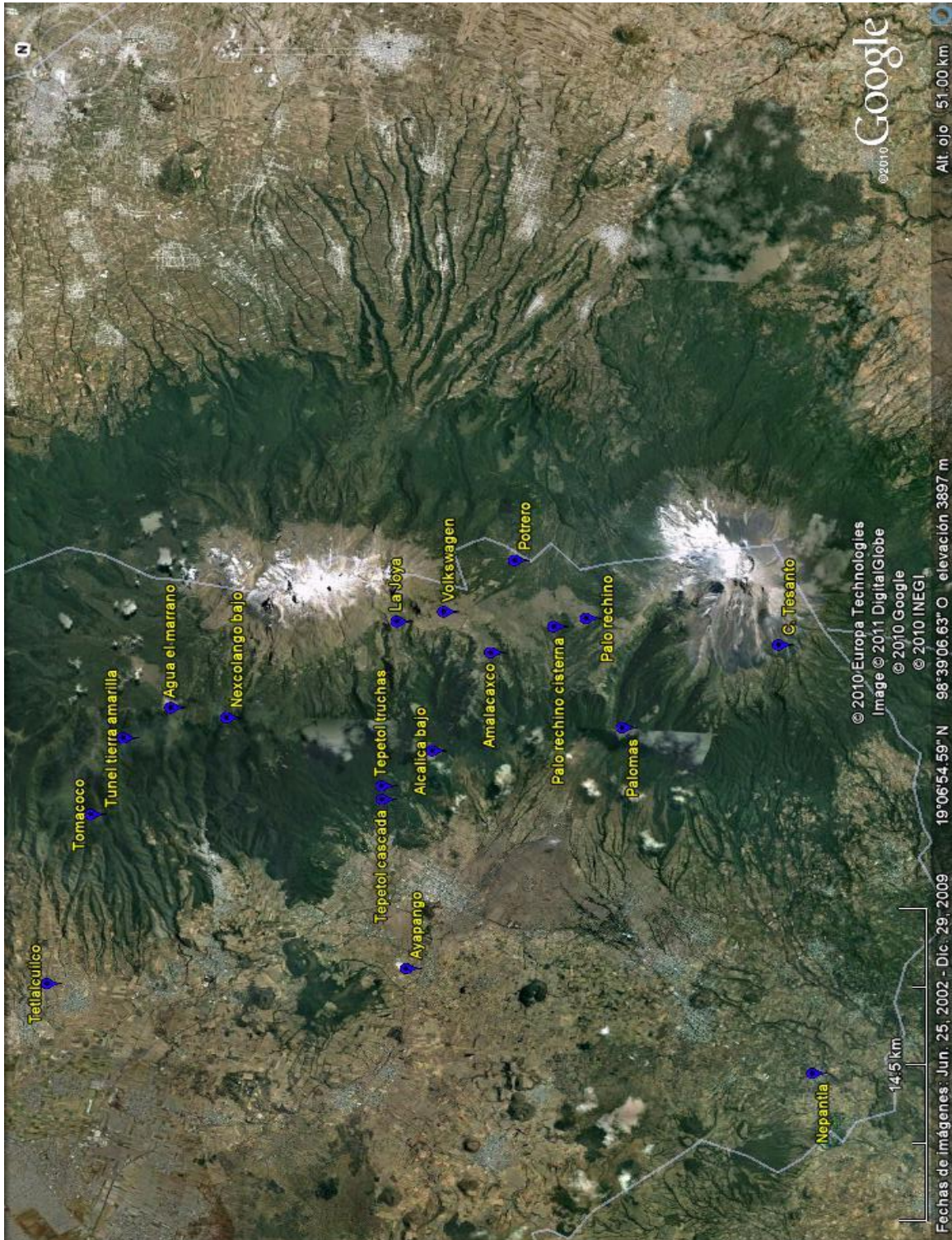


Fig. 18 Sitios de muestreo dentro del PNI-P.



El Cuadro 5 muestra la descripción de las características específicas de los sitios estudiados, distribuidos en un intervalo altitudinal de 1987 a 3883 m; su ubicación en UTM-14-NAD-27, el tipo de vegetación y las especies vegetales dominantes en cada uno.

Cuadro 5. Condición fisiográfica y biológica de los sitios estudiados dentro del PNI-P.

No.	Localidad	Altitud	Oeste	Norte	Uso de suelo	Tipos de vegetación		Especies Dominantes
1	Amalacaxco	3520	535323	2112480	1	Forestal	Asociación bosque-pastizal	<i>Pinus hartwegii</i>
2	Tetlalcuilco	2700	519500	2129850	1	Forestal	Bosque de coníferas	<i>Abies religiosa</i>
3	Potrero	3221	539397	2111719	1	Forestal	Bosque de coníferas	<i>Abies religiosa</i> <i>Pinus patula</i>
4	La joya	3832	536501	2116231	2	Forestal-pastizal	Pastizal	Zacatonal alpino
5	Palomas	2949	532212	2107046	3	Recreativo-forestal	Bosque de coníferas	<i>Abies religiosa</i> <i>Cupressus</i> sp.
6	Volkswagen	3883	537010	2114406	2	Forestal-pastizal	Pastizal	Zacatonal alpino
7	Nexcolango bajo	3489	531957	2122821	1	Forestal	Bosque de coníferas	<i>Abies religiosa</i> <i>Pinus pseudostrabus</i>
8	Agua el marrano	3522	532298	2125050	1	Forestal	Vegetación secundaria	ND
9	Túnel tierra amarilla	3311	530852	2126924	1	Forestal		
10	Alcalica bajo	2865	530806	2114617	1	Forestal		
11	Tomacoco	2567	527360	2128180	4	Agrícola	Bosque de coníferas	<i>Pinus pseudostrabus</i> ,
12	Tepetol Cascada	2780	528500	2116550	3	Recreativo-forestal		
13	Tepetol truchas	2634	529123	2116586	5	Acuícola-recreativo	Bosque de coníferas	<i>Pinus montezumae</i> , <i>Abies religiosa</i>
14	Palo rechino	3642	536986	2108782	6	Forestal-ganadero	Asociación bosque-pastizal	<i>Abies religiosa</i> , <i>Pinus pseudostrabus</i>
15	Cisterna Palo Rechino	3659	536566	2110036	6	Forestal-ganadero	Asociación bosque-pastizal	<i>Abies religiosa</i>
16	Nepantla	1987	516771	2098365	7	Urbano		
17	Ayapango	2433	520911	2115233	7	Urbano	Cultivos agrícolas	ND*
18	C. Tesanto	3116	534580	2101150	1	Forestal		

*ND. No determinado.

Con los valores de cada uno de los parámetros estudiados tanto para los sistemas acuáticos como para los terrestres, se generó una base de datos. El Cuadro 6 muestra las propiedades físicas y químicas del suelo en los ecosistemas ribereños que forman parte de este trabajo y las abreviaturas usadas para cada una de ellas.



Cuadro 6. Propiedades físicas y químicas determinadas para agua y suelo y las abreviaturas para cada una de ellas.

SUELO		AGUA	
ABREVIATURA	PROPIEDADES	ABREVIATURA	PROPIEDADES
<i>T</i> suelo (°C)	Temperatura	<i>T</i> agua (°C)	Temperatura
<i>D</i> ap (g cm ⁻³)	Densidad aparente	<i>ST</i> D (mg L ⁻¹)	Sólidos totales disueltos
<i>Ph</i> um (%)	Porcentaje de humedad	<i>p</i> H A	pH del agua
<i>PEP</i> (%)	Porcentaje de espacio poroso	<i>Cond</i> (μS m ⁻¹)	Conductividad eléctrica
<i>Phum</i> h _j (%)	Porcentaje de humedad de la hojarasca	<i>COP</i> ₁ (mg L ⁻¹)	Carbono orgánico particulado
<i>Ch</i> _j (g m ⁻³)	Contenido de Carbono en la hojarasca	<i>NO</i> ₃ ⁻ (mg L ⁻¹)	Contenido de Nitratos
<i>Phum</i> CF (%)	Porcentaje de humedad en la capa de fermentación (mantillo)	<i>NO</i> ₂ ⁻ (μg L ⁻¹)	Contenido de nitritos
<i>CCF</i> (g m ⁻³)	Contenido de carbono en la capa de fermentación (mantillo)	<i>NH</i> ₄ ⁺ (mg L ⁻¹)	Contenido de amonio
<i>ARC</i> (%)	Porcentaje de arcilla	<i>P</i> totA (mg L ⁻¹)	Contenido de Fósforo total
<i>LIM</i> (%)	Porcentaje de limo	<i>ORTOA</i> (mg L ⁻¹)	Contenido de ortofosfatos
<i>ARE</i> (%)	Porcentaje de arena	<i>OD</i> (mg L ⁻¹)	Oxígeno disuelto
<i>pH</i> real	pH real o activo(H ₂ O)	<i>DBO</i> ₅ (mg L ⁻¹)	Demanda bioquímica de oxígeno
<i>pH</i> pot	pH potencial (KCl)	<i>DQO</i> (mg L ⁻¹)	Demanda química de oxígeno
<i>CE</i> ₁ ((μS m ⁻¹)	Conductividad eléctrica	<i>Atot</i> (CaCO ₃ , mg L ⁻¹)	Alcalinidad total
<i>PMOS</i> (%)	Porcentaje de materia orgánica	<i>Dca</i> (CaCO ₃ , mg L ⁻¹)	Dureza de Calcio
<i>PCS</i> (%)	Porcentaje de carbono.	<i>DT</i> (CaCO ₃ , mg L ⁻¹)	Dureza total
<i>PN</i> totS (%)	Porcentaje de Nitrógeno total		
<i>CN</i>	Relación C:N		
<i>P</i> ppm (mg kg ⁻¹)	Fósforo extractable (Bray I)		

Se registraron los valores máximos y mínimos para cada una de las propiedades de suelo analizadas en estos ecosistemas ribereños; a partir de las variables determinadas, se pudieron describir, de manera general, los suelos de los sitios en los que se trabajó (Cuadro 7). Los valores obtenidos para la densidad aparente, indicaron, según la NOM-021-RECNAT-2001, que nuestros suelos son muy diversos y van desde los orgánicos y/o volcánicos hasta los arenosos. En cuanto a su textura, los suelos analizados se clasificaron de francos a franco-arcillosos.

Para el caso del pH, tanto activo (determinado en relación 1:2 con agua), como potencial (determinado en relación 1:2 con KCl), la NOM-021 nos indica que los suelos de los sitios estudiados en su mayoría tienen carácter ácido y van de fuerte a moderadamente ácidos, por su origen volcánico; se reportan algunos clasificados como medianamente alcalinos, pero solo en los sitios donde se encuentra algún asentamiento urbano.

En cuanto a la salinidad, los suelos estudiados estuvieron entre moderadamente salinos a suelos con salinidad despreciable, estos se caracterizan en función de su conductividad eléctrica de acuerdo a los parámetros establecidos en la NOM-021. En cuanto al contenido de materia orgánica, los suelos estudiados fueron diversos, sus valores abarcaron el espectro completo de clasificación de acuerdo a la concentración de materia orgánica, desde los de contenido muy bajo hasta suelos con contenido muy alto.

Los suelos de estos sitios fueron pobres en nutrientes, según la NOM-021; sus contenidos de Nitrógeno se encontraron entre los valores de muy bajos a medios, mientras que los contenidos de fósforo, son bajos en todos los sitios.



Cuadro 7. Propiedades del suelo ribereño del PNI-P.

	Promedio	Mínimo	Máximo
Tsuelo (°C)	9.25	3	15
Dap (g cm ⁻³)	0.65	0.15	1.39
Phum (%)	31.48	8.4	63.04
PEP (%)	75.27	47.55	94.22
Phumhj (%)	36.03	12.98	58.69
Chj (g m ⁻³)	345.02	40.48	941.12
PhumCF (%)	34.64	11.53	58.82
CCF (g m ⁻³)	1957.89	272.1	5069.76
ARC (%)	8.54	4.16	14.16
LIM (%)	21.12	5.28	35.28
ARE (%)	70.33	58.5	90.56
pHreal	5.65	4.32	7.48
pHpot	5.13	4.35	6.29
CE1 ((μS m ⁻¹))	0.095	0.03	0.30
PMOS (%)	8.95	1.85	20.73
PCS (%)	5.20	1.07	12.05
PNtotS (%)	0.20	0.04	0.42
CN	32.71	19.68	214.07
Pppm (mg kg ⁻¹)	0.27	0.08	0.52

De la misma forma que para los parámetros del suelo, a partir del intervalo de valores encontrados para cada una de las propiedades del agua analizadas (Cuadro 8) y, en base con la NOM-001-SEMARNAT-1996, se clasificaron de acuerdo a la cantidad de contaminantes básicos encontrados en ella. Los sistemas estudiados presentaron temperaturas, que, aunque bajas en la escala centígrada, se encuentran dentro de las temperaturas aceptadas para sistemas naturales. En cuanto al pH del agua, en estos sistemas se encontró “dentro de los límites recomendados para aguas naturales”.

Para el caso de la demanda bioquímica de oxígeno (DBO₅), los valores encontrados sitúan estos escurrimientos dentro de los límites permisibles para aguas naturales con tres usos; riego agrícola, público urbano y protección de vida acuática. Sucede lo mismo con el contenido de nitrógeno y de fósforo, aunque, los valores presentados para el contenido de este último, los ubican únicamente como de uso para riego agrícola y público urbano, ya que, los valores máximos para el contenido de fósforo total en estos sistemas fueron superiores al límite permisible para la protección de la vida acuática.

Cuadro 8. Propiedades de las corrientes muestreadas en el PNI-P.

	Promedio	Mínimo	Máximo
Tagua (°C)	9.36	6	17
STD (mg L ⁻¹)	66.90	24.33	454.0
pH A	6.86	5.86	8.36
Cond (μS m ⁻¹)	134.31	49.330	909.
COP1 (mg L ⁻¹)	604.91	203.13	1331.66
NO ₃ ⁻ (mg L ⁻¹)	0.11	0.05	0.41
NO ₂ ⁻ (μg L ⁻¹)	0.83	0.0	7.70
NH ₄ ⁺ (mg L ⁻¹)	0.16	0.02	0.68
PtotA (mg L ⁻¹)	0.46	0.07	6.36
ORTOA (mg L ⁻¹)	0.052	0.0	0.12
OD (mg L ⁻¹)	5.83	2.27	7.88
DBO ₅ (mg L ⁻¹)	4.23	0.44	6.35
DQO (mg L ⁻¹)	154.35	0.0	718.06
Atot (CaCO ₃ mg L ⁻¹)	31.10	4.28	280.8
Dca (CaCO ₃ mg L ⁻¹)	113.98	15.04	941.74
DT (CaCO ₃ mg L ⁻¹)	158.89	27.16	1334.13



9.1. VEGETACIÓN

Un listado de las especies vegetales encontradas, a lo largo de los transectos marcados en cada sitio de estudio dentro del PNI-P se presentan en el Cuadro 9 y en las figuras 19 a 22 una serie de fotografías de los mismos, que fueron usadas como apoyo para el reconocimiento e identificación de las diferentes especies.

Cuadro 9. Plantas ribereñas adyacentes a afluentes permanentes del PNI-P.

FAMILIA	NOMBRE CIENTÍFICO	FIG. #	LOCALIDAD
CARYOPHYLLACEAE	<i>Stellaria cuspidata</i> Willd	1	1, 3, 5, 18
CONVOLUVLACEAE	<i>Dichondra sericea</i> Sw.	2	3, 5, 18
ASTERACEAE	<i>Senecio angulifolius</i> DC.	3	3, 4, 18
ROSACEAE	<i>Alchemilla pinnata</i> Ruiz & Pavón	4	3, 4, 18
LAMIACEAE	<i>Stachys rotundifolia</i> Sessé & Moc.	5	5
CARYOPHYLLACEAE	<i>Spergularia mexicana</i> Hemsl.	6	5
ROSACEAE		7	
PORTULACACEAE		8	
CARYOPHYLLACEAE		9	
ASPLENIACEAE		10	
ASTERACEAE		11	
ASTERACEAE		12	
SAXIFRAGACEAE	<i>Heuchera orizabensis</i> Helms	13	5
ASTERACEAE	<i>Eupatorium rivale</i> Greenm	14	4, 3
ASTERACEAE	<i>Senecio cinerarioides</i> A. B. K.	15	1, 2, 3, 5, 14, 15
ASTERACEAE	<i>Senecio multidentalis</i> Sch. Bip. Ex. Hemsl.	16	1, 2, 3, 5, 14, 15
SOLANACEAE	<i>Lycianthes moziniana</i> (Dunal) Bitter.	17	5
MARCHANTIACEAE	<i>Marchantia</i> sp.	18	Todas
ROSACEAE	<i>Potentilla</i> sp.	19	1, 3, 4, 5, 6, 14, 15, 18
SALICEACEAE	<i>Salix paradoxa</i> H.B.K.	20	3
ASTERACEAE	<i>Senecio multidentalis</i> Sch. Bip. Ex. Hemsl.	21	1, 2, 3, 5, 14, 15
LAMIACEAE	<i>Salvia elegans</i> Vahl	22	5, 18
ASTERACEAE	<i>Senecio osizabensis</i> Sch. Bip. Ex. Hemsl.	23	1, 3, 5, 14, 15
ASTERACEAE	<i>Eupatorium glabratum</i> H.B.K.	24	5, 18
ASTERACEAE	<i>Senecio</i> sp.	25	Todas
ASTERACEAE	<i>Gnaphalium roseum</i> H.B.K.	26	1, 3, 4, 5, 6, 14, 15, 18
DRYOPTERIDACEAE	<i>Polystichum rachichlaena</i> Fée. Mém. foug	27	5, 18
ASTERACEAE		28	
ASTERACEAE		29	
VERBENACEAE		30	
ASTERACEAE		31	
ONAGRACEAE	<i>Fuchsia microphylla</i> H.B.K.	32	7, 10
DRYOPTERIDACEAE	<i>Dryopteris cinnamomea</i> (Cav.) C. Chr.	33	7
ASPLENIACEAE	<i>Asplenium monanthes</i> L.	34	4, 7
LAMIACEAE	<i>Salvia polystachya</i> Ort.	35	16, 18
ASPLENIACEAE	<i>Polystichum</i> sp.	36	5
THELYPTERIDACEAE	<i>Thelypteris</i> sp.	37	7, 8, 9
THELYPTERIDACEAE	<i>Thelypteris</i> sp.	38	7, 8, 9
POLIPODIACEAE	<i>Polypodium</i> sp.	39	5
ASTERACEAE	<i>Senecio barba-johannis</i> DC.	40	7
ROSACEAE	<i>Alchemilla pinnata</i> Ruiz & Pavón	41	7
SCROPHULARIACEAE	<i>Penstemon gentianoides</i> H.B.K.	42	1, 14
MALVACEAE	<i>Sida haenkeana</i> Presl.	43	5, 17, 18
ASTERACEAE	<i>Eupatorium pazcuarensis</i> H.B.K.	44	18
LAMIACEAE	<i>Salvia</i> sp.	45	5, 18
ASTERACEAE	<i>Gnaphalium semiaplexicaule</i> DC.	46	1, 3, 5, 14, 15, 18
ERICACEAE	<i>Arbutus</i> sp.	47	18
ASTERACEAE	<i>Tagetes erecta</i> L.	48	1, 3, 5, 14, 15, 18
FABACEAE	<i>Lupinus montanus</i> H.B.K.	49	1, 3, 4, 5, 6, 14, 15, 18



ASTERACEAE	<i>Eupatorium schaffneri</i> Sch. Bip.	50	10
ADIATACEAE	<i>Adiantum andicola</i> Liebm. Mexic. Berng	51	7
ONAGRACEAE	<i>Lopezia racemosa</i> Cav.	52	16
ASTERACEAE	<i>Tithonia tubiformis</i> (Jacq.) Cass.	53	17
BUDDLEIACEAE	<i>Buddleia cordata</i> H.B.K.	54	10
ASTERACEAE	<i>Tagetes foetidissima</i> DC.	55	10
ONAGRACEAE	<i>Fuchsia microphylla</i> H.B.K.	56	7, 10
DRYOPTERIDACEAE	<i>Pleopeltis polylepis</i> (Roem. Ex Kze.) T. Moore.	57	5
ASTERACEAE	<i>Cirsium ehrenbergii</i> Sch. Bip.	58	1, 4, 6, 14, 15

Se identificaron 23 familias de plantas vasculares. En sitios con altitud mayor a 3600 m y en el ecotono de la pradera de alta montaña-bosque de pino, se encontraron monocotiledóneas de las familias Poaceae, Cyperaceae y Fabaceae (*Lupinus montanus* Kunt). En el intervalo de 2700 a 3400 m., se registró el mayor número de familias como Asteraceae, Aspleniaceae, Rosaceae, Caryophyllaceae y Lamiaceae. También se observó la presencia de vegetación secundaria como *Penstemon getianooides* H.B.K, *Tagetes erecta* L, *Tithonia tubiformis* (Jacq.) Cass, *Buddleia cordata* H.B.K, en sitios con algún tipo de perturbación.

A partir de la abundancia de las diferentes familias en los ecosistemas muestreados (Cuadro 10), se apreció que la más abundante es la familia Asteraceae, representada por 21 especies. Otras de las familias mejor representadas y con una alta abundancia, fueron Lamiaceae, Aspleniaceae, Caryophylleaceae, Dryopteridaceae, Rosaceae, Onagraceae y Thelypteridaceae.

Cuadro 10. Abundancia de las familias de plantas ribereñas del PNI-P.

FAMILIA	No de especies	Abundancia	FAMILIA	No de especies	Abundancia
ASTERACEAE	21	5.33	ERICACEAE	1	0.56
LAMIACEAE	4	2.00	FABACEAE	1	0.56
ASPLENIACEAE	3	1.24	MALVACEAE	1	0.56
CARYOPHYLLACEAE	3	1.24	MARCHANTIACEAE	1	0.56
DRYOPTERIDACEAE	3	1.24	POLIPODIACEAE	1	0.56
ROSACEAE	3	1.24	PORTULACACEAE	1	0.56
ONAGRACEAE	2	1.00	SALICEACEAE	1	0.56
THELYPTERIDACEAE	2	1.00	SAXIFRAGACEAE	1	0.56
ADIATACEAE	1	0.56	SCROPHULARIACEAE	1	0.56
BUDDLEIACEAE	1	0.56	SOLANACEAE	1	0.56
CONVOLUVLACEAE	1	0.56	VERBENACEAE	1	0.56

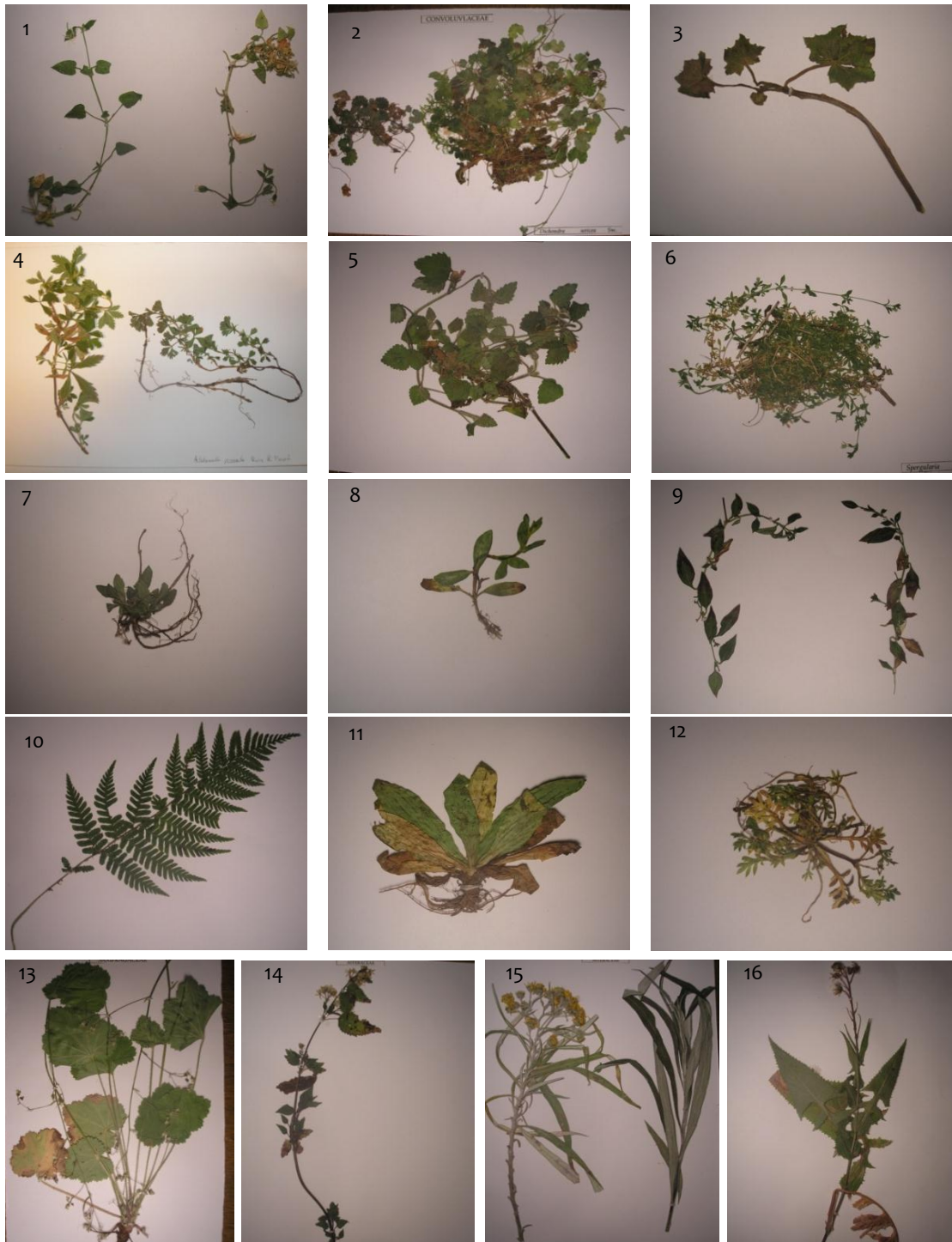


Fig. 19 Especies vegetales colectadas y determinadas.

1) *Stellaria cuspidata* Willd, 2) *Dichondra sericea* Sw, 3) *Senecio angulifolius* DC, 4) *Alchemilla pinnata* Ruíz & Pavón, 5) *Stachys rotundifolia* Sessé & Moc, 6) *Spergularia mexicana* Helms, 7) ROSASEAE, 8) PORTULACACEAE, 9) CARYOPHYLLACEAE, 10) ASPLENIACEAE, 11) ASTERACEAE, 12) ASTERACEAE, 13) *Heuchera orizabensis* Helms, 14) *Eupatorium rivale* Greenm, 15) *Senecio cinerarioides* A.B.K., 16) *Senecio multidentalis* Sch. Bip. Ex. Hemsl
(Fotos tomadas por Mitzi Y. Ayala C.).



Fig. 20 Especies vegetales colectadas y determinadas.

17) *Lycianthes moziniana* (Dunal) Bitter, 18) *Marchantia* sp., 19) *Potentilla* sp., 20) *Salix paradoxa* H.B.K., 21) *Senecio multidentalis* Sch. Bip. Ex. Hemsl., 22) *Salvia elegans* Vahl, 23) *Senecio orizabensis* Sch. Bip. Ex. Hemsl., 24) *Eupatorium glabratum* H.B.K., 25) *Senecio* sp., 26) *Gnaphalium roseum* H.B.K., 27) *Polystichum rachichlaena* Fée. Mém. Foug., 28) ASTERACEAE, 29) ASTERACEAE, 30) VERBENACEAE.

(Fotos tomadas por Mitzi Y. Ayala C.).



Fig. 21 Especies vegetales colectadas y determinadas.

31) ATERACEAE, 32) *Fuchsia microphylla* H.B.K., 33) *Dryopteris cinnamonea* (Cav.) C. Chr., 34) *Asplenium monanthes* L., 35) *Salvia polystachya* Ort., 36) *Polystichum* sp., 37) *Thelypteris* sp., 38) *Thelypteris* sp., 39) *Polypodium* sp., 40) *Senecio barba-johannis* DC., 41) *Alchemilla pinnata* Ruiz & Pavón, 42) *Penstemon gentianoides* H.B.K., 43) *Sida haenkeana* Presl., 44) *Eupatorium pazcuarensis* H.B.K., 45) *Salvia* sp., 46) *Gnaphalium semiamplexicaule* DC. (Fotos tomadas por Mitzi Y. Ayala C.).



Fig. 22 Especies vegetales colectadas y determinadas.

47) *Arbutus* sp., 48) *Tagetes erecta* L., 49) *Lupinus montanus* H.B.K., 50) *Eupatorium schaffneri* Sch. Bip., 51) *Adiantum andicola* Liebm. Mexic. Bergn, 52) *Lopezia racemosa* Cav., 53) *Tithonia tubiformis* (Jacq) Cass., 54) *Buddleia cordata* H.B.K., 55) *Tagetes foetidissima* DC., 56) *Fuchsia microphylla* H.B.K., 57) *Pleopeltis polylepis* (Roem. Ex Kze.) T. Moore, 58) *Cirsium ehrenbergii* Sch. Bip. (Fotos tomadas por Mitzi Y. Ayala C.).



9.2. ANÁLISIS DE CORRELACIÓN MÚLTIPLE

Con la ayuda del paquete STATGRAPHICS Centurión XV, se realizó un análisis de correlación múltiple considerando todas las variables determinadas, para suelo y agua. Se seleccionaron las variables encontradas con correlaciones significativas ($P < 0.05$) y de ellas las de valor de correlación más alta ($r > 0.5$). Las que cumplieron con lo anterior fueron; pH potencial, temperatura, C:N, % de arcilla, CE, conservación, % de N-total, uso de suelo, altitud, % de humedad, % de limo, fósforo extractable y % de C para el suelo, mientras que las del agua fueron; dureza total y de calcio, alcalinidad total, Demanda Química de Oxígeno, fósforo total, ortofosfatos, Demanda Bioquímica de Oxígeno a los 5 días, oxígeno disuelto, velocidad de corriente, conductividad y amonio.

La Figura 23 permite observar los tipos de usos de suelo existentes en esta región, en relación con la altitud a la que se encuentran. Se diferenciaron siete usos de suelo en los sitios de muestreo; forestal-pastizal, con una apreciable asociación entre bosques de pino y pastizales alpinos o bien el ecotono entre estos dos ecosistemas, se ubicaron únicamente a más de 3700 m. Siguiendo el gradiente altitudinal, se encuentran sitios a menor altitud denominados forestal-ganadero, con zonas de pastizal, usadas para el pastoreo del ganado, situados entre los 3500-3700 m. En el intervalo de 2500 a 3500 m, se localizaron zonas forestales no perturbadas y/o destinadas para actividades de ecoturismo, cuyo uso de suelo se denominó recreativo-forestal. En altitudes menores a los 2500 metros se hallaron algunas zonas empleadas para el cultivo de truchas. Finalmente, las zonas agrícolas se encontraron en áreas más bajas, con cercanía a los sitios con asentamientos humanos importantes.

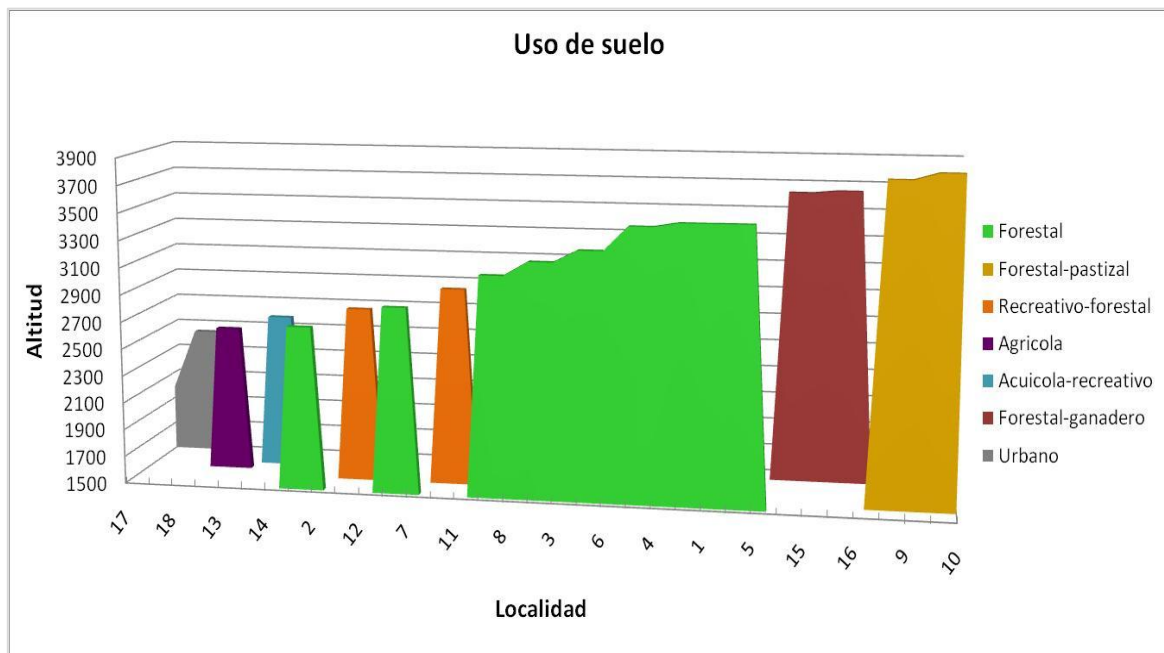


Fig. 23 Uso de suelo en relación con la altitud.



En la Figura 24 se representa el porcentaje correspondiente a cada uno de los usos de suelo considerando las 18 localidades. Se aprecia que para esta zona del parque, el mayor porcentaje lo ocupan las zonas forestales (44%), con 11% se encuentra el forestal-pastizal, forestal-ganadero, recreativo-forestal y urbano; mientras que los menos representados fueron el acuícola-recreativo y el agrícola, con apenas el 6% cada uno.

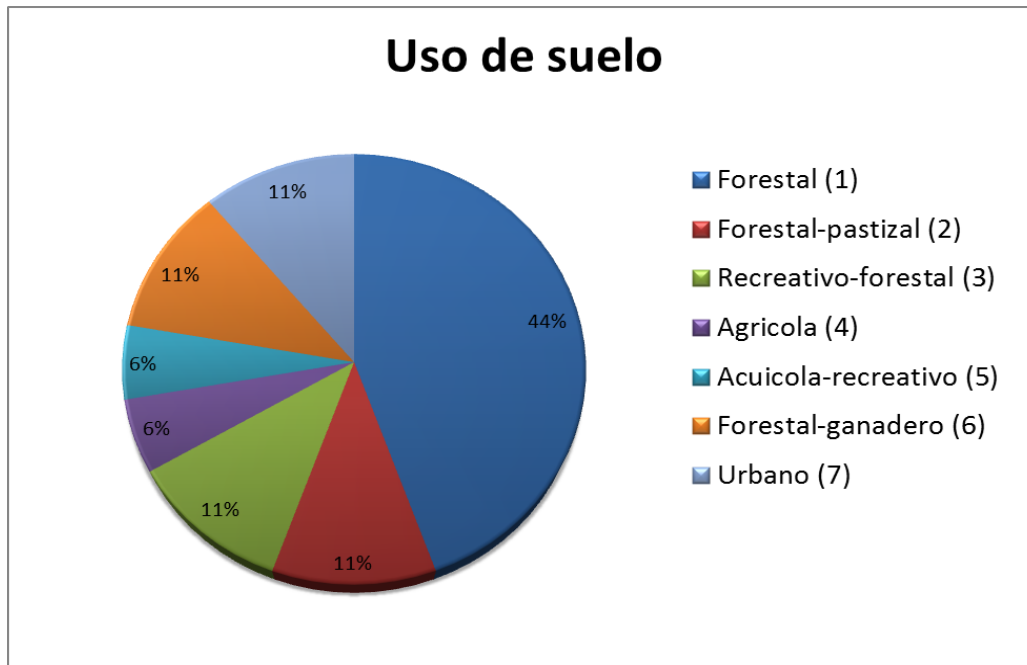


Fig. 24 Porcentajes de uso de suelo.

En la Figura 25 se aprecian los parámetros relacionados con el uso de suelo como el grado de conservación, la cantidad de NH_4^+ , la conductividad y los STD, estos gráficos son un bosquejo del estado de salud que presentan los suelos del Parque, tomando como base las actividades que se realizan en ellos.

La cantidad y tipo de actividades que se desarrollan, así como el manejo que se tiene del suelo en un sitio modifican su estado de conservación y/o la calidad del mismo. Esto se aprecia por el comportamiento inverso del uso de suelo en relación con el estado de conservación de cada sitio.

Los diferentes usos que se le dan al suelo implican el aporte de diversas sustancias o materiales, debido a procesos naturales o artificiales, y su acumulación en el suelo ribereño. Los suelos pueden ser lavados por la corriente lo que se refleja en la cantidad de sólidos disueltos y la conductividad del agua.

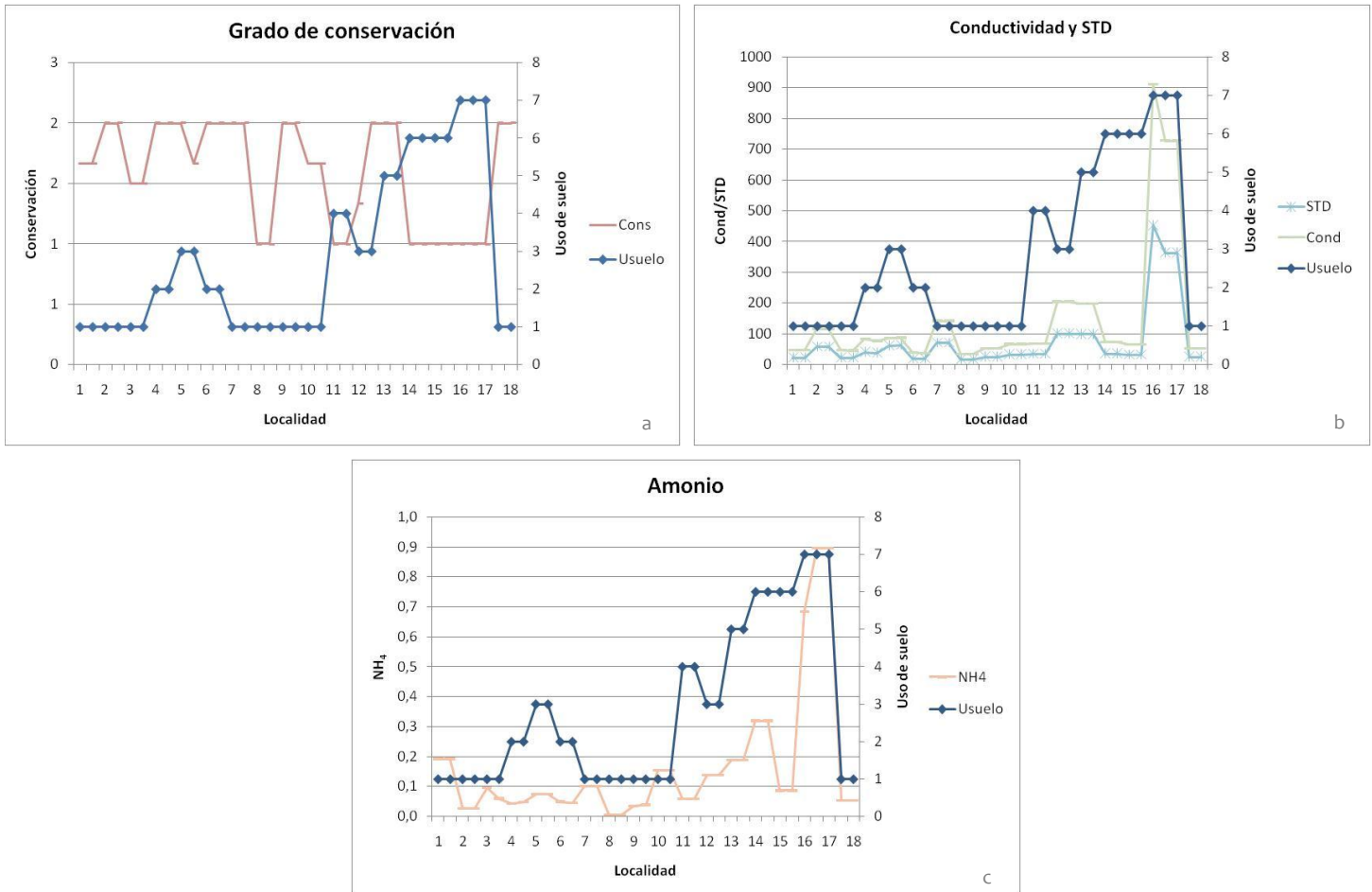


Fig. 25 Parámetros relacionados con el uso de suelo (Usuelo).
a) Conservación (Cons), b) Conductividad (Cond) y Sólidos totales disueltos (STD),
c) Amonio (NH₄).

En las Figuras. 26 y 27 se muestra el comportamiento de algunos parámetros físicos, químicos y nutrimentales, en relación con la altitud, se puede distinguir la tendencia negativa de las temperaturas en relación con la altitud, ya que, conforme la altitud aumenta, las temperaturas disminuyen, a pesar de que estas son influenciadas por otros factores como la estación del año, la hora del muestreo, el porcentaje de nubosidad, la abundancia y densidad de la vegetación, entre otras.

Los sólidos totales disueltos y la conductividad eléctrica del agua presentan una relación negativa con la altitud, por lo que se observan lecturas más altas a menores altitudes. Por otro lado, el pH y la demanda de oxígeno también tuvieron un comportamiento inverso a la altitud.

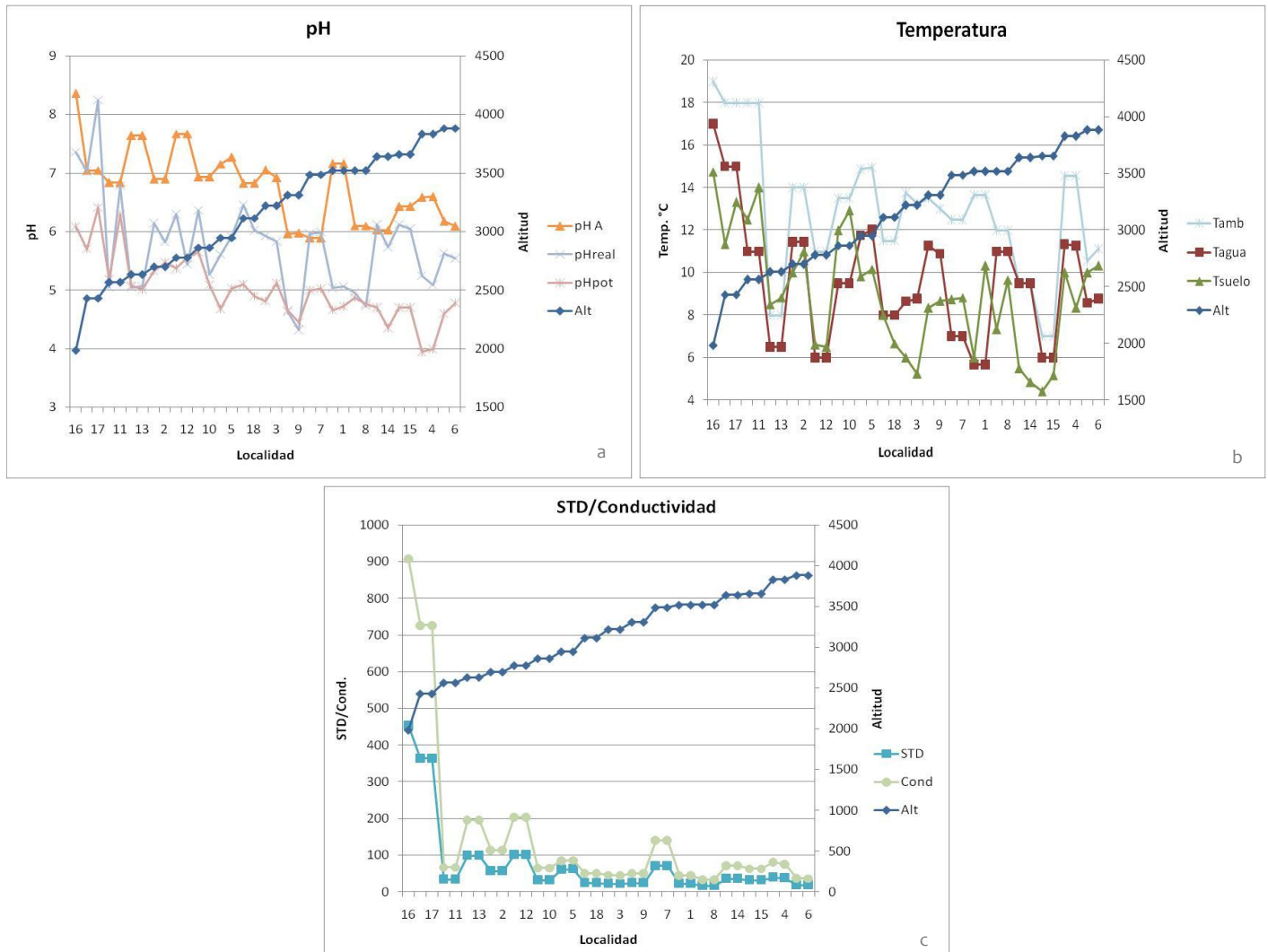


Fig. 26 Parámetros físicos relacionados con la altitud (Alt).
a) pH del agua (pHA), pH activo (pHreal) y pH potencial (pHpot), b) temperatura ambiente (Tamb), temperatura del agua (Tagua) y temperatura del suelo (Tsuelo), c) Sólidos totales disueltos (STC) y Conductividad (Cond).

Para el caso de la cantidad de Carbono Orgánico Particulado, este presentó un comportamiento inverso con la altitud; este efecto también se observó para el fósforo disuelto en agua cuantificado como fósforo total y ortofosfatos. Estas relaciones están influenciadas por las actividades realizadas bajo los diferentes usos de suelo presentes de acuerdo al gradiente altitudinal.





Cuando se presenta disminución en la temperatura ambiente, se reduce la cantidad de calor en los sistemas agua y suelo disminuyendo la temperatura de ambos, esto está representado en la Figura 28. Igualmente se distingue un comportamiento inverso para pH del suelo y conductividad eléctrica, en relación con la temperatura ambiente, ya que estos parámetros aumentaron con la altitud. A pesar de este comportamiento, las temperaturas no están necesariamente determinadas por el gradiente altitudinal ya que esta depende también de la estación del año en la que se pueda tomar la muestra.

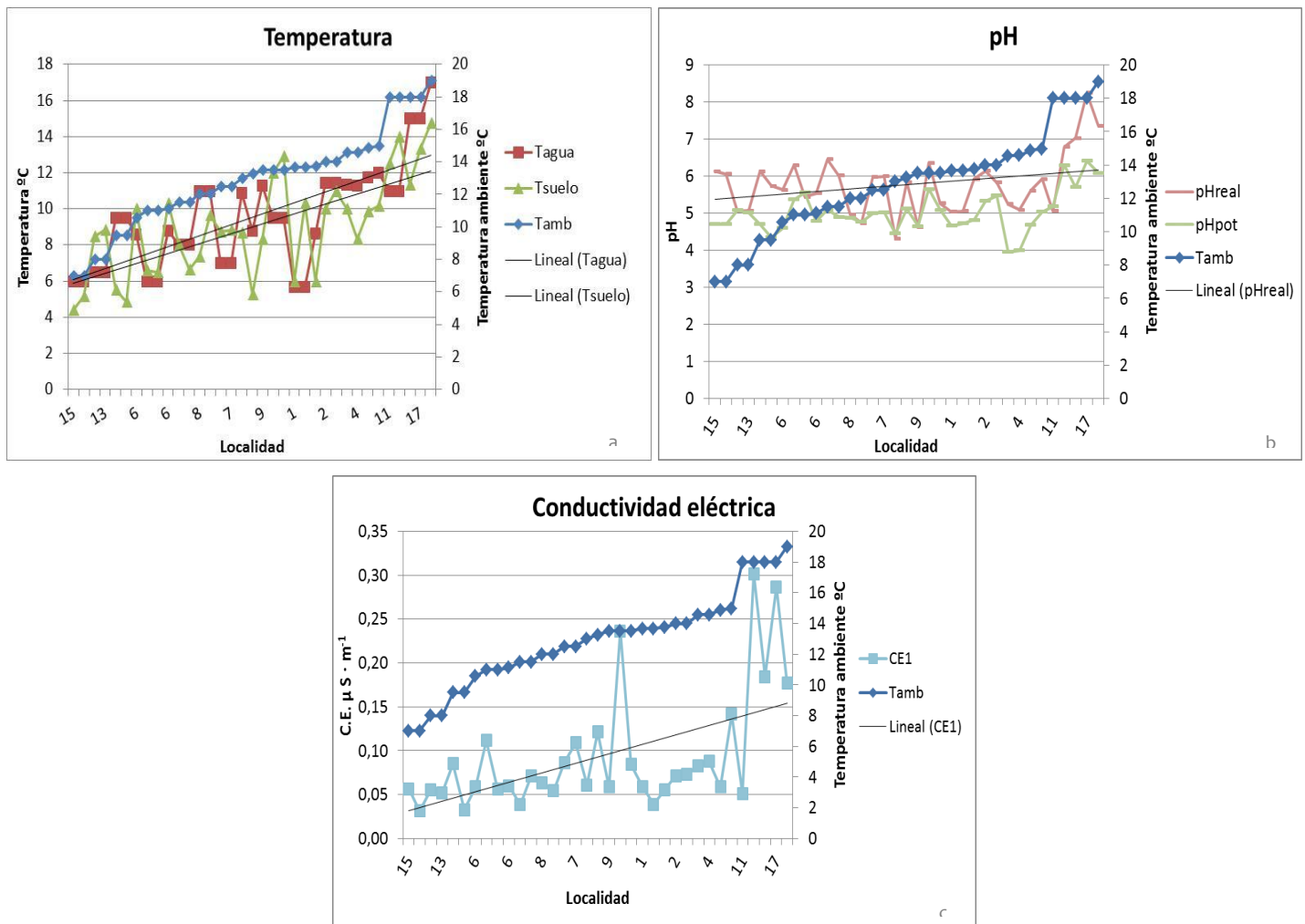


Fig. 28 Parámetros relacionados con la temperatura ambiente (Tamb).
a) Temperatura del agua (Tagua) y suelo (Tsuelo), b) pH activo del suelo (pHreal) y pH potencial (pHpot), c) Conductividad eléctrica del suelo (CE).



La Figura 29 muestra el comportamiento del porcentaje de humedad del suelo y el de la capa de fermentación. En los sitios que presentaron valor de cero, las muestras no fueron colectadas o no existía capa de fermentación en ellos. La mayoría de sitios donde hay ausencia de capa de fermentación fueron de pastizal, ya que este impide la acumulación de materia orgánica en el suelo, por la cobertura que presentan los pastos y la ausencia de vegetación de tipo arbustiva o arbórea, lo que reduce la presencia de hojarasca en estos suelos, evitando que se forme la capa de fermentación.

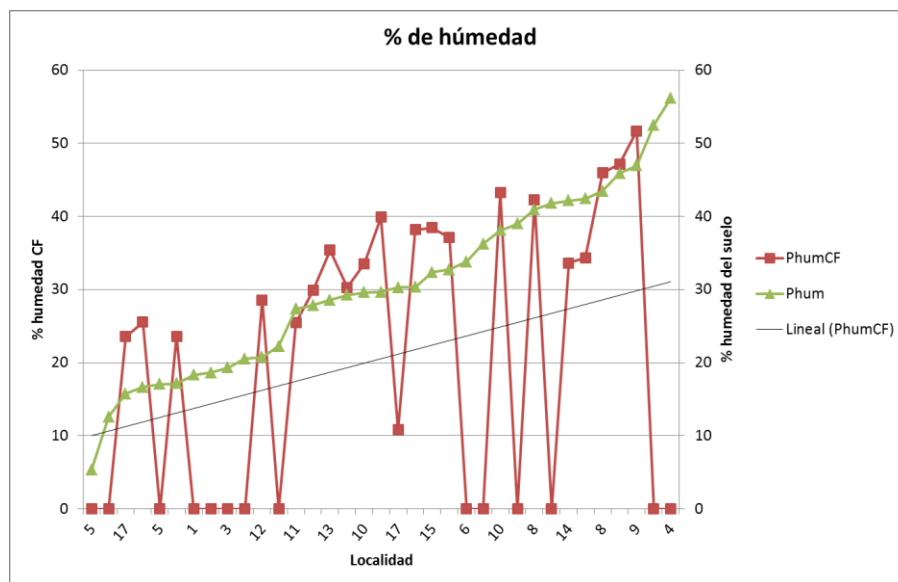


Fig. 29 Relación entre el % de humedad del suelo (Phum) y el de la capa de fermentación (PhumCF).

En la Figura 30 se observó un aumento de la DQO, la alcalinidad total, las durezas, la cantidad de fósforo total y la de nitratos en relación con el aumento de la temperatura del agua, mientras que la DBO₅ tiene un comportamiento inverso. La temperatura del agua está influenciada por factores externos como; altitud del sitio, temperatura ambiente, época del año e inclusive la hora del muestreo. La temperatura del sistema afectó, sobre todo, las concentraciones de las sales y los nutrientes en el agua.

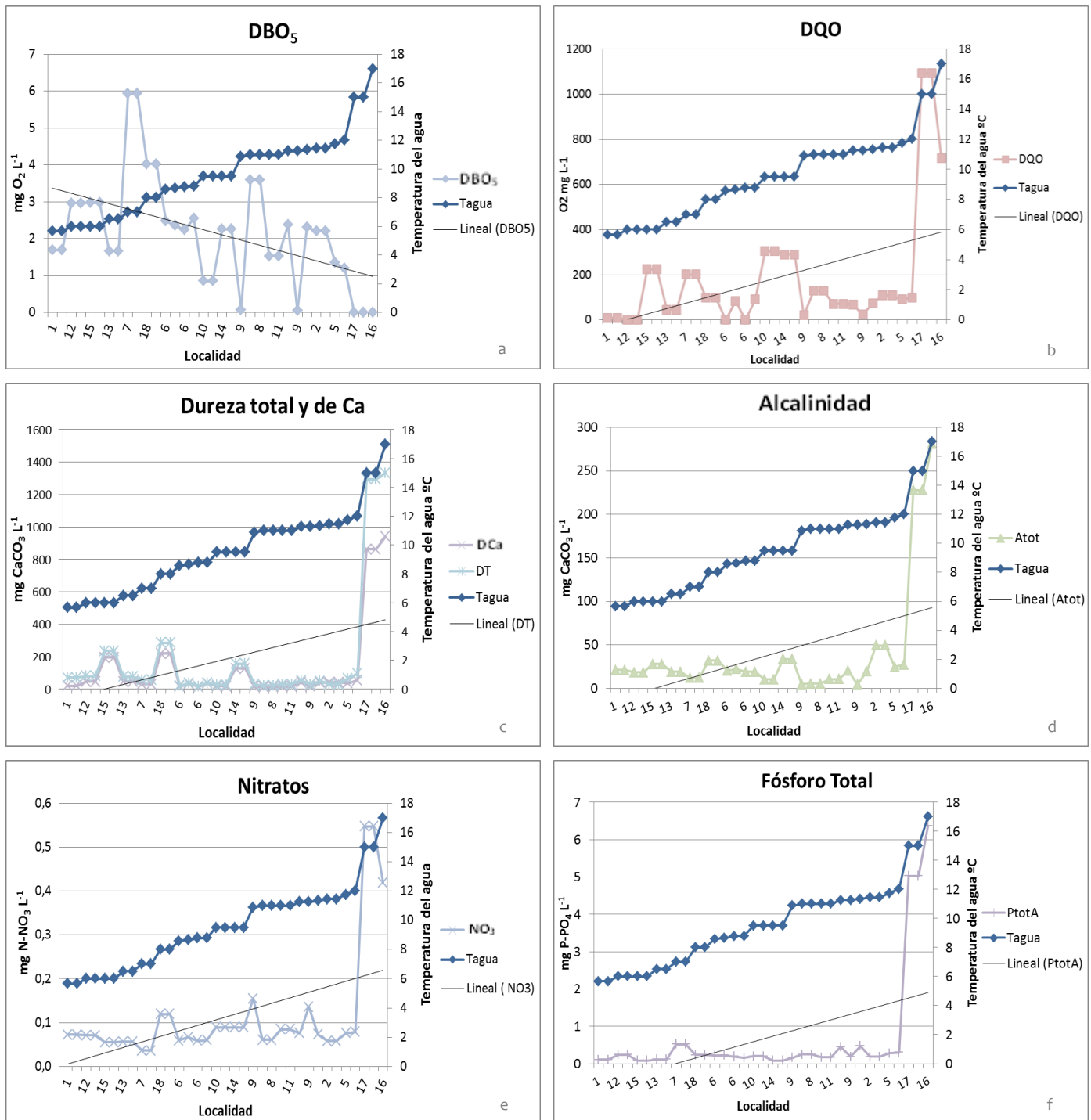


Fig. 30 Parámetros del agua en relación con la temperatura del agua (Tagua).

a) Demanda bioquímica de oxígeno (DBO₅), b) Demanda química de oxígeno (DQO), c) Dureza de Calcio (DCa) y Total (DT), d) Alcalinidad (Atot), e) Concentración de nitratos (NO₃), f) fósforo total (PtotA).



Por otro lado, el aumento en la temperatura del suelo afecta de forma positiva; al pH activo, pH potencial, la conductividad eléctrica y la cantidad de ortofosfatos en el agua, esto lo muestra la Figura 31. Al igual que la temperatura del agua, la del suelo es afectada por las condiciones externas que se dan durante cada muestreo; ambas presentaron un comportamiento similar.

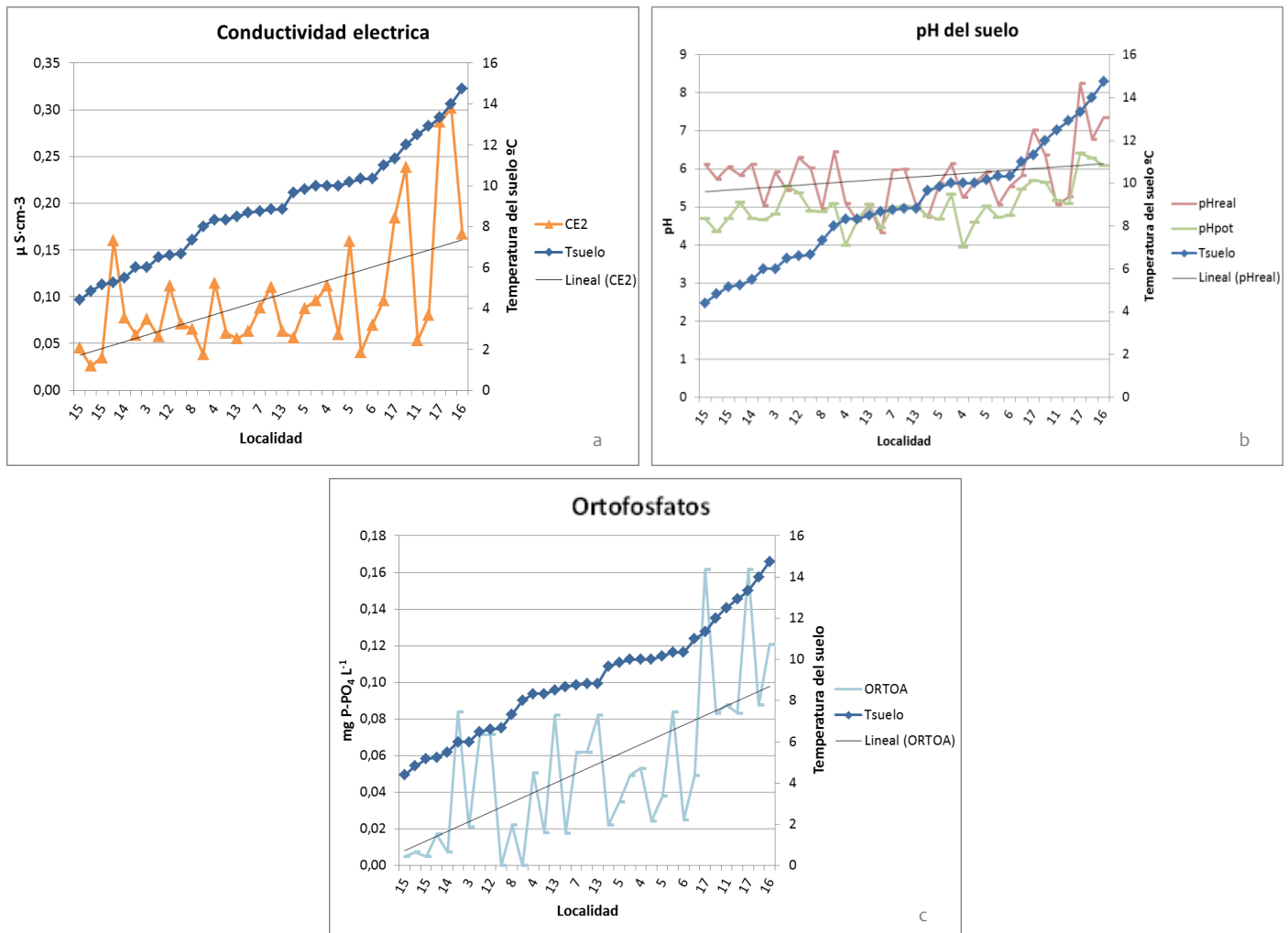


Fig. 31 Parámetros relacionados con la temperatura del suelo (Tsuelo).
a) Conductividad eléctrica (CE), b) pH activo del suelo (pHreal) y pH potencial del suelo (pHpot), c) Ortofosfatos (ORTOA)



Se observó una tendencia similar entre; el fósforo disponible en el suelo, la DBO_5 y el gasto, en relación con el aumento del porcentaje de humedad de la hojarasca (Fig. 32). El % de humedad de la hojarasca no se representa para todas las localidades debido a la ausencia de hojarasca en algunos sitios, además de que este parámetro también depende de factores climáticos, como la precipitación, al momento del muestreo. A pesar de esto, se distingue una tendencia a retener más cantidad de agua en los sitios en donde existe presencia de vegetación forestal más conservada, mientras que sitios perturbados, con asentamientos humanos o con vegetación secundaria establecida, tiene una menor capacidad de retención de humedad.

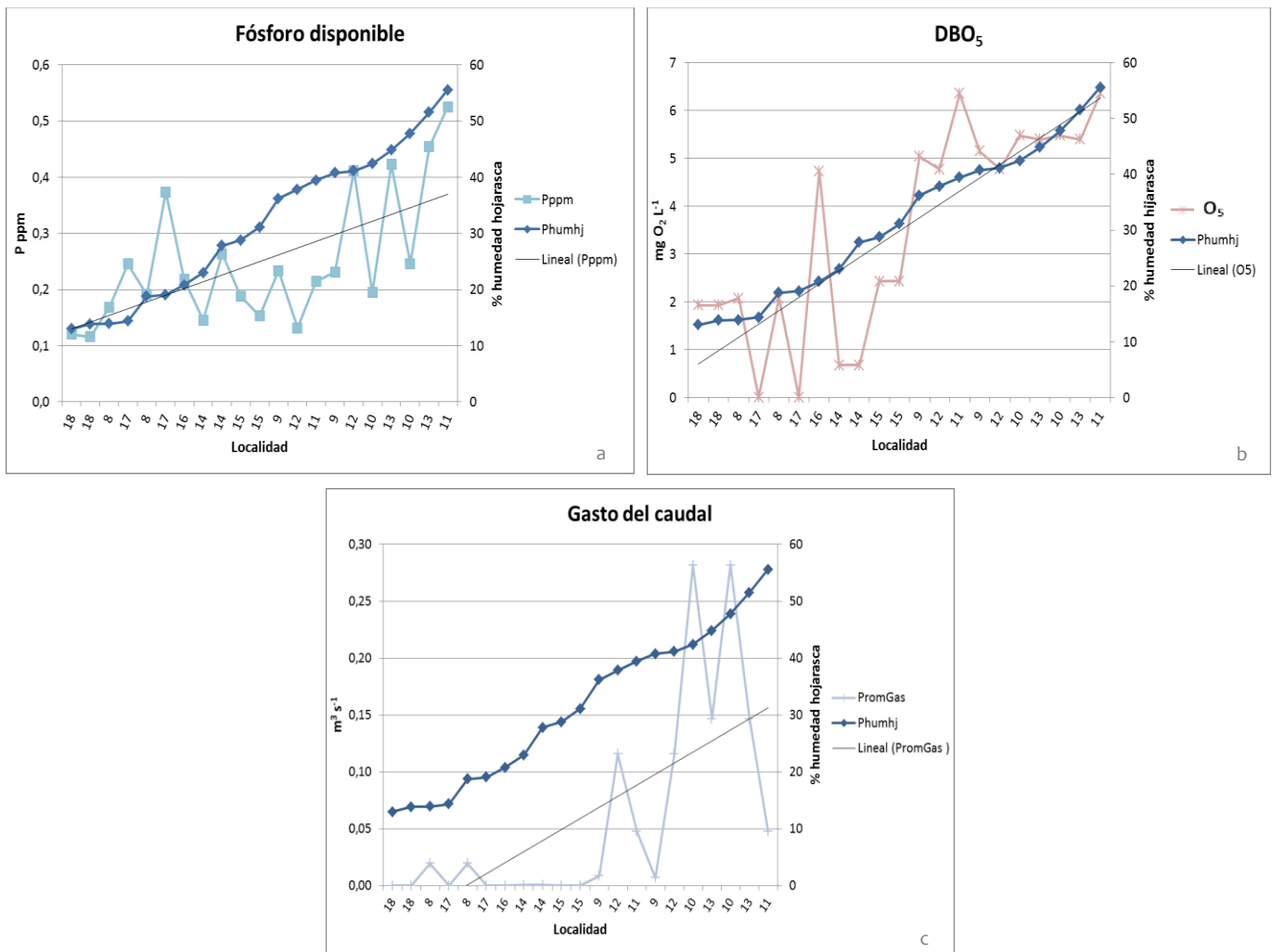


Fig. 32 Parámetros relacionados con el porcentaje de humedad de la hojarasca (Phumhj).
a) Fósforo disponible en el suelo (Pppm), b) Demanda bioquímica de oxígeno (DBO_5), c) Gasto del caudal (PromGas).



En la Figura 33 se presentan las variaciones de los sólidos totales disueltos y el pH del agua, los cuales presentan una tendencia similar. Se distingue que el aumento de STD se produce en función del tipo de actividades presentes por el uso de suelo en cada sitio, siendo Ayapango y Nepantla las que presentan concentraciones mayores a las observadas en el resto de las localidades, incluso en las que presentan cierto grado de perturbación.

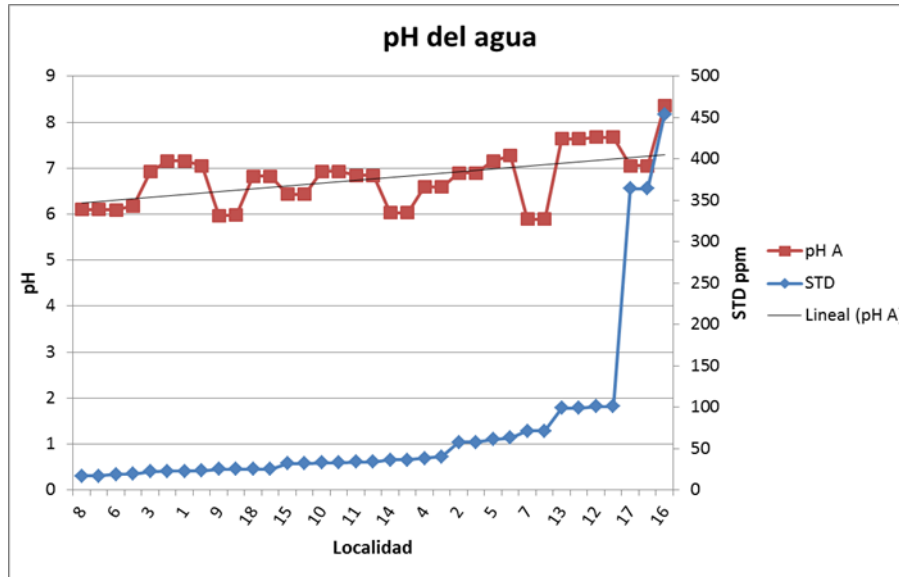


Fig. 33 Relación entre los sólidos totales disueltos (STD) y el pH de agua (pH A).

El aumento en valores de pH del agua afecta de forma proporcional al pH del suelo, la conductividad eléctrica del agua, el oxígeno disuelto y la cantidad de ortofosfatos en el agua. En los sitios que pertenecen a las zonas urbanas, se observan aumentos (conductividad y ortofosfatos) o descensos (oxígeno disuelto) marcados para todos los parámetros; la Figura 34 muestra estos comportamientos. Los valores de pH más básico se encontraron en los sitios que presentan algún tipo de actividad antrópica como agricultura, ganadería o desarrollo urbano.

Los suelos de estos sitios tienen tendencia ácida por su origen volcánico, sin embargo, esto se presenta con mayor intensidad en las localidades que no tienen influencia humana, las actividades antrópicas producen una elevación gradual en el pH del suelo dependiendo del grado de perturbación que presente el suelo, siendo las comunidades urbanas las que provocan que estos suelos tiendan a alcalinizarse.

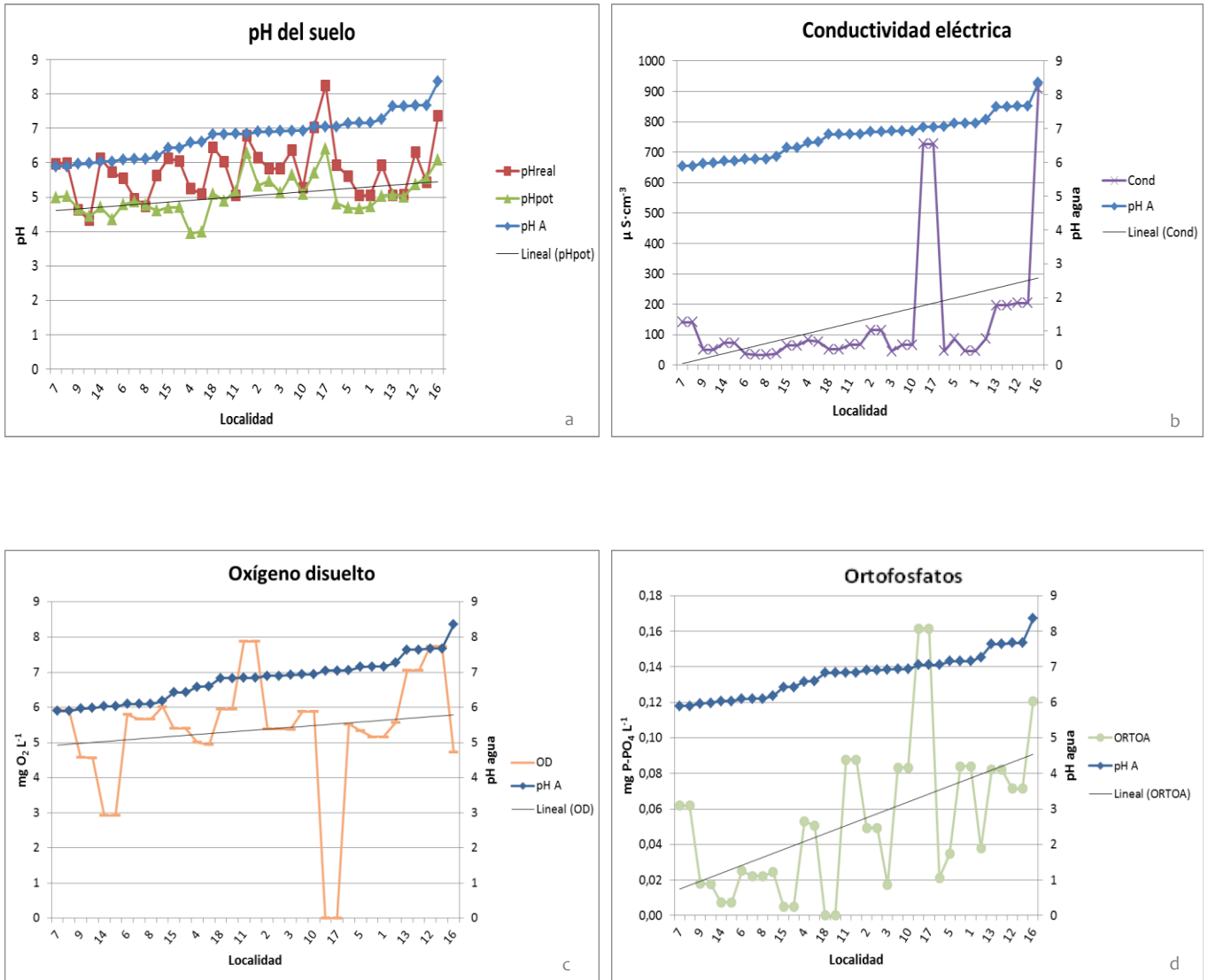


Fig. 34 Parámetros relacionados con el pH del agua (pH A).
a) pH activo del suelo (pHreal) y potencial (pHpot), b) Conductividad eléctrica del suelo (CE), c) Oxígeno disuelto (OD), d) Ortofosfatos en el agua (ORTOA).

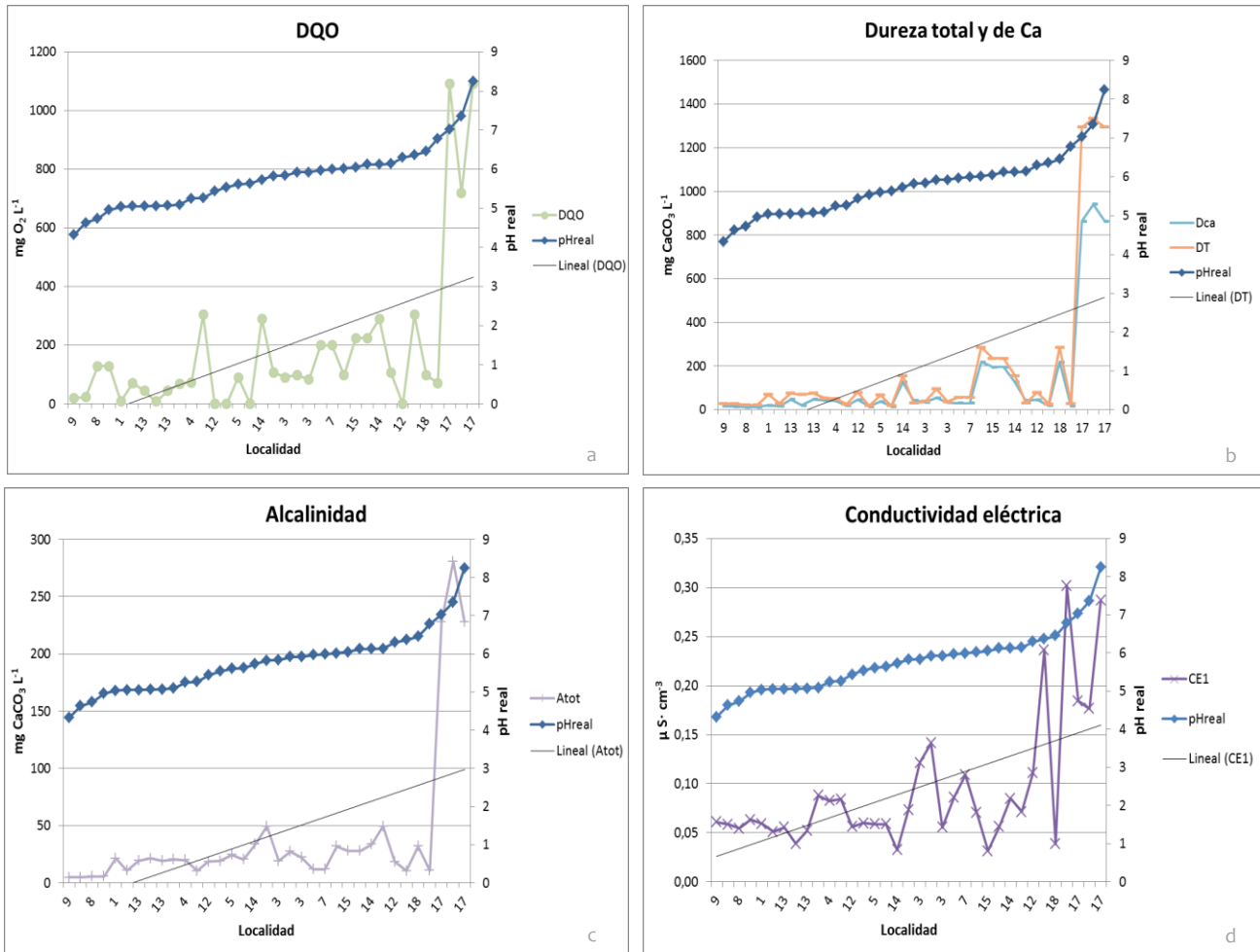


Fig. 35 Parámetros relacionados con el pH activo (pHreal).
a) Demanda química de oxígeno (DQO), b) Dureza de Calcio (Dca) y total (DT), c) Alcalinidad (Atot),
d) Conductividad eléctrica (CE).

La Figura 35 muestra el comportamiento de la DQO, la conductividad eléctrica del suelo, las durezas y la alcalinidad total en relación al pH activo del suelo. Mientras que, el pH potencial tiene un comportamiento muy similar a este, al igual que el pH activo, tiene una relación directa con la CE del suelo y negativa con su porcentaje de N, así como correlación positiva con parámetros del agua como; conductividad, alcalinidad, fósforo total, DQO, las durezas y NO₃⁻, solo que en este se presenta, además, relación con el contenido de ortofosfatos, la Figura 36, hace referencia solo a los parámetros que fueron más representativos gráficamente.

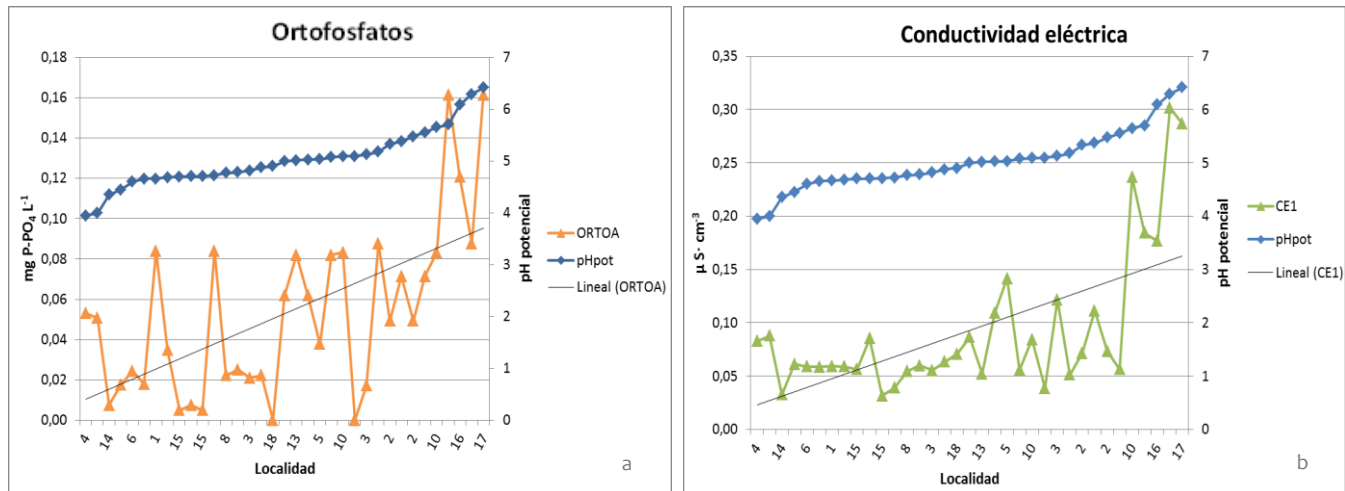


Fig. 36 Parámetros relacionados con el pH potencial (pHpot).
a) Ortofosfatos en agua (ORTOA), b) Conductividad eléctrica del suelo (CE).

La relación que existe entre el porcentaje de nitrógeno y el de carbono orgánico del suelo es directamente proporcional y se representa en la Figura 37. La cantidad de Nitrógeno en el suelo está determinada por el uso que se tenga de este y por el tipo de vegetación encontrado en cada sitio, ya que, en aquellos donde existe la presencia de pastizal se encuentran los menores porcentajes de Nitrógeno, aunque, la velocidad de mineralización de la materia orgánica es también condicionante.

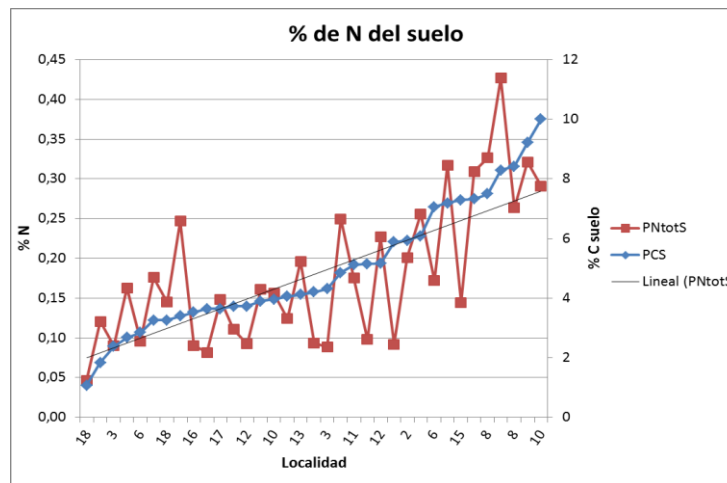


Fig. 37 Relación entre el % de N del suelo (PNtotS) y el % de C del suelo (PCS).

Al aumentar los STD dentro del sistema acuático, se produce un aumento en la conductividad eléctrica; está solo presenta relación directa proporcional (Fig. 38) con parámetros del agua y todas son en sentido positivo. Los parámetros con los que se relaciona la CE son; COP, ortofosfatos, NH₄⁺, alcalinidad, fósforo total, durezas, DQO y NO₃⁻. Como en la mayoría de los parámetros, los sitios con una marcada superioridad en cuanto a la conductividad eléctrica en el agua son aquellos que se encuentran dentro de comunidades urbanas, respondiendo a una mayor adición de sales en estos sistemas. Los parámetros que tienen relación con la conductividad presentan también mayores concentraciones en los sitios de asentamientos urbanos, además de un comportamiento similar entre ellos, con picos para determinadas localidades en las que se realizó alguna actividad que modificó las concentraciones de estos.

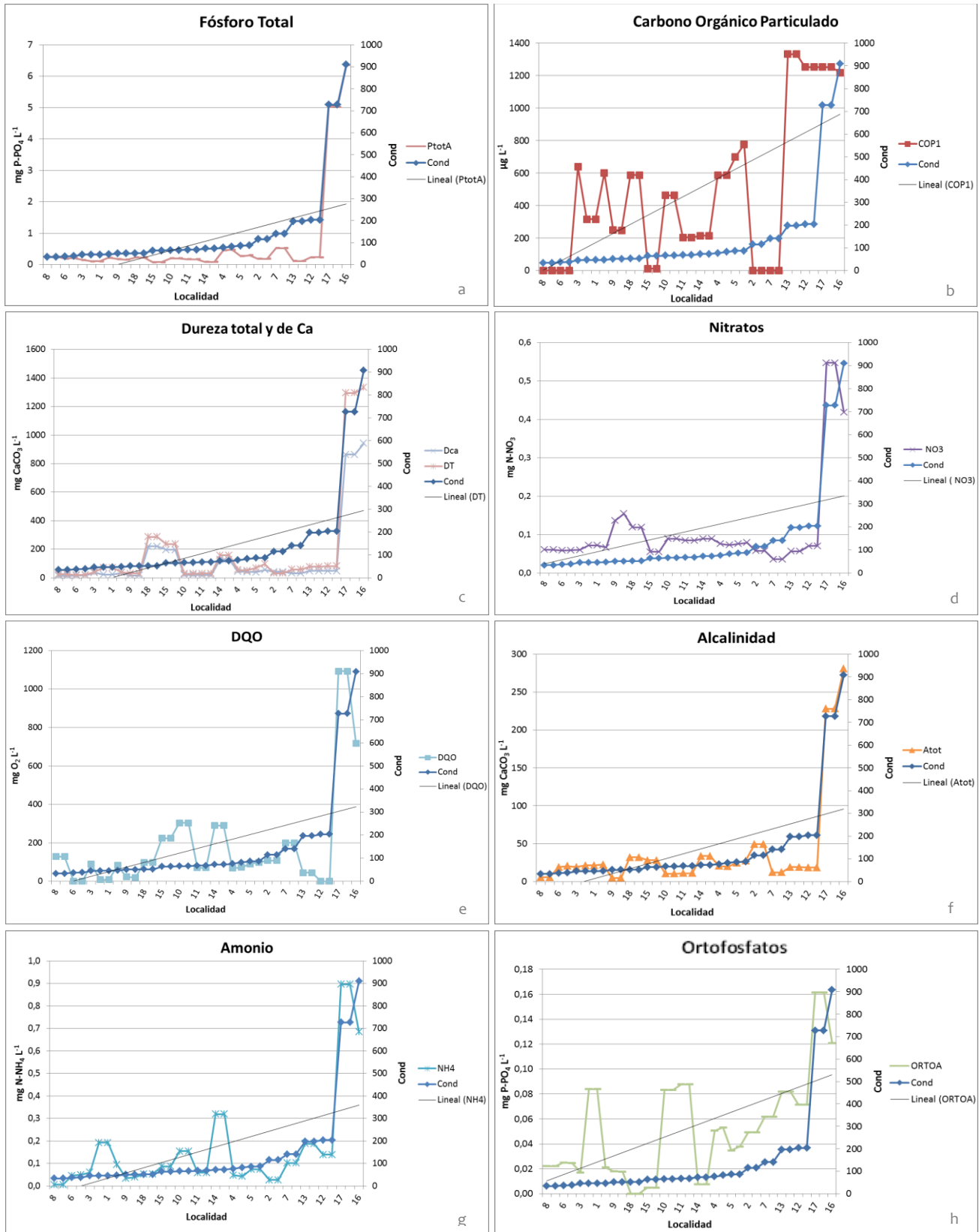


Fig. 38 Parámetros relacionados con la conductividad del agua (Cond).

a) Fósforo total en el agua (PtotA), b) Carbono orgánico particulado (COP), c) Dureza de calcio (Dca) y total (DT), d) Contenido de Nitratos (NO₃), e) Demanda química de oxígeno (DQO), f) Alcalinidad (Atot), g) Contenido de Amonio (NH₄), h) Ortofosfatos (ORTOA).



La concentración de nitratos (NO_3^-) en el agua puede relacionarse en mayor medida a la DQO, alcalinidad, durezas y fósforo total, todas tuvieron un comportamiento proporcional similar. De acuerdo a la Figura 39, se encontraron las mayores elevaciones en la concentración de nitratos en el agua dentro de las localidades urbanas. Posteriormente siguiendo el gradiente de concentración se encuentran localidades donde se presentan comunidades vegetales de bosque de coníferas y con las menores concentraciones aquellas donde se llevan a cabo actividades como la agricultura y la ganadería.

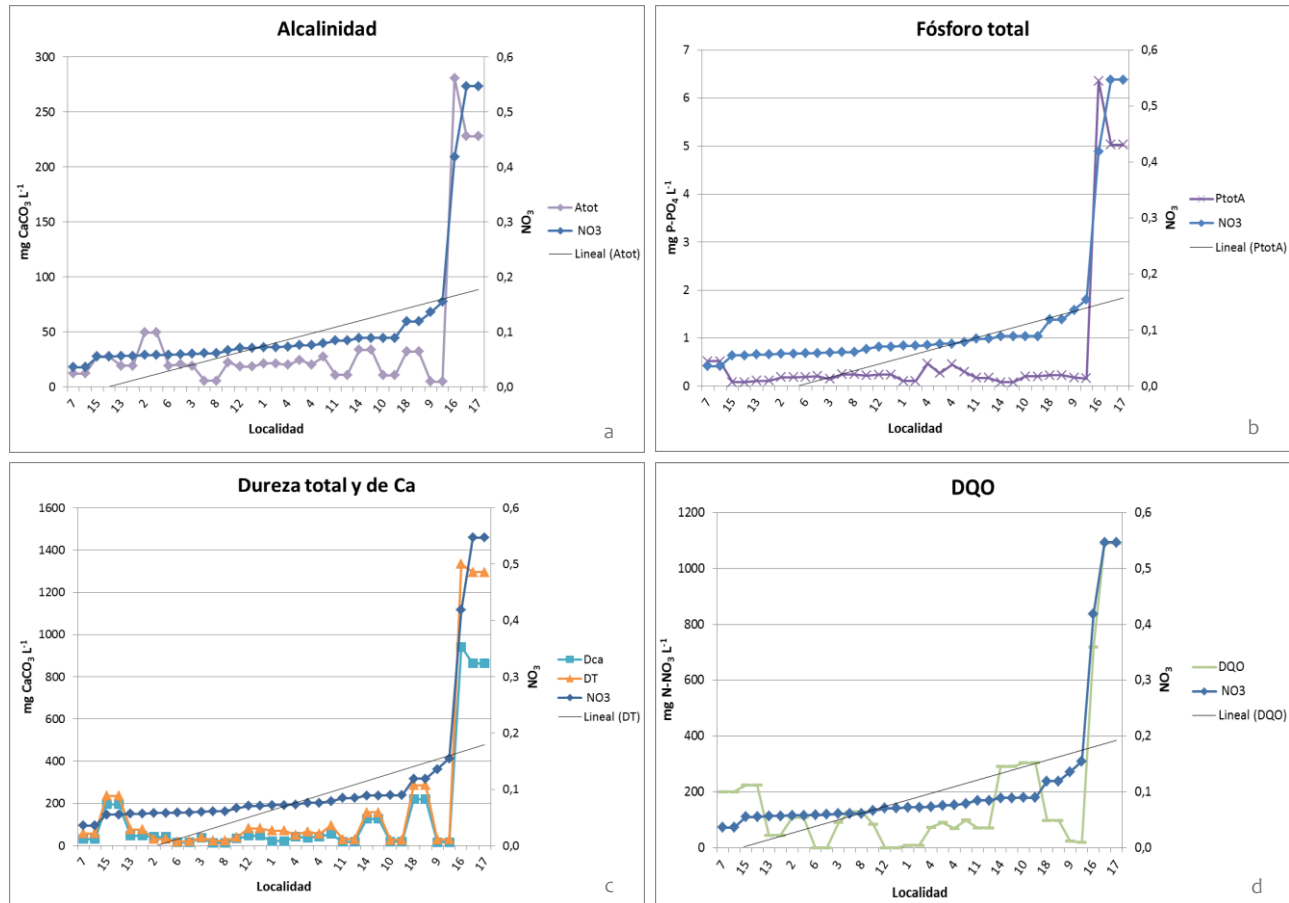
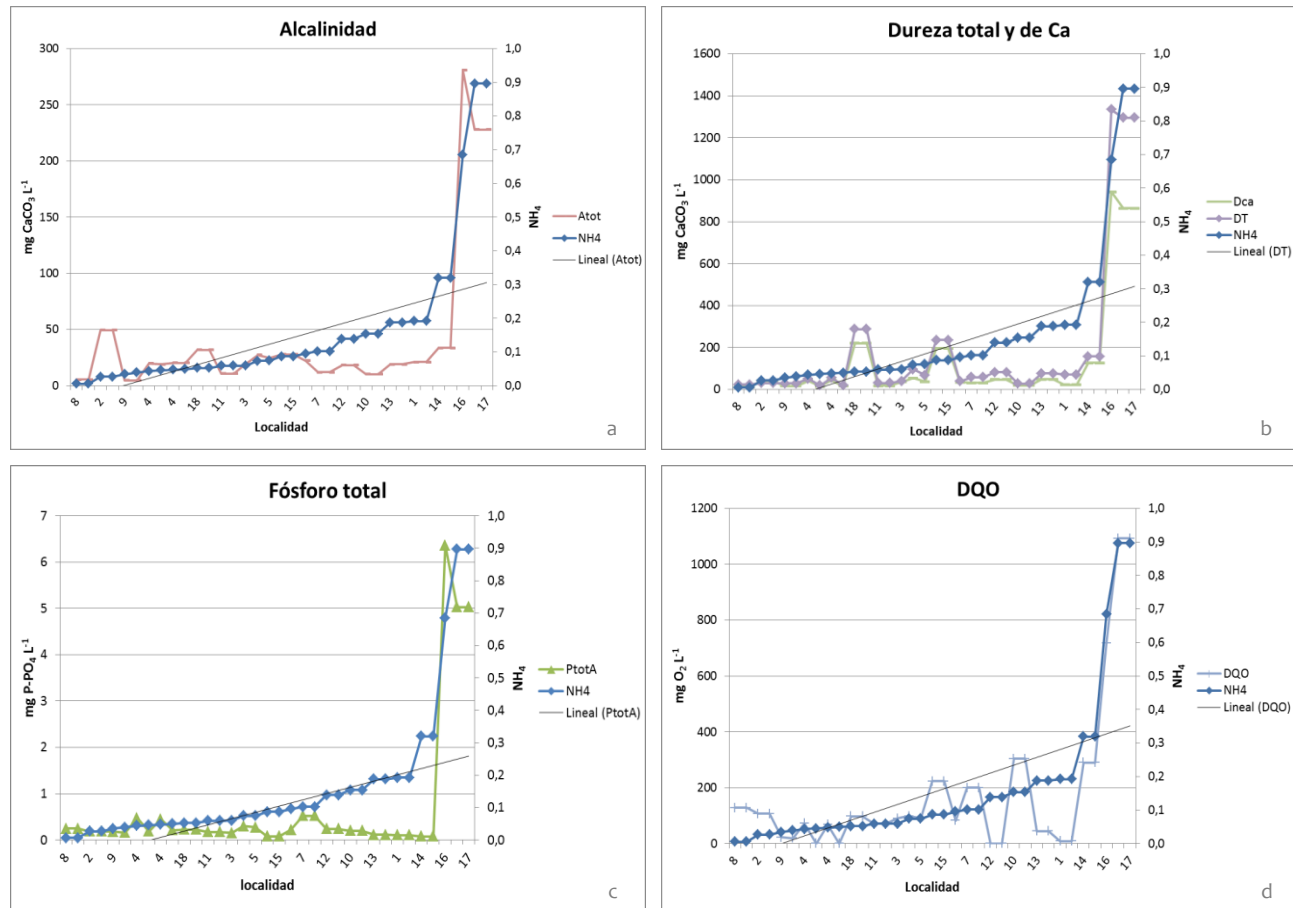


Fig. 39 Parámetros relacionados con la cantidad de Nitratos (NO_3^-).

a) Alcalinidad (Atot), b) Fósforo total (PtotA), c) Dureza de calcio (Dca) y total (DT), d) Demanda química de oxígeno (DQO).

La concentración del ión amonio (NH_4^+) se comporta de forma parecida a los nitratos. Al igual que estos, tiene relación positiva con el fósforo total, la alcalinidad, la DQO y las durezas, pero este tiene además también una relación con los ortofosfatos del agua (Fig. 40). En el caso del amonio, las concentraciones más altas se encontraron, primeramente en los sitios urbanos, enseguida, las localidades que presentan actividad ganadera y recreativa son las que presentan mayor concentración.



En la Figura 41, se representa la correlación estadística que existe entre estos parámetros y la relación C:N. Esta se da, con los parámetros del agua que determinan su calidad como alcalinidad, durezas, cantidad de fósforo disuelto y DQO. La relación C:N fue buena ($12 > C:N < 30$) en los sitios ubicados a menos de 3200 m, en donde no hay actividades antrópicas, así como en los de pastizal. En las localidades que no cumplen alguna de estas características, como Amalacaxco, esta relación tiene una proporción muy alta.

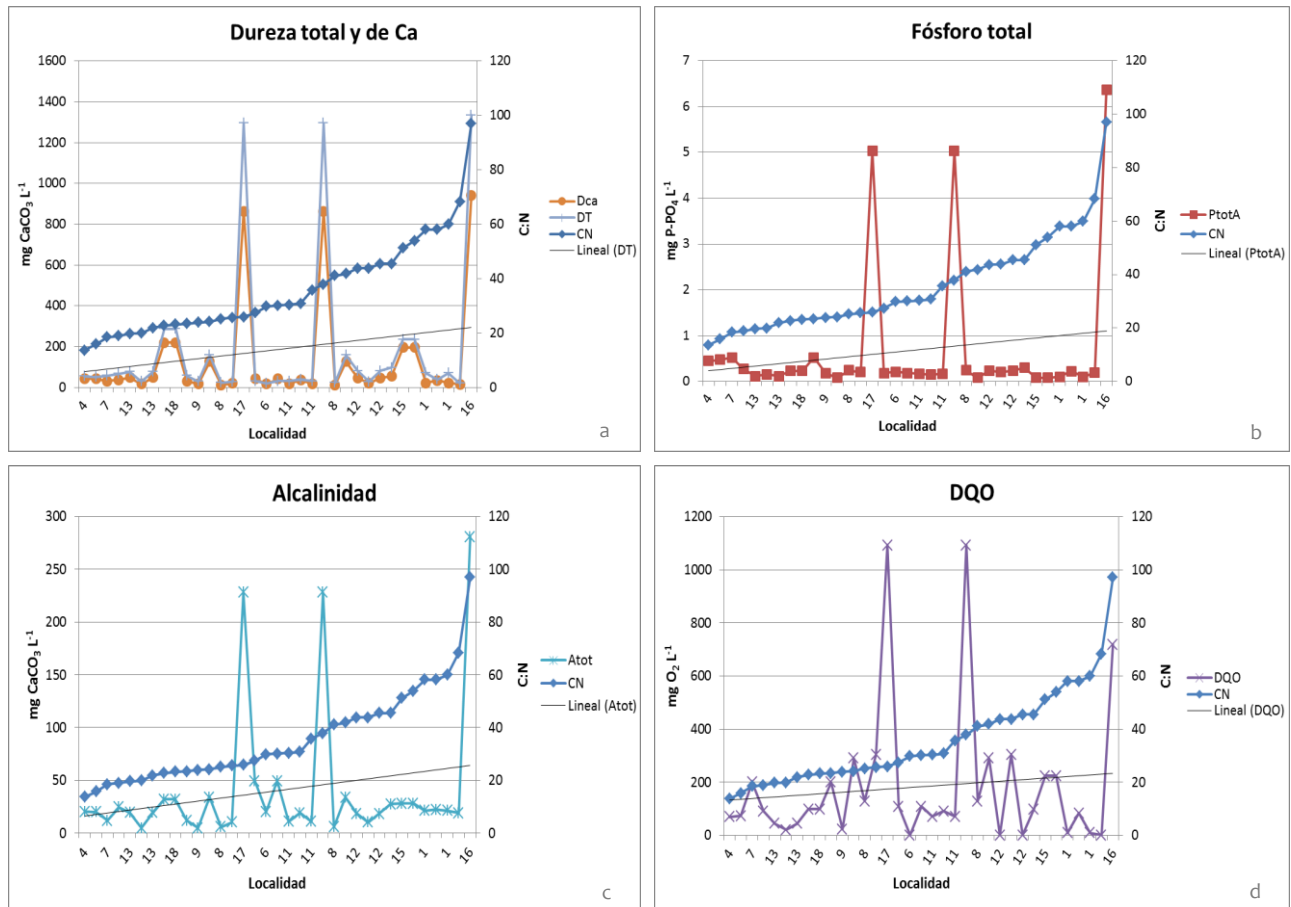


Fig. 41 Parámetros relacionados con la relación C:N (CN).

a) Dureza de Calcio (Dca) y total (DT), b) Fósforo total (PtotA), c) Alcalinidad (Atot) y d) Demanda química de oxígeno (DQO).

Los parámetros asociados a la calidad del agua, como la DQO, la alcalinidad, las durezas y los ortofosfatos presentan una relación directamente proporcional con la cantidad de fósforo total disuelto en el agua, esto se observa en la Figura 42.

Las variables que guardan relación con el fósforo total lo hacen también con los ortofosfatos, a excepción de la relación directa de éstos últimos con el fósforo disponible del suelo (Fig. 43). En cuanto a las diferencias de concentración, se observó que el uso de suelo urbano muestra una mayor cantidad de ambos, mientras que la presencia de la comunidad vegetal de pastizal disminuye la cantidad de fósforo total mientras que las actividades agrícolas reducen la concentración de ortofosfatos.

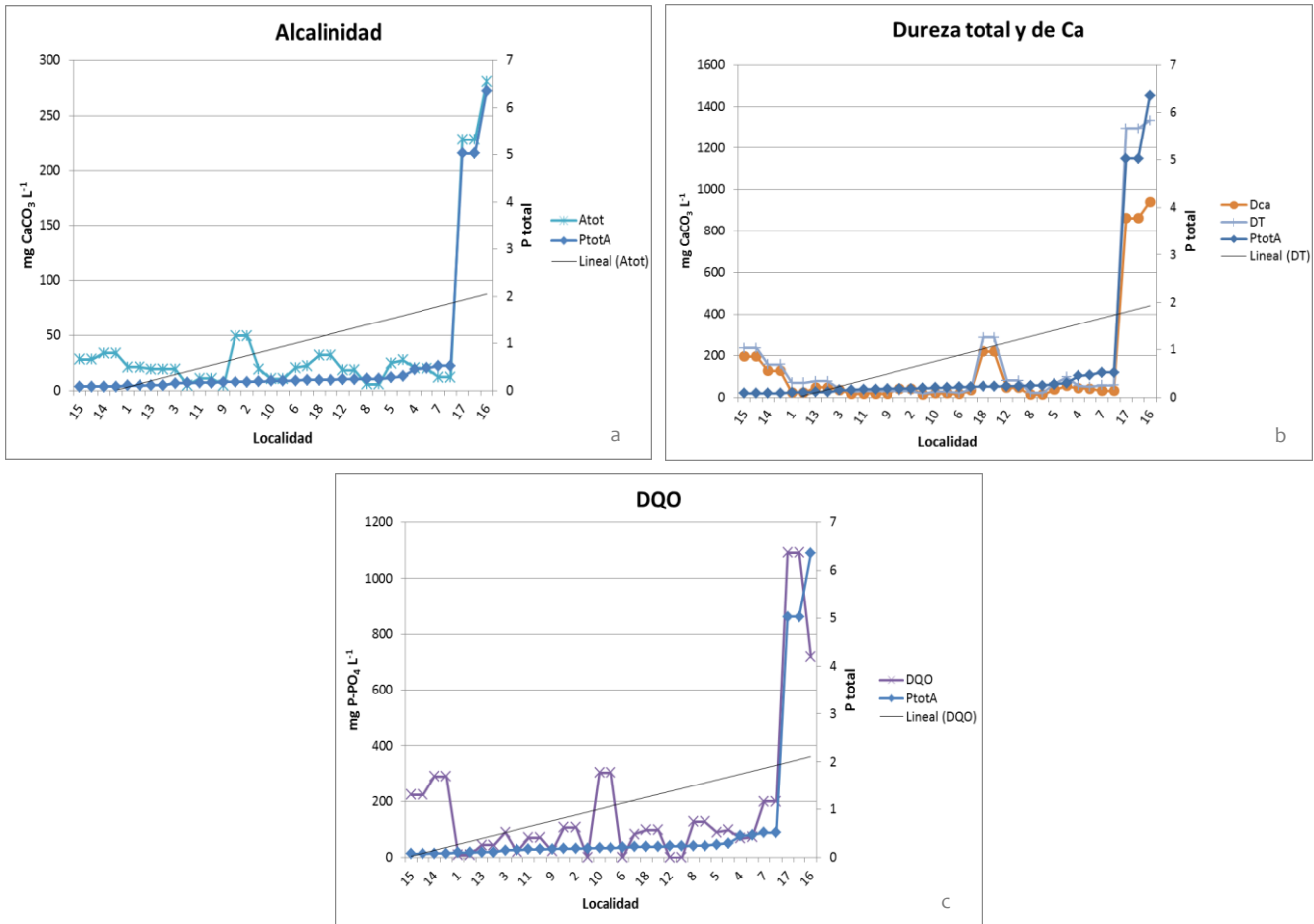


Fig. 42 Parámetros relacionados con el Fósforo total del agua (PtotA). a) Alcalinidad (Atot), b) Dureza de calcio (Dca) y total (DT), c) Demanda química de oxígeno (DQO).

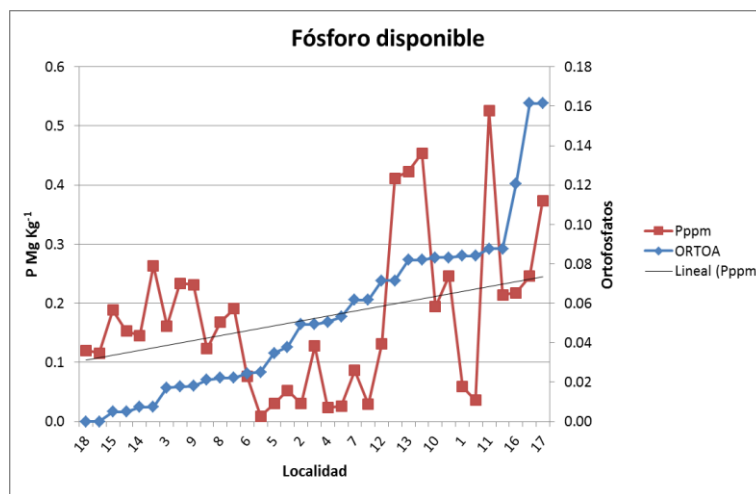


Fig. 43 Relación entre los ortofosfatos del agua (ORTOA) y el fósforo disponible del suelo (Pppm).



La cantidad de oxígeno disuelto y la DBO_5 son parámetros que dependen de diversos factores, el comportamiento de estos parámetros en los sitios estudiados se aprecia en la Figura 44, donde se distingue que los sitios con mayor concentración de oxígeno disuelto están ubicados en zonas de menor altitud debido a la aireación que se da por el recorrido que tiene el agua, mientras que las concentraciones menores se presentaron en sitios que presentan algún tipo de perturbación.

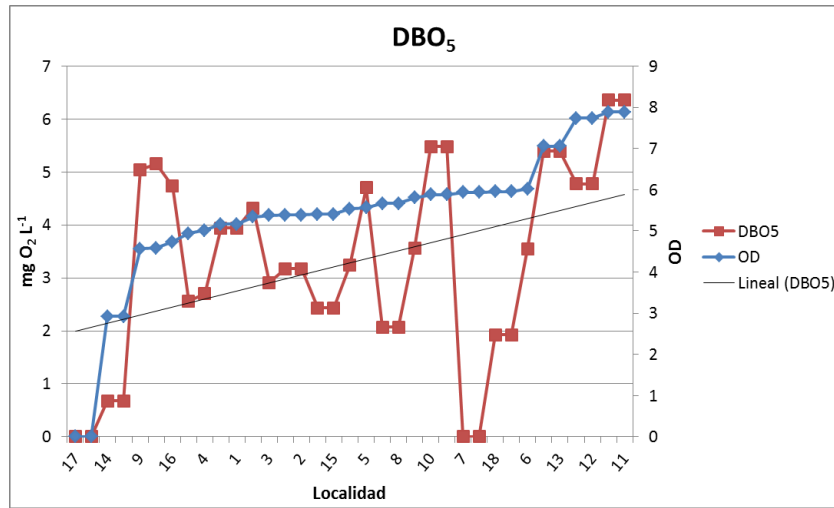


Fig. 44 Relación entre el Oxígeno disuelto (OD) y la Demanda bioquímica de oxígeno (DBO_5).

Considerando que la velocidad de corriente tiene un comportamiento inverso a la DBO_5 (Fig. 45); se distingue que los sitios ubicados a menos de 2700 m presentaron mayor demanda bioquímica de oxígeno, por lo que sus contenidos de este gas, fueron menores, esto asociado al hecho de que en estas altitudes se encuentran ubicadas las comunidades humanas.

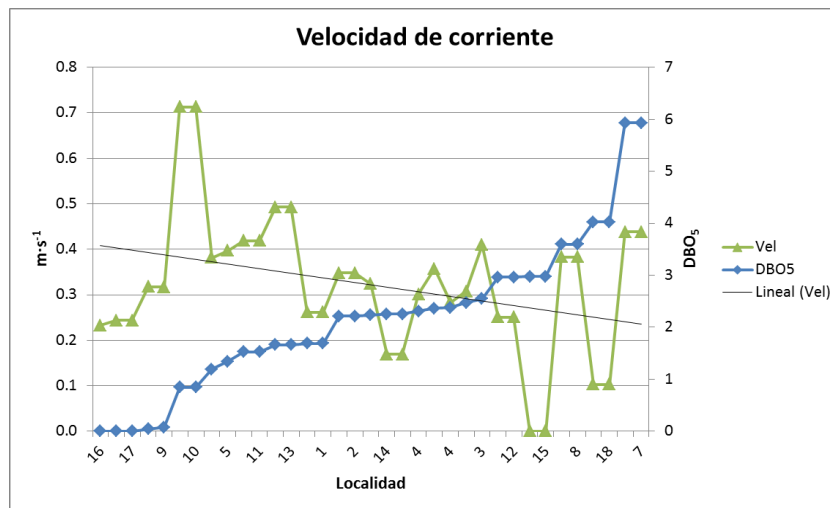


Fig. 45 Velocidad de corriente (Vel) en relación con la Demanda bioquímica de oxígeno (DBO_5).



En la Figura 46 se muestra la asociación entre variables que nos indican el aporte de sustancias al sistema incrementando las concentraciones de carbonatos y bicarbonatos, así como la concentración de iones Ca^{2+} y Mg^{2+} y sustancias contenidas que requieren oxígeno para su degradación, generando una alta demanda de este gas, principalmente en localidades contaminadas y ganaderas.

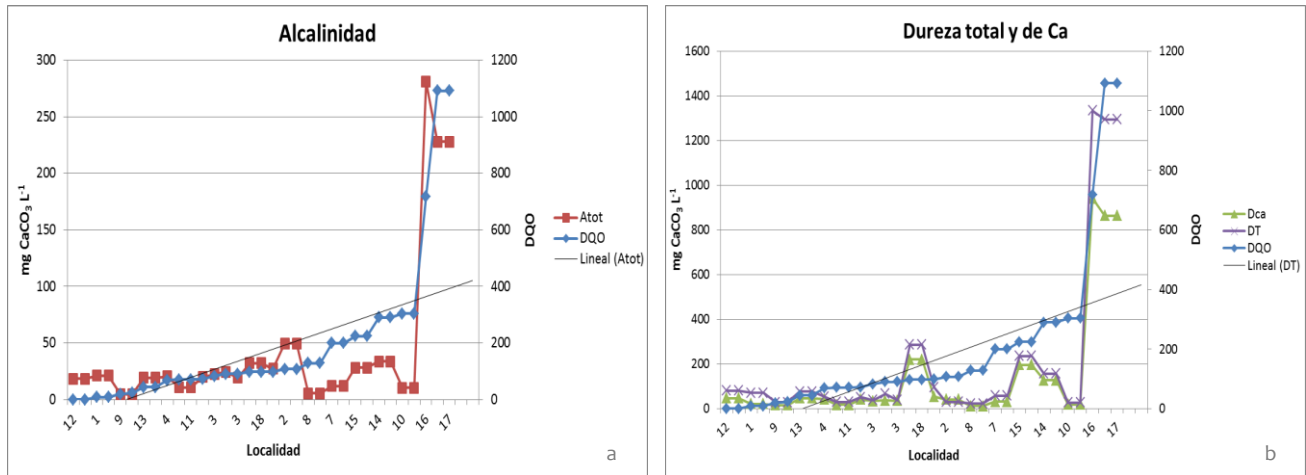


Fig. 46 Parámetros relacionados con la Demanda química de oxígeno (DQO). a) Alcalinidad (Atot), b) Dureza de calcio (Dca) y total (DT).

El comportamiento de la dureza total muestra que la concentración de Ca^{2+} en estos sistemas se mantuvo sobre la de Mg^{2+} . Las durezas del agua presentaron un comportamiento similar entre ellas y en relación con la alcalinidad del sistema acuático (Fig. 47). Como ya se describió, estos tres parámetros aumentan en arroyos cercanos a comunidades humanas, además, las actividades como la ganadería, también involucran un aumento para alcalinidad y durezas.

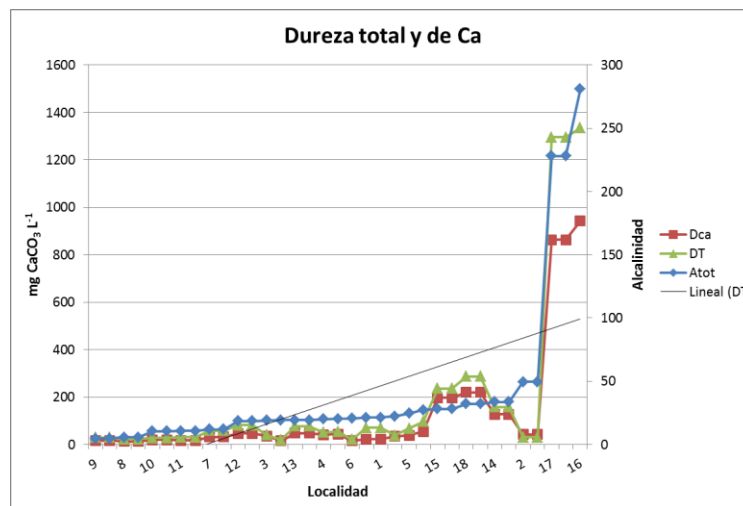


Fig. 47 Relación entre la alcalinidad (Atot) y la Dureza total (DT) y de calcio (Dca).



9.2. ANALISIS DE COMPONENTES PRINCIPALES

Con la finalidad de seleccionar las variables de mayor impacto en los sistemas agua y suelo, se realizó un análisis de Componentes principales usando aquellas que mostraron correlación más alta en el análisis de correlación múltiple. A partir de estas variables se calcularon un total 24 componentes, de los cuales, se extrajeron solo 6 componentes principales por sus eigenvalores mayores o iguales a 1.0 y explicaron, el 86.568% de la varianza total de los datos originales (Cuadro 11).

Cuadro 11. Análisis de Componentes Principales para las variables de suelo y agua.

Componente Número	Eigenvalor	Porcentaje de Varianza	Porcentaje Acumulado
1	10.4825	43.677	43.677
2	3.66592	15.275	58.952
3	2.93981	12.249	71.201
4	1.45849	6.077	77.278
5	1.19187	4.966	82.244
6	1.03761	4.323	86.568
7	0.709758	2.957	89.525

Cada uno de los 6 componentes principales se conforma por distintas variables (Cuadro 12). El primer componente (Fig. 48) presenta los mayores pesos hacia el extremo positivo y representa la concentración de sales en el agua en contraposición con la altitud y el Oxígeno disuelto, determinado por: la dureza total (DT), alcalinidad total (Atot), conductividad eléctrica del agua (Cond), dureza de calcio (DCa), contenido de NH_4^+ y DQO.

Cuadro 12. Tabla de Pesos de los Componentes de agua y suelo.

	Componente 1	Componente 2	Componente 3	Componente 4	Componente 5	Componente 6
pHpot	0,219761	-0,187245	0,203061	-0,0229973	-0,0759606	0,347997*
Tsuelo	0,167999	-0,129887	0,298367*	0,302699*	-0,0758111	0,0162299
CN	0,127536	-0,184161	-0,0541915	0,0283219	0,643558*	0,220462
ARC	0,105842	0,202027	0,288051*	-0,285456*	-0,139539	0,420317*
CEi	0,197108	-0,0373351	0,20084	0,279058*	-0,0268503	0,295861*
Cons	-0,168605	-0,12756	-0,0847686	0,351098*	-0,293361*	-0,245028
PNtotS	-0,10299	0,334585*	0,279881*	0,127541	0,166809	-0,253003*
Usuelo	0,232663	0,0445593	0,017775	-0,315292*	0,084819	-0,274105*
Alt	-0,207369	0,30074*	-0,171883	0,10126	0,092855	0,0904029
Phum	-0,102819	0,376712*	0,203219	0,0697617	0,0569111	-0,227414
LIM	0,0155329	0,403883*	0,184963	-0,108274	-0,213463	0,192206
Pppm	0,100647	-0,0397397	0,31055*	-0,52058*	-0,0769484	-0,320145*
PCS	-0,0712966	0,264569	0,301009*	0,182928	0,494664*	0,0274099
DT	0,296336*	0,0615333	-0,10381	0,0331883	0,00275757	-0,0617158
Dca	0,294539*	0,0609327	-0,111651	0,02801	0,00821629	-0,0618555
Atot	0,295723*	0,0193977	-0,105623	0,0830315	0,0590452	-0,0847539
DQO	0,283079*	0,141708	-0,0205392	0,123374	-0,106114	-0,0158412
PtotA	0,293816*	0,044283	-0,0531013	0,112662	0,0579884	-0,0778368
ORTOA	0,235353	-0,0687271	0,197877	0,133844	-0,101865	-0,102644
DBO ₅	-0,0670981	-0,370102*	0,27542*	-0,0431524	0,23745	-0,275592*
OD	-0,179878	-0,273358	0,215835	-0,17808	0,0336259	0,123562
Vel	-0,0595294	-0,136098	0,402771*	0,296697*	-0,19426	-0,0972408
Cond	0,294632*	0,0108467	-0,0221254	0,0337125	0,031004	-0,142987
NH ₄	0,289627*	0,0985193	-0,0600932	-0,00893765	0,0151608	-0,117416

*Variables con mayor peso estadístico para cada componente



El segundo componente (Fig. 48) está determinado principalmente por la DBO_5 en forma negativa y positivamente por los porcentajes de limo (LIM), de humedad del suelo (Phum) y de N total del suelo (PNTotS). El componente número 3 (Fig. 49) nos indica el factor de productividad del suelo en relación con la temperatura (T_{suelo}) y en contraposición con la altitud; siendo sus variables robustas el fósforo disponible (Pppm), el porcentaje de carbono del suelo (PCS) y la temperatura del mismo (T_{suelo}).

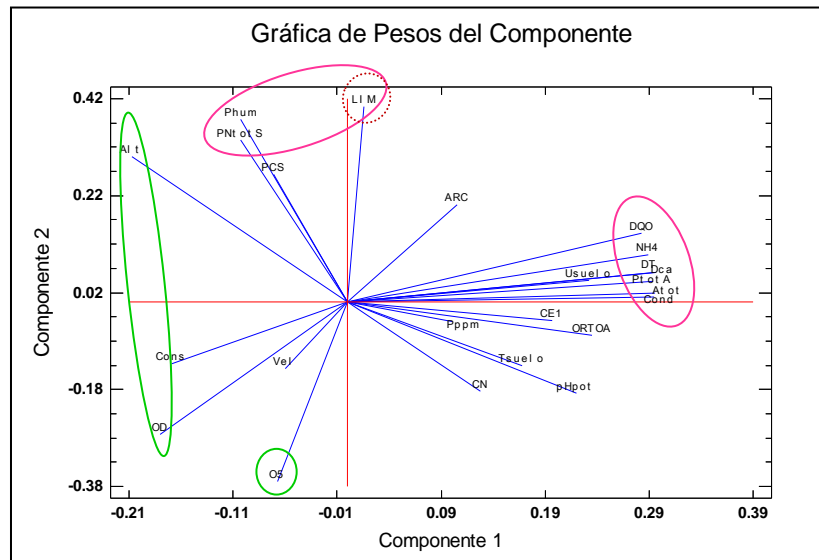


Fig. 48 Gráfica de pesos de los componentes 1 y 2.

Los parámetros con mayor peso en el 4° componente (Fig.49), hacia el extremo negativo, fueron el Pppm y su grado de conservación (Cons), mientras que con efecto negativo encontramos el uso de suelo (Usuelo) y su porcentaje de arcilla (ARC).

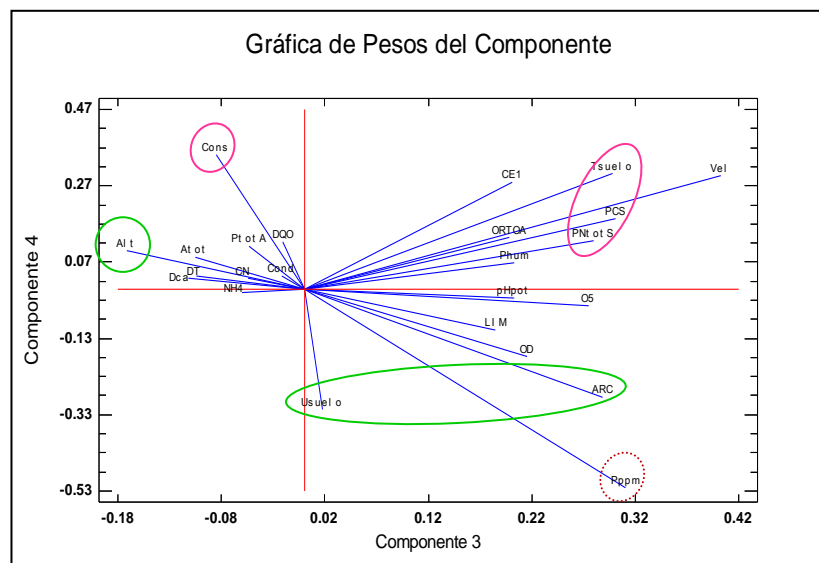


Fig. 49 Gráfica de pesos de los componentes 3 y 4.



En el componente cinco (Fig. 50) encontramos que la relación C:N y el PCS, positivos para este componente, son modificados de manera inversa por el grado de conservación. Por último, las variables de mayor peso para el componente seis fueron la Arcilla, el pH potencial (pHp_{ot}) y el Pppm, positivas, y la DBO₅ y uso de suelo las negativas (Fig. 50).

Es importante observar que para este análisis, la conductividad eléctrica del suelo (CE) y los ortofosfatos del agua (ORTOA) no tienen ninguna aportación significativa, por lo que no tienen presencia de mayor peso en ninguno de los componentes extraídos.

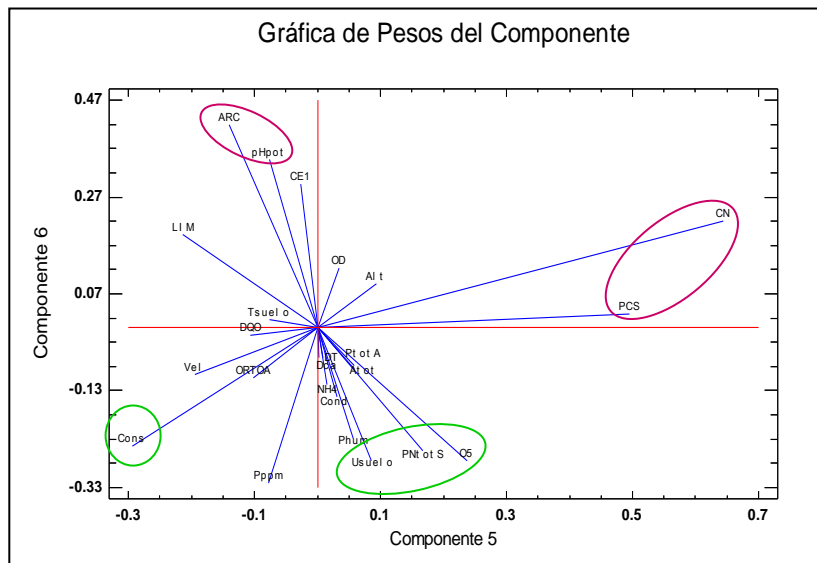


Fig. 50 Gráfica de pesos de los componentes 5 y 6.

9.3. ANÁLISIS DE CORRELACIONES CANÓNICAS

Una vez establecidas las variables de mayor peso estadístico, mediante el análisis de correlación múltiple y su posterior reducción con el de componentes principales, se realizó un análisis de correlaciones canónicas; este permitió identificar asociaciones entre dos conjuntos de variables, encontrando combinaciones lineales en ambos conjuntos que exhiben correlaciones fuertes. El primer conjunto estuvo determinado por las variables del suelo: pH_{pot}, Tsuelo, CN, ARC, CE₁, Cons, PNTotS, Usuelo, Alt, Phum, LIM, Pppm y PCS, mientras que: DT, Dca, Atot, DQO, PtotA, ORTOA, O₅, OD, Vel, Cond y NH₄ las variables del conjunto 2.

De este análisis se obtuvieron cuatro correlaciones canónicas importantes con valores-P menores que 0.05, esos conjuntos tienen una correlación estadísticamente significativa con un nivel de confianza del 95.0% y explican en su conjunto el 57.73% de la varianza total de los datos originales (Cuadro 13).



Cuadro 13. Correlaciones Canónicas entre las variables de suelo y agua.

Número	Correlación Canónica	Eigenvalor	Diferencia	Proporción	Acumulada	Valor-P
1	0.996238	0.992491	0.015996	0.1530401	0.1530401	0.0000
2	0.988178	0.976495	0.029235	0.1505736	0.3036137	0.0000
3	0.973273	0.94726	0.119462	0.1460656	0.4496793	0.0001
4	0.909834	0.827798	0.055117	0.1276448	0.5773241	0.0224

Los cuadros 14 y 15 nos muestran los coeficientes canónicos para ambos conjuntos de datos, a partir de los cuales se puede observar que, la primera correlación tiene una magnitud de 0.996238, por lo que se acerca mucho a la linealidad, aunque únicamente explica el 15.30% del funcionamiento del ecosistema ribereño. Las variables robustas que determinan esta correlación son relativamente equitativas, en cuanto a su polaridad, positivas la relación C:N, la condición de uso de suelo, la DT y la Atot, mientras que las que aportan efectos negativos fueron la altitud, el PCS, la DCa y la cantidad de fósforo total en el agua (PtotA).

La correlación canónica dos presentó también un valor de magnitud alto con 0.988178, con aporte del 15.05% de la variación total. Esta correlación está mucho más dirigida hacia el lado negativo, siendo el uso de suelo, la altitud, el pHpot, la DT, el NH₄ y la Atot las responsables de este comportamiento, mientras que en contraposición, solo encontramos le CE y la DCa.

La siguiente correlación, al contrario de la anterior, es afectada por una mayor cantidad de variables de forma positiva, Altitud, PNtotS, relación C:N, PtotA y NH₄, que las que la afectan negativamente; LIM, DCa y Conductividad. Esta correlación también se aprecia fuerte, con una magnitud de 0.973273, esta representa el 14.60% de la varianza.

Por último, la correlación cuatro arrojo un valor de 0.909834 explicando con esto el 12.76% del comportamiento del ecosistema. Sus variables más importantes son la CE, la relación C:N, el LIM, la DCa y el PtotA, positivamente y el PCS, DT y Atot en forma negativa.

Cuadro 14. Coeficientes de Variables Canónicas del Primer Conjunto (suelo).

Coeficiente 1		Coeficiente 2		Coeficiente 3		Coeficiente 4	
CN	0.399917	pHpot	-0.721521	CN	0.678452	CN	0.640518
Usuelo	0.250165	CE1	0.57414	PNtotS	0.869903	CE1	0.686044
Alt	-0.592162	Usuelo	-0.867097	Alt	0.938952	LIM	0.574472
PCS	-0.185875	Alt	-0.825207	LIM	-1.01169	PCS	-0.841369

Cuadro 15. Coeficientes de Variables Canónicas del Segundo Conjunto (Agua).

Coeficiente 1		Coeficiente 2		Coeficiente 3		Coeficiente 4	
DT	5.38457	DT	-4.14467	Dca	-6.08563	DT	-12.9361
Dca	-6.71194	Dca	6.9179	PtotA	5.49502	Dca	12.0811
Atot	3.34847	Atot	-2.17863	Cond	-1.92184	Atot	-4.49905
PtotA	-1.60805	NH ₄	-3.19586	NH ₄	1.26693	PtotA	6.04823



La Figura 51, muestra las gráficas para las variables canónicas 1 a 4, se distingue que en la 1 y 2 los puntos se encuentran más cercanos a la linealidad, mientras que en las gráficas para las variables 3 y 4, los puntos están más dispersos, aunque aún se aprecia cierta tendencia lineal. Si se grafica cualquier de las variables canónicas después de estas cuatro, la dispersión de los puntos es mucho mayor y cada vez menos próxima a la linealidad.

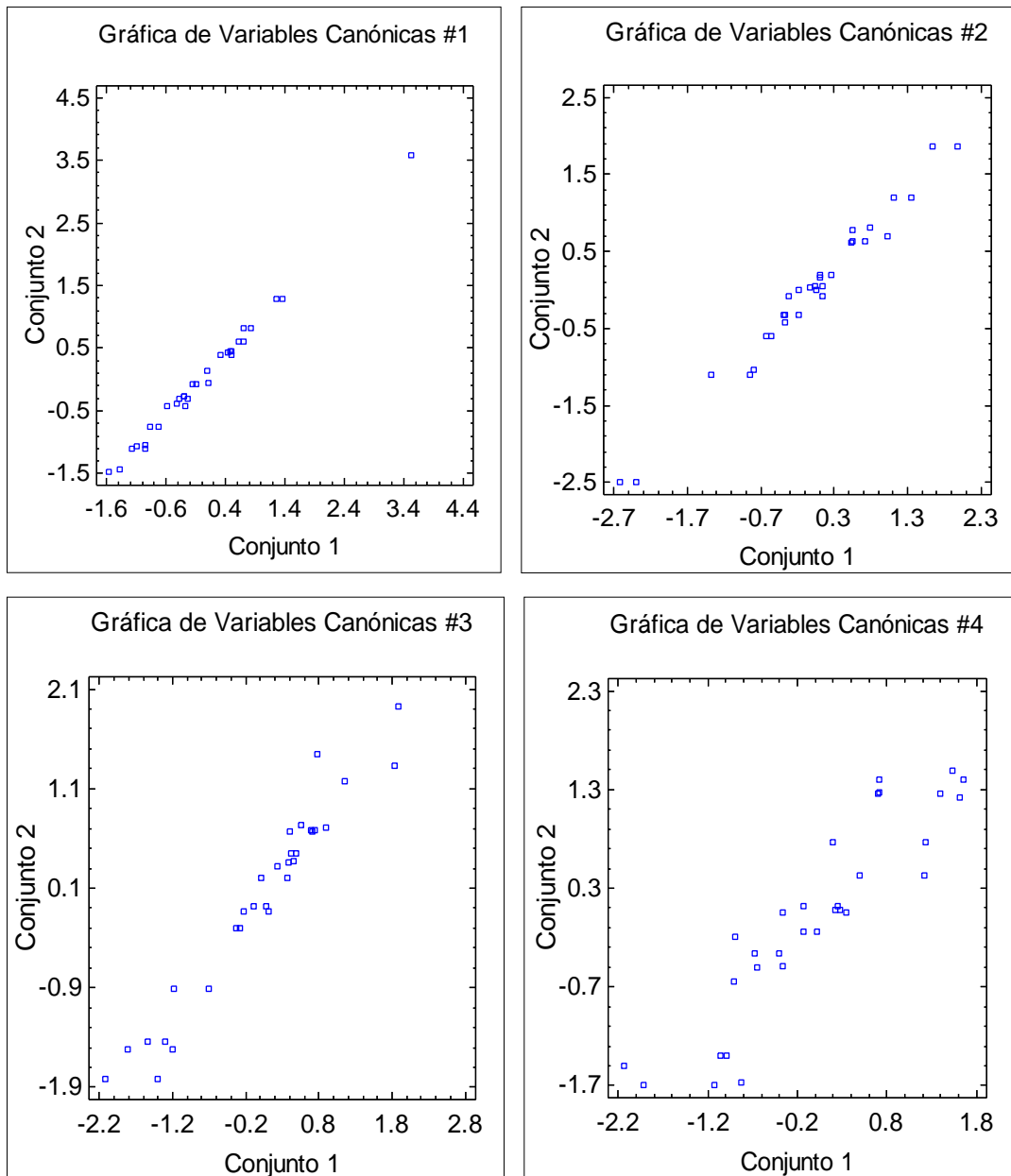


Fig. 51 Gráficas de las variables canónicas 1-4.



10. ANÁLISIS DE RESULTADOS

Los 18 sitios analizados se encontraron dentro de un rango altitudinal de los 1987 a 3886 m snm. y bajo temperaturas que fluctuaron desde los 7 a los 19 °C. En estos se distinguieron siete usos de suelo diferentes: forestal-pastizal, a más de 3700 m snm. Entre los 3500-3700 m snm, se encontraron sitios denominados forestal-ganaderos, donde aún se observan zonas de pastizal, las cuales son usadas para el ramoneo de ganado. Entre los 2500 y 3500 m snm, se ubican las zonas forestales, en esta franja se hallan ecosistemas no perturbados y sitios empleados para el ecoturismo, llamados recreativo-forestales. Por debajo de los 2500 metros se localizaron zonas con actividad acuícola, agrícola y zonas de asentamientos humanos importantes. Esta disposición coincide con la propuesta por Hernández y Granados (2006) en la cual proponen cuatro grandes fajas altitudinales, en las que 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 (2700 a 4000-5000 m), Zona de erosión inducida (2500 y 2750 m), Somontano, zona en la que se desarrollan gran parte de las actividades productivas y Llanura, que es la zona de asentamientos humanos (Hernández y Granados, 2006).

De todos los sitios integrados en el estudio, únicamente el denominado Agua el marrano, difiere de las anteriores, ya que conserva la vegetación forestal, y por la altitud a la que se encuentra pertenece a la zona de sierra. Sin embargo, tiene un grado de perturbación considerable, lo que se determinó por la presencia de vegetación secundaria y se pudo inferir que fue alterado por algún fenómeno natural como una avenida del río, lo que provocó el desarrollo posterior de la vegetación secundaria.

10.1. VEGETACIÓN

De las 23 familias de plantas vasculares encontradas, ocho son las mejor representadas, Asteraceae, Lamiaceae, Aspleniaceae, Caryophylleceae, Dryopteridaceae, Rosaceae, Onagraceae y Thelipteridaceae. La familia Asteraceae es la más diversa con 21 especies y abundancia de 5.33 ind m⁻², esto coincide con lo reportado por Camacho *et al.*(2006), a pesar de que su estudio fue realizado en comunidades de ecotono entre bosque mesófilo y selva baja, al analizar la composición de la vegetación ribereña de estos ecosistemas, encontró que la familia Asteraceae, es una de las más abundantes en estos sitios, posiblemente es un primer indicio de la composición florística en las zonas ribereñas.

En sitios con altitud mayor a 3600 m se encontraron monocotiledóneas de las familias Poaceae, Cyperaceae y Fabaceae (*Lupinus montanus* Kunt.) todas estas son características del tipo de vegetación conocido como pastizal (Rzedowski, 2006). A menor altitud (2700 a 3400 m), se encontró el mayor número de familias, esto se debe principalmente a la condiciones climáticas que se encuentran en altitudes mayores, a las cuales no están adaptadas la mayoría de las familias vegetales encontradas, esto habla de la existencia de una distribución asociada con el gradiente altitudinal (Camacho *et al.*, 2006). También se observó la presencia de vegetación secundaria como *Penstemon getianoides* H.B.K. en sitios que han presentado algún tipo de perturbación ya sea de origen natural o antrópico, además hay familias como Compositae y Leguminosae que son consideradas parte de la vegetación secundaria (Rzedowski,



2006), al igual que la familia Asteraceae que se ha encontrado establecida en zonas con disturbios naturales recurrentes debido a las crecidas de los ríos (Camacho *et al.*, 2006), las especies de esta familia forman parte de la vegetación en este tipo de ecosistemas, por lo que no se sabe con exactitud cuáles son las especies de estas que pueden servir como indicador, esto puede interpretarse de dos formas, primero, que esta es una familia abundante en los ecosistemas ribereños y la segunda, que la mayoría de estos ecosistemas de ribera se encuentran con cierto grado de perturbación.

Entre los géneros encontrados están: *Stellaria*, *Dichondra*, *Sencio*, *Alchemilla*, *Stachys*, *Spergularia*, *Heuchera*, *Eupatorium*, *Lycianthes*, *Marchantia*, *Potentilla*, *Salix*, *Salvia*, *Gnaphalium*, *Polystichum*, *Fuchsia*, *Dryopteris*, *Asplenium*, *Thelypteris*, *Polypodium*, *Penstemon*, *Sida*, *Arbutus*, *Tagetes*, *Lupinus*, *Adiantum*, *Lopezia*, *Tithonia*, *Buddleia*, *Pleopeltis* y *Cirsum*. Sánchez-González y López-Mata (2003) y Rzedowski (2006) describieron la vegetación, al norte de la sierra nevada encontrando especies de géneros y familias aquí indicadas, Sánchez-González y López-Mata (2003) no señalan si incluyeron ambientes ribereños. Mientras que Rzedowski (2006) denomina a estos ambientes bosques de galería y considera como especies principales solo a *Salix* y *Arbutus*.

Por otro lado *Sencio*, *Alchemilla*, *Heuchera*, *Eupatorium*, *Potentilla*, *Salix*, *Salvia*, *Fuchsia*, *Polypodium*, *Penstemon*, *Arbutus*, *Tagetes*, *Lupinus* y *Cirsum*, son géneros reportados por Rzedowski (2006), como parte de la vegetación encontrada en el estrato arbustivo dentro de los bosques de *Pinus* y *Abies* de la zona montañosa del centro de México.

10.2. CORRELACIONES MÚLTIPLES

A partir del análisis de correlaciones múltiples al que se sometieron los datos de suelo y agua y después de haber seleccionado aquellos cuyas correlaciones fueron significativas ($P < 0.05$) y los de valor de correlación más alto ($r^2 > 0.5$). Las variables que cumplieron con lo anterior fueron: pH potencial, temperatura, C:N, % de arcilla, CE, conservación, % de N-total, uso de suelo, altitud, % de humedad, % de limo, fósforo extractable y % de C para el suelo, mientras que las del agua fueron: dureza total y de calcio, alcalinidad total, DQO, fósforo total, Ortofosfatos, DBO_5 , OD, velocidad de corriente, conductividad y NH_4^+ .

Con base en lo anterior, se considera que el uso de suelo influye en el manejo y determina la cantidad de actividades que se desarrollan en este por lo que tiene una correlación negativa ($r^2 = -0.5819$) con el grado de conservación de cada sitio muestreado. Los diferentes usos que se le dan al suelo implican la incorporación de compuestos lavados por la corriente, lo que genera un aumento en la cantidad de sólidos disueltos y consecuentemente la conductividad del agua, por lo que ambos presentan una correlación positiva ($r^2 = -0.5137$ y $r = -0.5109$) con el uso de suelo, conforme se desarrollan mayor número de actividades productivas y se establecen asentamientos humanos.

La perturbación antrópica del paisaje mediante la agricultura, la deforestación y el pastoreo rompe las relaciones estructurales y funcionales entre los elementos del paisaje y la estabilidad del ambiente acuático. Entre las actividades realizadas en las cuencas, el pastoreo del ganado es particularmente notable ya que ejerce un gran impacto sobre los ambientes acuáticos, compacta el suelo, reduce la infiltración e incrementa la escorrentía; las heces y orina elevan los niveles de fósforo y nitrógeno en el



agua. El ganado también afecta la vegetación y el suelo en el área ribereña con la destrucción de las orillas y cambio en la morfología del cauce, lo que repercute en la calidad fisicoquímica del agua; la destrucción de la vegetación ribereña reduce la entrada de hojarasca al ambiente acuático, que es una importante fuente de energía de estos (Chará *et al.*, 2007).

Cuando el ambiente presenta una disminución en su temperatura, afecta de forma directa la cantidad de calor en los sistemas agua y suelo, lo cual se ve representado con una correlación positiva entre estos tres factores del ecosistema. La tendencia negativa de la temperatura con respecto a la altitud es fácilmente distinguible ya que conforme la altitud aumenta las temperaturas disminuyen, a pesar de la influencia de otros factores como la estación del año, la hora del muestreo, el porcentaje de nubosidad, la cantidad de vegetación, entre otras, esta es la tendencia general, por lo que se puede decir que existe una correlación negativa entre las temperaturas y la altitud ($r^2=-0.4788$, $P < 0.05$ y $r^2=-0.7059$, $P < 0.05$) a la que se encuentra cada sitio de muestreo. La temperatura es uno de los parámetros condicionantes, por su influencia sobre muchos procesos como los de disolución de sales y gases, mineralización, degradación de MO y metabolismo de los organismos.

La temperatura del agua condiciona de modo directo o indirecto todo lo que sucede en el medio acuático, de modo que el régimen térmico de los ríos constituye uno de los parámetros más importantes para mantener el equilibrio en un ecosistema fluvial. Influye en aspectos como el contenido de oxígeno disuelto, densidad, disponibilidad de nutrientes y producción de algas. A pesar de que sobre la temperatura del agua inciden otros factores como el sombreado debido a la vegetación ribereña que es sin duda uno de los más importantes (Álvarez y Oria De Rueda, 2004; Granados *et al.*, 2006; Segnini y Chacón, 2005; Wetzel, 2001).

El aumento en la temperatura del agua en general incrementa la solubilidad de las sales y la velocidad de las reacciones metabólicas, acelerando la descomposición de la materia orgánica; aunado a este aumento de temperatura se da una disminución en la solubilidad de los gases, por lo que se pudo observar que al aumentar la temperatura del sistema acuático la cantidad de oxígeno disuelto fue menor.

La temperatura también es un factor determinante para la liberación de fósforo del suelo, ya que, la difusión de fósforo aumenta con el incremento de la temperatura. Por lo tanto existe más fósforo libre a mayor temperatura y este puede ser más fácilmente arrastrado por las aguas del sistema debido al lavado constante al que están sometidas las orillas.

Los sólidos totales disueltos y la conductividad eléctrica del agua son propiedades dependientes una de otra; su relación con la altitud es claramente negativa, por lo que se aprecian lecturas más altas a menores altitudes y se debe a muchos factores como la incorporación de sólidos y sales que se han arrastrado, esto coincide con lo reportado por Feijoó *et al.* (1999), quienes observaron que la conductividad presentaba cierta dependencia altitudinal atribuible a la presencia de fuentes de contaminación difusa, aunado a la relación antes mencionada entre la altitud y la temperatura, estos factores en conjunto resultan en el hecho de que exista una mayor solubilidad donde hay una temperatura más alta, lo cual se da a una menor altitud.



En el sistema terrestre, los valores de CE en el suelo dependen mucho de la temperatura, ya que esta es determinante para la solubilidad de sales. La conductividad eléctrica del agua presenta únicamente relación con parámetros del mismo sistema como: CO_2 , PO_4^{3-} , fósforo total, NH_4^+ , NO_3^- , alcalinidad, durezas y DQO. Se puede observar, que todos los parámetros que se relacionan con la conductividad tienen relación también con la cantidad de sólidos disueltos, por lo que su relación con la conductividad se da debido a su presencia.

Dentro de los STD se encuentran algunos que contienen en su composición alguno o varios de los nutrientes en forma de NH_4^+ , NO_3^- , PO_4^{3-} o fósforo en alguna otra forma química, esto provoca que al aumentar la cantidad de STD, aumenten también el contenido de estas sustancias en el agua; como consecuencia de lo anterior, otros parámetros se modifican como el pH, alcalinidad, durezas y DQO, lo que en conjunto, indicarían una disminución en la “calidad del agua”. Debe tenerse en cuenta también que la mineralización del agua en los sistemas de aguas corrientes naturales, está determinada principalmente por el clima y la geología del terreno (Wetzel, 2001), por lo que es posible observar cierta variabilidad en la conductividad, la alcalinidad y la dureza, reflejando diferencias de origen litológico entre los sitios (Segnini y Chacón, 2005).

El comportamiento del pH en general, tanto del agua como del suelo, tiene una tendencia negativa en función de la altitud, esto puede deberse a que ante la disminución de las temperaturas, la capacidad de solución de muchas sustancias como las sales tiende a disminuir. Avendaño y Castillo (2006) reportan para los bosques ribereños una tendencia ácida de sus suelos, lo que aunado al origen ácido los suelos en esta región (Granados *et al.*, 2006) y a la capacidad de absorción en este tipo de suelos, produce la disminución del pH.

El pH depende de la solubilidad de los iones, determinada por la temperatura ambiente que es factor condicionante para que se realicen los procesos bacterianos. Estos producen un aumento en el contenido nutrimental del suelo, lo que modifica el pH, provocando que exista una relación positiva entre la temperatura ambiental y el pH potencial del suelo. De la misma forma que para el pH, la temperatura afecta igualmente los valores de conductividad eléctrica y la cantidad de PO_4^{3-} disueltos.

Al ser el pH una propiedad determinante; su incremento repercute en el comportamiento de los nutrientes y sobre la solubilidad de los compuestos como las sales, lo cual se refleja en la conductividad eléctrica. El aumento en el pH del agua produce un efecto positivo para la liberación del P del suelo, lo que indica que ante un pH con tendencia básica, la cantidad de fósforo disponible aumenta. El pH activo del suelo presenta correlación positiva con la CE del mismo, esto se debe a que un aumento del pH indica una mayor cantidad de sustancias presentes en la solución del suelo. Sucede lo contrario con el porcentaje de N en el suelo, ya que, al aumentar el pH activo del suelo, este disminuye, por lo que se puede decir que los procesos de liberación del nitrógeno funcionan menos eficazmente en pH alcalinos.

El aumento en la cantidad de nutrientes y en la concentración de carbonatos, afecta la acidez y da lugar a un aumento en el pH del agua (Wetzel, 2001; Granados *et al.*, 2006; Habit Conejeros, 2003; Feijóo *et al.*, 1999); a pesar de esto el pH del agua presenta poca variabilidad debido a su capacidad buffer, determinada por el equilibrio dióxido de carbono-bicarbonato-carbonato en el sistema acuático (Wetzel, 2001; Segnini y Chacón, 2005).



El aumento en el pH del suelo, presentó correlación positiva con los siguientes parámetros del agua: DQO, durezas, alcalinidad, conductividad, contenido de fósforo total, NH_4^+ y NO_3^- , el pH potencial también se relaciona con PO_4^{3-} y el COP; el aumento de todos estos parámetros, se puede relacionar con una disminución en la calidad del agua o bien un aumento en el grado de eutrofización o contaminación del mismo, por lo que se puede sugerir que un aumento en el pH del suelo influye negativamente sobre la calidad del agua del sistema ribereño. El pH del suelo presenta correlación positiva con su CE y negativa con el porcentaje de N del suelo, esto se deriva del efecto del pH sobre la capacidad de disolución de las sustancias.

Se puede apreciar que el pH es un factor determinante para el comportamiento del resto de los parámetros, principalmente sobre los que se relacionan con los iones, disueltos o liberados, y los nutrientes, el cambio del pH en uno o ambos sistemas influye sobre las propiedades del otro, debido al constante contacto que se presenta entre ellos dentro de los ecosistemas ribereños, por lo que este parámetro puede considerarse de importancia para determinar el estado ecológico de las riberas, además de ser un buen ejemplo de la interacción entre sistemas lo que es reforzado por lo que reportan Granados *et al.* (2006), quienes lo catalogan como una de las características fundamentales de calidad del agua de las corrientes.

La demanda de oxígeno que muestra una correlación negativa con la altitud, esto principalmente se debe a la disminución de la temperatura y al aumento de la presión atmosférica, estos dos factores son determinantes en la capacidad de solución del oxígeno, se puede esperar una menor demanda de oxígeno a mayor altitud. Con relación al contenido de oxígeno disuelto, es importante agregar que aun cuando su solubilidad varía inversamente con la temperatura del agua (Wetzel, 2001), también existe la re-oxigenación del agua debido a la turbulencia de la corriente que mezcla constantemente el agua con el oxígeno atmosférico, contrarrestando los efectos que la temperatura del agua, la presión atmosférica o la producción primaria puedan tener sobre la cantidad de oxígeno disuelto en el agua (Segnini y Chacón, 2005).

El oxígeno disuelto en el agua que es un buen indicador de calidad del sistema presentó correlación positiva con el gasto del caudal y la velocidad de corriente. La velocidad de corriente ayuda a la aireación del agua, lo que incrementa los niveles de oxígeno en ella, de igual forma un mayor contenido de agua, disminuye la concentración de partículas de cualquier tipo, lo que se traduce en un mejor estado de la corriente o escurrimiento.

La DBO_5 tiene correlación importantes negativas, con la velocidad de corriente; al disminuir la velocidad de corriente, ayuda al asentamiento de colonias de microorganismos, los cuales hacen consumo del oxígeno, esto se mide a través de la incubación por cinco días, lo que genera un mayor consumo de este gas. Chará *et al.* (2007) mencionan que la tendencia hacia una mayor concentración de DBO_5 en los sitios sin protección obedece a que la materia fecal depositada en el área de captación y en las cercanías del cauce está aportando materia orgánica y organismos patógenos al agua, ya que éstos corren libremente por escurrimiento.

De forma totalmente contraria, con el aumento del oxígeno, se da la disminución de la dureza y la DQO, al ser esta última una medida del grado de contaminación del agua, reafirma el hecho de que una buena cantidad de oxígeno en el agua es prácticamente sinónimo de un buen estado ecológico de la misma. La



DQO es una medida de la cantidad de oxígeno necesaria para la oxidación de las partículas contenidas en el agua, por lo tanto está asociada con la contaminación del agua, la cual se da por la adición de un exceso de partículas ajenas al medio, esto se refleja en un aumento en parámetros como la alcalinidad y la dureza.

Como ya se mencionó, al aumentar la altitud disminuyen factores como la temperatura, lo que a su vez influye sobre la cantidad de oxígeno disuelto, la variabilidad de todos estos factores en conjunto tienen repercusión directa sobre la disponibilidad de fósforo el cual disminuye. Otro factor importante es que a menores altitudes se presentan con mayor frecuencia actividades como la agricultura, ganadería e incluso la presencia de asentamientos humanos, todo esto contribuye al aumento de P en el agua ya que estas actividades involucran acciones como la aplicación de fertilizantes, la descarga de aguas residuales, el uso de detergentes, entre otros. La carga elevada de fósforo en ríos puede acelerar el proceso de eutrofización, esto es ocasionado por el exceso de nutrimentos en el agua, lo que genera un desarrollo exagerado de poblaciones acuáticas de vida corta que después de muertas dan lugar a procesos de descomposición aeróbicos que consumen gran cantidad de oxígeno del agua, reduciendo la calidad del agua y provocando deterioro en el ecosistema (Ceccon, 2003).

La cantidad de COP en el agua depende de factores químicos, físicos y biológicos; primeramente al disminuir las temperaturas la capacidad de solución disminuye también, a esto se le suma el tipo de vegetación que se encuentre en el sitio, ya que a mayor cobertura la adición de hojarasca en el sistema aumenta, lo que produce la disminución del pH como consecuencia de la degradación de esta materia orgánica, el aumento de nutrientes y la tendencia eutrófica del sistema. Otro factor más pueden ser las sustancias vertidas sobre el suelo y agua, dependiendo del uso y manejo de ambos recursos.

En cuanto al aporte de materia orgánica, las dos fuentes principales de entrada de energía en los ecosistemas fluviales son los detritos procedentes de la ribera y la producción de algas del propio río. Se ha demostrado que la estructura biológica de un río depende en gran medida de la materia orgánica alóctona que llega a él, la cual procede en su mayor parte de la propia ribera (González y García, 1998). Por ello, para conseguir un adecuado balance energético que satisfaga las necesidades de los ecosistemas fluviales es necesario que a lo largo de todo el río se mantenga una banda de vegetación suficientemente ancha en las orillas (Álvarez y Oria De Rueda, 2004).

Numerosos parámetros edáficos condicionan el comportamiento hidrológico de las cuencas. Los más destacables son la profundidad del suelo, textura, estructura, porosidad, humedad y sus características químicas. A través de estos parámetros que controlan su capacidad de infiltración y retención de agua, el suelo constituye un regulador de la escorrentía superficial y subterránea, además de la influencia sobre la escorrentía, el suelo es un condicionante de primer orden en el establecimiento de la vegetación riparia (Álvarez y Oria De Rueda, 2004).

La relación entre la densidad aparente y el espacio poroso es inversa, esto se debe principalmente a que un valor más pequeño de densidad, indica un mayor volumen de agua y aire en la estructura del suelo y una reducida cantidad de material sólido, por la presencia de mayor número de poros y/o poros más grandes. La porosidad, a su vez es dependiente de la cantidad de arena en el suelo y determina en gran medida su porcentaje de humedad, lo que implica una relación entre estos parámetros.



El porcentaje de humedad afecta a las capas más superficiales del suelo, de ahí que se observe la relación positiva entre los parámetros de humedad de la capa de fermentación y la humedad del suelo inferior a esta. La capa de fermentación del suelo se encuentra en la parte superficial del mismo, al aumentar la cantidad de agua en el suelo, la capa de fermentación adquiere un mayor porcentaje de humedad y ayuda a la retención de agua en el suelo lo que también produce el aumento de esta humedad y/o la cantidad de agua que presenten los suelos de estos sitios.

La cantidad de agua que se transporta en el cauce del río es muy importante para el suelo, ya que al aumentar el gasto del caudal, el agua cubre una mayor superficie del suelo y contribuye al aumento de la humedad del mismo; a su vez, la hojarasca que se encuentra en las partes superiores se humedece y degrada más rápidamente. Si se considera que el aumento en el gasto se da en la temporada de lluvias, el porcentaje de humedad de la hojarasca se incrementa de forma considerable en esta época.

La mayor cantidad de sustrato inorgánico en las quebradas sin protección estaba cubierto por lodo o limo, mientras que en las cañadas protegidas este material sólo se encontró en un 29%. El mayor porcentaje de sustratos finos en las zonas ganaderas es, aparentemente, producto de la erosión y perturbación del cauce por el ganado. En contraste, los cauces protegidos con corredores ribereños tienden a presentar mayor porcentaje de sustratos gruesos como piedras. (Chará *et al.*, 2007). Según Avendaño y Castillo (2006) los bosques ribereños se caracterizan por tener suelos arenosos con bajo contenido de nutrientes y pH ácido, por lo que la productividad está condicionada por la existencia de mecanismos eficientes de reserva de nutrientes, lo cual se comprobó en este trabajo ya que se encontraron suelos más ácidos y arenosos en los ecosistemas ribereños que en sitios alejados de las riberas.

Existe una relación entre el fósforo disponible en el suelo y el porcentaje de humedad de la hojarasca, se puede explicar la relación que existe entre estos dos parámetros debido a que la descomposición de la hojarasca aporta nutrientes al suelo, el fósforo entre ellos. Al aumentar el porcentaje de humedad de la hojarasca y tomando en cuenta que esta ayuda a la retención de agua en el suelo, se puede decir que existe un medio propicio para la liberación del fósforo. El fósforo es reducido por la acción del bosque ribereño, porque el 85% del fósforo disponible está ligado a las pequeñas partículas del suelo; los bosques de ribera retienen parte del fósforo transportados por la escorrentía, desde los cultivos hasta los cursos de agua. Una banda de vegetación de ribera de 16 m de largo retiene 95% del fósforo. La creación de corredores vegetales a lo largo de los ríos es uno de los medios que permiten restaurar la calidad de las aguas superficiales (Ceccon, 2003 y Granados *et al.*, 2006).

El hecho de que el fósforo tenga relación con los ortofosfatos es debido a que la mayoría de las especies solubles del fósforo se encuentran en forma de ortofosfatos. La cantidad de fósforo total disuelto en el agua presentó las correlaciones más importantes con la DQO, la alcalinidad, las durezas y los ortofosfatos con polaridad positiva, esto quiere decir que todas aumentan al aumentar el contenido de fósforo en el agua, lo cual se debe, a que una parte del fósforo puede presentarse como sales, las cuales influyen en las lecturas de alcalinidad y durezas, además de que un alto contenido de fósforo también indica cierto grado de contaminación y/o eutrofización del sistema, lo cual se ve reflejado en las medidas de la DQO.



Del lado negativo se encuentra al oxígeno, la elevación en los contenidos de fósforo impide la disolución de oxígeno, lo que va generando cierto grado de anoxia en el sistema, además de impedir el afloramiento de microorganismos, lo que también afecta a las posteriores lecturas de la DBO₅. Esto concuerda con lo reportado por autores como Ceccon (2003) y Granados *et al.* (2006), quienes mencionan que, la elevada carga de fósforo en ríos y lagos puede acelerar el proceso de eutrofización, lo que con el tiempo da lugar a procesos de descomposición aeróbicos que consumen gran cantidad del oxígeno del agua y limitan la existencia de otros seres vivos y de sí mismas, pues finalmente reducen la calidad del agua y destruyen el ecosistema.

La única diferencia que existe entre las correlaciones que presenta el fósforo total y las que presentan los ortofosfatos es que esta tiene una relación importante con el fósforo disponible del suelo. Ésta relación es positiva, lo que significa que al aumentar el fosforo disponible en el suelo, los ortofosfatos del agua aumentan también. Posiblemente se debe a que el agua está en constante contacto con el suelo ribereño y se presenta lavado de los mismos y su adición al sistema acuático.

La cantidad de nitratos (NO₃⁻) en el agua presentó sus correlaciones más importantes con la DQO, la alcalinidad, las durezas y el fósforo total positivamente. Esto quiere decir que todas aumentan junto con el contenido de NO₃⁻ debido a que muchos de los nitratos pueden presentarse como sales, que a la vez influyen en las lecturas de alcalinidad y durezas, además de que un alto contenido de nitratos también puede ser sinónimo de contaminación y/o eutrofización del sistema, repercutiendo en las medidas de la DQO. Algunos estudios (Ceccon, 2003 y Granados *et al.*, 2006) demuestran que el nitrógeno en el escurrimiento del agua subterránea superficial, puede ser reducido en un 80% después de pasar por un bosque ribereño. El bosque también transforma residuos de pesticidas transportados por escorrentías en componentes no tóxicos por descomposición biológica y otras formas biodegradables. Cerca de 25% del nitrógeno removido por el bosque ribereño es asimilado en el crecimiento de los árboles y puede ser almacenado por largos periodos de tiempo.

Por otro lado, la cantidad de NO₃⁻ tuvo relación negativa con el gasto del caudal y la DBO₅, primeramente el gasto influye ya que al haber una menor cantidad de agua la concentración de los iones contenidos en ella aumentan, es el caso de los nitratos; al llevarse a cabo la oxidación del N a NO₃⁻ se disminuye la concentración de oxígeno disuelto debido a la oxidación, lo que resulta en una disminución del contenido de oxígeno O₂ y explica su relación con la DBO₅. Ceccon (2003) menciona que en el caso de suelos bien oxigenados, las bacterias y los hongos del bosque convierten el nitrógeno del escurrimiento y la materia orgánica del suelo del bosque en formas minerales (nitratos) que pueden ser aprovechadas por las plantas y bacterias. Cuando la humedad del suelo es alta se crean condiciones anaerobias en las cámaras superficiales del bosque y las bacterias convierten el nitrógeno disuelto en nitrógeno gaseoso, regresándolo a la atmósfera.

El amonio (NH₄⁺) se comporta de forma parecida a los nitratos, al igual que estos, tiene relación positiva con el fósforo total, la alcalinidad, la DQO y las durezas, solo que este tiene también una relación con los ortofosfatos del agua. Estas correlaciones son básicamente las mismas que para nitratos, pero se diferencian debido a que, la presencia del amonio se debe a contaminación orgánica, con residuos directos de seres vivos en forma de NH₃, que en disolución se convierte en NH₄⁺, liberando así el oxígeno que se une a algunas especies de fósforo formando los ortofosfatos.



La cantidad de NH_4^+ es afectada por el uso de suelo (presentan correlación positiva), debido a que: 1) Los suelos agrícolas presentan aportaciones de NH_4^+ en fertilizantes y el lavado produce aportes a los cuerpos de agua, 2) Suelos forestales de este tipo llegan a tener deficiencias de N y para el caso específico del NH_4^+ , suelos conservados no deben presentar niveles altos debido a que no tienen aportes de N, por lo que no existen aportes amoniacales a las corrientes, más aún si estos sitios están en las zonas más altas en donde el curso del agua es natural y presenta alteraciones mínimas y 3) El uso de suelo urbano es indicador de que pueden existir descargas de aguas residuales a los ríos, las cuales pueden contener tanto fosfatos como NH_4^+ .

Diversos estudios han demostrado la relación positiva que existe entre el porcentaje de uso de suelo agrícola en la cuenca y las concentraciones de nitratos en las aguas de los arroyos (Feijoó, 2009; Ceccon, 2003 y Granados *et al.*, 2006). Algunos autores han encontrado que el uso de suelo en la zona ribereña presenta relaciones más fuertes con los niveles de nitratos en las aguas que el uso de suelo en la cuenca entera. Los excesos de nitrógeno provenientes de la actividad agrícola se solubilizan rápidamente en agua y son transportados al manto freático. Por otra parte, en los sedimentos de arroyos que mantienen la vegetación natural de la ribera inalterada se produce la conversión del nitrato disuelto a nitrógeno gaseoso a través de un proceso bacteriano denominado desnitrificación, con la consiguiente mejora de la calidad del agua. Se ha observado que con la canalización se reduce la capacidad de la red fluvial para cumplir esta función actuando como áreas claves para la mitigación de la contaminación por fertilizantes (Feijoó, 2009).

Para Ceccon (2003) y Granados *et al.* (2006), en las áreas de bosques ribereños naturales los niveles de materia orgánica en el suelo son altos, lo que aumenta los procesos de adsorción química. Los bosques ribereños se consideran base para la cadena alimentaria de los cuerpos de agua. El material orgánico proveniente del mantillo (hojas y ramas caídas en descomposición), transportado hacia el cuerpo de agua a partir de la vegetación marginal constituye un suministro energético aún más importante que la producción autóctona en los ríos. Al ser el porcentaje de C una medida derivada de la determinación de la materia orgánica, es natural que exista una relación directa positiva entre ellos.

Por otro lado, el porcentaje de Nitrógeno total del suelo, tiene relación positiva con el contenido de C; al aumentar el contenido de materia orgánica y mantenerse estable su tasa de mineralización, se obtiene como resultado una buena liberación de carbono y de compuestos nitrogenados. La razón C:N, guarda relaciones con algunos parámetros del agua, que determinan su calidad influenciada por la cantidad de materia orgánica adicionada al suelo y agua y la velocidad de mineralización. La otra relación importante del carbono del suelo se da negativamente con las durezas esto se explica debido a que al tener más carbono orgánico, el carbono inorgánico no se encuentra disponible.

Se ha demostrado que la estructura biológica de un río depende en gran medida de la materia orgánica alóctona que llega a él, la cual procede en su mayor parte de la propia ribera (González y García, 1998); sin embargo donde se han eliminado las franjas de vegetación protectora con el fin de establecer pasturas se ha incrementado la contaminación por materia orgánica, sedimentos y patógenos, lo cual va en detrimento de la biota que habita estos ambientes y de la población que usa el líquido para consumo humano o animal (Chará *et al.*, 2007; Pedraza *et al.*, 2008).



La alcalinidad del agua presentó correlación positiva con las durezas, esto puede deberse a que, las durezas están determinadas por el contenido de compuestos como carbonatos y la concentración de estos modifican los valores de alcalinidad para el agua, lo que coincide con Wetzel (2001), quien propone que un aumento en la concentración de carbonatos puede dar lugar a un aumento en el pH.

A demás la química del arroyo está fuertemente influida por el suelo, la vegetación y el uso de suelo a lo largo de sus bordes; el agua que se percola a través del suelo incorpora nutrientes, lo cual afecta la acidez y la calidad del agua (Granados *et al.*, 2006). La mineralización del agua en los sistemas de aguas corrientes naturales, está determinada principalmente por el clima y la geología del terreno (Wetzel, 2001) también la disponibilidad de oxígeno disuelto y la cantidad de MO, por lo que es posible que la variabilidad en la conductividad, alcalinidad y dureza, esté reflejando las diferencias de origen litológico entre los sitios (Segnini y Chacón, 2005).

10.3. ANALISIS DE COMPONENTES PRINCIPALES

Con la finalidad de reducir el número de variables, se realizó un análisis de Componentes principales usando las variables que tuvieron los valores de correlación más altas en el análisis de correlación múltiple, las variables que cumplieron con lo anterior fueron: pH potencial del suelo (pHpot), temperatura del suelo (Tsuelo), relación C:N (CN), % de arcilla (ARC), conductividad eléctrica del suelo (CE1), grado de conservación del sitio (Cons), % de N-total del suelo (PNtotS), Uso de suelo (Usuelo), altitud (Alt), % de humedad del suelo (Phum), % de limo (LIM), P-disponible del suelo (Pppm), % de carbono orgánico del suelo (PCS), dureza total (DT), dureza de calcio (Dca), alcalinidad total (Atot), DQO, F-total del agua (PtotA), contenido de ortofosfatos del agua (ORTOA), oxígeno disuelto (OD), velocidad de corriente (Vel), conductividad eléctrica del agua (Cond) y concentración de amonio en el agua (NH_4^+).

A partir de las variables mencionadas se obtuvieron un total de 24 componentes, de los cuáles, se extrajeron 6 componentes principales con eigenvalores mayores o iguales a 1.0 y con ellos se puede explicar, en conjunto, el 86.568% de la varianza total de los datos originales. Cada uno de los componentes principales se ve afectado por distintas variables, lo que nos muestra un primer bosquejo del funcionamiento del ecosistema ribereño.

Los parámetros del 1^{er} componente permiten describir la calidad del agua, por lo que se puede decir que este representa el estado del sistema acuático en los ecosistemas ribereños y estas variables son las más importantes para determinar su calidad a nivel acuático.

El segundo componente muestra una relación, entre parámetros de agua y suelo, ya que está determinado positivamente por el porcentaje de limo (LIM), el porcentaje de humedad del suelo (Phum) y el porcentaje de N total del suelo (PNtotS). El componente número tres explica la calidad del suelo en función de la altitud, siendo únicamente esta con la que se relaciona negativamente, mientras que los parámetros positivos de mayor peso en este componente son; el fósforo disponible (Pppm), el porcentaje de carbono del suelo (PCS) y la temperatura del mismo (Tsuelo). De la misma forma que en el primer componente, estas variables determinan la calidad del ecosistema, pero esta vez a nivel terrestre.



El 4º componente describe la calidad del suelo, en función de su estructura, y como es afectada de acuerdo al uso de suelo que se tenga en cada uno de los sitios. Sus parámetros más pesados hacia el extremo positivo fueron el Pppm y su grado de conservación (Cons), mientras que hacia el lado contrario encontramos el uso de suelo (Usuelo) y el porcentaje de arcilla (ARC).

La fertilidad del suelo y su velocidad de mineralización, se encontró en función del grado de conservación, dentro del componente cinco, esto debido a que la relación C:N y el PCS, positivos para este componente, se ven afectados de manera inversa por el grado de conservación. Por último, el componente seis muestra la modificación de la estructura y calidad del suelo determinadas por el uso que se le dé y nuevamente, a través del oxígeno, una relación entre estos y el sistema acuático. Sus variables de mayor peso fueron la ARC, el pH potencial (pHpot) y el Pppm, positivas, y el uso de suelo la negativa.

Como se puede apreciar cada componente representa el comportamiento de cierta parte del ecosistema ribereño como un conjunto. Tres de estos componentes se refieren a las características que presenta el suelo, de acuerdo con su estado de conservación o su fertilidad; sin embargo, cada uno está enfocado hacia alguna variable indicativa de su calidad, por lo que para futuros trabajos se podrían tomar en cuenta propiedades específicas dependiendo de lo que se necesite analizar.

Otro de los componentes se enfoca exclusivamente en la calidad del agua, determina únicamente ocho variables, las cuales en conjunto explican o justifican el nivel de contaminación que presente este tipo de sistemas acuáticos. Al igual que para el caso de los componentes de suelo, estas variables podrán ser utilizadas posteriormente como determinantes del estado en el que se encuentran los ríos de los ecosistemas ribereños en los bosques templados.

Finalmente los dos componentes restantes implican cierta relación entre parámetros de agua y de suelo, aunque solo consideran como variable “acuática” de mayor peso a las relacionadas con el oxígeno, esto se puede justificar debido a que como mostró el análisis de correlaciones múltiples, la mayoría de las veces, los parámetros relacionados con la cantidad de oxígeno disuelto en el agua, o bien la demanda que existe de este elemento, proporcionan buena información sobre el estado ecológico en el que se encuentran estos ecosistemas.

10.4. ANALISIS DE CORRELACIONES CANONICAS

El método de las correlaciones canónicas es una generalización de la regresión múltiple que tiene por objeto encontrar la correlación máxima entre las combinaciones lineales (variables canónicas) de dos grupos de descriptores. Esta técnica multivariante ha sido utilizada en el campo de la ecología por diversos autores (Fernández *et al.*, 1986). Del análisis de correlaciones canónicas se obtuvieron 4 correlaciones canónicas importantes, con valores de probabilidad (P) menores que 0.05, esos conjuntos tienen una correlación estadísticamente significativa con un nivel de confianza del 95.0% y explican en su conjunto el 57.73% de la varianza total de los datos originales.

El primer coeficiente, que representa el 15.05% del funcionamiento del sistema, representa, para el sistema acuático la variación en la acidez del agua y la cantidad de fósforo total en ella, mientras que las



variables terrestres que explican este coeficiente, representan el grado de mineralización del nitrógeno en función del uso de suelo y la altitud a la que se encuentren los sitios.

El coeficiente número dos para el ecosistema acuático, explica, la variación de acidez en relación con el contenido de NH_4^+ , mientras que para la parte terrestre determina también la acidez y salinidad del suelo, nuevamente en función de la altitud y su uso.

El tercer coeficiente canónico, podría ser llamado el componente nutricional, ya que es el único que presenta la influencia de la parte nutritiva para ambos sistemas. Este explica, para el agua el contenido de nutrientes y la cantidad de sales en ella, mientras que para el suelo, representa la cantidad de nutrientes disponibles en función de la altitud a la que se encuentra el sitio y de la estructura que tenga el suelo.

El último coeficiente, que explica únicamente el 12.76% del comportamiento del ecosistema de ribera, lo determina la acidez del agua en función del fósforo total, mientras que en el ambiente terrestre se determina por la mineralización y la salinidad que presentan los suelos en función de su estructura.

A partir de este análisis y de acuerdo con los parámetros que definen cada uno de los coeficientes presentados aquí, se percibe, la gran influencia que tienen variables como la alcalinidad, la dureza, y los contenidos de N y P en el agua. Mientras que las variables del suelo más importantes son las que determinan la tasa de mineralización de la MOS, el estado nutrimental, la salinidad y la estructura. Para este tipo de ambientes en bosques templados, se aprecia una gran influencia de la altitud en los sitios de muestreo, ya que es una variable de influencia constante en los cuatro coeficientes de correlación canónica.

Este análisis muestra que si existe una relación entre los parámetros del agua y del suelo, como Álvarez y Oria De Rueda (2004) lo habían propuesto, en las riberas agua y medio terrestre muestran una íntima relación. A partir de las correlaciones entre las variables canónicas y los dos conjuntos de datos, se pueden observar parámetros que tienen más peso y por lo tanto proporcionan mayor información sobre el estado ecológico del ecosistema ribereño. Estos parámetros fueron la relación C:N, el uso de suelo, la altitud, el porcentaje de carbono del suelo, la conductividad eléctrica del suelo, el pH potencial, el porcentaje de N en el suelo, el porcentaje de limo, la dureza total y de calcio, la alcalinidad total el contenido de fósforo total en el agua, la cantidad de NH_4^+ y la conductividad eléctrica.

Todo esto se refuerza con los estudios de Kutschker *et al.* (2009) y Morales y Fernández (2005), quienes demuestran la fuerte interacción que existe entre el río y el ecosistema terrestre adyacente, y que es, justamente, el bosque de ribera el que sustenta la conectividad entre ambos ambientes. Además puntualizan el hecho de que los bosques de ribera constituyen un elemento clave para la evaluación del estado ecológico de los ríos y es imperativo el desarrollo de indicadores biológicos para un manejo sustentable de las áreas boscosas, destacando la importancia del estudio con visión integradora de procesos internos y externos, tomando en cuenta las interacciones entre vegetación de ribera y algunos procesos hidrológicos.



11. CONCLUSIONES

- * Se identificaron cuatro fajas altitudinales relacionadas con el aprovechamiento de los recursos naturales, denominadas por otros autores como: Sierra, Zona de erosión inducida, Somontano y Llanura.
- * La perturbación antrópica del paisaje mediante la agricultura, la deforestación y el pastoreo, rompe las relaciones estructurales y funcionales entre los elementos del paisaje y la estabilidad del ambiente ribereño.
- * El pastoreo del ganado es una actividad con mayor impacto sobre los ecosistemas ribereños ya que aumenta la densidad aparente del suelo, reduce la infiltración, incrementa la escorrentía, daña la vegetación y aumenta las concentraciones de fósforo y nitrógeno en el agua.
- * Con el descenso altitudinal se incrementa el número de actividades antropogénicas como la agricultura, ganadería e incluso la presencia de asentamientos humanos, esto contribuye al aumento de fósforo en el agua, debido a: la aplicación de fertilizantes, la incorporación de desechos orgánicos, la descarga de aguas residuales, uso de detergentes, entre otros.
- * El régimen térmico constituye uno de los factores más importantes para mantener el equilibrio en el ecosistema fluvial por su influencia en variables como la concentración de oxígeno y sales disueltas, la disponibilidad de nutrientes y los procesos de mineralización.
- * Las principales familias vegetales encontradas en los sistemas ribereños de zona occidental del PNI-P y su área de influencia fueron ocho: Asteraceae, Lamiaceae, Aspleniaceae, Caryophylleaceae, Dryopteridaceae, Rosaceae, Onagraceae y Thelipteridaceae. De estas la mejor representada fue Asteraceae.
- * La distribución de especies vegetales sigue un gradiente altitudinal, la mayor diversidad se encuentra entre los 2700 y 3400 m. Sobre los 3400 m snm el pastizal es dominante.
- * En sitios que presentaron disturbios de origen natural o antrópico, se registró la presencia de las familias Asteraceae, Compositae y Leguminosae.
- * Los datos de vegetación obtenidos en este estudio no son suficientes para determinar las especies vegetales capaces de fungir como indicadores del estado de salud de los ecosistemas ribereños.
- * La capacidad de infiltración y retención de humedad en el suelo regula la escorrentía superficial y subterránea, además de condicionar el establecimiento de la vegetación ribereña.



- * La conductividad eléctrica tanto del suelo como del agua, presenta relación inversa con la altitud, debido a la localización de fuentes de contaminación difusa y al aumento de solubilidad de sales, como resultado del incremento de temperatura.
- * Al aumentar el pH activo del suelo, disminuye el porcentaje de N en el suelo, por lo que se puede decir que los procesos de liberación de nitrógeno funcionan menos eficazmente en pH alcalinos.
- * El pH del agua es un factor determinante en el comportamiento del resto de las variables químicas, principalmente los relacionados con la disolución y liberación de iones y nutrientes, por lo que se puede catalogar como una característica fundamental de la calidad del agua.
- * El proceso de oxigenación del agua debido a la turbulencia de la corriente, es un factor importante, debido a que la mezcla constante con el oxígeno atmosférico, minimiza los efectos que la temperatura, la presión atmosférica o la producción primaria tienen sobre la concentración de oxígeno disuelto en el agua.
- * Una alta concentración de oxígeno disuelto en el agua es sinónimo de un buen estado ecológico del recurso.
- * La elevada carga de fósforo y nitrógeno en los ríos acelera la eutrofización, dando lugar a procesos de descomposición aeróbicos que consumen gran cantidad del oxígeno, reduciendo la calidad del agua y destruyendo el ecosistema.
- * La cantidad de amonio en el agua de estos ecosistemas está influenciada por el uso de suelo, en cada una de las localidades siendo el agrícola el que presenta más aportaciones de este ión.
- * La calidad del agua varía debido a factores naturales y antrópicos, relacionados con su origen litológico y el uso de suelo respectivamente.
- * Los bosques de ribera retienen parte del fósforo transportado por la escorrentía desde los cultivos hasta los cursos de agua.
- * La creación de corredores vegetales a lo largo de los ríos es uno de los medios que permiten restaurar la calidad de las aguas superficiales.
- * Para conseguir un balance energético de los ecosistemas fluviales; es necesario que a lo largo del río se mantenga una banda de vegetación mayor de 5 m a ambos lados del cauce.
- * La vegetación de ribera aporta protección contra la erosión y desarrolla mecanismos eficientes de reserva de nutrientes, necesarios para mantener su productividad.
- * La química de estos arroyos está fuertemente influida por el suelo adyacente, la vegetación y los usos de la tierra a lo largo de sus bordes.



- * La calidad del sistema acuático en los ecosistemas ribereños, según el análisis de componentes principales, puede ser determinada a partir la medición de la dureza total y de calcio, alcalinidad total, conductividad eléctrica, contenido de amonio, DQO y oxígeno disuelto.
- * Con base en el análisis de componentes principales, la calidad del suelo en los ecosistemas ribereños se puede determinar en función de la altitud, uso de suelo y grado de conservación a partir de parámetros como textura, temperatura, pH potencial, cantidad de fósforo disponible y la relación C:N.
- * El análisis de correlaciones canónicas confirma que los parámetros que proporcionan mayor información sobre el estado ecológico del ecosistema ribereño y sus interacciones son la altitud, la relación C:N, el uso de suelo, el porcentaje de C, la conductividad eléctrica, el pH potencial, el porcentaje de N y la textura del suelo; mientras que del agua fueron la dureza total, de calcio, la alcalinidad total, el contenido de fósforo total, la cantidad de amonio y la conductividad eléctrica.
- * Los bosques de ribera constituyen un elemento clave para la evaluación del estado ecológico de los ríos, por lo que es necesario el desarrollo de indicadores biológicos para el manejo de estas áreas con una visión integradora de los procesos internos y externos que tomen en cuenta las interacciones entre el suelo, la vegetación de ribera y los procesos hidrológicos.



12. RECOMENDACIONES

- ❖ Realizar estudios similares, en igual número de sitios contaminados y no contaminados.
- ❖ Realizar muestreos más específicos de la vegetación, para identificar las especies que pueden ser utilizadas como bioindicadores del estado de salud de los ecosistemas ribereños para bosques templados.
- ❖ Incorporar a los estudios sobre cuencas hidrográficas, el análisis de la interacción agua-suelo-vegetación como un elemento integrador, para las zonas ribereñas
- ❖ Realizar estudios para determinar el ancho ideal de la franja de vegetación ribereña.
- ❖ Realizar la misma cantidad de muestreos en época de lluvias y en época de secas en cada uno de los sitios de estudio.
- ❖ Definir el método de muestreo a partir del relieve encontrado en los sitios de trabajo.
- ❖ Realizar análisis donde solo se consideren los parámetros con mayor peso estadístico o con relación significativa.



13. REFERENCIAS

- Aguilera, N. 1989. Tratado de Edafología de México. Tomo I. Primera impresión. Facultad de Ciencias, UNAM. México. p. 222.
- Álvarez N. A. y J. A. Oria De Rueda S. 2004. Las Riberas: Síntesis De La Ecología De Un Ecosistema Singular. Universidad De Valladolid. España. Pp. 7.
- APHA, AWWA and WPCF. 1992. Métodos normalizados para el análisis de aguas potables y residuales. 17^o edición. Editorial Díaz Santos. Washington. Pp. 1995.
- Avendaño N. y A. Castillo. 2006. Catálogo de especies arbustivas de los bosques ribereños en Eláreacuao-Sipapo-Orinoco medio, municipio Autana, estado Amazonas. Acta botánica Venuezelica. 29(002):235-256. Caracas, Venezuela.
- Ayala N.F. 2007. Caracterización hidrográfica de la microcuenca de colonia San Martín, Zapotitlán Salinas, Puebla. Tesis de Licenciatura. Facultad de Estudios Superiores Iztacala. UNAM. México. Pp. 98.
- Camacho R. F., I. Trejo. y C. Bonfil. 2006. Estructura y composición de la vegetación ribereña de la barranca del río Tembembe, Morelos, México. Boletín de la Sociedad Botánica de México. México. 78:17-31.
- Ceccon E. 2003. Los bosques ribereños y la restauración y conservación de las cuencas hidrográficas. Ciencias (72):47-53. México, D.F.
- Chará J. G., Pedraza L. G. y D. Hincapié. 2007. Efecto de los corredores ribereños sobre el estado de quebradas en la zona ganadera del río La Vieja, Colombia. Agroforestería en las Américas. 45:72-78. Colombia.
- Chavarría A., R. 2005. Cuantificación retrospectiva (1993-1999) de la depositación ácida en suelos forestales del desierto de los leones, Izta-popo y Zoquiapan, y determinación multielemental aplicando la técnica de PIXE. Tesis de licenciatura en biología. FES-Zaragoza. UNAM. Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas. 2009. Parque Nacional Izta-Popo Zoquiapan. Disponible en línea en: <http://iztapopo.conanp.gob.mx/>
- Comisión Nacional del Agua. 2009. Ley de Aguas Nacionales y su Reglamento. ISBN 978-968-(pendiente). www.conagua.gob.mx. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales.
- Comisión Nacional del Agua. 2010. Estadísticas del Agua en México, edición 2010. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. México, D.F. Pp.258.
- Dourojeanni A., A. Jouravlev y G. Chávez. 2002. Gestión del agua a nivel de cuencas: teoría y práctica. Programa Agua, Medio Ambiente y Sociedad. Publicación de la Naciones Unidas. USA.



- Ezcurra E., M. Mazari-Hiriart, I. Pisanty y A. G. Aguilar. 2006. La cuenca de México. Aspectos ambientales críticos y sustentabilidad. FCE. Colección de Obras de Ciencia y tecnología. México. D.F. Pp. 286.
- Feijoó C. 2009. La destrucción morfológica y biológica de los arroyos pampeanos. Programa de Investigación en Ecología Acuática. Departamento de Ciencias Básicas. Universidad Nacional de Luján. Buenos Aires, Argentina. Pp. 7.
- Feijoó C. S., A. Giorgi, M. E. García y F. Momo. 1999. Temporal and spatial variability in streams of pampean basin. *Hydrobiología* 349: 41-52. Buenos Aires, Argentina.
- Fernández A. M.C., E. L. Calabuig y M. Fernández A. 1986. Análisis de correlaciones canónicas aplicado al estudio de la relación entre la composición físico-química del agua y suelo aluvial en el río Bernesga (León). *Limnética* 2:85-93. Madrid, España.
- Galván F. A. y A. Z. Márquez G. 2006. Descripción biofísica de la cuenca del río Coapa, Chiapas. *Hidrobiológica* 2(16):107-120.
- Gayoso, J. y S. Gayoso. 2003. Diseño de zonas ribereñas requerimiento de un ancho mínimo. Valdivia. Universidad Austral de Chile. Departamento de Ciencias Forestales. Chile. Pp. 12.
- Gleick, P.H. 2000. *The world's water 2000-2001*. Island Press. Washington, D.C. Pp. 315.
- González del Tánago, M., M.R. Vidal-Abarca, M.L. Suárez y C. Molina. 1995. Consideraciones sobre el estado actual de las riberas de los principales cauces fluviales de la cuenca del río Segura (España)". *ANALES DE BIOLOGIA. Biología Ambiental* 20(9):117-130.
- González, M. y D. García. 1998. Restauración de ríos y riberas. Ediciones Mundi Prensa. Madrid, España. p. 319.
- Granados S. D.; M.A. Hernández G.; G.F. López R. 2006. Ecología de las zonas ribereñas. *Revista Chapingo. Serie Ciencias forestales y ambiente. México.* 12(1):55-69.
- Habit-Conejeros E. 2003. Calidad del agua del estero Piduco (Talca, VII Región): un análisis basado en la data existente. Universidad del Bío-Bío. *Theoria* 12: 43-54. Chillán, Chile.
- Hernández G. M. A. y D. Granados S. 2006. El Parque Nacional Iztaccíhuatl-Popocatepetl-Zoquiapan y el impacto ecológico-social de su deterioro. *Revista Chapingo. Serie ciencias forestales y del ambiente. México.* 12(002):101-109.
- Hernández G., R y Herrerías G., G. 2001. *Procesos de delimitación de cuencas tributarias*. Alternativas y Procesos de Participación Social A.C. Tehuacán, Puebla, México.
- Instituto Nacional de Ecología. 2000. Regionalización de cuencas hidrográficas. Disponible en línea en: <http://www.ine.gob.mx/dgioece/cuencas/index.html>



- Johnson E. D. 2000. Métodos multivariados aplicados al análisis de datos. International Thompson Publishing. Capi.12. Pp: 189-515.
- Kennard, M.J.; B.J. Pusey; A.H. Arthington; B.D. Harch y S.J Mackay. 2006. Development and application of a predictive model of freshwater fish assemblage composition to evaluate river health in eastern Australia. *Hidrobiología* 572:33-57.
- Kobiyama, M. 2003. Conceitos de zona ripária e seus aspectos geobiohidrológicos. Seminário de Hidrologia Florestal: Zonas Ripárias. Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental. Universidad Federal de Santa Catarina. Florianópolis, Brasil. Pp. 13.
- Kutschker, A, C. Brand y M. L. Miserendino. 2009. Evaluación de la calidad de los bosques de ribera en ríos del NO del Chubut sometidos a distintos usos de la tierra. *Ecología Austral*. Chubut, Argentina. 19(1):18.
- Manson, R.H. 2004. Los servicios hidrológicos y la conservación de los bosques de México. *Madera y Bosques*. 10(1), 2004:3-20.
- Mickel J. T. y A. R. Smith. 2004. The Pteridophytes of Mexico. *Memories of the New York Botanical Garden*. Vol. 88. The New York Botanical Garden. USA. Pp.1054.
- Morales, C.M. y J. Fernández B. 2005. Aspectos relevantes de la interacción entre la vegetación de ribera, la hidráulica y la morfología de cauces. 3^{er} Congreso de Ingeniería Civil, territorio y medio ambiente. Valencia, España. Pp. 14.
- NOM-001-SEMARNAT-1996. 2003. Que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en aguas y bienes nacionales. *Diario Oficial de la Federación*. México. Pp. 35.
- NOM-021-RECNAT-2001. 2002. Norma Oficial Mexicana, Que establece las especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de suelos. Estudios, muestreo y análisis. *Diario Oficial de la Federación*. México. Pp. 85.
- NOM-059-SEMARNAT-2001. 2003. Protección Ambiental. Especies nativas de México de flora y fauna silvestres-Categorías de riesgo y especificaciones para su inclusión, exclusión o cambio-Lista de especies en riesgo. *Diario Oficial de la Federación*. México. Pp. 153.
- Ortiz-Arrona. C.I., P.R.W. Gerritsen, L.M. Martínez R., A. Allen y M. Snoep. 2005. Restauración de bosques ribereños en paisajes antropogénicos, en el occidente de México [En línea]. Cuba. Pp. 12. Disponible en: www.dama.gov.co.
- Palacio A.A.G., R. Noriega T. y P. Zamora C. 2002. Caracterización físico-geográfica del paisaje conocido como "bajos inundables". El caso del Área Natural Protegida Balamkín, Campeche. *Investigaciones Geográficas*. Universidad Nacional Autónoma de México. México. 49: 57-73.



- Parsons T. R, M. Yoshiaki, L. Carol M. 1984. A manual of chemical and biological Methods for seawater analysis. Pergamon Press. Oxford, England. Pp 173.
- Pedraza G. X., L. P. Giraldo y J. D. Chará. 2008. Efecto de la restauración de corredores ribereños sobre características bióticas y abióticas de quebradas en zonas ganaderas de la cuenca del río La Vieja, Colombia. *Zootecnia tropical* 26(3):179-182. Colombia.
- Person H., S. 1936. Las pequeñas fuentes fluviales. Estudio de las cabeceras fluviales y otros pequeños cuerpos de agua, su utilidad y sus relaciones con el suelo. Washington, DC. USA. Pp. 17-23.
- Ramírez L.J.E. 2007. Caracterización de las condiciones morfológicas y edáficas de ecosistemas de ribera en la red hidrológica de la subcuenca Mil Cumbres (río grande) en la cuenca de Cuitzeo, Michoacán. Tesis de licenciatura en biología. Facultad de ciencias. UNAM.
- Rzedowski, G., C. de, J. Rzedowski y colaboradores. 2005. Flora fanerogámica del Valle de México. 2a. ed. 1a reimp. Instituto de Ecología, A.C. y Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. Pátzcuaro, Michoacán. Pp. 1406.
- Rzedowski, J., 2006. Vegetación de México. 1ra. Edición digital, Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad, México, 504 pp.
- Sánchez, V. A. 1987. Conceptos elementales de hidrología forestal. Agua, cuenca, vegetación. Universidad Autónoma Chapingo. Volumen 1. 149pp.
- Sánchez-González A. y López-Mata L. 2003. Clasificación y ordenación de la vegetación del norte de la Sierra Nevada, a lo largo de un gradiente altitudinal. *Anales del Instituto de Biología, Universidad Nacional Autónoma de México, Serie Botánica*. 74(1): 47-71.
- Segnini S. y Chacón, M.M. 2005. Caracterización fisicoquímica del hábitat interno y ribereño de ríos andinos en la cordillera de Mérida, Venezuela. *Sociedad Venezolana de Ecología. Ecotrópicos*. 18(1): 38-61.
- Spurr., S.H. y B.V. Barnes. 1982. Ecología forestal. Ed. AGT. México. Pp: 690.
- Velasco O. J.J. 2008. La ciénaga de Chiconahuapan, Estado de México: un humedal en deterioro constante. *Contribuciones desde Coatepec. Universidad Autónoma del Estado de México, Toluca, México*. 15:101-125.
- Villanueva M.J. 2008. Microcuencas. Universidad Autónoma Chapingo. México, México. Pp: 222.
- Wetzel, R.G. 2001. *Limnology*. 3rd edition. Academic Press. New York. USA. Pp. 743.
- Zepeda C., Gómez-Tagle R., Chávez H. y Medina A. 2002. *Metodología rápida para la evaluación de ecosistemas riparios en zonas templadas*. Ingeniería hidráulica en México. Vol. XVII, núm. 1. pp. 61-74.



Zunino de E. F. y Currie H. M. 2005. Sedimentología y caracterización físico-química de agua en el área irrigada de Finca Tolloche, Salta. Universidad Nacional Del Nordeste. Comunicaciones Científicas y Tecnológicas. Pp. 4.



ANEXO I

Cuadro 16. Fechas de muestreo en cada sitio.

SUELO		AGUA	
Localidad	Fecha	Localidad	Fecha
Amalacaxco	28/02/2009	Amalacaxco	28/02/2009
			30/10/2009
Tetlalcuilco	26/03/2009	Tetlalcuilco	26/03/2009
Potrero	27/03/2009	Potrero	28/02/2009
			27/03/2009
			18/04/2009
			23/06/2009
			19/09/2009
			17/10/2009
			30/10/2009
			14/11/2009
La joya	27/03/2009	La joya	26/02/2010
			27/03/2009
Palomas	28/03/2009	Palomas	26/02/2010
			28/03/2009
			17/04/2009
			19/09/2009
			17/10/2009
			14/11/2009
Volkswagen	23/06/2009	Volkswagen	26/02/2010
			23/06/2009
Nexcolango bajo	18/09/2009	Nexcolango Alto	19/09/2009
Agua el marrano	16/10/2009	Agua el marrano	18/09/2009
Túnel tierra amarilla	16/10/2009	Túnel tierra amarilla	16/10/2009
Alcalica bajo	29/10/2009	Alcalica bajo	16/10/2009
Tomacoco	29/10/2009	Tomacoco	29/10/2009
Tepetol (Cascada)	13/11/2009	Tepetol (cascada)	29/10/2009
Tepetol (truchas)	13/11/2009	Tepetol (truchas)	13/11/2009
Palo rechino	03/12/2009	Palo rechino	13/11/2009
			03/12/2009
Cs Palo Rechino	03/12/2009	Palo rechino Cs	24/06/2009
Nepantla	04/12/2009	Nepantla	03/12/2009
Ayapango	04/12/2009	Ayapango	04/12/2009
C. Tesanto	25/02/2010	c. Tesanto	04/12/2009
			25/02/2010