



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES ZARAGOZA

VARIACIONES DE CARBONO, NITRÓGENO Y FÓSFORO EN
SITIOS CON DISTINTO USO DE SUELO EN DOS SISTEMAS
RIBEREÑOS DEL RÍO AMECAMECA

TESIS

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE

BIÓLOGO

PRESENTAN:

CORTÉS GUERRERO ANA LAURA

VEGA MARTÍNEZ KAREN LISSET

DIRECTOR DE TESIS: M. en C. ELOISA ADRIANA GUERRA HERNÁNDEZ

ASESOR: Dr. GERARDO CRUZ FLORES



SEPTIEMBRE 2013, MÉXICO D.F.
APOYO PROYECTO PAPIME PE205510



AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Nacional Autónoma de México por permitirnos ser parte de ella.

A la Facultad de Estudios Superiores Zaragoza en especial a la carrera de Biología.

Con especial cariño y respeto a nuestra directora de tesis la M. en C. Eloísa Guerra Hernández y a nuestro asesor el Dr. Gerardo Cruz Flores quienes nos brindaron sus conocimientos para nutrir nuestra vida académica, enseñarnos cosas para la vida personal y apoyarnos en la conclusión de este proyecto.

A nuestro jurado el M. en C. Ramiro Ríos, el M. en C. Armando Cervantes y la Biól. Elvia García, porque nos han ayudado a mejorar el trabajo con sus observaciones haciéndonos recordar lo olvidado y enseñándonos lo desconocido. Los admiramos y estamos muy agradecidas.

Al Proyecto de Apoyo a Proyectos para la Innovación y Mejoramiento de la Enseñanza PAPIME-PE 205510 por el apoyo otorgado para la culminación del presente trabajo.

Al Laboratorio de Calidad de agua y Ecohidrología y a los compañeros que se encuentran en él, aunque ya han pasado algunas generaciones desde que ingresamos siempre nos mostraron su apoyo, muy en especial a Mitzi, Manuel, Alejandro, Emilio y Viri que nos asesoraron mucho cuando apenas nos incorporamos, también Ernesto, Armando, César, Areli, Jannice y Alejandra que nos apoyaron en las labores de campo, además de los compañeros que se encuentran actualmente.

Al Laboratorio de Edafología y Nutrición Vegetal y a los compañeros que lo componen Dafne, Karina, Ely, Sergio, Paquito, Mike y Beyi, con su compañía y ayuda se hizo más ameno el trabajo.

Y a todos nuestros compañeros que de alguna u otra manera fueron participes con nuestro trabajo, alentándonos en todo momento, aligerando tensiones, esperándonos hasta que saliéramos de procesar las muestras, no lo olvidaremos y nos llevamos un gran recuerdo de ustedes.



DEDICATORIAS

A mis papás que son mi principal guía, los mejores amigos que tengo, estoy muy agradecida, los quiero y siempre los llevo presente.

A mis queridos hermanos que ojalá esto nos motive a seguir trabajando todos los días y más cuando la pereza quiera ganar. ٩

A la familia Cortés que aunque estamos lejos, siempre estamos unidos y apoyándonos. También a la familia Guerrero que invariablemente alegran con sus ocurrencias. A todos se les quiere mucho.

A Juan Carlos mi gran aliado, con el que llevo una relación poderosa de cariño y respeto. Gracias por estar conmigo todos los días.

A Lisset porque compartimos esta experiencia como un verdadero equipo, desde el inicio hasta hoy me has contagiado tu entusiasmo, un gusto trabajar contigo.

A mis grandes amigos de la Facultad; Brenda, Cecy, Chucho, Carlitos, Anita, Elías, Raúl, que también me han acompañado en esta etapa, gracias por las risas que me regalan.

A los amigos que conformaron el equipo de mastozoología; Julio César, Fernando, Juan Montes de Oca, Eder, Enrique, Carlos, Ismael, Héctor gracias por enseñarme tanto y salvarme la vida.

También a mi amiga del Politécnico Diana Segura y familia, que siempre andan al pendiente de mí, al Psicólogo David Herrera, Ing. Civil Daniel González y Q.F.B. Iván Velasco que aunque ya no nos vemos muy seguido, los recuerdo dulcemente.

Ana Laura Cortés Guerrero.



DEDICATORIAS

A mis padres, mi papá Benjamín, te admiro y agradezco por tu sacrificio y apoyo, debido a ello he podido llegar hasta aquí, eres mi mayor inspiración, gracias por tu confianza, amor incondicional, por ser mi guía y ejemplo a seguir, además de protegerme y sostener mi mano en momentos de debilidad. Mi mamá y amiga Laura, tu amor y comprensión te hacen la mujer más valiosa de mi vida, gracias por tu dedicación y empeño para hacerme una mejor persona. Los amor y es un honor tenerlos a mi lado, esta alegría y logro lo comparto principalmente con ustedes, de todo corazón ¡Gracias!

A mis hermanos, mi adorado Benjamín, desde siempre me has cuidado y apoyado en cada decisión, gracias por ser tan buen hermano y compartir conmigo los momentos más extraordinarios, sobre todo ahora que esos momentos se multiplican en compañía de Adriana, Adrianita y Benji, a quienes amo y agradezco por brindarme su cariño y apoyo incondicional. También mi hermanita Diana, toda la vida has sido mi mejor amiga y compañera de locuras, mi pequeña bribona y brazo derecho, gracias por ayudarme a cumplir mis metas y alentarme a soñar con un mejor futuro, además fuiste la mejor *compañía*, junto a nuestro fiel amigo Ronnie, durante las noches de desvelo a lo largo de la carrera. Los amo.

A mis abuelitos, excelentes personas quienes durante su vida hicieron inolvidables cada momento, en especial a mi doñita Esther y mi abue Chole, asombrosas mujeres, dignas de inspiración y respeto, sus abrazos y amor fueron sin duda de mis mayores tesoros, gracias.

A mis tíos Sara, Celia, Raúl y Francisco y sus familias que siempre han estado junto a mí para superar los momentos más difíciles y disfrutar los más felices, gracias por su protección, cariño, apoyo y confianza, por estar presentes y orgullosos de cada etapa en mi vida y por alentarme a ser una mejor persona. Los amo y admiro.

A mis tíos Mario, Gonzalo, Agustín, Esther, Vicky, Cata, Sofía y sus familias, quienes me alentaron a superarme, brindaron su apoyo, cariño y confianza. Además mis tíos Paty, Manuel y Tere quienes me han enseñado que ante las adversidades es cuando se debe ser más fuerte.



A mis tías adoptivas miembros de la UVA y a sus hijos, los mejores amigos con quienes he crecido, gracias por acompañarme en la vida y ser una familia más para mí.

A la Laura que comparte conmigo los sentimientos de concluir esta etapa, compañera en las salidas al campo y durante el largo periodo transcurrido en el laboratorio. Los días a tu lado y los viajes juntas son inolvidables. Lo logramos equipo café, te quiero.

A Norma y Manuel con quienes formé fuertes lazos de cariño, Ernesto mi amigo y equipo perfecto, Nayeli, Mayra, Ernesto, Francisco, Mario, Toño y Lily, además el trío que siempre me alentó Elías, Raúl y Pedro. Su compañía en fue fundamental, las risas, lágrimas, desvelos, fiestas y viajes, el tiempo transcurrido en las aulas, laboratorios y salidas al campo no serían lo mismo sin ustedes. Gracias amigos, los adoro.

A mis queridas amigas Kari, Daff y Ely con quienes las experiencias vividas, principalmente en campo y en Cancún quedaran grabadas en mi memoria. Manu, Mitzi y Alex que me brindaron su amistad y apoyo. A los pequeños Tona y Pache quienes me hicieron sentir parte de su equipo y su presencia me alegró siempre.

Karen Lisset Vega Martínez



ÍNDICE

| | |
|--|----|
| Resumen | 1 |
| 1. Introducción | 2 |
| 2. Antecedentes | 4 |
| 3. Marco teórico | 6 |
| 3.1. Ciclos biogeoquímicos | 6 |
| 3.1.1. Ciclo del carbono | 6 |
| 3.1.2. Ciclo del nitrógeno | 8 |
| 3.1.3. Ciclo del fósforo | 10 |
| 3.2. Sistema ribereño | 11 |
| 3.2.1. Relación agua-sedimento-suelo | 12 |
| 3.3. Uso de suelo | 13 |
| 3.4. Cuenca hidrográfica | 14 |
| 3.4.1. Cuenca del Valle de México | 16 |
| 3.5. Parque Nacional Izta-Popo y zonas aledañas | 16 |
| 3.5.1. Río Amecameca | 17 |
| 4. Justificación | 19 |
| 5. Hipótesis | 19 |
| 6. Objetivos | 20 |
| 6.1. Objetivo general | 20 |
| 6.2. Objetivo específicos | 20 |
| 7. Área de estudio | 20 |
| 7.1. Hidrología | 20 |
| 7.2. Edafología | 21 |
| 7.3. Vegetación | 22 |
| 7.4. Clima | 22 |
| 7.5. Fauna | 23 |
| 8. Métodos | 24 |
| 8.1. Fase de campo | 24 |
| 8.1.1. Toma de muestras de agua | 24 |
| 8.1.2. Toma de muestra de sedimento | 28 |
| 8.1.3. Toma de muestra de suelo | 28 |
| 8.2. Fase de laboratorio | 30 |
| 9. Resultados y análisis de resultados | 34 |
| 9.1. Caracterización del agua | 43 |
| 9.2. Fósforo en los sistemas agua, sedimento y suelo | 47 |
| 9.3. Nitrógeno en los sistemas agua, sedimento y suelo | 51 |
| 9.4. Carbono en los sistemas agua, sedimento y suelo | 55 |



| | |
|--|----|
| 9.5. Análisis de correlación múltiple | 60 |
| 9.6. Análisis de componentes principales | 61 |
| 9.7. Análisis de correlaciones canónicas | 64 |
| 9.8. Análisis de comparaciones múltiples | 69 |
| 9.9. Análisis prueba de hipótesis | 71 |
| 10. Conclusiones | 78 |
| 11. Bibliografía | 80 |



ÍNDICE DE FIGURA

| Figura | Título | Página |
|---------------|--|---------------|
| 1 | Ciclo del carbono | 8 |
| 2 | Ciclo del nitrógeno en agua y suelo | 10 |
| 3 | Sectores que interactúan en una Cuenca Hidrográfica | 14 |
| 4 | Componentes de una Cuenca | 15 |
| 5 | Sitio de confluencia de ambos sistemas | 24 |
| 6 | Toma de muestra de agua, medición de velocidad de corriente, temperatura, conductividad eléctrica y pH | 26 |
| 7 | Determinación de oxígeno disuelto en campo y toma de muestra para carbono orgánico particulado | 28 |
| 8 | Esquema del muestreo de sedimento y suelo | 29 |
| 9 | Arriba toma de muestra de sedimento, abajo toma de muestra de suelo | 29 |
| 10 | Parámetros de agua determinados en el laboratorio; arriba de izquierda a derecha: DBO ₅ , DQO y sólidos sedimentables. Abajo de izquierda a derecha: N-NO ₃ ⁻ , P-PO ₄ ³⁻ y P-total | 31 |
| 11 | Parámetros en sedimento y suelo determinados en el laboratorio; arriba de izquierda a derecha: pH, conductividad eléctrica, temperatura y materia orgánica. Abajo de izquierda a derecha: nitrógeno total y fósforo extractable. | 33 |
| 12 | Estaciones de muestreo en el Parque Nacional Izta-Popo y área de influencia | 34 |
| 13 | Sitio de muestreo Amalacaxco | 35 |
| 14 | Sitio de muestreo Potrero 1 | 35 |
| 15 | Sitio de muestreo Potrero 2 | 36 |
| 16 | Sitio de muestreo Alcalica | 36 |
| 17 | Sitio de muestreo Tomacoco | 37 |
| 18 | Sitio de muestreo Tezahua | 37 |
| 19 | Sitio de muestreo Vías Libramiento | 38 |
| 20 | Sitio de muestreo Ranchotitla | 38 |
| 21 | Sitio de muestreo Tepinoco | 39 |
| 22 | Sitio de muestreo Axochiapa | 39 |
| 23 | Sitio de muestreo Peña Verde | 40 |
| 24 | Sitio de muestreo Cuatonco | 40 |
| 25 | Concentraciones de fósforo del agua en el sistema Amalacaxco | 47 |
| 26 | Concentraciones de fósforo del agua en el sistema Chopanac | 47 |
| 27 | Concentraciones de fósforo del sedimento y suelo en el sistema Amalacaxco | 49 |
| 28 | Concentraciones de fósforo del sedimento y suelo en el sistema Chopanac | 49 |
| 29 | Concentraciones de nitrógeno del agua en el sistema Amalacaxco | 51 |
| 30 | Concentraciones de nitrógeno del agua en el sistema Chopanac | 51 |
| 31 | Concentraciones de nitrógeno del sedimento y suelo en el sistema Amalacaxco | 53 |



| | | |
|----|---|----|
| 32 | Concentraciones de nitrógeno del sedimento y suelo en el sistema Chopanac | 54 |
| 33 | Concentraciones de carbono orgánico particulado para el sistema Amalacaxco | 55 |
| 34 | Concentraciones de carbono orgánico particulado para el sistema Chopanac | 55 |
| 35 | Porcentajes de materia orgánica en sedimento y suelo del sistema Amalacaxco | 57 |
| 36 | Porcentajes de materia orgánica en sedimento y suelo del sistema Chopanac | 57 |
| 37 | Modelo de las variables que se correlacionaron en los sistemas agua-sedimento-suelo | 60 |
| 38 | Variables del componente 1 y componente 2 | 63 |
| 39 | Variables del componente 3 y componente 4 | 63 |
| 40 | Gráfica de dispersión donde se muestran las variables canónicas | 65 |
| 41 | Gráfica de dispersión donde se muestran las variables canónicas | 67 |
| 42 | Comportamiento del fósforo total en el agua para ambos sistemas. | 69 |
| 43 | Comportamiento de los ortofosfatos en el agua para ambos sistemas. | 69 |
| 44 | Comportamiento de los nitratos en el agua para ambos sistemas. | 70 |
| 45 | Gráfico de caja y bigotes para nitratos en los tres sistemas | 71 |
| 46 | Gráfico de caja y bigotes para amonio en los tres sistemas | 72 |
| 47 | Gráfico de caja y bigotes para carbono orgánico particulado en los tres sistemas | 72 |
| 48 | Gráfico de caja y bigotes para fósforo total en los tres sistemas | 73 |
| 49 | Gráfico de caja y bigotes para fosfatos en los sistemas Amalacaxco y Chopanac. | 73 |
| 50 | Medias e intervalos de confianza al 95% de Tukey HSD, para el nitrógeno en sedimento para las tres sistemas | 74 |
| 51 | Gráfico de caja y bigotes para fósforo en el sedimento de los tres sistemas | 75 |
| 52 | Gráfico de caja y bigotes para la materia orgánica en el sedimento de los tres sistemas | 75 |
| 53 | Gráfico de caja y bigotes del nitrógeno en suelo para los tres sistemas | 76 |
| 54 | Gráfico de caja y bigotes del fósforo en suelo para los tres sistemas | 76 |
| 55 | Gráfico de caja y bigotes para la materia orgánica en suelo para los tres sistemas | 77 |



ÍNDICE DE CUADRO

| Cuadro | Título | Página |
|---------------|---|---------------|
| 1 | Variables registradas en agua-sedimento-suelo para el afluente Amalacaxco | 41 |
| 2 | Variables registradas en agua-sedimento-suelo para el afluente Chopanac | 42 |
| 3 | Variables registradas en agua-sedimento-suelo para ambos afluentes | 43 |
| 4 | Promedios registrados en agua para ambos afluentes durante la época de lluvia y estiaje | 44 |
| 5 | Clasificación de durezas | 45 |
| 6 | Clasificación de alcalinidad | 45 |
| 7 | Componentes principales | 61 |
| 8 | Variables con mayor peso en cada componente | 62 |
| 9 | Correlaciones canónicas entre las variables de agua con sedimento y suelo | 65 |
| 10 | Coeficientes de variables canónicas del primer conjunto (agua) | 65 |
| 11 | Coeficientes de variables canónicas del segundo conjunto (sedimento y suelo) | 66 |
| 12 | Correlaciones canónicas entre las variables de sedimento y suelo | 67 |
| 13 | Coeficientes de variables canónicas del primer conjunto (sedimento) | 68 |
| 14 | Coeficientes de variables canónicas del segundo conjunto (suelo) | 68 |
| 15 | Intervalos de confianza de Tukey HSD, 95% | 74 |

RESUMEN

Los ambientes ribereños son zonas donde se lleva a cabo el flujo, reciclamiento y absorción de nutrimentos entre el sistema acuático y terrestre, tal es el caso del carbono, nitrógeno y fósforo. La modificación en la vocación del suelo, ha generado una degradación de los ambientes ribereños alterando la dinámica de nutrimentos en el cauce del río y suelos aledaños. Por ello se planteó comparar la dinámica del carbono, nitrógeno y fósforo en el sistema agua-sedimento-suelo en sitios con distintas condiciones de uso de suelo, a lo largo de dos afluentes del Río Amecameca, en el Parque Nacional Iztaccíhuatl-Popocatepetl y su área de influencia. El estudio se realizó de Octubre 2010 a Noviembre 2011 y se caracterizó ecológicamente 12 sitios de muestreo con diferentes uso de suelo: forestal, forestal perturbado, pecuario, agropecuario y urbano a lo largo de ambos afluentes. Se realizaron muestreos mensuales en agua, se midió el pH, conductividad eléctrica, sólidos totales disueltos y sedimentables, oxígeno disuelto, dureza total y de calcio, alcalinidad, fósforo total, ortofosfatos, nitratos, amonio, carbono orgánico particulado, demanda bioquímica de oxígeno, demanda química de oxígeno, perfil batimétrico, velocidad y aforo del caudal. En sedimento y suelo se determinó pH activo, conductividad eléctrica, materia orgánica, fósforo extractable y nitrógeno total mediante Kjeldhal modificado para incluir nitratos.

Con el programa Statgraphics Centurion XV se realizó un análisis de correlación múltiple con el objetivo de conocer la relación que existe entre las variables, de este análisis se seleccionaron aquellas con coeficiente de correlación mayor y se llevó a cabo el análisis de componentes principales, donde 4 componentes explicaron la variabilidad del sistema en un 78.94%. La dinámica que presentaron los elementos en el agua-sedimento-suelo se estableció mediante el análisis de correlaciones canónicas, en el cual resultaron 3 coeficientes entre los conjuntos de agua y sedimento-suelo; además se realizó un segundo análisis entre los conjuntos suelo y sedimento, donde resultaron 2 coeficientes con valor-P menor a 0.05. Se realizó un análisis de comparaciones múltiples (Tukey HSD con un nivel de confianza de 95%) para determinar si existen diferencias significativas entre los distintos usos de suelo de acuerdo a los nutrimentos y se obtuvo que nitratos, ortofosfatos y fósforo total difieren estadísticamente entre los usos de suelo forestal, agropecuario y urbano. Finalmente se realizó una comparación entre ambos afluentes para el carbono, nitrógeno y fósforo mediante la prueba de hipótesis, donde no se observó diferencia significativa entre ambos afluentes.



1. INTRODUCCIÓN

Los ríos, arroyos, lagos, lagunas y humedales son ecosistemas que poseen condiciones únicas a lo largo de sus márgenes y determinan las transferencias de energía y nutrientes (Gayoso y Gayoso, 2003). En los ambientes ribereños la composición florística está determinada por la intensidad luminosa, contenido de agua, granulometría de suelo y conforma la base de la cadena trófica en los cuerpos de agua por la incorporación continua del material orgánico (Granados *et al.*, 2006). Los bosques ribereños, se conocen como la vegetación que se desarrolla a ambos lados de un sistema lótico (Tragsa 1998, citado en Gutierrez, 2009). Estos bosques juegan un papel importante ya que presentan microclimas húmedos con alta biodiversidad (Torres, 2005) y tienen participación activa en el secuestro de carbono atmosférico. Una banda de vegetación de 16 m de ancho retiene 50% del nitrógeno y 95% del fósforo transportados por la escorrentía de los cultivos hasta los cursos de agua, constituyendo una línea de protección para estos sistemas (Granados *et al.*, 2006).

Entre los elementos químicos esenciales para los seres vivos se encuentran el carbono, nitrógeno y fósforo (Domínguez, 1989). El primero, se obtiene de la atmósfera para ser transformado por medio de la fotosíntesis e incorporarse al suelo, después de pasar por distintos niveles tróficos, constituye posteriormente la materia orgánica del suelo (MOS). Ésta es la suma de los residuos orgánicos en diferentes grados de descomposición y ayuda a mejorar la calidad del suelo, prevenir la escorrentía, retener humedad y moderar las fluctuaciones diarias de temperatura en las capas superiores del suelo (Lessard *et al.*, 2011). Los bosques juegan un papel preponderante en el ciclo global del carbono, porque en ellos se realizan procesos biogeoquímicos que regulan el intercambio que existe entre la atmósfera y los diferentes reservorios que lo componen (Barrionuevo, 2004).

El nitrógeno es uno de los elementos clave en el desarrollo de cultivos agrícolas y acuícolas. Dada su importancia para la agricultura, enormes cantidades de nitrógeno son suministradas a los suelos y en cantidades moderadas es añadido a la acuicultura (Páez *et al.*, 2007). La relación carbono-nitrógeno determina el grado de mineralización de la MOS. Cuanto menor sea el valor de la relación, mayor será el grado de mineralización de la materia orgánica y por tanto, la calidad edáfica será superior (Yanai, 1992). Las formas iónicas de nitrógeno inorgánico más comunes en los ecosistemas acuáticos son amonio (NH_4^+), nitrito (NO_2^-) y nitrato (NO_3^-). Estos iones pueden estar presentes de manera natural en el medio acuático como consecuencia de la deposición atmosférica, escorrentía superficial y subterránea, disolución de depósitos geológicos, descomposición de la materia orgánica y fijación por ciertos organismos (Camargo y Alonso, 2007).

Además del carbono y nitrógeno, el fósforo es un elemento que ocurre de manera natural en el suelo y se encuentra en numerosas formas que pueden ser clasificadas como fracciones disueltas o particuladas. En los suelos se origina a partir del intemperismo de minerales petrogénicos como las apatitas. Las lluvias, residuos de plantas, fertilizantes comerciales,



abonos de origen animal, desechos industriales, domésticos y agrícolas son vías de introducción adicional de fósforo a los ecosistemas, el uso de suelo y su manejo determinan cuál de estas fuentes es la más importante en cada región. En la medida que el fósforo es solubilizado como consecuencia de los procesos de intemperismo químico y físico, se asimila por las plantas, animales y permanece en formas estables dentro de los ecosistemas, o bien es transportado a los sistemas acuáticos donde está disponible para la biota (Páez *et al.*, 2007).

La ubicación del Parque Nacional Izta-Popo lo hace indispensable para la generación de servicios ecosistémicos en beneficio de la región más poblada del país y al mismo tiempo sus recursos son sometidos a una fuerte presión, por ello es importante proteger el suelo contra la degradación, manteniendo sus bosques, para garantizar la regulación del agua que abastece la agricultura, ganadería e industria (Diario Oficial de la Federación, 2013). Por las características que le confieren las elevaciones de la región, presenta un mosaico de estructuras y paisajes que favorecen el desarrollo de actividades de recreación, educación ambiental y turismo, mediante excursionismo, montañismo, observación de flora y fauna (Hernández y Granados, 2006), actividades culturales, construcción de infraestructura para investigación científica y monitoreo del ambiente (Diario Oficial de la Federación, 2013).



2. ANTECEDENTES

El área de los volcanes constituye la zona de estudio y fue declarada Parque Nacional en 1935, con el fin de proteger los recursos naturales que en ella se encuentran; evitando alteraciones en los recursos hídricos y edáficos, así como restaurar los bosques para garantizar el buen clima de las ciudades vecinas (CONANP, 2010). Este Parque Nacional sufre, como todas las áreas protegidas de nuestro país, amenazas de diversos tipos que atentan contra la conservación. El grado de perturbación en los bosques de pino y oyamel del Parque y zonas aledañas es acentuado por la extracción de flora, fauna, tala y pastoreo que se presentan, pero esto sucede con mayor frecuencia en las cercanías a los arroyos y ríos, afectando flora, suelo y propiedades de los afluentes (Cruz *et al.*, 2008).

En los márgenes de estos sistemas lóticos se localizan los bosques de ribera, cuyo estudio ecológico es de sumo interés, por los procesos de interacción agua-suelo que tienen lugar en ellos. Estas interacciones en las zonas de ribera han evolucionado a lo largo de los años, inicialmente su rol fue como recurso de materia y energía para los sistemas acuáticos, posteriormente se enfatizó su capacidad para amortiguar los aportes de la ladera hacia el río y desde finales de la década de los noventa, el papel del cauce sobre la vegetación, con respecto a los daños físicos que causan las perturbaciones hidrológicas a escala local (Morales y Fernández, 2005).

Los ecosistemas riparios presentan dos funciones conceptuales dentro de las microcuencas: la función hidrológica, en donde el bosque protege el cauce de agua, regula los caudales y estabiliza los taludes en los márgenes del caudal y la función ecológica; que representa protección y desarrollo de la biodiversidad, tanto para los ecosistemas acuáticos como terrestres (Rodríguez *et al.*, 2000, citado en Torres, 2005).

Algunos autores recomiendan que para la conservación y protección de la calidad del agua se deben mantener franjas riparias mayores de 15 m en zonas templadas y con poca pendiente en los bancos aluviales (Lynch *et al.*, 1985; Shisler *et al.*, 1987; Woodard y Rosk 1995, citados en Torres, 2005).

González del Tánago *et al.* (1994), describen el estado de las riberas en los principales cauces del Río Segura, España; donde analizan su principal problemática y plantean un plan de restauración, ya que consideran la falta de atención que se dedica a las riberas tanto en bibliografía científica, como en planes de gestión administrativos. Sin embargo la restauración ribereña comprende una serie de pasos que se ensamblan para los diferentes sectores involucrados en cada proyecto (González del Tánago y García de Jalón, 2007; citados en Sánchez *et al.*, 2011).

Otro trabajo realizado es el de Segnini y Chacón (2005) donde caracterizan el hábitat ribereño de los ríos andinos en la cordillera de Mérida, Venezuela, abarcando los elementos físicos, químicos y biológicos propios del cuerpo de agua y del hábitat ribereño que afectan



la estructura y función de la comunidad acuática, encontrando gran heterogeneidad en las condiciones hidrológicas.

El trabajo de Auquilla *et al.* (2005), evaluó la calidad del agua a través de análisis físico-químicos y bacteriológicos en la subcuenca del Río Jabonal, Costa Rica. Seleccionaron cuatro diferentes usos de suelo: manantial, bosque ribereño, pasturas y establos, muestrearon en época seca, periodo de transición seca-lluviosa y época lluviosa. El análisis físico-químico demostró que la calidad del agua tuvo alteraciones importantes debido al cambio de uso de suelo, además que el aporte de contaminantes aumenta a medida que disminuye la franja ribereña en las microcuencas y se incrementa el área de pasturas-ganadería.

Granados *et al.* (2006), contribuyeron con la descripción ecológica de las zonas ribereñas y características de un ecosistema ripario, con aspectos sobre la vegetación, manejo de los ecosistemas ribereños, contaminación que afecta al sistema y al mismo tiempo el desequilibrio en la relación agua-suelo-plantas, así como el funcionamiento y dinámica de las cuencas hidrográficas.

Rivas *et al.* (2009), evaluaron los aportes de nitrógeno y fósforo total, así como el caudal en época de lluvia y sequía que presentaron los ríos tributarios al Sistema Lago de Maracaibo, Venezuela. El trabajo se realizó mediante la recopilación de información obtenida en investigaciones anteriores durante el periodo de 1974 a 2004.

Morales y Chávez (2010) determinaron la carga del nitrógeno y fósforo procedentes de las subcuencas aledañas al Río Tepenaguasapa, en donde la carga de nutrientes es originada por el pastizal y la actividad ganadera extensiva, tierras de labranza, monocultivo, manejo de las aguas residuales, tala de árboles, además de ser una subcuenca con abundante precipitación y de gran tamaño.

Ayala (2011) en su trabajo caracterizó ecológicamente sitios ribereños ubicados dentro del Parque Nacional Izta-Popo y áreas de influencia, para evaluar la relación que existe entre los sistemas vegetación, suelo y agua, encontrando gran influencia del medio terrestre en la dinámica y calidad de los sistemas acuáticos, además identificó que los bosques de ribera sustentan la conectividad de los sistemas agua y suelo.

Entre los trabajos más recientes se encuentra el realizado por Martínez (2012), en el cual evalúa la actividad enzimática de la arilsulfatasa y fosfatasa ácida-alcalina como indicadores en la fertilidad y calidad de suelos adyacentes a los ambientes ribereños con diferentes usos de suelo dentro del Parque Nacional Izta-Popo y zonas de influencia concluyendo que la mayor fertilidad de los suelos se da en las partes con mayor altitud, siendo las menos perturbadas por el hombre.



3. MARCO TEÓRICO

3.1. Ciclos biogeoquímicos

Los organismos vivos requieren de 30 a 40 elementos para su desarrollo normal, los más importantes son el carbono (C), hidrógeno (H), oxígeno (O), nitrógeno (N), azufre (S) y fósforo (P). Los ciclos biogeoquímicos tienen una función importante en la dinámica de los ecosistemas, ya que hacen posible que estos elementos se encuentren disponibles para emplearse una y otra vez, recirculándolos a través de la atmósfera, hidrosfera, litosfera y biosfera. Un ciclo biogeoquímico posee las siguientes características:

- El movimiento del elemento desde el ambiente hasta los organismos y su retorno a éste.
- La inclusión de organismos (vegetales, animales y microorganismos).
- Un depósito geológico.
- El desarrollo o cambio químico en cualquier orden.

Los ciclos biogeoquímicos pueden dividirse en dos tipos:

- Ciclos gaseosos.
- Ciclos sedimentarios.

En los ciclos gaseosos, la fuente del nutrimento se encuentra en la atmósfera. Existe poca o ninguna pérdida del elemento durante el proceso de recirculación. Durante una fase importante del ciclo gaseoso este es relativamente cerrado, los ciclos típicos de nutrimentos gaseosos incluyen al carbono, oxígeno y nitrógeno. En los ciclos sedimentarios, la fuente primaria se encuentra en las rocas. Estos ciclos son más lentos y tienden a ejercer una influencia limitante sobre los organismos vivos. Para que estos elementos sean aprovechados, las rocas deben ser intemperizadas e incorporarse al suelo. Los ciclos sedimentarios típicos incluyen el ciclo del fósforo y del azufre (Sutton y Harmon, 1988).

3.1.1. Ciclo del carbono

El carbono está presente en la Tierra en diferentes formas (Turk *et al.*, 1981), es un elemento fundamental de los compuestos orgánicos, se combina con el H, O, N, S y P, entre otros, para constituir las moléculas más importantes de la vida. El movimiento del carbono ocurre a diferentes escalas en espacio y tiempo, que van desde el nivel molecular hasta los organismos más evolucionados o el nivel global donde aparece distribuido ampliamente en la atmósfera como bióxido de carbono (CO₂) gas resultante de procesos geoquímicos y biológicos (Jaramillo, 2004). Una parte del CO₂ reacciona con el agua de mar para formar carbonatos, que se depositan en el fondo de mar como carbonato de calcio, ya sea en forma de precipitados inorgánicos (piedra caliza) o como esqueletos de diversos organismos marinos. Ésta pérdida se compensa en parte por la acción del agua continental



que disuelve lentamente los depósitos de piedra caliza y lleva los carbonatos al mar (Turk *et al.*, 1981). Y otra parte importante se lleva a cabo con las plantas que utilizan el CO₂ para producir carbohidratos durante la fotosíntesis y mediante la respiración retornarlo a la atmósfera, de esta manera mantiene su concentración y su ciclaje (Sutton y Harmon, 1988).

- **Carbono en agua y suelo**

En los ecosistemas fluviales, la materia orgánica disuelta (MOD) representa la fracción mayoritaria en el transporte río abajo y constituye un importante componente de las vías heterotróficas. Aunque la mayor parte de este material lo constituyen los compuestos refractarios como ácidos húmicos y fúlvicos, la fracción lábil (carbohidratos y aminoácidos) juega un importante papel como fuente de energía para los microorganismos, que constituyen el nivel trófico esencial en numerosos procesos de los sistemas lóticos (González y Pozo, 1995). La variabilidad en la magnitud y frecuencia de las crecientes, permite la exportación de materia orgánica aguas abajo y su distribución hacia otros sistemas acuáticos de la llanura de inundación, en donde pueden ser utilizados por diversos organismos. La supervivencia de especies requiere un caudal variable para su alimentación y/o reproducción, por lo cual la modificación del régimen natural de caudal influye directamente en la estructura y funcionamiento del río, afectando su biodiversidad y su integridad ecológica (Feijoó, 2009). Las alteraciones producidas por el hombre dentro de las cuencas, como la eliminación o disminución de la vegetación riparia, menor tiempo de contacto del agua con el suelo o entradas adicionales de carbono orgánico disuelto (COD) procedente de los vertidos urbanos afectan las concentraciones y la exportación del COD en los ríos y alteran las dinámicas naturales de la materia orgánica (González y Pozo, 1995).

El carbono, un elemento esencial para el crecimiento de las plantas, se obtiene de la atmósfera por medio de la fotosíntesis. Sin embargo, cuando las plantas mueren, sus tejidos ricos en carbono vuelven al suelo y son degradados por microorganismos. La materia orgánica del suelo (MOS) es por tanto la suma de los residuos orgánicos en diferentes grados de descomposición, funciona como un enorme almacén de carbono y fuente de micro y macronutrientes como son el nitrógeno y fósforo (Hayes, 1997; citado en León, 2007). La materia orgánica mejora la calidad del suelo, ayuda a prevenir la escorrentía, incrementa su humedad y contribuye a moderar las fluctuaciones diarias de temperatura en las capas superiores del suelo. El carbono del suelo no se acumula para siempre, se libera cuando la materia orgánica es descompuesta por varios tipos de organismos aerobios que lo utilizan para su propio desarrollo, este proceso libera nutrientes que pueden ser captados por las plantas, pero también produce CO₂. La tasa de actividad microbiana y por consiguiente, de respiración del suelo, es afectada por la temperatura y la humedad del suelo, así como por la cantidad y calidad de su materia orgánica (Lessard *et al.*, 2011). Gran parte de la biomasa muerta se incorpora al detritus y a la materia orgánica del suelo, donde es asimilada a diferentes velocidades dependiendo de sus características químicas, por lo

que se producen almacenes de carbono en el suelo para luego regresar a la atmósfera en diferentes periodos (Jaramillo, 2004).

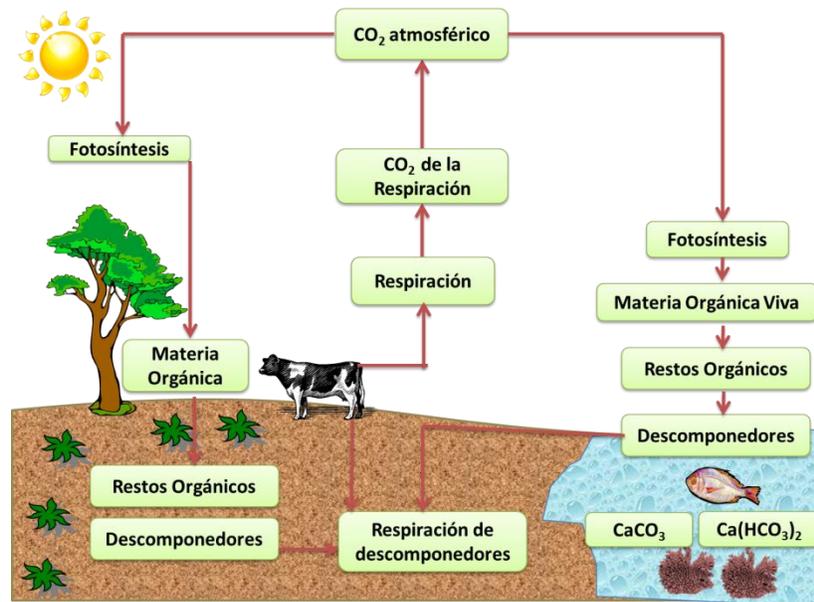


Figura 1. Ciclo del carbono.

3.1.2. Ciclo del nitrógeno

El ciclo del nitrógeno es complejo por la presencia de diversas formas químicas con las que cuenta, en el proceso se tienen condiciones aeróbicas y anaeróbicas reguladas por procesos microbianos (Páez *et al.*, 2007). El nitrógeno (N₂) es el elemento que se encuentra en forma libre (estado gaseoso) y en mayor abundancia en la atmósfera (78%), se coloca entre los principales elementos biogeoquímicos y necesita de una gran cantidad de energía para desdoblarse y combinarlo con otros elementos como el carbono y el oxígeno. Al aire ingresa continuamente nitrógeno por la acción de las bacterias desnitrificantes, y regresa continuamente nitrógeno al ciclo por la acción de las bacterias fijadoras de este elemento. Las bacterias quimiosintéticas, como *Nitrosomas* que convierten el amoníaco en nitrito y *Nitrobacter* que convierten el nitrito en nitrato (el cual queda disponible para ser absorbido o disuelto en el agua, e incorporarse al ecosistema), obtienen energía de la desintegración, en tanto que las bacterias desnitrificantes y fijadoras de nitrógeno necesitan energía de otras fuentes para realizar sus transformaciones (Odum, 1987).

Los animales herbívoros sintetizan sus proteínas a partir de los vegetales, mientras que los carnívoros la obtienen a partir de los herbívoros, todos los seres vivos almacenan grandes cantidades de nitrógeno orgánico en forma de proteínas, que luego vuelve al suelo con las heces, descomposición de cadáveres o restos orgánicos. Por lo que en el metabolismo de los compuestos nitrogenados, los animales acaban formando iones amonio que resultan muy



tóxicos y que deben ser eliminados. Esta eliminación se hace en forma de amoníaco, urea o ácido úrico, para que posteriormente las bacterias nitrificantes se encarguen de transformarlo. Las bacterias desnitrificantes (entre ellas *Pseudomonas desnitrificans*) utilizan los nitratos en su proceso metabólico y devuelven parte del nitrógeno inorgánico del suelo a la atmósfera en forma gaseosa, produciendo una disminución de este elemento en los ecosistemas terrestres ya que la reserva activa de este elemento se encuentra en el suelo. Es así como las bacterias fijadoras de nitrógeno concluyen el proceso de descomposición de estos materiales convirtiendo el nitrógeno orgánico en inorgánico (CICEANA, 2012).

- **Nitrógeno en agua y suelo**

El nitrógeno llega a los cuerpos de agua en forma de amonio, nitrato y nitrito, las altas concentraciones crean problemas de toxicidad para los organismos acuáticos y cambios ambientales como la eutrofización de ríos, lagos y mares (Cervantes *et al.*, 2000). El nitrato en aguas naturales, es un indicador de la calidad del sistema, ya que se encuentra relacionado en el ciclo del nitrógeno en suelo y plantas superiores, aunque comúnmente son incorporados por medio de fertilizantes que pueden ocasionar que las concentraciones de dicho compuesto aumenten (Cabrera *et al.*, 2003). El ion nitrato es la forma termodinámicamente estable del nitrógeno combinado en los sistemas acuosos y terrestres oxigenados, de forma que hay una tendencia de todos los materiales nitrogenados a ser convertidos a nitratos. Las pequeñas cantidades de nitrógeno que contienen las rocas ígneas pueden proporcionar nitrato a las aguas naturales en el proceso de meteorización. Todos los compuestos del nitrato son altamente solubles en agua y cualquiera de ellos que se forme en este proceso, se encontrará en solución. Los minerales que contienen nitratos son muy raros, solamente los salitres (nitrato de sodio y nitrato de potasio) son los más difundidos (Pacheco y Cabrera, 2003).

La mineralización del nitrógeno es el proceso a través del cual el nitrógeno orgánico, que es el mayor componente en los sistemas continentales, es convertido en nitrógeno amoniacal, este proceso es mediado principalmente por los microorganismos. El subsecuente destino del N-amoniacal en los suelos y en los cuerpos de agua depende de diversos factores bióticos y abióticos, así como de diversos procesos que compiten por el amonio disponible, como son la captura o asimilación por las plantas y la nitrificación (Páez *et al.*, 2007). La fijación o mineralización del N en el suelo depende en gran medida del ritmo de descomposición de la MOS temperatura y pH ya que se da por la actividad de microorganismos que lo dejan disponibles para las plantas (Buckman y Brady 1991, citados en León, 2007). Por último es importante mencionar que la cuantificación del nitrógeno total (Nt) es fundamental para evaluar la fertilidad del suelo (Jarquín *et al.*, 2011).

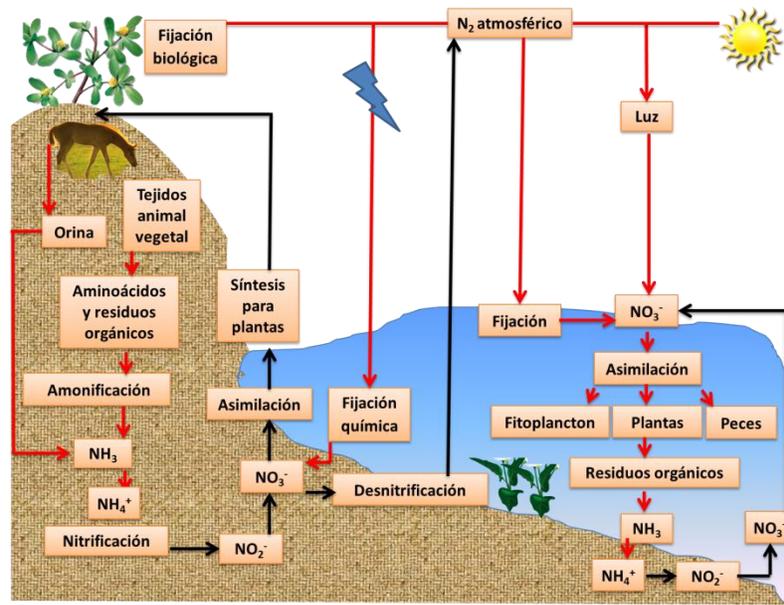


Figura 2. Ciclo del nitrógeno en agua y suelo.

3.1.3. Ciclo de fósforo

El ciclo del fósforo incluye interacciones y transformaciones que ocurren a través de procesos físicos, químicos y microbiológicos que determinan las formas del fósforo, su disponibilidad para las plantas, transporte a través de los escurrimientos, así como su lixiviación (Páez *et al.*, 2007). Se considera de tipo sedimentario y más sencillo que el ciclo del nitrógeno, sin embargo de suma importancia ya que también limita o controla la abundancia de organismos en el ecosistema; el depósito del fósforo no está en el aire, sino en las rocas u otras formaciones, que se erosionan gradualmente y liberan fosfatos hacia los ecosistemas, donde una parte es utilizada por los seres vivos y otra va al mar, en el que una cantidad se deposita en las aguas someras y otra se pierde en sedimentos profundos (Odum, 1987).

En el suelo el ciclo es dinámico y complejo ya que involucra la acumulación del elemento en la biomasa microbiana, materia orgánica y formas inorgánicas (Picone y Zamuner, 2002). La presencia de arcillas, óxidos, carbonatos y materia orgánica en los suelos afecta la porción disponible y soluble del fósforo. Cuando este elemento se encuentra en solución está fácilmente disponible para las plantas y se transporta por los escurrimientos superficiales y subsuperficiales; parte del fósforo que captura la planta se remueve durante la cosecha, otra puede retornar al suelo como residuo vegetal donde permanece sobre la superficie y otra parte se recicla en el suelo como desecho animal.

El fósforo que se transporta desde los suelos en su forma soluble se atrapa temporal o permanentemente en alguno de los diversos reservorios que componen el ciclo, o bien se incorpora en ríos, lagos, embalses, humedales o sistemas acuáticos costeros. Las salidas



potenciales del fósforo en los suelos se dan a través de la fijación de éste, o por medio de su depósito en los sedimentos de las áreas bajas, en donde los humedales funcionan como zonas de amortiguamiento (Páez *et al.*, 2007).

- **Fósforo en agua y suelo**

El fósforo se considera uno de los principales nutrimentos en los ecosistemas acuáticos (Morales y Chávez, 2010). Los escurrimientos continentales aportan fósforo en tres formas principales: orgánico disuelto, materia orgánica particulada y ortofosfatos, donde las formas disueltas se aprovechan rápidamente por los organismos vegetales para llevar a cabo la fotosíntesis, así se incorporan a la cadena trófica; y los organismos muertos o bien sus heces van a dar a los sedimentos donde se atrapan temporalmente (Mee, 1979). Los ríos, lagos o embalses sufren cambios cuando sus aguas se enriquecen con nutrimentos, los fosfatos y nitratos son los que tienen mayor influencia en este proceso, ya que en altas concentraciones originan problemas de eutrofización en los cuerpos de agua ya sea natural o artificialmente (Rivas *et al.*, 2009).

El fósforo existe en el suelo en forma orgánica e inorgánica, su fraccionamiento describe su biodisponibilidad relativa y su viabilidad de transporte a través del agua. Las formas orgánicas se mineralizan y se remplazan por el fósforo inorgánico por medio de la actividad microbiana. A través de los procesos de inmovilización, el fósforo inorgánico se convierte a fósforo orgánico bajo ciertas condiciones, y a partir de las formas minerales se convierte en formas solubles y disponibles por la disolución a través del intemperismo (Páez *et al.*, 2007). El fósforo orgánico está compuesto por varias fracciones, desde las más lábiles hasta las más resistentes a la mineralización. No obstante, el componente orgánico central del ciclo del fósforo es la biomasa microbiana, la cual es una fracción lábil controlada por factores ambientales y por aquellos relacionados con el manejo de los suelos (Stewart y Tiessen, 1987; citados en Picone y Zamuner, 2002).

3.2. Sistema ribereño

El término de zona riparia o ribereña se asigna a la interfase entre ecosistemas acuáticos y terrestres, donde plantas y animales se establecen y desarrollan mecanismos de adaptación especializados para su permanencia, generando comunidades distintas al resto del bosque, estas zonas poseen un poder amortiguador en el cual el agua que fluye facilita el reciclamiento y la absorción de los nutrimentos, así como el desarrollo de las plantas mediante el movimiento del oxígeno a través del suelo (Granados *et al.*, 2006). La vegetación riparia destaca por su capacidad de regeneración y su desarrollo compatible con la dinámica del cauce y con las fluctuaciones del caudal. Su principal función es la de filtración en los procesos fluviales, disminuir la velocidad de la corriente, favorecer la sedimentación, reducir la turbidez del agua, fijar los nutrimentos, reforzar y estabilizar las orillas (Ureña y Ollero, 2000). En suma, estas comunidades vegetales han sido



consideradas como un sistema continuo que redistribuye materiales a través del paisaje y en el que se presenta una gran variedad de interacciones terrestres y acuáticas (Camacho *et al.*, 2006). Los bosques ribereños se consideran importantes ya que con frecuencia son excepcionalmente fértiles y productivos, su extensión es clave para la captación de dióxido de carbono y generación de oxígeno, además son un hábitat ideal para un gran número de especies animales y vegetales, funcionan como zonas de recarga de aguas subterráneas y regulan el microclima del río (Granados *et al.*, 2006).

La degradación de la calidad de los recursos hídricos es resultante de la contaminación que afecta los cuerpos de agua, ya sean por contaminantes originados por fuentes puntuales (desagües industriales o domésticos) o por fuentes de origen difuso (fertilizantes, agrotóxicos, combustibles, solventes). La vegetación de ribera y el sustrato edáfico se encargan de reducir la conexión entre la fuente de contaminación potencial y el cuerpo de agua receptor, y pueden ofrecer una barrera física y bioquímica contra la entrada de contaminación de fuentes distantes del curso de agua (Ceccon, 2003), lamentablemente en casi todos los valles en los que la accesibilidad es suficiente, los bosques riparios han sido eliminados, fragmentados o profundamente modificados y reducidos a una estrecha franja junto al cauce, por tanto la pérdida de cubierta forestal y los diferentes usos de suelo repercuten negativamente en los suministros de agua dulce y agrava las catástrofes humanas resultantes de las situaciones extremas hidrometeorológicas (González del Tánago *et al.*, 1994).

Las zonas de ribera son probablemente, las más transformadas por la actividad humana. Entre las principales amenazas para la conservación de estas zonas se encuentran la sustitución de la vegetación por cultivos agrícolas y forestales, el encauzamiento de los tramos sobre los que se asientan, la construcción de infraestructuras hidráulicas y la contaminación por especies invasoras. Dada la importancia ecológica de los ambientes ribereños y las ventajas prácticas asociadas a su conservación, es necesaria la adopción de medidas encaminadas a la protección y regeneración de estos medios. Para ello, es imprescindible contar con un conocimiento real del estado actual de los ríos y sus riberas, a partir de la elaboración de inventarios, caracterización y valoración de estas comunidades (Ceccon, 2003).

3.2.1. Relación agua-sedimento-suelo

En los sistemas lóticos se presenta una gran variedad de interacciones entre el agua y el suelo que son perturbadas debido al mal uso y manejo que se hace de ellos. Entre los procesos que rigen la relación agua-suelo se encuentran la entrada de material orgánico, la remoción de nutrientes, lo que favorece al mejoramiento de la calidad del agua, la filtración de sedimentos, además de condicionar la cubierta vegetal que es sustentada por el suelo, el control del flujo y las inundaciones. La degradación, pérdida y compactación son los problemas centrales que afectan la relación y coordinación entre ambos sistemas y la



vegetación. De igual manera la aportación de sedimentos y nutrimentos provienen de esta interacción, debido a la erosión de suelos aledaños y en áreas con fuerte pendiente. Esto se incrementa como resultado de los cambios en uso de suelo, particularmente por la remoción de la vegetación nativa. Este aumento de sedimentos y nutrimentos como el fósforo y el nitrógeno en el río, puede conducir a la pérdida de hábitats, sofocando la vida en el río y cambiando la composición de las comunidades de flora y fauna acuática (Lovett y Price, 1999).

3.3. Uso de suelo

Los cambios en el uso de los recursos naturales, principalmente el suelo modifica el ciclo hidrológico en cantidad, calidad y ubicación dentro de la cuenca (Dourojeanni y Jouravlev 2002). En América Latina la principal causa de degradación del recurso hídrico es el avance de la frontera agropecuaria, con prácticas de uso del suelo tradicionales, como la ganadería extensiva en zonas de fuertes pendientes, deforestación, acuicultura, sobrepastoreo, riego por inundación, urbanismo y erosión que han causado impactos negativos sobre los ecosistemas (FAO, 2012). Esta conversión del bosque natural a variados usos antrópicos, ha inducido un proceso de deforestación y pasan de ser áreas con denso arbolado a bosques ralos (Kammerbauer y Ardon, 1999).

La ganadería es una de las prácticas de uso de suelo con mayor impacto sobre la calidad del recurso hídrico, cuando hay sobrepastoreo provoca un impacto negativo desde el punto de vista bacteriológico, químico y físico a la calidad del agua, así como a la capacidad de infiltración de los suelos (Brooks *et al.*, 1991, citado en Gutierrez, 2009). Ya que generalmente, las áreas de pastos tienden a ser ubicadas en lugares húmedos junto a cursos de agua así los contaminantes pueden ser lavados con facilidad y rapidez hacia aguas superficiales (Line *et al.*, 2000, citado en Cardona, 2003). Siendo más vulnerables si están desprovistas de cobertura vegetal ribereña, la cual juega un papel de protección a la calidad y cantidad del agua, la carencia de esta faja protectora de vegetación o zona de amortiguamiento, facilita que las corrientes arrastradas con una alta población de microorganismos patógenos, nutrimentos, sólidos suspendidos y otros, lleguen con mucha facilidad al cuerpo de agua (Reynolds, 2002).

La agricultura constituye una de las actividades económicas más difundidas en el mundo, particularmente en las áreas rurales (Sandía *et al.*, 1999); se ha comprobado que el uso de fertilizantes basados en nitrógeno tienen gran eficacia en el incremento de cosechas y cultivos, sin embargo, su uso en diferentes formas, tipos, cantidades y frecuencias (Gardi, 2001) genera diferentes tipos de impacto en los sistemas acuáticos ya sea en aguas subterráneas, superficiales o

en las mismas tierras de cultivo (Kingston *et al.*, 2000).

Por otro lado, el uso de suelo para el establecimiento de asentamientos humanos genera mayores problemas relacionados a la contaminación del agua, principalmente por los aportes de aguas residuales que se incorporan al cauce (TCA 1998, citado en Gutiérrez, 2009).

3.4. Cuenca hidrográfica

Una cuenca es un área donde toda el agua de lluvia y deshielo drena hacia un mismo punto que puede ser un río, lago, acuífero o el mar. Sus límites están bien definidos por las partes altas de las montañas conocidas como parteaguas (Cruz, 2003). La cuenca hidrográfica está conformada por elementos biofísicos (agua, suelo), biológicos (flora y fauna) y antropogénicos (socioeconómicos, culturales, institucionales) que se relacionan funcionalmente en el tiempo y espacio e interactúan a su vez con otros sistemas del entorno (Figura 3), de manera que su análisis requiere entender las relaciones sistémicas pero también estudiar el comportamiento de sus partes (Faustino *et al.*, 2008). De tal manera que al afectarse uno de ellos, se produce un desbalance que pone en peligro todo el sistema (Ramakrishna 1997, citado en Gutierrez, 2009).

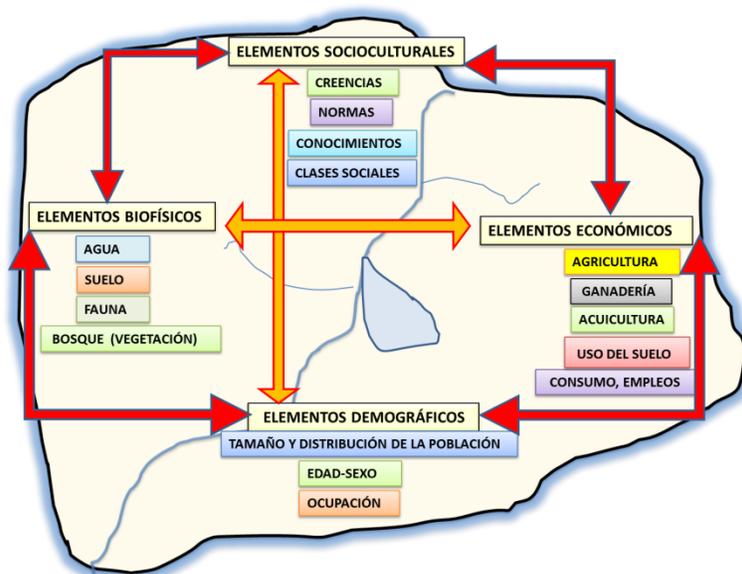


Figura 3. Sectores que interactúan en una Cuenca Hidrográfica.

Las características de las cuencas, comprenden un amplio espectro de parámetros que usualmente no son objeto de cambios significativos en una escala de tiempo de años o décadas (Figura 4). Algunas de las características más prominentes son:

- **Relieve.** Afecta directamente el patrón hidrológico de la cuenca, su capacidad de almacenamiento y tiempo de residencia.
- **Altitud.** Afecta la presencia o ausencia de vegetación, temperatura media del aire, velocidad del viento y nivel de precipitación.
- **Clima.** Define la precipitación media anual, humedad relativa, temperatura, presencia de niebla.
- **Geología.** La mineralogía, composición química y tectónica del lecho rocoso, determinan las tasas de intemperización y aporte de nutrientes para las plantas.
- **Cubierta del suelo.** Su profundidad, características químicas, distribución del tamaño de partícula y permeabilidad, son importantes para la evolución de la vida vegetal y para el desarrollo de los conductos hidrológicos.
- **Cubierta vegetal.** Distribución en la cuenca, naturaleza del bosque, profundidad de las raíces, edad y estado de salud del bosque.
- **Eventos.** Puede alterar el cuadro general aparentemente más adecuado. México es un país propenso a sufrir los efectos de las tormentas tropicales, agravado por la falta de planificación del uso de suelo.
- **Presencia humana.** Determina la magnitud de la deposición atmosférica en la cuenca, el uso de suelo, tasas de erosión, contaminación del aire, deforestación, urbanización, reemplazo de especies.



Figura 4. Componentes de una Cuenca.

Una cuenca hidrológica recibe una precipitación anual definida que fluye por los elementos naturales y antropogénicos del terreno, confiriéndoles continuidad física y coherencia funcional. Parte del agua puede salir hacia el mar a través de los drenes naturales, como ríos



y arroyos (cuenca exorreica), o puede acumularse temporal o permanentemente en los bajos relieves del terreno (cuenca endorreica) (Banderas, 2007).

3.4.1. Cuenca del Valle de México

La Cuenca del Valle de México cuenta con 17 Áreas Naturales Protegidas de carácter Federal de las cuales 16 de ellas son Parques Nacionales (Diario Oficial, 2011), se encuentra rodeada de grandes montañas o volcanes entre los que destacan el Popocatepetl (5438 m) y el Iztaccíhuatl (5286 m), así como una cadena de sierras de las cuales descienden desde hace siglos el agua de diversos ríos aún existentes (Legorreta, 2009).

Es una cuenca endorreica de carácter lacustre, donde la corteza ha sufrido un intenso fracturamiento, cubierta en diferentes puntos por áreas producto de lagos que existieron al final de la época glacial. Al cerrarse la cuenca en el Cuaternario Superior, las aguas pluviales quedaron encajonadas, formando un conjunto de lagos someros, en el centro el Lago de México, al este el de Texcoco, al sur los de Xochimilco y Chalco, que formaban uno solo y al norte el de Zumpango. El fondo de la cuenca es una planicie de 1431 km², a una altitud que varía entre 2230 y 2240 m y se mantiene seca artificialmente. El parteaguas se extiende por la zona montañosa circundante que se eleva por encima de los 3000 m. La cuenca a la que pertenece el Acuífero Zona Metropolitana de la Ciudad de México (ZMCM) es la Cuenca del Valle de México y se encuentra limitada por elevaciones topográficas de origen volcánico como son la Sierra de Guadalupe al norte, la Sierra de Las Cruces al poniente, la Sierra Chichinautzin al sur, el volcán del Ajusco al suroeste y la Sierra Nevada al oriente. Dentro de este valle existen algunos aparatos volcánicos aislados, siendo principales los que forman la Sierra de Santa Catarina y existiendo algunos otros que aparecen en forma aislada como son el Peñón del Marqués, Peñón de los Baños y el Cerro de La Estrella (CONAGUA, 2002).

La cuenca presenta gran número de problemas ambientales debido a la enorme presión antrópica generada por una de las más grandes metrópolis del mundo. Su población rebasa actualmente los veinte millones de habitantes, lo que la ha convertido en una de las áreas de mayor importancia desde todos los puntos de vista a nivel país, en ella se genera más del 30% del total del producto interno bruto (PIB), predominando el sector industrial y el de servicios públicos. Esto ha dado lugar a una serie de impactos ambientales, como contaminación atmosférica, agotamiento y contaminación de los acuíferos, alta tasa de residuos sólidos que ha sobrepasado la capacidad de los sitios de disposición, desaparición de los bosques por el crecimiento de las zonas urbanas, expansión de las actividades agropecuarias y el manejo inadecuado del suelo lo que ocasiona una continua pérdida de la biodiversidad y un acelerado deterioro de los recursos naturales (SEMARNAT, 2010).

3.5. Parque Nacional Izta-Popo y zonas aledañas



El Parque Nacional Iztaccíhuatl-Popocatepetl-Zoquiapan se encuentra en la parte centro-oriental del Eje Volcánico Transmexicano. Ocupa parte de la Sierra Nevada en su porción sur y de la Sierra de Río Frío en su porción norte. Abarca una superficie de 40,008 hectáreas dividida entre los estados de México con 28,461 ha; Puebla con 11,047 ha y Morelos con 499 ha. La ubicación del Parque lo hace indispensable para la generación de servicios ecosistémicos en beneficio de la región más poblada del país. Las boscosas montañas con las que cuenta captan y filtran agua para abastecer a dos cuencas hidrológicas muy importantes del país: la del Alto Balsas y la del Valle de México, además que genera una red hidrográfica importante para el suministro de agua de poblaciones, zonas industriales y valles agrícolas vecinos (CONANP, 2010).

El Parque Nacional, aún alberga un alto porcentaje de biodiversidad endémica del Eje Volcánico Transmexicano y al incluir las montañas más altas de México, con su marcado gradiente altitudinal, constituye una combinación que da origen a la gran diversidad de fauna y flora con desarrollo de diferentes estratos de vegetación (Hernández y Granados, 2006).

La Sierra Nevada se encuentra rodeada en su mayor parte por asentamientos humanos por debajo de la cota altitudinal de los 2500 m. Luego una zona de transición con presencia de actividades agrícolas y pecuarias que va desde los 2300 a los 3000 m, donde se nota poca vegetación natural. Una tercera zona que corresponde al uso de suelo forestal que inicia en la cota de los 3000 m y sube hasta los 3600 m, y una última zona que se encuentra por arriba de los 3600 m y hasta las cumbres de los volcanes (CONANP, 2010).

En el Parque Nacional no hay poblaciones asentadas, dado que el decreto de creación del Área Natural Protegida en 1935 excluyó a todas aquellas poblaciones que ya existían independientemente de la cota de los 3000 m, que fue el primer límite para establecer el Parque, sin embargo los municipios ubicados en las cercanías del Parque Nacional y al mismo tiempo colindan con la zona metropolitana de la ciudad de México, han tenido un crecimiento demográfico explosivo lo que se traduce en una urbanización acelerada y en la consecuente demanda de recursos naturales particularmente el agua. La gran mayoría de los escurrimientos del Parque corren libremente, sin embargo algunas comunidades captan sus aguas en las zonas más altas a los centros urbanos para sus respectivos sistemas de agua potable (CONANP, 2012).

3.5.1. Río Amecameca

El Río Amecameca se considera un Canal Nacional que nace en las partes altas de los volcanes Iztaccíhuatl y Popocatepetl, desciende por la parte occidental del Parque hacia la cuenca del valle de México, en las partes más altas atraviesa por una región boscosa donde predominan comunidades de diversas especies de Pino y Oyamel, a lo largo de su recorrido se van viendo diversos tipos de vegetación y usos de suelo que influyen en la calidad del



agua. Se nutre de gran cantidad de cañadas y barrancas donde la accidentada topografía expone principalmente rocas andesítico-dacíticas y riolita que por su contenido de sílice tienen tendencia ácida e intermedia en escala de pH, además de toba basáltica y ceniza de pómez (Macías, 2005), en el aporte también contribuyen los pequeños ríos como Amilpulco, El Paraje, Tzonquinzinco, San José Corratitla, Alcalica, Panoaya, San José Tetzahuac y Los Reyes. En la planicie atraviesa por Amecameca y prosigue hacia San Mateo Tepolula, Ayapango y Tenango del Aire, después de cruzar Temamatla, pasa al norte del Valle de Chalco para proseguir por Mixquic, continúa hacia Tulyehualco donde a partir de aquí el cauce es conocido como Canal de Chalco ya que recibe un afluente con ese nombre proveniente del lago Los Reyes ubicado en el centro de Tláhuac, prosigue su recorrido a un costado del Parque Ecológico Xochimilco y atraviesa Periférico para continuar al lado de la laguna de regulación Ciénega Grande, posteriormente recibe un aporte del Canal Nacional que viene de la zona lacustre de Xochimilco y de la pista de canotaje, donde después se bifurca en dos afluentes: uno abierto denominado Paseo del Río que se conecta con Río Churubusco y el otro entubado llamado Canal de la Viga que corre por debajo de la calzada atravesando Iztacalco, Santa Anita y Jamaica, para finalmente llegar a San Lázaro. La importancia de este río radica en que es el más extenso y abastece grandes sectores de la ciudad de México (Legorreta, 2009).



4. JUSTIFICACIÓN

Las perturbaciones más importantes dentro de las zonas templadas del PN-IP, particularmente en sus sistemas ribereños son ocasionadas debido a la disminución de la cobertura forestal como consecuencia de la tala inmoderada, los incendios forestales y la tendencia a cambiar la vocación del suelo, de uso forestal a agrícola, ganadero y en las zonas de menor altitud a uso urbano (Sánchez *et al.*, 2005). Aunado a lo anterior se ejerce una enorme presión sobre los recursos naturales de esta zona, como consecuencia de la cercanía a la zona metropolitana del Valle de México (Sánchez y López, 2003). Estos procesos de degradación ambiental provocan pérdidas del C, N y P, alterando las relaciones y balance entre ellos. Por lo anterior es importante identificar la relación entre las variaciones del C, N y P en agua, sedimento y suelo de zonas ribereñas, de acuerdo a los distintos usos de suelo presentes.

5. HIPÓTESIS

A lo largo de los afluentes en el área de estudio se realizan actividades de ecoturismo, agricultura, ganadería y se han establecido asentamientos humanos, modificando la vocación forestal del suelo (Ayala, 2011). Por lo que es importante mencionar que los contenidos de C, N, P en el sistema agua-sedimento-suelo de ambientes ribereños, se mantienen en equilibrio por intervalos constantes, cuando el suelo preserva su vocación forestal (Granados *et al.*, 2006).

La modificación del uso de suelo, reduce la cubierta vegetal y el contenido de materia orgánica, esto disminuirá de manera diferencial las concentraciones de C, N y P para el sistema terrestre; sin embargo las concentraciones de estos elementos se incrementarán en el ecosistema acuático (agua-sedimento) ante aportes diversos de residuos agrícolas y ganaderos, descarga de aguas residuales o por actividades recreativas.

Los ambientes ribereños de los dos afluentes presentan modificaciones en su vocación forestal, por lo cual se infiere que la dinámica del C, N y P, presentará en ambos sistemas una tendencia similar.



6. OBJETIVOS

6.1. General

Comparar la dinámica del C, N y P en el sistema agua-sedimento-suelo, en sitios con distintas condiciones de uso de suelo a lo largo de dos afluentes del Río Amecameca.

6.2. Específicos

- Caracterizar física y químicamente los sistemas agua, sedimento y suelo a lo largo de dos afluentes del Río Amecameca.
- Determinar la variación temporal y espacial del C, N y P en el sistema agua, sedimento y suelo.
- Establecer la dinámica para cada uno de los elementos en el sistema agua-suelo-sedimento.
- Comparar el comportamiento de C, N y P del sistema agua-suelo-sedimento a lo largo de dos afluentes en función del uso de suelo.

7. ÁREA DE ESTUDIO

El estudio se realizó dentro del Parque Nacional Iztaccíhuatl-Popocatepetl y área de influencia, a lo largo del Río Amecameca en un intervalo altitudinal de 2463 a 3651 m, que desciende del occidente del Iztaccíhuatl hacia la cuenca del Valle de México. A lo largo de su cauce se desarrollan diversos tipos de vegetación donde predominan comunidades de numerosas especies de Pino y Oyamel, además de los diferentes usos de suelo que influyen en la calidad del agua (Legorreta, 2009).

7.1. Hidrología

El área del Parque Nacional es importante por ser una zona de captación de agua que distribuye y alimenta a la Cuenca del Valle de México (Hernández y Granados, 2006). Los recursos hídricos se originan principalmente por el deshielo de los glaciares y la precipitación pluvial, se distribuyen a través de corrientes superficiales que pueden ser permanentes o intermitentes. Estas últimas son innumerables durante la época lluviosa y favorecen la infiltración de agua que alimenta las corrientes subterráneas (CONANP, 2012). La reducción de los bosques del Parque Nacional ha significado la disminución de áreas de captación y filtración de agua (PRONATURA, 2011), que alimentan los acuíferos de las comunidades San Pedro Nexapa, Santa Isabel Chalma, o sectores como Panoaya y San Juan Grande para luego incorporarse a la subcuenca de Chalco (PMDU Amecameca, 2003).

En su recorrido por los diferentes municipios, gran parte de este recurso es desviado en ramales para ser utilizado como agua potable, en actividades industriales y agropecuarias, reduciendo de esta manera el gasto del escurrimiento. Durante este proceso los ecosistemas



acuáticos sufren alteraciones en sus características físicas, químicas y biológicas, con un alto deterioro de su calidad, por efecto de las descargas de agua municipales, fábricas de textiles, tintas y otros giros, que son vertidas a los cauces principales sin un tratamiento adecuado (SEMARNAT, 2005).

El Río Amecameca nace en las partes altas de los volcanes Iztaccíhuatl y Popocatepetl, se nutre de agua proveniente de una gran cantidad de cañadas, barrancas y pequeños ríos que conforman la subcuenca Amecameca, donde las corrientes principales Chopanac, Ocosintla, Santiago y San José, que en su mayoría son intermitentes, se infiltran o son entubados al llegar a zonas más bajas (CONANP, 2010). En la lógica de los mercados de servicios ecosistémicos, los productores forestales de la región son los proveedores de Servicios Hidrológicos Ambientales (SHA) (Martínez *et al.*, 2010).

7.2. Edafología

Los principales suelos en el Parque Nacional Izta-Popo y su área de influencia son asociaciones de Andosol húmico, Regosol eútrico y Leptosol lítico, Cambisol y Fluvisol (FAO, 1970; modificado DGG, 1983; citados en García, 2004). De acuerdo con el sistema de clasificación de suelos WRB 2007, se describen a continuación.

- ❖ Andosoles. Suelos que se desarrollan en eyecciones o vidrios volcánicos bajo casi cualquier clima. Sin embargo, los Andosoles también pueden desarrollarse en otros materiales ricos en silicatos bajo meteorización ácida en climas húmedos y perhúmedos.
- ❖ Regosoles. Suelos minerales muy débilmente desarrollados en materiales no consolidados que no tienen un horizonte mólico o úmbrico, no son muy someros ni muy ricos en gravas, arenosos o con materiales flúvicos. Están extendidos en tierras erosionadas, particularmente en áreas áridas y semiáridas y en terrenos montañosos.
- ❖ Leptosoles. Suelos muy someros sobre roca continua y suelos extremadamente arcillosos o pedregosos. Suelos azonales y particularmente comunes en regiones montañosas.
- ❖ Cambisoles. Suelos con formación de por lo menos un horizonte subsuperficial incipiente. La transformación del material parental es evidente por la formación de estructura y decoloración principalmente parduzca, incremento en el porcentaje de arcilla o remoción de carbonatos.
- ❖ Fluvisoles. Suelos azonales genéticamente jóvenes, en depósitos aluviales, presentan evidencia de estratificación; débil diferenciación de horizontes pero puede haber presente un horizonte superficial diferente.



7.3. Vegetación

Debido al amplio desnivel altitudinal, la vegetación se distribuye en un patrón de pisos. El pastizal submontano es un tipo de vegetación de escasa distribución en el trópico, en el centro de México ocupa las laderas altas de las principales montañas (3800-4100 m) coincidiendo con el área de distribución de dos tipos de vegetación; el pinar abierto de *Pinus hartwegii* y el pastizal submontano (García, 2004). La vegetación del Parque está caracterizada por los bosques templados, siendo el bosque de pino el de mayor extensión, los pinares de *Pinus hartwegii*, *P. ayacahuite*, y *P. pseudostrobus*, presentan comunidades clímax. El bosque de *Abies* tiene su origen a partir de la biota que arribó por el lado norte del País. El bosque de *Alnus* o de *Aile* constituye una etapa sucesional para *Pinus* y principalmente *Abies religiosa*. El bosque de *Quercus* es otro tipo de vegetación representativo en el área de influencia. En cuanto a los pastizales se tienen los que son comunidades clímax en las cimas de las cumbres más altas, los que son comunidades producto de una perturbación en el bosque original llamados pastizales antropógenos y forman parte del proceso de sucesión, así como los que se encuentran en los valles donde las inundaciones son periódicas debido a una deficiencia en el drenaje (Lomas *et al.*, 2005).

7.4. Clima

Debido a su topografía y ubicación, el Parque tiene una variedad de climas que van del templado húmedo a los climas frío y muy frío; la temperatura disminuye con la altura a razón de 0.68° C por cada 100 m (CONANP, 2010).

El pastizal submontano, que se encuentra entre los 3600 y 4000 m, con clima tipo ET (frío) y precipitaciones que superan los 1300 mm anuales cuenta con dos estaciones; de estiaje de noviembre a marzo y lluvias de mayo a octubre. La parte cubierta de nieve del Iztaccíhuatl se presenta en la cota de los 4500 m durante el invierno, principalmente en las vertientes del norte, oriente y occidente. Está constituida por un casquete de profundidad variable que alcanza una extensión de 14 kilómetros de largo. Esta extensión de nieves desempeña el papel de condensador eficaz de la humedad del aire y regulador de temperatura, cuyos deshielos son una fuente normal y constante de aguas superficiales y subterráneas; esto es muy eficaz en la climatología de la montaña, cabe mencionar que las temperaturas inferiores a 10°C en todos los meses del año limitan la distribución de especies arbóreas (García, 2004).



7.5. Fauna

El área de los volcanes es considerada como importante reservorio de fauna silvestre. Los altos endemismos de la región se atribuyen a las características fisiográficas y topográficas. Las perturbaciones llevadas a cabo en el Parque Nacional reducen y aíslan los hábitats naturales cada vez más, además la fauna sufre por la caza deportiva y de subsistencia, así como por su comercio ilegal (CONANP, 2010).

Dentro del Parque se encuentran 8 órdenes, 15 familias y 50 especies de mamífero tres de esas especies son endémicas: los ratones (*Peromyscus maniculatus*, *Peromyscus cineritius*), el conejo zacatuche o teporingo (*Romerolagus diazi*), que por sus características óseas se considera una especie primitiva y endémica, protegida por la NOM-059-SEMARNAT-2001, reportada en peligro de extinción lo mismo que la musaraña oscura (*Sorex vagrans*) y el tejón o tlalcoyote (*Taxidea taxus*). Los roedores son los mejor representados; incluyen tuzas, ardillas y ratones; le sigue el orden de los carnívoros con coyotes, mapaches, zorrillos y se tienen registros de gato montés; los quirópteros (murciélagos); y finalmente los reptiles que se encuentran representados por 10 especies pertenecientes a 7 géneros en 5 familias.

El área de los volcanes es considerada por la CONABIO como Área de Importancia para la Conservación de las Aves (AICA) donde se distribuyen gavilancillos, aguilillas, codornices, lechuzas, búhos, cuervos, cenizos, jilgueros, gorriones, azulejos, tórtolas, coquitos, primavera, carpinteros, colibríes, cardenales, entre otros. El grupo está representado por 10 órdenes, divididos en 38 familias y 163 especies de ellas, 12 se encuentran bajo alguna categoría de riesgo de acuerdo a la NOM-059-SEMARNAT-2001 (CONANP, 2012).

8. MÉTODOS

Se eligieron 12 sitios de muestreo con influencia de diferentes usos de suelo a lo largo de dos afluentes que alimentan el Río Amecameca, la selección de los dos sistemas lóticos se basó en la revisión bibliográfica y cartográfica, los muestreos se llevaron a cabo mensualmente de octubre de 2010 a noviembre de 2011 con la finalidad de analizar los patrones de interacción entre el sistema hídrico y edáfico.

8.1. Fase de campo

En el primer afluente, sistema Amalacaxco, los sitios seleccionados presentaron uso de suelo forestal, forestal perturbado, pecuario, agropecuario y urbano. En el segundo afluente, sistema Chopanac, los sitios tuvieron uso forestal, forestal perturbado, pecuario, agrícola y urbano, en este último se da la confluencia de ambos sistemas (Figura 5). Cada sitio se caracterizó ecológicamente registrando sus coordenadas geográficas y altitud con un GPS (GARMIN modelo etrex-vista 2000); vegetación dominante, estratos vegetales, porcentaje de nubosidad, temperatura ambiente (termómetro de inmersión total con mercurio y precisión de 0.1°C), pendiente (distanciómetro modelo Leica-Disto3) y uso de suelo.



Figura 5. Sitio de confluencia de ambos sistemas (INEGI-SIATL, editado por Cortés y Vega; 2012).

8.1.1. Toma de muestras de agua

El muestreo de agua se llevó a cabo manualmente a nivel superficial en botellas de polietileno opacas de 1 L, 500 mL que se preservaron a un pH < 2 con H₂SO₄ concentrado y de 250 mL para las determinaciones químicas antes de 24 horas como la alcalinidad,



dureza total y de calcio, todas se conservaron a 4°C en una hielera durante su traslado al laboratorio o área de análisis de acuerdo al APHA-AWWA-WPCF (1992).

In situ se midió el pH, conductividad y STD (Combo Hanna modelo HI 98129), se determinó la concentración de oxígeno disuelto en botellas DBO con capacidad de 50 mL; para el carbono orgánico particulado se tomó la muestra de 100 mL con ayuda de un equipo de filtración y filtro de fibra de vidrio (Parsons *et al.*, 1984). Se obtuvo el perfil batimétrico del cauce y se midió la velocidad del caudal por el método del flotador (Aparicio, 1994).

❖ **Parámetros físicos:**

- **Temperatura.** La temperatura y la luz, son factores que determinan los procesos de fotosíntesis en los productores primarios (De la Lanza, 1990), particularmente en los cuerpos de agua tienen gran efecto sobre procesos químicos y biológicos de ecosistemas acuáticos. La temperatura de las aguas corrientes difiere en tres aspectos de las de los lagos: 1) la fluctuación diaria es amplia por la pequeña profundidad, 2) la turbulencia tiende a destruir gradientes e impide la formación de termoclinas, 3) el transporte horizontal lleva una masa de agua que tiende a estar en equilibrio con la atmósfera local por radiación y evaporación hasta un punto más bajo donde ya no lo está (Margalef, 1983).
- **pH.** El pH del agua representa su acidez o alcalinidad cuyo factor más importante es habitualmente la concentración de bióxido de carbono (De la Lanza, 1990).
- **Conductividad eléctrica.** Con ella se mide el contenido de sales en el agua. Es una expresión numérica de la capacidad de una solución para transportar una corriente eléctrica. Esta capacidad depende de la presencia de iones y de su concentración total, movilidad y temperatura. En sistemas como ríos y lagos se utilizan instrumentos de medición, los cuales pueden incorporarse a estaciones de monitoreo multiparamétrico con registradores (APHA-AWWA-WPCF, 1992).
- **Sólidos Totales Disueltos (STD).** Son las sales y residuos orgánicos disueltos en un medio acuoso. Normalmente la salinidad total de las aguas continentales es determinada por cuatro aniones principalmente que son el calcio, magnesio, sodio, potasio y por aniones carbonato, sulfato y cloruros. Los análisis de sólidos disueltos son importantes como indicadores de la efectividad de procesos de tratamiento biológicos y físicos de aguas. Se ha encontrado que existe una correlación directa entre conductividad y concentración de sólidos totales disueltos, para cuerpos de agua dulce (Wetzel, 2001).



Figura 6. Toma de muestra de agua, temperatura, conductividad eléctrica, pH y medición de perfil batimétrico.

❖ Parámetros químicos:

- **Oxígeno disuelto.** Es una determinación imprescindible en un cuerpo acuático ya que este gas interviene en diferentes funciones como la respiración de los organismos y reacciones óxido-reducción. La concentración del oxígeno depende de la temperatura, presión atmosférica y contenido de sales disueltas (Wetzel, 2001). Este se determinó por el método de Winkler con la modificación de la azida de sodio, el cual depende de la formación de un precipitado de hidróxido manganeso que absorbe el oxígeno disuelto en el agua, formando óxido mangánico; una posterior acidificación, en presencia de yoduro, libera el yodo en cantidades equivalentes al oxígeno disuelto en la muestra. El yodo liberado se titula con tiosulfato de sodio de concentración conocida utilizando solución de almidón como indicador (NMX-AA-012-SCFI-2001).
- **Alcalinidad.** La cantidad de ácido requerido para graduar y valorar las bases es una medida de la alcalinidad del agua, la cual se determinó por el método volumétrico con dos indicadores. Este método se basa en el manejo de pH utilizando la fenolftaleína y el anaranjado de metilo como indicadores. Si las muestras se tornan rojizas al agregarles fenolftaleína



(pH > 8.3) éstas contienen iones carbonato y la valoración se realiza en una segunda etapa, la muestra es primeramente valorada con ácido sulfúrico hasta el punto de conversión de la fenolftaleína. Durante este paso los carbonatos se transforman a bicarbonatos y al punto de vire todos los carbonatos han sido valorados. Además ningún bicarbonato originalmente presente ha sido destruido, de manera que la muestra ahora contiene más bicarbonatos que al principio de la titulación. Luego se mide la alcalinidad total que consiste en valorar la muestra con ácido para tomar en cuenta los bicarbonatos de la primera reacción con los bicarbonatos de la muestra utilizando el anaranjado de metilo como indicador (pH > 4.5) hasta que todo el bicarbonato se convierta en bióxido de carbono y agua (NMX-AA-036-SCFI-2001).

- **Dureza total.** La dureza total en un cuerpo de agua juegan un papel importante en el metabolismo de los organismos. Se determinó con el método Titrimétrico. Esta técnica se basa en la valoración de los iones de calcio y magnesio con la sal disódica del ácido EDTA para formar el complejo estable CaEDTA y MgEDTA, si una pequeña cantidad de ericromo negro es agregada a la muestra amortiguada a pH 10, se formará un complejo soluble color vino con los iones de calcio y magnesio. En la valoración con el EDTA estos iones se disociarán de sus respectivos complejos con ericromo negro para formar complejos más estables con el EDTA. Cuando todo el calcio y magnesio han reaccionado, el color de la solución se vuelve azul (NMX-AA-072-SCFI-2001).
- **Dureza de calcio.** La dureza del agua es resultado de la solución de rocas y minerales alcalinotérreos del suelo y del aporte directo de desechos que contienen carbonatos de calcio y magnesio que prevalecen en la corteza terrestre. Se valoraron los carbonatos de calcio presentes en el agua con el método complejométrico. En esta técnica la murexida presenta un color púrpura oscuro que en presencia de calcio forma un complejo estable de color rojizo o rosa, observándose que al agregar EDTA en medio básico (pH 12-13) el calcio se disocia de su complejo de murexida para formar un compuesto quelatado con la sal de EDTA (APHA-AWWA-WPCF, 1992).



Figura 7. Determinación de oxígeno disuelto en campo y toma de muestra para carbono orgánico particulado.

8.1.2. Toma de muestra de sedimento

En cada sitio de muestreo se tomaron tres submuestras del sedimento a lo largo de un transecto de 30 m para formar muestras compuestas con el fin de representar mejor el sistema. Posteriormente se secaron a temperatura ambiente y tamizaron en el laboratorio con una malla 2 mm, se almacenaron en frascos de plástico etiquetados con los datos del sitio y fecha de colecta, para su posterior análisis.

8.1.3. Toma de muestra de suelo

Para la colecta de suelo en cada sitio de muestreo se delimitaron cuadrantes de 30 m x 2 m y 30 m x 10 m, con una amplitud de 1 m y 5 m a ambos lados del Río (Figura 8). En cada cuadrante se colectaron al azar cuatro submuestras de suelo (dos de cada lado del río) con profundidad de 0 a 20 cm, para generar muestras compuestas que representaban mejor el sitio. Se secaron a temperatura ambiente, posteriormente se tamizaron con malla 2 mm y almacenaron en botes de plástico membretados.

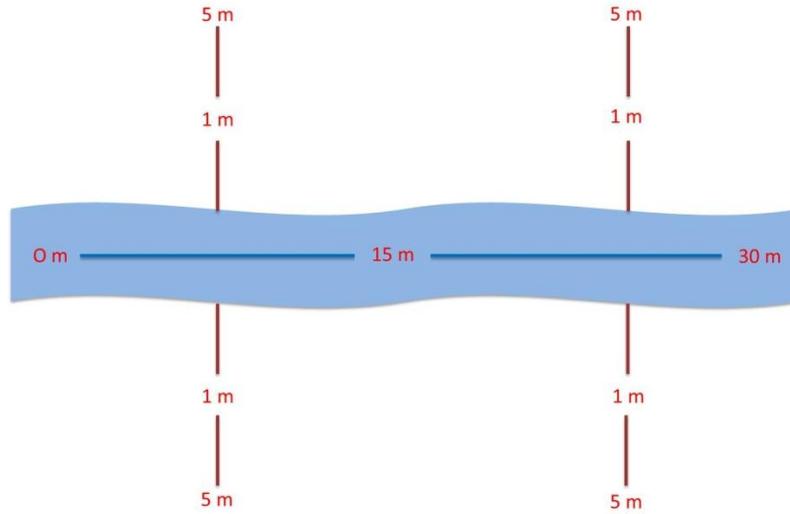


Figura 8. Esquema del muestreo de sedimento y suelo.



Figura 9. Arriba toma de muestra en sedimento, abajo toma de muestra en suelo.



8.2. Fase de laboratorio

Las muestras de agua colectadas en campo se transportaron al laboratorio donde se analizaron los siguientes parámetros de acuerdo las técnicas en el APHA-AWWA-WPCF (1992), manual de técnicas básicas para el análisis de ambientes acuáticos y las Normas Mexicanas:

- **Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO).** Mide la cantidad de oxígeno utilizado por los microorganismos acuáticos que descomponen la materia orgánica disuelta en el agua, al cabo de 5 días. Se determinó por el método de Winkler con la modificación de azida de sodio, el método se emplea en aguas naturales y residuales y se determina por la diferencia entre el oxígeno disuelto inicial y el oxígeno disuelto al cabo de cinco días de incubación a 20°C (NMX-AA-028-SCFI-2001).
- **Demanda Química de Oxígeno (DQO).** Se utiliza como una medida del equivalente de oxígeno del contenido de materia orgánica de una muestra susceptible de oxidación por un oxidante químico fuerte. Para las muestras de una fuente específica, la DQO puede relacionarse empíricamente con la DBO, el carbono orgánico o la materia orgánica. Se valoró mediante el método colorimétrico de reflujo cerrado (APHA-AWWA-WPCF 1992).
- **Sólidos Totales Sedimentables (STS).** Están formados por partículas más densas que el agua, que se mantienen dispersas dentro de ella en virtud de la fuerza de arrastre causada por el movimiento o turbulencia de la corriente. Se determinaron mediante el uso de cono Imhoff, en el cual por acción de la gravedad sedimentan rápidamente cuando la masa de agua se mantiene en reposo por dos horas (NMX-AA-004-SCFI-2000).
- **Nitratos.** Se determinaron de acuerdo al método del ácido fenoldisulfónico. Este método tiene un principio colorimétrico en el cual, el ácido fenoldisulfónico reacciona con el nitrato en ausencia de agua para formar un nitroderivado, que en medio alcalino es alterado ligeramente para producir un compuesto de color amarillo, la intensidad del color es proporcional a la concentración del nitrato en la muestra (Cervantes, 1985).
- **Amonio.** Se determinó por el método fenato o azul de indofenol, el método se basa en la reacción en condiciones alcalinas del amonio con fenol e hipoclorito, catalizada por la sal manganosa, para formar indofenol de color azul (APHA-AWWA-WPCF, 1992).
- **Fósforo total.** Determinado por el método de digestión con persulfato, en donde los compuestos fosfatados son transformados a ortofosfatos por medio de una digestión con persulfato de potasio y ácido sulfúrico, ya que este método espectrofotométrico es específico para el ión ortofosfato (PO_4^{3-}), midiéndose la

concentración de ortofosfatos por el método del fosfomolibdato (APHA-AWWA-WPCF, 1992).

- **Ortofosfatos.** Los ortofosfatos solubles se transforman en un complejo colorido de fosfomolibdato por reacción con el molibdato de amonio en medio ácido. Presentándose una coloración azul, que se incrementa en forma proporcional a la cantidad de ortofosfatos presente en la muestra, después de que el molibdeno reacciona con un agente reductor que generalmente es el cloruro estanoso (NMX-AA-029-SCFI-2001).
- **Carbono orgánico particulado (COP).** La estimación del carbono orgánico particulado se lleva a cabo mediante la oxidación de una muestra filtrada, la materia particulada es retenida a través de un filtro de fibra de vidrio así el carbono es determinado por incineración húmeda con dicromato y ácido sulfúrico concentrado. La reducción de la solución amarilla de dicromato se toma como la medida del carbono oxidable (Parsons *et al.*, 1984).

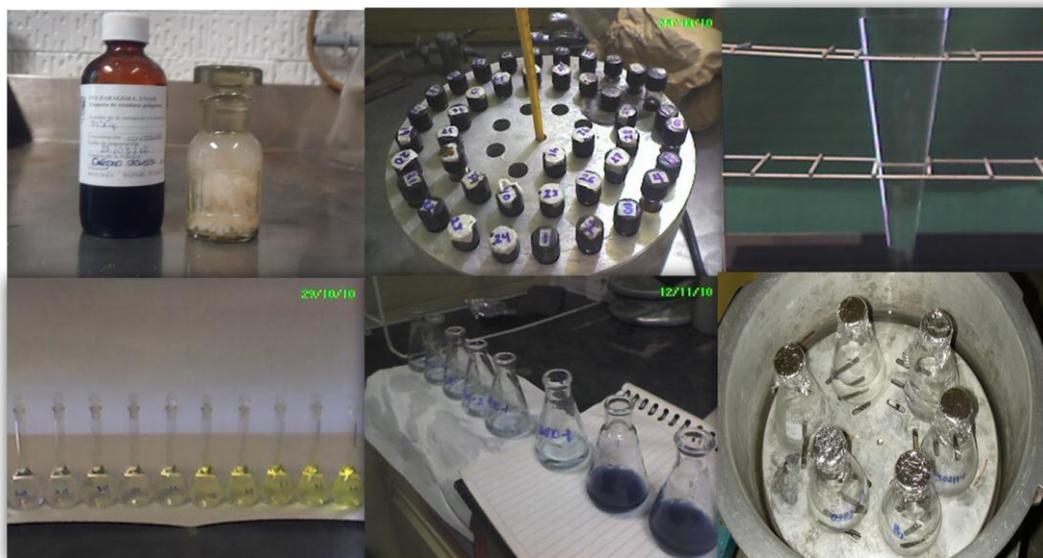


Figura 10. Parámetros de agua determinados en el laboratorio; arriba de izquierda a derecha: DBO₅, DQO y STS. Abajo de izquierda a derecha: N-NO₃⁻, P-PO₄³⁻ y P-total.



En sedimento y suelo se determinaron los siguientes parámetros de acuerdo a la Norma Oficial Mexicana NOM-021-SEMARNAT-2000, que establece las especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de suelos, estudio, muestreo y análisis.

- **pH.** En el suelo corresponde a una fase acuosa o solución salina que interviene con los coloides ionizables. Se determinó de acuerdo a Jackson (1964) con relación 1:2.
- **Conductividad eléctrica.** Sirve para medir la concentración total de sales en una solución, pero no indica qué sales están presentes, se expresa en dS m^{-1} . Se determinó con una relación 1:5 de acuerdo a Richards (1990).
- **Contenido de humedad del suelo.** Se basa en la medición de la cantidad de agua expresada en gramos que contiene una muestra de suelo. La determinación de la masa de agua se realiza por la diferencia en peso entre la masa de suelo húmedo y la masa de suelo seco (se considera como suelo seco aquél secado a la estufa a 105°C) hasta obtener un peso constante, fue realizado por el método de gravimetría (NOM-021-SEMARNAT-2000).
- **Materia orgánica.** Es la fracción orgánica del suelo que consiste en organismos, plantas secas y residuos de origen animal, donde esta porción orgánica es la fracción química y biológica más activa del suelo, almacenando muchos elementos esenciales, además que favorece las relaciones entre el aire y agua y es un enorme depósito geoquímico de carbono, la materia orgánica se determinó con el método Walkley y Black que se basa en la reacción ante un agente oxidante, favorecida por la ayuda de calor donde las reacciones que se llevan a cabo son la reducción del cromo, oxidación de la materia orgánica y la valoración del exceso de oxidante con la sal ferrosa (Jackson, 1964).
- **Nitrógeno total.** Método Semimicro Kjeldhal modificado para incluir nitratos (Bremmer, 1965). Se basa en la digestión de la muestra en ácido sulfúrico concentrado a ebullición, con adición de un catalizador. La muestra se digiere hasta la oxidación total. El nitrógeno contenido en la muestra se convierte en sulfato de amonio. Al añadir hidróxido de sodio 10 N, el amonio es liberado y por arrastre de vapor es recogido sobre una solución de ácido bórico que se valora con ácido sulfúrico.
- **Fósforo extractable.** Es ampliamente utilizado en estudios de fertilidad de suelos y se evalúa el fósforo disponible en los suelos. Se determinó mediante Bray-Kurtz 1, en donde la solución extractora de fósforo consiste en una mezcla de HCl y NH_4F para remover formas de fósforo ácido solubles como los fosfatos de calcio y una porción de fosfatos de aluminio y hierro (Bray y Kurtz, 1945).



Figura 11. Parámetros en sedimento y suelo determinados en el laboratorio; arriba de izquierda a derecha: pH, conductividad eléctrica, temperatura y materia orgánica. Abajo de izquierda a derecha: nitrógeno total y fósforo extractable.

9. RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

En la Figura 12 se muestran los doce sitios estudiados, ubicados a lo largo de dos afluentes del Río Amecameca, los sistemas lóticos Amalacaxco y Chopanac, los cuales fueron establecidos de acuerdo a los diferentes usos de suelo y se encontraron distribuidos en un gradiente altitudinal de 2463 a 3651 m.

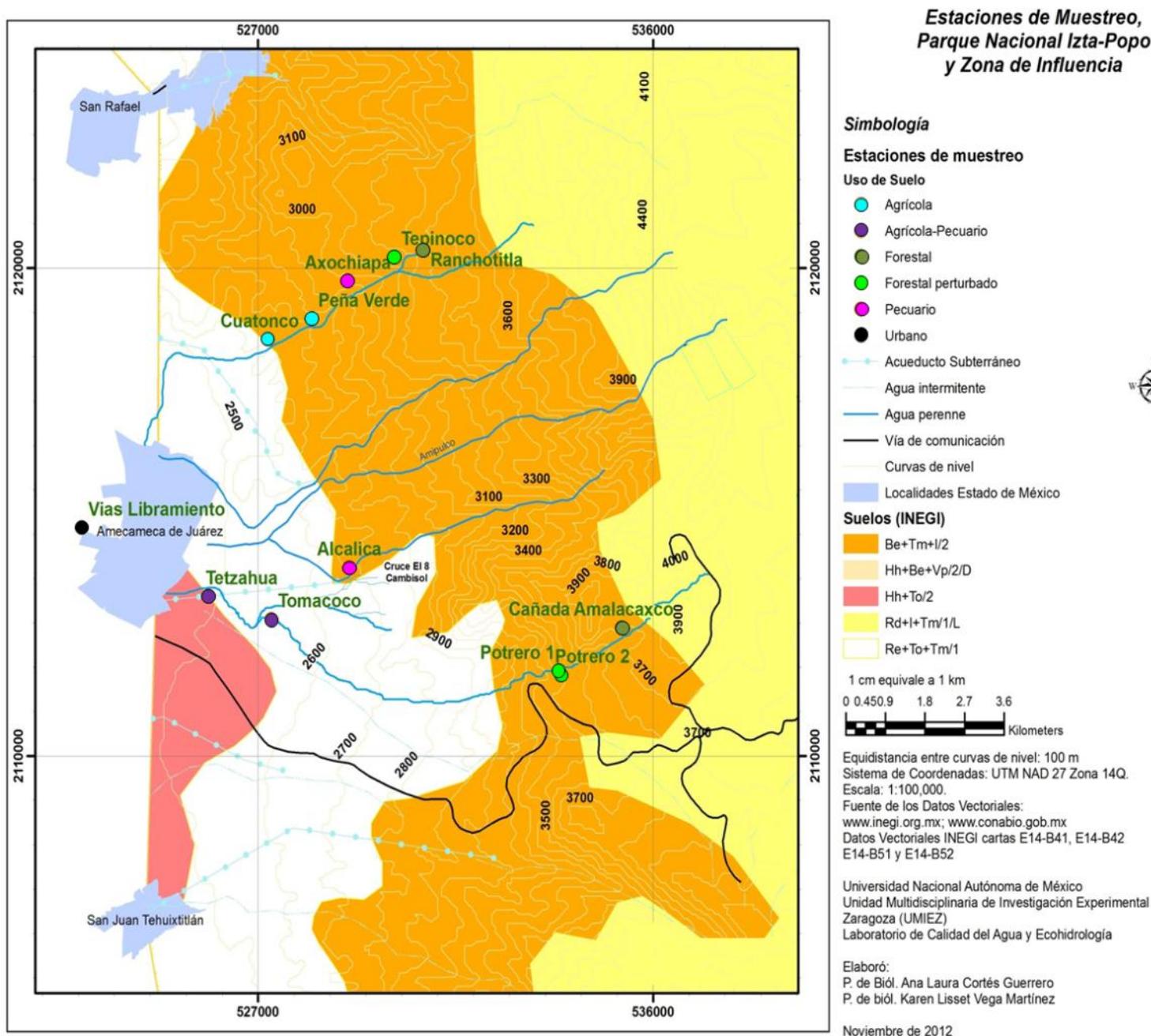


Figura 12. Estaciones de muestreo en el Parque Nacional Izta-Popo y área de influencia.

Los siete sitios con distintos usos de suelo que conformaron el sistema Amalacaxco, se describen de la Figura 13 a la 19.

Cañada Amalacaxco

Uso de suelo: Forestal

Coordenadas: 2112632 N, 535280 W

Altitud: 3651 m

Tipo de suelo: Cambisol Eútrico, Andosol Mólico (INEGI, 2012).

Vegetación dominante: Bosque de *Pinnus hartwegii* con zacatonal



Figura 13. Sitio de muestreo Amalacaxco.

Potrero 1

Uso de suelo: Forestal perturbado

Coordenadas: 2111743 N, 533867 W

Altitud: 3368 m

Pendiente: 15%

Tipo de suelo: Cambisol Eútrico, Andosol Mólico (INEGI, 2012).

Vegetación dominante: Bosque de *Abies religiosa*



Figura 14. Sitio de muestreo Potrero 1.

Potrero 2

Uso de suelo: Forestal perturbado

Coordenadas: 2111663 N, 533890 W

Altitud: 3347 m

Pendiente: 30%

Tipo de suelo: Cambisol Eútrico, Andosol Mólico (INEGI, 2012).

Vegetación dominante: Bosque de *Abies religiosa* y *Pinus patula*

Observaciones: Presencia de maquinaria y entubamiento en el cauce.



Figura 15. Sitio de muestreo Potrero 2.

Alcalica

Uso de suelo: Pecuario

Coordenadas: 2113867 N, 529075 W

Altitud: 2684 m

Pendiente: 10%

Tipo de suelo: Cambisol Eútrico, Andosol Mólico (INEGI, 2012).

Vegetación dominante: Bosque de *Arbutus xalapensis* y *Cupressus sp.*

Observaciones: Debido al entubamiento en zonas de mayor altitud durante algunas fechas, la cantidad de agua se vio reducida o ausente.

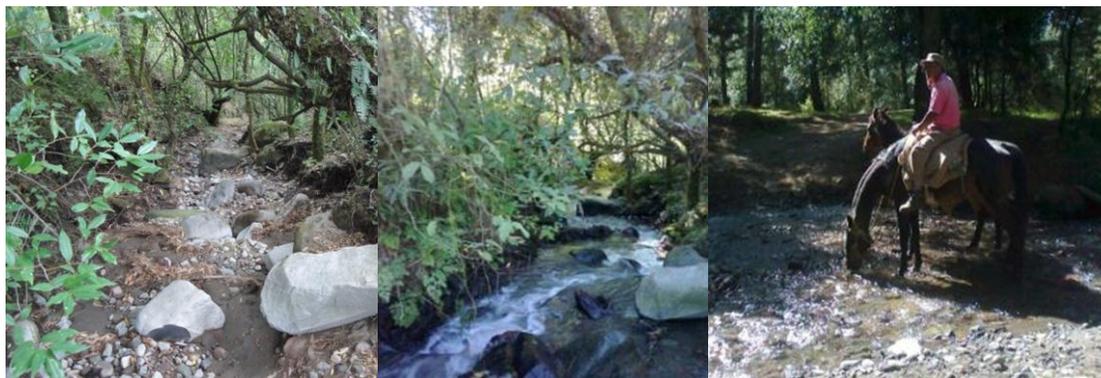


Figura 16. Sitio de muestreo Alcalica.

Tomacoco

Uso de suelo: Agrícola-pecuario

Coordenadas: 2112802 N, 527300 W

Altitud: 2545 m

Pendiente: 4%

Tipo de suelo: Regosol Eútrico, Andosol Ócrico (INEGI, 2012).

Especie dominante: *Buddleia cordata*



Figura 17. Sitio de muestreo Tomacoco.

Tetzahua

Uso de suelo: Agrícola-pecuario

Coordenadas: 2113274 N, 525870 W

Altitud: 2518 m

Pendiente: 5%

Tipo de suelo: Regosol Eútrico, Andosol Ócrico (INEGI, 2012).

Especie dominante: *Crataegus mexicana*



Figura 18. Sitio de muestreo Tetzahua.

Vías Libramiento

Uso de suelo: Urbano

Coordenadas: 2114682 N, 522978 W

Altitud: 2463

Pendiente: 2%

Tipo de suelo: Regosol Eútrico, Andosol Ócrico (INEGI, 2012).

Especies dominantes: *Alnus jorullensis* y *Buddleja sessiliflora*

Observaciones: Zona donde confluyen ambos sistemas, además recibe aportes de las comunidades aledañas



Figura 19. Sitio de muestreo Vías Libramiento.

En el sistema lótico Chopanac se muestrearon 5 sitios con distintos usos de suelo, los cuales se describen a continuación (Figura 20-24).

Ranchotitla

Uso de suelo: Forestal

Coordenadas: 2120366 N, 530775 W

Altitud: 3224 m

Pendiente: 5%

Exposición: sureste

Tipo de suelo: Cambisol Eútrico, Andosol Mólico (INEGI, 2012).

Vegetación dominante: Bosque de *Abies religiosa* con *Senecio angulifolius*

Observaciones: Zona de manantial.



Figura 20. Sitio de muestreo Ranchotitla.

Tepinoco

Uso de suelo: Forestal perturbado

Coordenadas: 2120227 N, 530104 W

Altitud: 3028 m

Pendiente: 4%

Exposición: sureste

Tipo de suelo: Cambisol Eútrico, Andosol Mólico (INEGI, 2012).

Vegetación dominante: Bosque de *Abies religiosa* con *Senecio angulifolius*



Figura 21. Sitio de muestreo Tepinoco.

Axochiapa

Uso de suelo: Pecuario

Coordenadas: 2119739 N, 529037 W

Altitud: 2760 m

Pendiente: 4%

Exposición: suroeste

Tipo de suelo: Cambisol Eútrico, Andosol Mólico (INEGI, 2012).

Vegetación dominante: Bosque de *Quercus ilex* con *Adiantum sp.*, *Asplenium sp.*, *Blechnum occidentale L.*

Observaciones: Zona donde captan agua en cisternas.



Figura 22. Sitio de muestreo Axochiapa.

Peña Verde

Uso de suelo: Agrícola

Coordenadas: 2118961 N, 528227 W

Altitud: 2752 m

Pendiente: 3%

Exposición: suroeste

Tipo de suelo: Cambisol Eútrico, Andosol Mólico (INEGI, 2012).

Vegetación dominante: Bosque de *Pinus ayacahuite* y *Quercus ilex*



Figura 23. Sitio de muestreo Peña Verde.

Cuatonco

Uso de suelo: Agrícola

Coordenadas: 2118544 N, 527224 W

Altitud: 2673 m

Pendiente: 4%

Exposición: sureste

Tipo de suelo: Cambisol Eútrico, Andosol Mólico (INEGI, 2012).

Vegetación dominante: Bosque de *Pinus ayacahuite*

Observaciones: También recibe aporte de una cisterna.



Figura 24. Sitio de muestreo Cuatonco.



Los Cuadros 1 y 2 muestran las variables registradas en campo y laboratorio a lo largo de este estudio para ambos afluentes.

Cuadro 1. Variables registradas en agua-sedimento-suelo para el afluente Amalacaxco.

| | Parámetro | Abreviatura | Unidades | Mínimo | Máximo |
|-------------------------|-------------------------------|---------------------------------|--------------------------------|--------|---------|
| AGUA | Altitud | Alt | m | 2463 | 3651 |
| | Temperatura Ambiente | T-amb | °C | 6 | 19 |
| | Temperatura | T-agua | °C | 4.0 | 18.0 |
| | pH | pH | | 7.0 | 8.3 |
| | Conductividad eléctrica | CE | μS | 26 | 1056 |
| | Oxígeno disuelto | OD | mg L ⁻¹ | 0 | 16.0 |
| | Alcalinidad total | Alc-tot | mg L ⁻¹ | 8.56 | 472.94 |
| | Dureza calcio | D-Ca | mg L ⁻¹ | 9.87 | 83.86 |
| | Dureza total | D-tot | mg L ⁻¹ | 24.66 | 1541.54 |
| | Nitratos | N-NO ₃ ⁻ | mg L ⁻¹ | 0.008 | 2.03 |
| | Amonio | N-NH ₄ ⁺ | mg L ⁻¹ | 0.001 | 1.99 |
| | Fósforo total | P-tot | mg L ⁻¹ | 0.006 | 10.90 |
| | Fosfatos | P-PO ₄ ³⁻ | mg L ⁻¹ | 0.002 | 4.04 |
| | Demanda bioquímica de oxígeno | DBO ₅ | mg L ⁻¹ | 0.89 | ND |
| | Demanda química de oxígeno | DQO | mg L ⁻¹ | 3.56 | 613.18 |
| | Carbono orgánico particulado | COP | μg L ⁻¹ | 10.89 | 586.12 |
| | Sólidos totales disueltos | STD | ppm L ⁻¹ | 20.0 | 530.0 |
| | Sólidos totales sedimentables | STS | ml L ⁻¹ | 0.01 | 8.54 |
| | Promedio Gasto | Prom-gas | m ³ s ⁻¹ | ND | 0.26 |
| | Velocidad de Corriente | Vel-corr | m s ⁻¹ | 0.13 | 1.09 |
| Área | Área | m ² | 0.01 | 0.44 | |
| SEDIMENTO | Materia orgánica | MO-sed | % | 0.74 | 17.64 |
| | Nitrógeno | N-sed | % | 0.01 | 0.46 |
| | Fósforo | P-sed | mg kg ⁻¹ | 0.005 | 0.40 |
| | pH | pH-sed | | 5.93 | 7.95 |
| | Conductividad eléctrica | CE-sed | dS m ⁻¹ | 0.01 | 0.25 |
| SUELO | Densidad aparente | DA | g cm ⁻³ | 0.64 | 1.92 |
| | Humedad | Hum | % | 7.44 | 52.43 |
| | Materia orgánica | MO-suelo | % | 2.17 | 19.87 |
| | Nitrógeno | N-suelo | % | 0.07 | 0.68 |
| | Fósforo | P-suelo | mg kg ⁻¹ | 0.02 | 0.42 |
| | pH | pH-suelo | | 4.65 | 6.78 |
| Conductividad eléctrica | CE-suelo | dS m ⁻¹ | 0.04 | 0.18 | |

*ND: No determinado



Cuadro 2. Variables registradas en agua-sedimento-suelo para el afluente Chopanac.

| | Parámetro | Abreviatura | Unidades | Mínimo | Máximo |
|-------------------------|-------------------------------|---------------------------------|--------------------------------|--------|---------|
| AGUA | Altitud | Alt | m | 2463 | 3224 |
| | Temperatura Ambiente | T-amb | °C | 5 | 19 |
| | Temperatura | T-agua | °C | 6 | 18 |
| | pH | pH | | 6.4 | 8.4 |
| | Conductividad eléctrica | CE | μS | 63 | 1056 |
| | Oxígeno disuelto | OD | mg L ⁻¹ | 0 | 16.8 |
| | Alcalinidad total | Alc-tot | mg L ⁻¹ | 17.12 | 472.94 |
| | Dureza calcio | D-Ca | mg L ⁻¹ | 12.33 | 83.86 |
| | Dureza total | D-tot | mg L ⁻¹ | 43.16 | 1541.54 |
| | Nitratos | N-NO ₃ ⁻ | mg L ⁻¹ | 0.01 | 2.03 |
| | Amonio | N-NH ₄ ⁺ | mg L ⁻¹ | 0.001 | 1.99 |
| | Fósforo total | P-tot | mg L ⁻¹ | 0.021 | 10.90 |
| | Fosfatos | P-PO ₄ ³⁻ | mg L ⁻¹ | 0.017 | 4.04 |
| | Demanda bioquímica de oxígeno | DBO | mg L ⁻¹ | 1.33 | ND |
| | Demanda química de oxígeno | DQO | mg L ⁻¹ | 4.69 | 604.82 |
| | Carbono orgánico particulado | COP | μg L ⁻¹ | 9.25 | 586.12 |
| | Sólidos totales disueltos | STD | ppm L ⁻¹ | 31 | 530 |
| | Sólidos totales sedimentables | STS | ml L ⁻¹ | 0 | 8.54 |
| | Promedio Gasto | Prom-gas | m ³ s ⁻¹ | 0 | 0.23 |
| | Velocidad de Corriente | Vel-corr | m s ⁻¹ | 0.06 | 1.01 |
| Área | Área | m ² | 0 | 0.35 | |
| SEDIMENTO | Materia orgánica | MO-sed | % | 0.49 | 17.64 |
| | Nitrógeno | N-sed | % | 20 | 0.46 |
| | Fósforo | P-sed | mg kg ⁻¹ | 0.005 | 0.40 |
| | pH | pH-sed | | 5.93 | 7.89 |
| | Conductividad eléctrica | CE-sed | dS m ⁻¹ | 0.01 | 0.25 |
| SUELO | Densidad aparente | DA | g cm ⁻³ | 0.57 | 1.25 |
| | Humedad | Hum | % | 13.69 | 47.52 |
| | Materia orgánica | MO-suelo | % | 2.17 | 12 |
| | Nitrógeno | N-suelo | % | 0.18 | 0.69 |
| | Fósforo | P-suelo | mg kg ⁻¹ | 0.16 | 0.42 |
| | pH | pH-suelo | | 5 | 7.04 |
| Conductividad eléctrica | CE-suelo | dS m ⁻¹ | 0.03 | 0.18 | |

*ND: No determinado



9.1. CARACTERIZACIÓN DEL AGUA, SEDIMENTO Y SUELO

El Cuadro 3 muestra los promedios de pH y conductividad en agua, sedimento y suelo registrados en campo y laboratorio a lo largo de este estudio para ambos afluentes, además de los sólidos totales disueltos y sedimentables del agua.

Cuadro 3. Variables registradas en agua-sedimento-suelo para ambos afluentes.

| | Localidad | Agua | | | | Sedimento | | Suelo | |
|------------|------------------|------|------------------------------------|--------------------------------|-------------------------------|-----------|---|-------|---|
| | | pH | Conductividad (μS) | STD (ppm L^{-1}) | STS (cm L^{-1}) | pH | Conductividad (dS m^{-1}) | pH | Conductividad (dS m^{-1}) |
| Amalacaxco | C. Amalacaxco | 7.34 | 42 | 21.2 | 0.11 | 6.92 | 0.03 | 5.05 | 0.09 |
| | Potrero 1 | 7.36 | 46 | 22.5 | 0.17 | 7.63 | 0.02 | 5.42 | 0.07 |
| | Potrero 2 | 7.37 | 44 | 32.2 | 0.26 | 7.14 | 0.02 | 5.52 | 0.05 |
| | Alcalica | 7.39 | 63 | 31.0 | 0.09 | 7.39 | 0.03 | 5.78 | 0.07 |
| | Tomacoco | 7.47 | 63 | 32.0 | 0.17 | 6.80 | 0.02 | 6.54 | 0.14 |
| | Tetzahua | 7.31 | 63 | 31.2 | 0.58 | 7.13 | 0.03 | 6.07 | 0.09 |
| Chopanac | Ranchotitla | 6.88 | 67 | 33.0 | 0.02 | 7.15 | 0.02 | 5.13 | ND |
| | Tepinoco | 7.72 | 67 | 33.0 | 0.20 | 7.10 | 0.03 | 5.15 | ND |
| | Axochiapa | 7.62 | 118 | 59.2 | 0.24 | 7.63 | 0.03 | 6.11 | 0.03 |
| | Peña Verde | 8.36 | 100 | 50.0 | 0.16 | 7.25 | 0.03 | 5.93 | 0.06 |
| | Cuatonco | 7.47 | 138 | 81.0 | 0.18 | 7.60 | 0.04 | 6.66 | 0.06 |
| | Vías Libramiento | 7.55 | 898 | 449.7 | 4.34 | 5.94 | 0.25 | 6.09 | 0.14 |

*ND: no determinado

- **Conductividad eléctrica**

En ambos sistemas este parámetro representa notablemente la afectación del cambio en el uso de suelo sobre la calidad del agua, debido a que en las zonas de actividad forestal se registraron las mínimas conductividades, mientras que en los sitios agrícolas-pecuarios del sistema Amalacaxco se mantuvieron en los 60 μS aproximadamente y en un intervalo de 100-140 μS para el sistema Chopanac, el sitio de contacto urbano presentó un excesivo aumento en la conductividad superando los 800 μS , debido a que además de recibir el aporte de agua de ambos afluentes se tiene el vertimiento de los desechos fecales, residuos de alimento o abonos y fertilizantes que se utilizan en el cultivo de maíz, avena y cebada al sistema hídrico. Olías *et al.* (2005), reporta que para el Laboratorio de Salinidad de los Estados Unidos, las conductividades <750 μS se consideran con bajo riesgo de salinidad, tal es el caso de la mayoría de las localidades muestreadas, de 750 a 1500 μS las consideran con riesgo medio de salinidad, como es el caso de la zona urbana. Feijoó *et al.* (1990), menciona que la conductividad tiene cierta dependencia altitudinal atribuible a la presencia de fuentes de contaminación difusa, caso que se representa en ambos sistemas estudiados. Los sólidos disueltos y la conductividad eléctrica del agua son propiedades dependientes una de la otra, por ello que de manera similar a la tendencia de la conductividad, se observó la de los STD y STS.

La CE, los STD y STS tuvieron correlación significativa con la conductividad del sedimento, la cual se mantuvo por debajo de los 0.03 dS m^{-1} en la mayoría de los sitios



muestreados, exceptuando una zona agrícola (0.04 dS m^{-1}) y la zona urbana (0.25 dS m^{-1}). En el suelo presentó un comportamiento similar al sedimento con conductividades por debajo de 0.1 dS m^{-1} en la mayoría de los sitios, de 0.09 a 0.14 dS m^{-1} en zonas agrícolas y urbanas, según la NOM-021-SEMARNAT-2000 estos suelos son considerados no salinos, debido a su naturaleza ácida.

- **pH**

De acuerdo con la NMX-008-SCFI-2000 los límites establecidos para aguas naturales deben encontrarse entre 6.5 a 8.5, es decir entre neutra y ligeramente alcalina. Los pH registrados para las unidades de muestreo en ambos sistemas se encontraron dentro de los límites que establece la norma; no obstante cabe resaltar que tanto en zonas agrícola, pecuaria y urbana se registraron valores entre 7 y 8, mientras que en zonas forestales fueron de 6.8 a 7.4. Los valores obtenidos en el pH activo del suelo indican una clasificación que va de fuertemente ácido por su origen volcánico a neutro para las zonas con manipulación antrópica en ambos afluentes.

El Cuadro 4 muestra los promedios de oxígeno disuelto, alcalinidad total y durezas registrados en campo durante la época de lluvia y estiaje para ambos afluentes.

Cuadro 4. Promedios registrados en agua para ambos afluentes durante la época de lluvia y estiaje.

| Localidad | Oxígeno Disuelto (mg L^{-1}) | | Alcalinidad total (mg L^{-1}) | | Dureza calcio (mg L^{-1}) | | Dureza total (mg L^{-1}) | | |
|------------|--|---------|---|---------|---|---------|--|---------|------|
| | Lluvia | Estiaje | Lluvia | Estiaje | Lluvia | Estiaje | Lluvia | Estiaje | |
| Amalacaxco | C. Amalacaxco | 9.2 | 10.5 | 35.5 | 28.0 | 14.8 | 12.8 | 79.2 | 53.3 |
| | Potrero 1 | 13.8 | 13.9 | 52.9 | 37.2 | 15.2 | 9.9 | 74.6 | 33.9 |
| | Potrero 2 | 17.0 | 14.8 | 40.9 | 50.9 | 16.8 | 11.0 | 48.7 | 39.2 |
| | Alcalica | 12.3 | 12.5 | 31.7 | 38.9 | 13.3 | 13.3 | 58.3 | 42.5 |
| | Tomacoco | 11.0 | 11.8 | 31.0 | 38.5 | 12.9 | 14.1 | 77.1 | 44.4 |
| | Tetzahua | 13.6 | 12.1 | 44.5 | 37.7 | 18.7 | 15.7 | 113 | 77.1 |
| Chopanac | Ranchotitla | 13.2 | 11.6 | 83.0 | 50.0 | 22.2 | 17.6 | 67.2 | 56.6 |
| | Tepinoco | 13.2 | 13.3 | 66.3 | 57.9 | 16.2 | 19.1 | 59.2 | 65.2 |
| | Axochiapa | 17.0 | 14.5 | 180 | 94.8 | 33.5 | 26.9 | 130 | 90.5 |
| | Peña Verde | 8.9 | | 73.6 | | 21.7 | | 73.4 | |
| | Cuatonco | 13.2 | 12.0 | 165 | 115 | 31.3 | 29.8 | 121 | 110 |
| | Vías Libramiento | 00.0 | 00.0 | 373.5 | 230.6 | 70.8 | 57.7 | 205 | 845 |

- **Durezas**

Las durezas en los sistemas acuáticos tienen una gran relación con la alcalinidad, tal es el caso de esta investigación donde presentaron $P < 0.0001$ y $r = 0.911$. La dureza es una característica del agua que representa la concentración total de iones Ca^{2+} y Mg^{2+} ,



expresados bajo la forma de carbonato de calcio y representa la naturaleza de las formaciones geológicas por las que el agua ha pasado (NMX-AA-072-SCFI-2001).

La dureza del agua se clasifica en base a la concentración de estos iones en el agua:

Cuadro 5. Clasificación de durezas (NMX-AA-072-SCFI-2001).

| Clasificación | Dureza (mg L ⁻¹) |
|--------------------|------------------------------|
| Blanda | 0-75 |
| Moderadamente dura | 75-150 |
| Dura | 150-300 |
| Muy dura | 300 o más |

De acuerdo a esta clasificación en ambos afluentes las zonas forestales se consideraron aguas blandas con concentraciones de 30 a 70 mg L⁻¹, en las zonas con actividades agrícolas y pecuarias se registraron concentraciones en un intervalo de 80-130 mg L⁻¹ clasificándose como aguas moderadamente duras. En Vías Libramiento (zona urbana) los valores obtenidos clasifican el agua como dura (200 mg L⁻¹) a muy dura con concentraciones por arriba de los 800 mg L⁻¹.

Exceptuando la zona urbana, ambos sistemas presentaron concentraciones dentro de lo establecido para las aguas naturales, ya que las concentraciones de calcio y magnesio en las fuentes naturales de agua son comúnmente de hasta 150 mg L⁻¹ (National Research Council, 1977).

- **Alcalinidad**

Es la medida de los compuestos alcalinos presentes en el agua. Regularmente se encuentran en forma de hidróxidos, carbonatos y bicarbonatos de calcio, potasio, sodio y magnesio (Wetzel, 2001). Si se tienen bajas concentraciones disminuye la capacidad amortiguadora del agua, produciendo variaciones de pH. Las altas concentraciones pueden provocar depósitos salinos en suelos agrícolas por la evaporación. La alcalinidad en el agua se clasifica de la siguiente manera:

Cuadro 6. Clasificación de alcalinidad (Kevern *et al.*, 1996).

| Rango | Alcalinidad (mg L ⁻¹) |
|-------|-----------------------------------|
| Baja | < 75 |
| Media | 75-150 |
| Alta | > 150 |



De acuerdo con esta clasificación el Sistema Amalacaxco, presentó alcalinidad baja en la mayoría de los sitios de muestreo con valores en un intervalo aproximado de 30 a 50 mg L⁻¹, en la zona urbana se registraron valores por arriba de los 300 mg L⁻¹ clasificándose como alta alcalinidad.

Para el Sistema Chopanac en la zonas forestales se obtuvieron concentraciones de 50 a 80 mg L⁻¹ clasificándose alcalinidades de baja a media, los sitios de muestreo con uso de suelo pecuarios y agrícolas tuvieron concentraciones aproximadas de 160 a 180 mg L⁻¹ en época de lluvia, consideradas como alcalinidades altas y de 90 a 110 mg L⁻¹ en época de estiaje siendo la alcalinidad media en esta época.

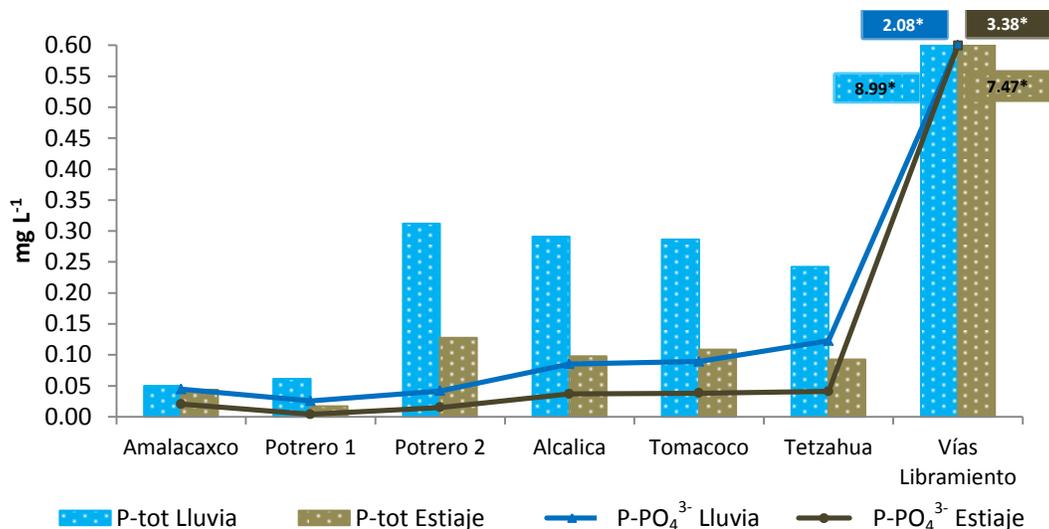
- **Oxígeno disuelto**

En el Sistema Amalacaxco la estación de muestreo con uso de suelo forestal conservado en época de lluvia presentó concentraciones de oxígeno disuelto (OD) en un intervalo de 9.2 a 10.5 mg L⁻¹ en estiaje, en las zonas forestales con perturbación se mostró un incremento de aproximadamente 13 a 17 mg L⁻¹ en época de lluvia y en estiaje se encontraron los valores entre 14 y 15 mg L⁻¹, esto debido a que la pendiente en esta zona es más pronunciada y al mismo tiempo la velocidad de la corriente es mayor, favoreciendo con esto la oxigenación del sistema. En las zonas donde se presentan actividades de ganadería y agricultura, las concentraciones de OD disminuyen como consecuencia de los diversos procesos de oxidación que se realizan de forma continua, mientras que en la zona urbana se presentaron condiciones anóxicas, debido a que en este sitio la demanda de este gas es tan elevada que se consume en su totalidad.

En el Sistema Chopanac para la estación de mayor altitud con uso de suelo forestal “Ranchotitla” se obtuvieron valores que oscilan entre los 11 a 13 mg L⁻¹ de oxígeno disuelto, los cuales fueron relativamente menores a los registrados en la zona forestal perturbada (14 mg L⁻¹), esto se puede atribuir a que este muestreo se realizó en manantial, teniendo así un menor tiempo de contacto con el oxígeno de la atmósfera, además en el recorrido del agua a lo largo del cauce se presentan pendientes pronunciadas, propiciando una mayor velocidad de corriente y por tanto una mayor oxigenación del sistema. Para la zona con uso de suelo pecuario se presentó la mayor concentración de OD con 17 mg L⁻¹ en época de lluvia y 14.5 mg L⁻¹ en época de estiaje, además que cuenta con la construcción de cisternas para la captación de agua lo que hace del afluente un sistema intermitente.

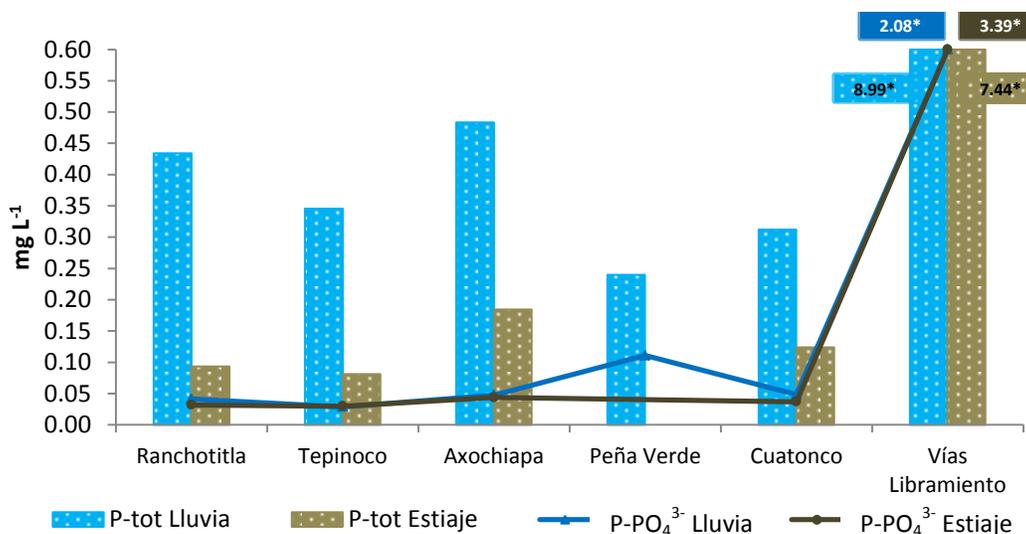
9.2. FÓSFORO EN LOS SISTEMAS AGUA, SEDIMENTO Y SUELO

En aguas naturales y residuales el fósforo puede existir en forma de fosfatos, siendo los ortofosfatos los más comunes. En las Figuras 25 y 26 se muestra el comportamiento de los ortofosfatos y el fósforo total en el agua ($r=0.7625$, $p<0.0001$) durante las épocas de lluvia y estiaje para los sistemas Amalacaxco y Chopanac. En ambos afluentes el fósforo total y los ortofosfatos generalmente tuvieron concentraciones más altas en la época de lluvias que en estiaje.



* Concentraciones fuera del intervalo de la gráfica

Figura 25. Concentraciones de fósforo del agua en el sistema Amalacaxco.



* Concentraciones fuera del intervalo de la gráfica

Figura 26. Concentraciones de fósforo del agua en el sistema Chopanac.



Para el sistema Amalacaxco la concentración más baja de fósforo se observó en las zonas forestales donde se registraron concentraciones de aproximadamente 0.05 mg L^{-1} . En las estaciones con uso de suelo pecuario y agrícola la cantidad de fósforo aumentó, encontrando concentraciones de 0.2 a 0.3 mg L^{-1} durante la lluvia y aproximadamente de 0.1 mg L^{-1} durante el estiaje. En el sistema Chopanac las zonas de uso forestal tuvieron concentraciones de 0.3 a 0.4 mg L^{-1} en época de lluvia y menores a 0.1 mg L^{-1} en estiaje. La zona urbana, donde confluyen ambos sistemas, presentó un aumento drástico de fósforo en comparación a los demás usos de suelo con valores de 9 mg L^{-1} en lluvias y 7.5 mg L^{-1} durante el estiaje; esto fue similar a los resultados obtenidos por Soledad (2013) en diversos afluentes del Parque Nacional Izta-Popo, donde menciona que en las zonas de mayor altitud el agua tuvo las menores concentraciones de fósforo total, menores a 0.3 mg L^{-1} .

Los ortofosfatos tuvieron el mismo comportamiento que el fósforo total, aumentando las concentraciones conforme se modifica el uso de suelo. En las zonas forestales de ambos sistemas se registraron concentraciones en un intervalo de 0.03 a 0.04 mg L^{-1} . Los valores en la zona urbana fueron de 2.1 mg L^{-1} en lluvias y 3.4 mg L^{-1} en época de estiaje, debido a que los residuos de plantas, los fertilizantes comerciales, los abonos de animales, los desechos industriales, domésticos y agrícolas son vías de introducción adicionales del fósforo a los ecosistemas, esto coincide con lo establecido por Páez *et al.* (2007).

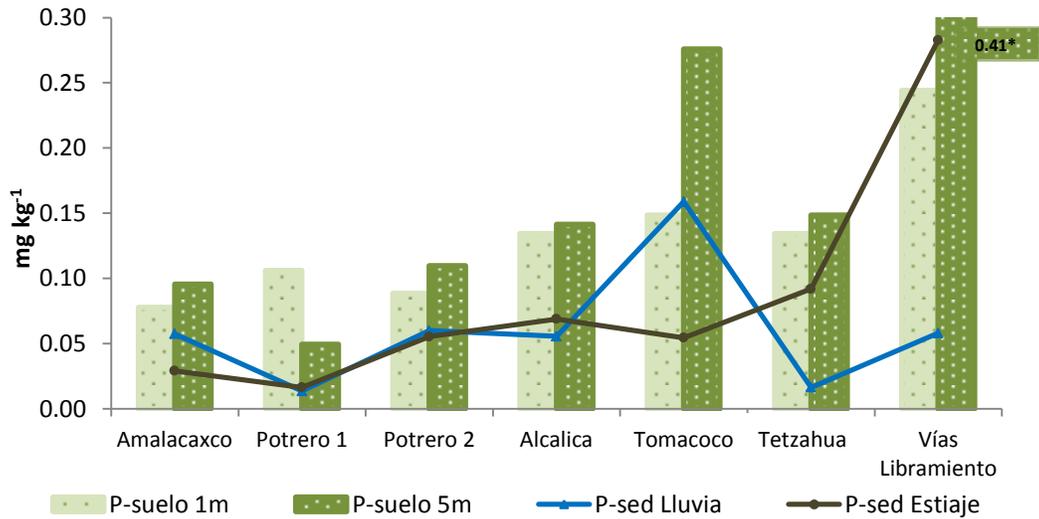
La NOM-001-ECOL-1996 establece el límite máximo permisible de fósforo total en ríos con uso para riego agrícola de 20 mg L^{-1} , mientras que para la protección de la vida acuática de 5 mg L^{-1} , de acuerdo a lo establecido la estación urbana fue la única que sobrepasa el máximo permisible para el desarrollo de la vida acuática.

Para Metcalf y Eddy (1991) una concentración de 4 mg L^{-1} de fósforo es considerada una concentración débil, 8 mg L^{-1} una concentración media y 15 mg L^{-1} concentración fuerte. Por lo tanto las concentraciones de fósforo a lo largo de ambos sistemas presentaron una concentración débil, exceptuando la zona urbana donde se presentó una concentración media.

El fósforo del agua presentó correlación con el fósforo del sedimento y el fósforo del suelo. El intercambio de fósforo entre los sedimentos y el agua inmediatamente superior a ellos es un factor importante en el ciclo del fósforo de las aguas naturales y su importancia se basa en un aparente movimiento del fósforo hacia los sedimentos, la eficacia de la inmovilización de fósforo en los sedimentos y la rapidez de los procesos que regeneran el fósforo del agua están relacionados con una serie de procesos físicos, químicos y metabólicos (Wetzel, 2001).

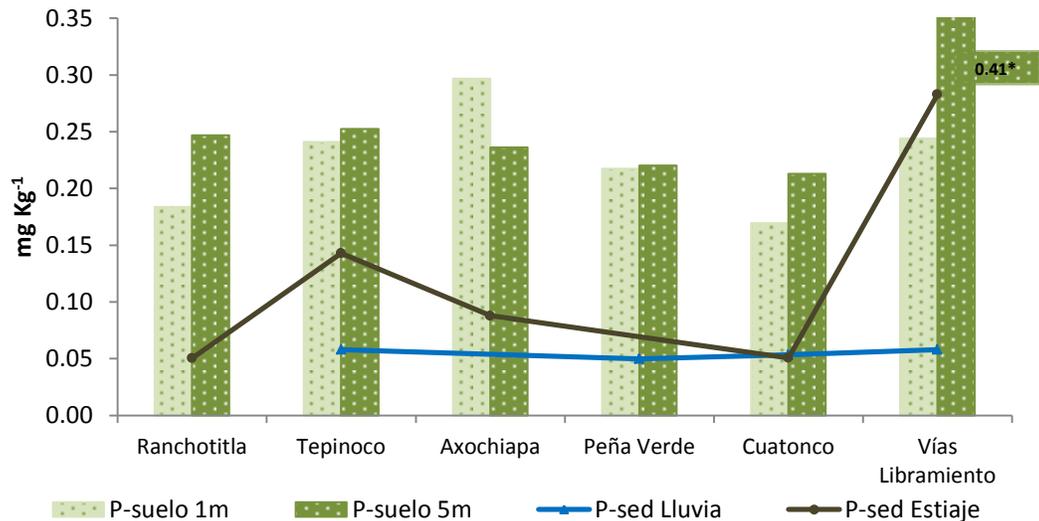
El fósforo del sedimento en el afluente Amalacaxco presentó los valores mínimos de 0.01 mg kg^{-1} en la zona forestal con perturbación, mientras que los valores más altos fueron en las estaciones con uso de suelo agrícola-pecuario con valores de 0.16 mg kg^{-1} (Figura 27).

El afluente de Chopanac muestra valores aproximados de 0.05 mg kg^{-1} en la mayoría de sus estaciones de muestreo durante época de lluvia. Durante el estiaje la concentración más alta (0.14 mg kg^{-1}) se presentó en la zona forestal perturbada (Figura 28), atribuyendo esto al proceso de roza-tumba de la vegetación aledaña al río dejando expuesto el sistema edáfico e incorporándose material orgánico al cauce, aumentando así la concentración de nutrientes en el sedimento.



* Concentraciones fuera del intervalo de la gráfica

Figura 27. Concentraciones de fósforo del sedimento y suelo en el sistema Amalacaxco.



* Concentraciones fuera del intervalo de la gráfica

Figura 28. Concentraciones de fósforo del sedimento y suelo en el sistema Chopanac.

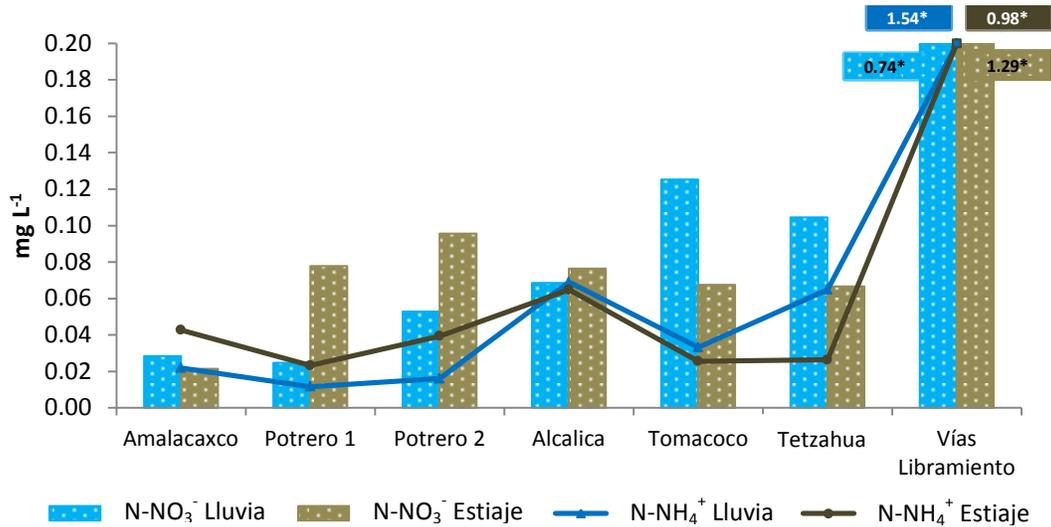


El fósforo del sedimento presentó correlación significativa con el fósforo del suelo, el cual generalmente tuvo menores concentraciones a distancia de 1 m que a 5 m en ambos sistemas lóticos, además tuvo incrementos de su concentración en las zonas que presentaron modificaciones durante el tiempo de estudio o debido a los aportes de fósforo en las zonas de cultivo. En el sistema Amalacaxco las zonas forestales presentaron las concentraciones más bajas de fósforo ($>0.1 \text{ mg kg}^{-1}$), con una tendencia a aumentar conforme disminuye la altitud y se modifica la vocación del suelo de agrícola, pecuario y urbano (Figura 27). En el sistema Chopanac el fósforo fue de aproximadamente 0.2 mg kg^{-1} en la mayoría de los sitios de estudio, mientras que la zona urbana presentó la concentración más alta de 0.4 mg kg^{-1} (Figura 28).

La NOM-021-SEMARNAT-2000 establece que para suelos ácidos las concentraciones de fósforo extractable menores a 15 mg kg^{-1} se clasifican como bajas, tal es el caso del suelo presente en ambos afluentes.

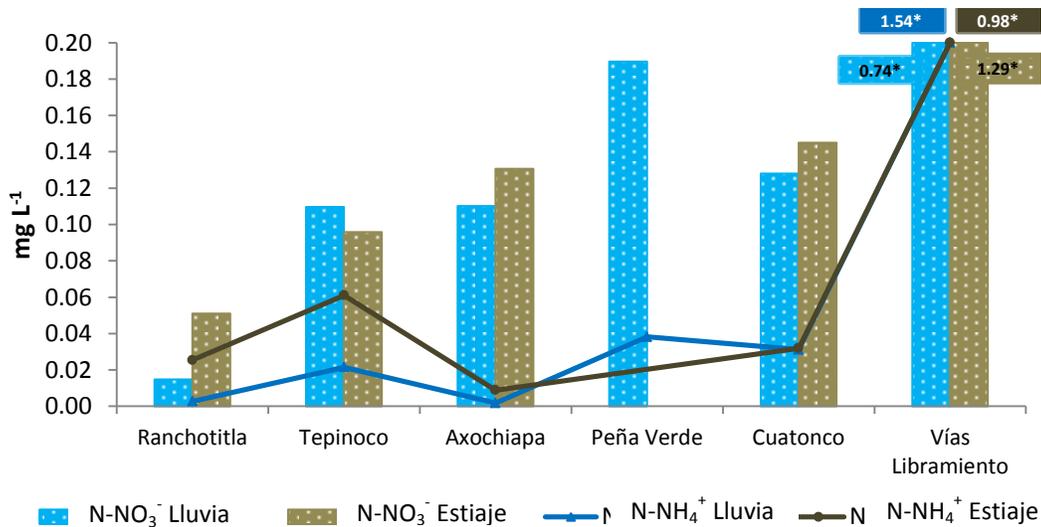
9.3. NITRÓGENO EN LOS SISTEMAS AGUA, SEDIMENTO Y SUELO

En las Figuras 29 y 30 se muestran el comportamiento del nitrato y amonio en el agua durante las épocas de lluvia y estiaje para el sistema Amalacaxco y sistema Chopanac, encontrando una correlación significativa positiva ($p < 0.0001$, $r = 0.817$) entre estos iones.



* Concentraciones fuera del intervalo de la gráfica

Figura 29. Concentraciones de nitrógeno del agua en el sistema Amalacaxco.



* Concentraciones fuera del intervalo de la gráfica

Figura 30. Concentraciones de nitrógeno del agua en el sistema Chopanac.



El nitrato es la forma principal del nitrógeno que se presenta en las aguas naturales, representa la fase más oxidada del ciclo y se encuentra generalmente a nivel de trazas en el agua de superficie, mientras que en las aguas subterráneas no contaminadas pueden alcanzar niveles de nitrato de 2 mg L^{-1} (Colín, 2001). Para el sistema Amalacaxco en las zonas agrícolas y pecuarias se registró aumento en la concentración de nitratos durante la época de lluvia, esto se atribuye que en esta zona se encuentran cultivos de maíz, avena y posiblemente se esté fertilizando, además del criadero porcino y vacuno, aportando así nitratos al sistema. Las concentraciones en zonas forestales fueron menores a 0.05 mg L^{-1} durante la época de lluvias y 0.08 mg L^{-1} en el estiaje. En las zonas agrícolas y pecuarias se encontraron en un intervalo de 0.07 a 0.1 mg L^{-1} aproximadamente, mientras que en la zona con actividad urbana, las concentraciones registradas fueron mayores a 1 mg L^{-1} . En el Sistema Chopanac, la estación Peña Verde se ubica después de la caja donde se capta el agua que utilizan los predios cercanos, en esta unidad de muestreo el agua corre a través del cauce solo en época de lluvias encontrando concentraciones aproximadas de 0.2 mg L^{-1} , debido a que durante los periodos de estiaje los nitratos se acumulan en el suelo, producto de la mineralización, para ser liberados durante los periodos de lluvias (Páez, 2007). Para este sistema las concentraciones más bajas tanto en época de lluvia (0.015 mg L^{-1}) como en estiaje (0.05 mg L^{-1}) se presentaron en el manantial del bosque conservado.

De acuerdo a la NOM-127-SSA1-1994 define 10 mg L^{-1} de nitratos como límite permisible en el agua para uso humano, los resultados obtenidos en ambos sistemas no sobrepasan lo establecido por la norma.

La WHO (2001), define que en aguas superficiales la concentración de nitrato de manera natural es normalmente baja ($0-18 \text{ mg L}^{-1}$), pero puede llegar fácilmente a varios cientos de mg L^{-1} como resultado de la escorrentía agrícola, descargas o contaminación con desechos humanos o animales. En el caso de los sistemas estudiados, ambos se encuentran dentro de lo establecido por la WHO, aunque no se debe dejar de considerar que en comparación con las demás estaciones de muestreo la zona urbana presenta un aumento considerable en cuanto a la concentración de este ion.

Para el caso del amonio las Figuras 29 y 30 muestran que la mayoría de las estaciones tuvieron concentraciones relativamente bajas durante ambas épocas. En las zonas forestales durante el estiaje, las concentraciones de amonio fueron superiores a las encontradas durante la época de lluvias, este comportamiento se modificó en las zonas donde la actividad agrícola y pecuaria está presente con mayores concentraciones durante las lluvias, las variaciones de este nutrimento se deben a que durante esta temporada el sistema recibe aportes con alto contenido de materia orgánica, además de la depuración de los excrementos de ganado y el filtrado de agua a través del suelo (Mason, 1984).

Las concentraciones registradas a lo largo de ambos sistemas fueron menores a 0.05 mg L^{-1} y correspondieron a las zonas forestales. La estación urbana presentó un excesivo aumento de este nutriente con concentraciones de 1 a 1.5 mg L^{-1} durante ambas épocas, lo que se puede atribuir a la influencia que tiene el ganado porcino y los desechos fecales que se depositan cerca del sistema ribereño, con los que puede haber lixiviación o arrastre hacia el sistema hídrico. Este proceso se ve favorecido por la reducción o ausencia de bosque ribereño, el cual ayudaría a retener estos residuos (Schultz *et al.*, 2004; citado en Auquilla, 2005)

A lo largo de ambos sistemas, exceptuando la zona urbana, las concentraciones de amonio se encontraron por debajo de lo establecido por Dieter y Möller (1991), ellos consideran que la concentración de amonio en aguas naturales generalmente se encuentran por debajo de 0.2 mg L^{-1} .

Tanto el amonio como los nitratos tienen una correlación significativa con el nitrógeno del sedimento ($p < 0.0001$, $r = 0.75$), en las Figuras 31 y 32 se muestra el comportamiento del nitrógeno en el suelo y sedimento para ambos afluentes.

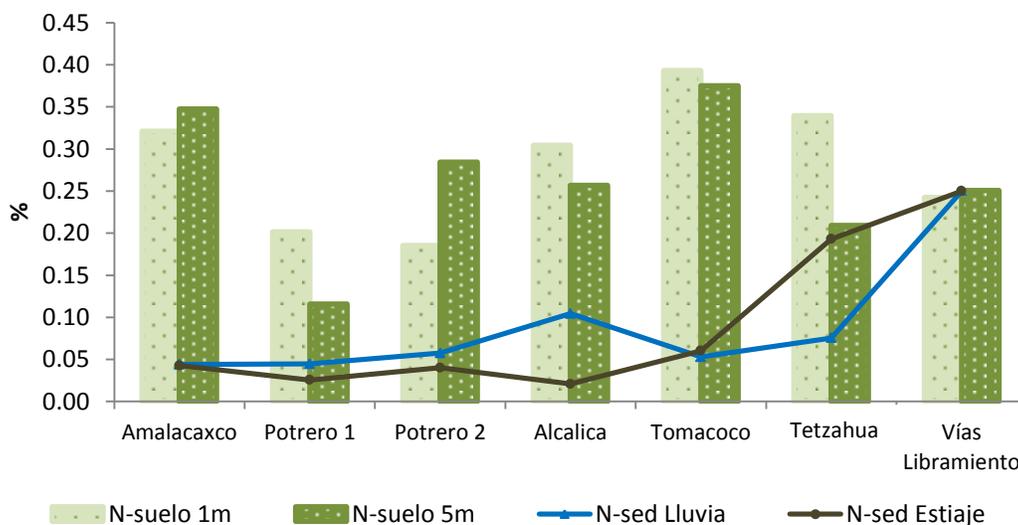


Figura 31. Concentraciones de nitrógeno del sedimento y suelo en el sistema Amalacaxco.

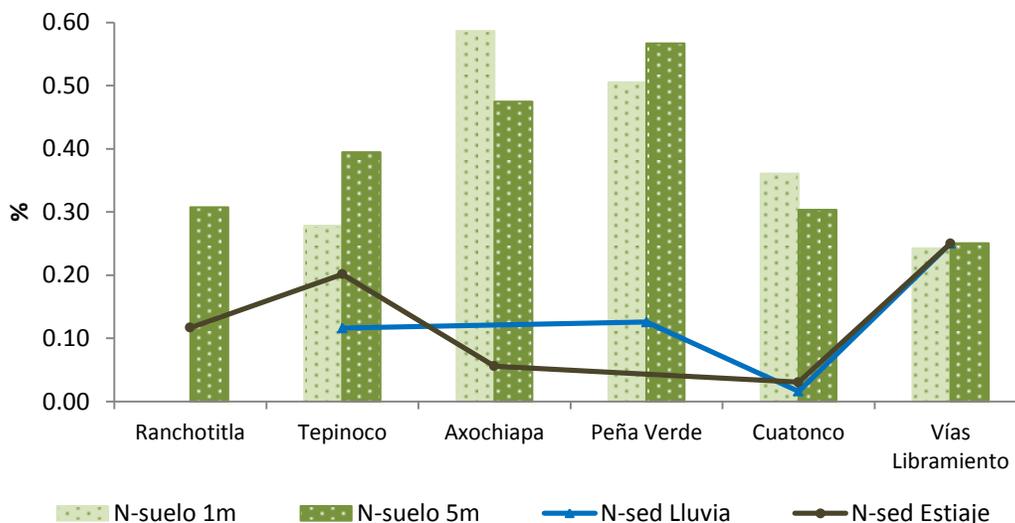


Figura 32. Concentraciones de nitrógeno del sedimento y suelo en el sistema Chopanac.

Los valores mínimos de nitrógeno en el sedimento para el afluente Amalacaxco se presentaron en las estaciones forestales (>0.05 %) con tendencia a aumentar en las zonas agrícolas, pecuarias y urbanas. El sistema Chopanac mostró valores que oscilaron entre los 0.05-0.2 % en la mayoría de las estaciones, con un ligero incremento en la zona agrícola. La zona urbana presentó concentraciones más altas con valores por arriba del 0.3%.

El nitrógeno total de los suelos con uso forestal en los sistemas Amalacaxco y Chopanac fue bajo de acuerdo con la clasificación de suelos volcánicos que nos presenta la NOM-021-SEMARNAT-2000, con valores menores al 0.3%.

García (2003), reportó valores de nitrógeno total ente 0.08 a 0.3 % para suelos forestales de los volcanes Iztaccíhuatl y Popocatepetl, estos resultados concuerdan con los valores de nitrógeno total encontrados en los suelos ribereños estudiados.

Los usos de suelo agrícola, pecuario y urbano, de acuerdo a la NOM-021-SEMARNAT-2000 se consideran valores medios, representados en el intervalo de 0.3 a 0.6 % de nitrógeno total.

9.4. CARBONO EN LOS SISTEMAS AGUA, SEDIMENTO Y SUELO

En las Figuras 33 y 34 se muestra el comportamiento del carbono orgánico particulado (COP) para el sistema Amalacaxco y el sistema Chopanac durante las épocas de lluvia y estiaje. En ambos afluentes el COP generalmente tuvo concentraciones más bajas en época de lluvias que en estiaje. La materia orgánica particulada, puede incorporarse al río a partir de la vegetación de las orillas y es transportada principalmente por escorrentía o por el viento. La entrada de materia orgánica al agua en forma de carbono orgánico normalmente constituye una fuente principal de material y energía, este proceso es muy frecuente en los ríos de montaña rodeados de abundante vegetación (Wetzel, 2001).

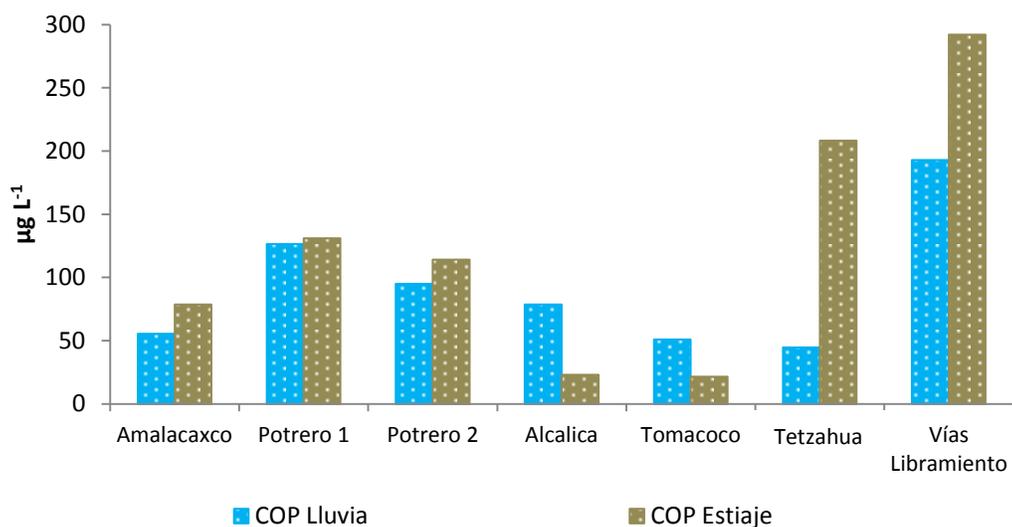


Figura 33. Concentraciones de carbono orgánico particulado para el sistema Amalacaxco.

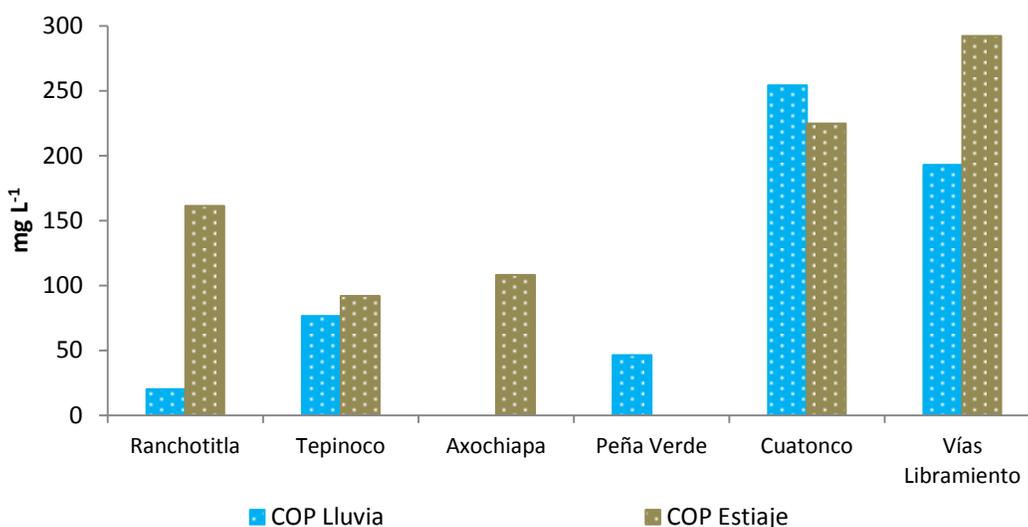


Figura 34. Concentraciones de carbono orgánico particulado para el sistema Chopanac.



A lo largo del sistema Amalacaxco se observó que las concentraciones más bajas de COP fueron en zonas con uso de suelo pecuario y agrícola-pecuario, las cuales tuvieron mayores concentraciones en época de lluvias (78.6 y $50.9 \mu\text{g L}^{-1}$) que en estiaje (23.1 y $21.6 \mu\text{g L}^{-1}$). En la estación de uso agrícola-pecuario se observó un incremento en época de estiaje con un valor de $208.2 \mu\text{g L}^{-1}$, esto se atribuye a que por algunos meses permaneció sin agua el cauce, cuando el sistema recibió aporte de agua el acarreo de carbono particulado fue demasiado alto. La zona forestal con perturbación mostró una concentración de $126.64 \mu\text{g L}^{-1}$ en época de lluvia y en estiaje se registró de $131.10 \mu\text{g L}^{-1}$ ya que es zona donde entubaron el agua, removieron suelo-sedimento y así las concentraciones de carbono particulado en el agua se ven elevadas transportando parte del material hacia el afluente.

De acuerdo con Ayala (2011), 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 aporte energético más importante que la producción autóctona del río.

En el sistema Chopanac se observó la mínima concentración para ambas épocas en la zona forestal-perturbada, con un valor de $76.41 \mu\text{g L}^{-1}$ en época de lluvia y $91.79 \mu\text{g L}^{-1}$ en estiaje, en una de las zonas agrícolas se mostró un incremento importante en las concentraciones de carbono orgánico, siendo de $254.02 \mu\text{g L}^{-1}$ en época de lluvia y $224.71 \mu\text{g L}^{-1}$ en época de estiaje, es muy probable que los residuos orgánicos de los cultivos adyacentes al cauce sean acarreados por la lluvia hasta el sistema hídrico aumentando así las concentraciones del carbono particulado. En la zona donde confluyen ambos sistemas (uso de suelo urbano) se observaron las mayores concentraciones de COP con valores de $192.86 \mu\text{g L}^{-1}$ en época de lluvia y $292.07 \mu\text{g L}^{-1}$ en época de estiaje, se puede atribuir a la acumulación de partículas que se va teniendo a lo largo del recorrido del río.

La materia orgánica es aportada dentro del sistema acuático principalmente por productores primarios como la vegetación circundante. El crecimiento de la población, el cambio de uso del suelo y el incremento en el uso de fertilizantes durante las últimas décadas, han modificado la cantidad y calidad de las entradas de material orgánico a los sistemas hídricos (Escobedo *et al.*, 1999, citado en Escobedo *et al.*, 2007). La exportación de COP ayuda a amortiguar el impacto de la gran cantidad de aguas residuales principalmente de origen agrícola vertidas sin tratamiento al sistema hídrico, además del importante aporte que tiene el nitrógeno y fósforo hacia estos sistemas (Calvario *et al.*, 2006, citado en Escobedo *et al.*, 2007).

En las Figuras 35 y 36 se muestra el comportamiento de la materia orgánica en sedimento y suelo para el afluente Amalacaxco y el afluente Chopanac.

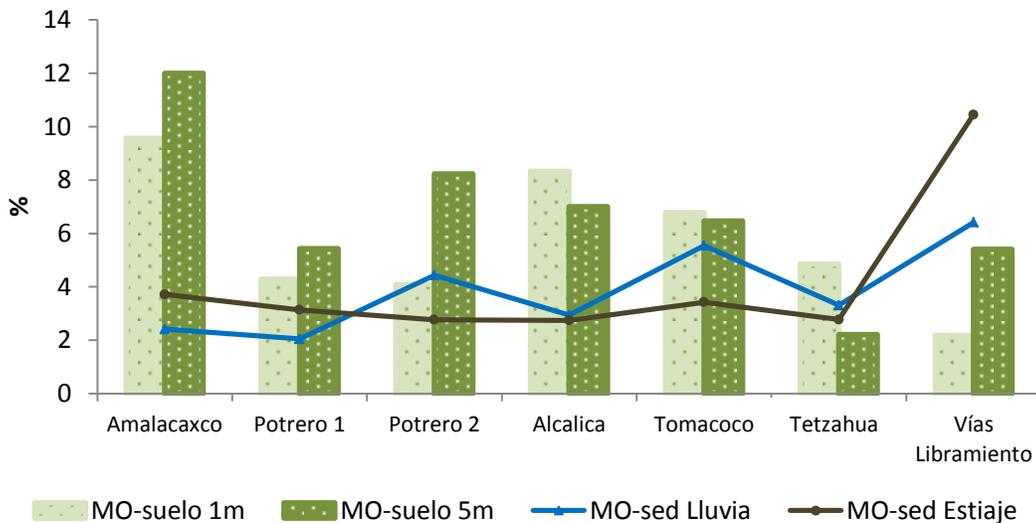


Figura 35. Porcentajes de materia orgánica en sedimento y suelo del sistema Amalacaxco.

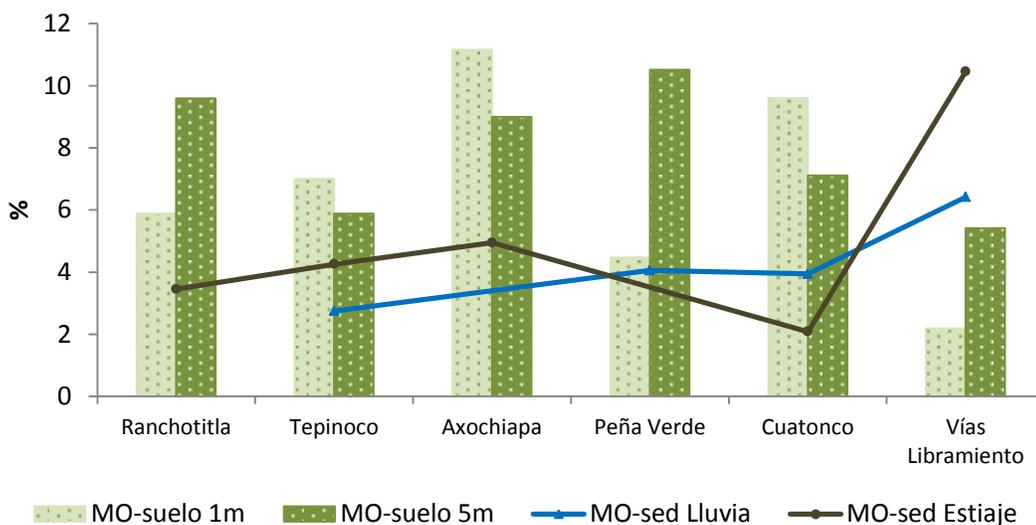


Figura 36. Porcentajes de materia orgánica en sedimento y suelo del sistema Chopanac.

El sedimento en el sistema Amalacaxco presentó en las zonas con uso de suelo agrícola-pecuario porcentajes de materia orgánica de lluvia 3.5 a 5.5 %, siendo ligeramente mayor que las zonas forestales, las cuales se mantuvieron en un intervalo de 2 a 4 % aproximadamente.



La materia orgánica del suelo para este sistema mostró los máximos porcentajes en zonas con uso de suelo forestal, siendo de 9.6 % a 1 m de distancia del cauce y de 12 % a los 5 m de distancia, esto resultó similar con el trabajo realizado por Martínez (2012), donde reporta que la mayor cantidad de materia orgánica en suelo, se encontró en las zonas forestales donde sus valores oscilan de 3.8 a 16.5 %.

García (2003) observó en suelos forestales la tendencia de que a altitudes más elevadas, mayor es el contenido de materia orgánica en suelo, mismo comportamiento que muestran los resultados obtenidos a lo largo de este estudio. Para Ceccon (2003) y Granados (2006), en los sitios con bosques ribereños los niveles de materia orgánica en el suelo son altos. Los bosques son los responsables principalmente de la mayor parte de los flujos de carbono entre la corteza y la atmósfera a través de la fotosíntesis y la respiración, aproximadamente el 90 % de la biomasa acumulada se encuentra en los bosques en forma de fustes, ramas, hojas, raíces y materia orgánica (Leith y Whithacker, 1975; citados en Rodríguez *et al.*, 2006).

La zona pecuaria mostró un porcentaje de 8.3 % a distancia de 1 m y 7 % a distancia de 5 m, los mínimos valores se presentaron en la zona agrícola-pecuaria y urbana teniendo concentraciones de 2 a 5 % aproximadamente. En la agricultura moderna se utilizan fertilizantes químicos para suministrar nutrientes a los cultivos, en cambio casi nunca se aplica estiércol, lo que resulta que el contenido de materia orgánica en los suelos se encuentre por debajo de los niveles de requerimiento lo que provoca degradación del suelo que se va dando en cadena, es decir que el agotamiento de la materia orgánica contribuye a debilitar la estructura del suelo, que a su vez favorece la compactación de la capa arable y como consecuencia se tiene erosión laminar (Zinck, 2005).

Los porcentajes del sedimento en el sistema Chopanac se mantuvieron en un intervalo de 2.5 a 4.5 % para la mayoría de las estaciones en ambas épocas. En la zona urbana que es sitio de confluencia se presenta un incremento importante de 6.4 % en época de lluvia mientras que en época de estiaje fue de 10.4 %.

En lo que respecta a la materia orgánica del suelo para este afluente se observaron las máximas concentraciones de materia orgánica en zonas con uso de suelo pecuario y agrícola, teniendo para la zona pecuaria un valor de 11.1 % a distancia de 1 m y 8.9 % a distancia de 5 m, mientras que para la zona agrícola se registró un valor de 4.5 % a distancia de 1 m y 10.5 % a distancia de 5 m. En los países tropicales el cambio en uso de suelo que va de bosques conservados a pasturas o cultivos disminuye los contenidos de carbono en el suelo, debido a aumentos de temperatura que aceleran los procesos oxidativos de compuestos orgánicos (Fearnside y Barbosa 1998; citados en Arcos, 2005).



De acuerdo a la clasificación para suelos volcánicos que especifica la NOM-021-SEMARNAT-2000, la materia orgánica en el sistema Amalacaxco para zonas forestales se mantuvo de media a muy alta, en la zona pecuaria fue media y en las zonas con uso de suelo agrícola-pecuario fue de baja a muy baja. En cuanto al sistema Chopanac en zonas pecuarias se registró de media a alta, mientras que la zona agrícola fue de baja a media. La cantidad de materia orgánica en el sitio con uso de suelo urbano fue de baja a muy baja.

9.5. ANÁLISIS DE CORRELACIÓN MÚLTIPLE

Con el programa estadístico Statgraphics Centurion XV se realizó un análisis de correlación múltiple utilizando todas las variables determinadas en el agua, sedimento y suelo. Se seleccionaron las variables correlacionadas significativamente ($r > 0.5$) que contaron con un P-value menor a 0.05.

Tomando en cuenta lo anterior, en el sistema acuático se observó que de los nutrimentos estudiados, el carbono (COP) solo se correlacionó con la CE del sedimento, mientras que la CE del agua se correlacionó con nitratos, amonio, ortofosfatos y fósforo total, los cuales se correlacionaron entre ellos y también con la alcalinidad total, durezas, oxígeno disuelto, demanda química de oxígeno, sólidos totales disueltos y suspendidos que son fundamentales en la dinámica del sistema.

Los parámetros de sedimento que se correlacionan entre sí fueron: nitrógeno total, fósforo disponible y pH, mientras propiedades del sedimento que se correlacionaron con las del agua fueron: materia orgánica, nitrógeno total, pH, CE; con nitratos, amonio, ortofosfatos, fósforo total, durezas, sólidos totales suspendidos y disueltos; además el nitrógeno se correlacionó con el promedio del gasto y el área del cauce, mientras que el fósforo disponible con oxígeno disuelto y fosfatos.

En el suelo la materia orgánica y el nitrógeno total se correlacionaron entre sí, mientras que el fósforo disponible tuvo correlación con las siguientes variables del sistema acuático: conductividad eléctrica, alcalinidad, dureza de calcio y sólidos totales disueltos.

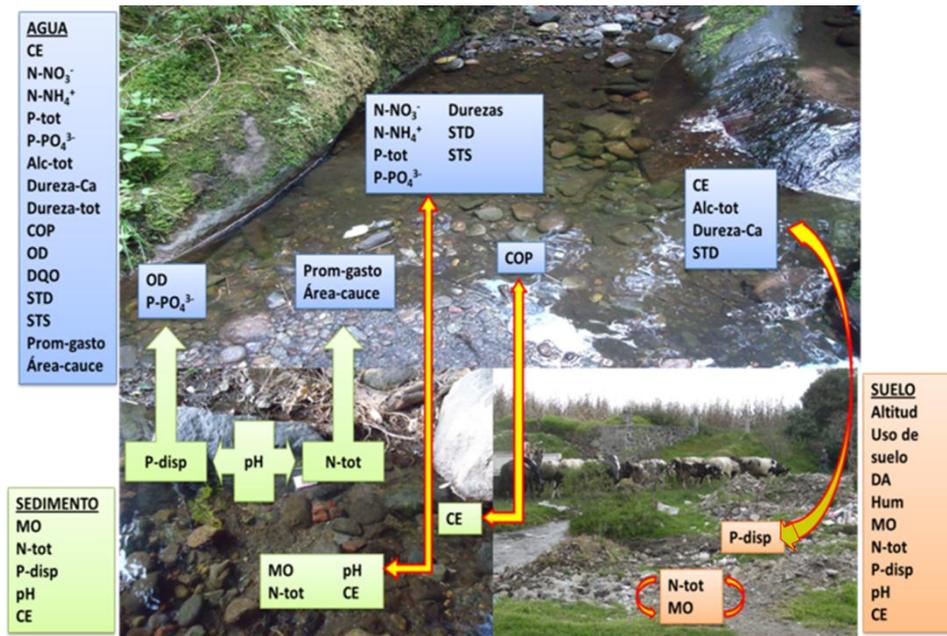


Figura 37. En los recuadros exteriores se muestran todas las variables registradas en agua-sedimento-suelo, mientras que el modelo muestra la dinámica de las variables que se correlacionaron de acuerdo al análisis de correlaciones múltiples.



9.6. ANÁLISIS DE COMPONENTES PRINCIPALES

El Análisis de Componentes Principales (ACP) es una técnica estadística que permite la síntesis de información o reducción de la dimensión (número de variables). El objetivo es que ante un banco de datos con muchas variables se debe reducir a una menor cantidad (Terrádez, 2013). Las componentes principales son variables correlacionadas, tales que unas pocas puedan explicar la mayor parte de la variabilidad, además que deberán ser independientes entre sí (Cuadras, 2012).

Sabiendo esto, de los resultados obtenidos en el análisis de correlaciones múltiples se seleccionaron las variables con coeficientes de correlación mayores a 0.5 para realizar el ACP, las cuales fueron: altitud, uso de suelo, temperatura del agua, pH del agua, conductividad eléctrica del agua, sólidos totales disueltos (STD), sólidos totales sedimentables (STS), oxígeno disuelto (OD), demanda bioquímica de oxígeno (DBO), demanda química de oxígeno (DQO), alcalinidad, durezas, nitratos, amonio, fósforo total, ortofosfatos, carbono orgánico particulado (COP), área del caudal, promedio del gasto y velocidad de corriente; para suelo y sedimento fue la materia orgánica, fósforo extractable, nitrógeno total, pH, conductividad eléctrica, así como la densidad aparente del suelo.

Se obtuvieron 15 componentes, de los cuales los primeros cuatro explican la variabilidad del sistema en un 78.94% como se indica en el Cuadro 7.

Cuadro 7. Componentes principales.

| Número de componente | Eigenvalor | Porcentaje de varianza | Porcentaje acumulado |
|----------------------|----------------|------------------------|----------------------|
| 1 | 14.6061 | 45.644 | 45.644 |
| 2 | 4.10371 | 12.824 | 58.468 |
| 3 | 3.66523 | 11.454 | 69.922 |
| 4 | 2.88599 | 9.019 | 78.941 |
| 5 | 1.78523 | 5.579 | 84.520 |
| 6 | 1.21422 | 3.794 | 88.314 |
| 7 | 1.0764 | 3.364 | 91.678 |
| 8 | 0.903651 | 2.824 | 94.502 |
| 9 | 0.542868 | 1.696 | 96.198 |
| 10 | 0.479067 | 1.497 | 97.695 |
| 11 | 0.39832 | 1.245 | 98.940 |
| 12 | 0.178835 | 0.559 | 99.499 |
| 13 | 0.11694 | 0.365 | 99.864 |
| 14 | 0.0365599 | 0.114 | 99.979 |
| 15 | 0.0068375 | 0.021 | 100.00 |

En el Cuadro 8 se resaltan las variables que presentan mayor peso en sentido positivo o negativo. De los tres elementos considerados para este estudio (carbono, nitrógeno y fósforo) se puede observar que el nitrógeno y fósforo del agua se relacionaron principalmente con las durezas y sales disueltas ya que estas se encuentran en forma de cationes y aniones, el carbono del agua parece no estar asociado con ningún otro parámetro



evaluado. En el sedimento el nitrógeno se relaciona con la caracterización hidrológica del sistema, mientras que el carbono y fósforo se asocian al nitrógeno y carbono del suelo. El uso de suelo aparentemente se asocia al carbono, nitrógeno y fósforo del suelo, y al fósforo del sedimento.

Cuadro 8. Variables con mayor peso en cada componente.

| | COMPONENTES | | | |
|---------------------------------|-------------|------------|-------------|------------|
| | 1 | 2 | 3 | 4 |
| Alt | 0.13924 | 0.299048 | -0.187466 | 0.0954871 |
| Uso Suelo | -0.160599 | -0.251252 | -0.0118853 | -0.0560376 |
| T-agua | -0.215644 | -0.149385 | 0.102142 | 0.216369 |
| pH | -0.0303909 | -0.0152524 | -0.324429 | -0.377491 |
| CE | -0.257166 | 0.00958808 | -0.0502167 | 0.017154 |
| OD | 0.174072 | 0.145472 | -0.0143425 | -0.231432 |
| Alc-tot | -0.248381 | 0.0205974 | -0.125613 | 0.0384238 |
| D-Ca | -0.234917 | 0.025496 | -0.156129 | -0.120827 |
| D-tot | -0.201225 | 0.0817051 | -0.0108281 | -0.111726 |
| N-NO ₃ ⁻ | -0.256632 | 0.0592481 | -0.0191472 | 0.0394179 |
| N-NH ₄ ⁺ | -0.250812 | 0.0911742 | -0.0220163 | 0.0626608 |
| P-tot | -0.250603 | 0.100213 | -0.0292603 | 0.0685172 |
| P-PO ₄ ³⁻ | -0.239475 | 0.0683941 | 0.108824 | -0.0893163 |
| DBO | 0.13457 | 0.306731 | -0.161761 | -0.189499 |
| COP | -0.169456 | 0.0944266 | -0.18301 | 0.124983 |
| STD | -0.252506 | 0.0347567 | -0.0922332 | 0.04701 |
| STS | -0.246918 | 0.0846365 | -0.0530866 | -0.0642652 |
| Prom-Gas | -0.125989 | 0.110816 | 0.380005 | -0.192682 |
| Vel-Corr | -0.0693582 | 0.231138 | 0.27588 | -0.19677 |
| Área | -0.110431 | 0.0267447 | 0.394425 | -0.224957 |
| MO-sed | -0.115948 | 0.117947 | -0.065941 | -0.331463 |
| N-sed | -0.125387 | 0.17707 | 0.302718 | -0.149276 |
| P-sed | -0.0692442 | -0.283416 | -0.261886 | -0.0650371 |
| pH-sed | 0.223322 | -0.0832598 | 0.0878749 | -0.153475 |
| CE-sed | -0.255024 | 0.069575 | -0.0114561 | 0.0365065 |
| DA | 0.0090503 | 0.311762 | -0.25833 | -0.099417 |
| MO-sue | 0.0706724 | -0.370137 | 0.0745403 | -0.205491 |
| N-sue | -0.0663786 | -0.350838 | 0.0100776 | -0.268749 |
| P-sue | -0.170642 | -0.238378 | -0.00847165 | -0.0421049 |
| CE-sue | -0.0658744 | -0.0644198 | 0.151736 | 0.382031 |

El primer componente está definido por variables de agua, la mayoría de las variables presentaron correlaciones negativas, asociando principalmente los nitratos, amonio, fosfatos y fósforo total con las sales disueltas y las propiedades amortiguadoras del sistema, contraponiéndose con el oxígeno disuelto. Resultados similares a este fueron los registrados por Soledad (2013), en donde especifica una correlación entre el fósforo, el nitrógeno, la conductividad eléctrica y la dureza del sistema acuático.



9.7. ANÁLISIS DE CORRELACIONES CANÓNICAS

Después de haber establecido las variables de mayor importancia con base en el análisis de correlación múltiple y elegir las más relevantes mediante el análisis de componentes principales, se prosigió al análisis de correlaciones canónicas.

El análisis canónico es una técnica estadística que permite analizar las relaciones lineales entre dos conjuntos de variables cuantitativas observadas sobre un mismo conjunto de individuos. Para ello, se busca una combinación lineal de las variables del primer grupo y una combinación lineal de las variables del segundo, de manera que se seleccionen las que presentan la mayor correlación posible (Ruano y Trejos, 2012).

La técnica del análisis de la correlación canónica se entiende mejor considerándola como una extensión de la regresión múltiple y de la correlación. El análisis de regresión múltiple consiste en encontrar la mejor combinación lineal de p variables independientes, X_1, X_2, \dots, X_p , para predecir la variable dependiente Y . La correlación múltiple es la correlación simple entre Y y sus valores estimados por la ecuación de regresión \hat{Y} . Por tanto el objetivo en los análisis de regresión y correlación múltiple está en examinar la relación entre varias variables X y una variable Y . El análisis de correlación canónica se aplica a situaciones donde es apropiada la técnica de la regresión pero para más de una variable dependiente. Aunque otra aplicación del análisis de correlación canónica es como un método para determinar la asociación entre dos grupos de variables, es una generalización de la regresión múltiple al caso de más de una variable dependiente (Cuadras, 2012). Este análisis intenta resumir las relaciones entre los dos conjuntos de variables, mediante la creación de nuevas variables a partir de cada uno de los dos grupos de variables originales (Jhonson, 2000).

Se llevaron a cabo dos análisis de correlaciones canónicas, para el primero se eligieron las siguientes variables de agua dentro del conjunto 1: altitud, uso de suelo, pH, conductividad eléctrica, oxígeno disuelto, alcalinidad total, dureza de calcio, dureza total, nitratos, amonio, fósforo total, fosfatos, carbono orgánico particulado, sólidos totales disueltos, demanda química de oxígeno, demanda bioquímica de oxígeno. En el conjunto 2 se incluyeron las siguientes variables de sedimento y suelo: materia orgánica, nitrógeno, fósforo, pH y conductividad eléctrica.

El Cuadro 9 muestra los valores más importantes, donde se obtuvieron tres correlaciones canónicas que cuentan con valores-P menores a 0.05, estos conjuntos tienen una correlación estadísticamente significativa con un nivel de confianza del 95.0%.



Cuadro 9. Correlaciones canónicas entre las variables de agua con sedimento y suelo.

| Número | Correlación Canónica | Valor-P |
|--------|----------------------|---------|
| 1 | 0.999807 | 0.0000 |
| 2 | 0.998543 | 0.0000 |
| 3 | 0.985395 | 0.0043 |

La Figura 40 muestra las variables canónicas de la correlación con magnitud de 0.999807 y con las correlaciones posteriores, la dispersión de puntos se va haciendo más amplia.

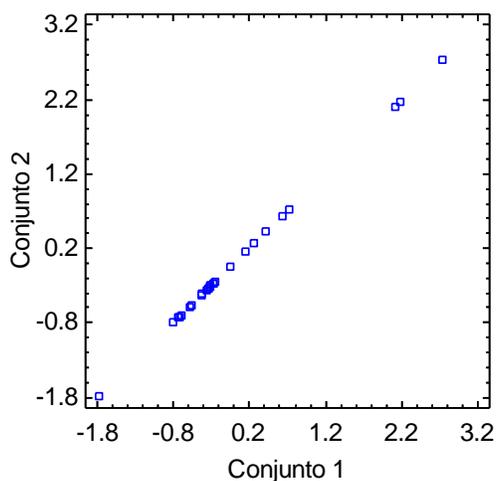


Figura 40. Gráfica de dispersión donde se muestran las variables canónicas.

Los Cuadros 10 y 11 muestran los coeficientes de variables canónicas para ambos conjuntos (agua, sedimento y suelo) donde se observan los valores con sus cargas, que indican la dirección positiva (+) o negativa (-).

Cuadro 10. Coeficientes de variables canónicas del primer conjunto (agua).

| | Coeficiente 1 | Coeficiente 2 | Coeficiente 3 |
|--------------------------------|---------------|---------------|---------------|
| Alt | -0.386899 | -0.632961 | -0.181138 |
| Uso Suelo | -0.306671 | -0.00529883 | -0.426457 |
| pH | 0.506208 | 0.646267 | 0.0054178 |
| CE | -0.0894039 | -1.91428 | 3.19659 |
| OD | 0.444 | 0.645952 | 0.114761 |
| Alc-tot | -0.13125 | 0.438898 | -0.659508 |
| D-Ca | -0.703378 | -1.20022 | 1.05011 |
| D-tot | -0.880753 | -1.41786 | 2.42243 |
| N-NO ₃ ⁻ | 0.94245 | 0.338422 | -0.98775 |
| N-NH ₄ ⁺ | -0.230048 | -0.64431 | 0.58054 |
| P-tot | -0.315173 | 0.145121 | -4.08833 |



| | | | |
|---------------------------------|-----------|-----------|-----------|
| P-PO ₄ ³⁻ | 0.268603 | 1.12692 | -4.01063 |
| DBO ₅ | 0.164197 | 0.684144 | -0.300077 |
| DQO | -0.162801 | -0.21294 | 0.328188 |
| COP | 0.140785 | 0.0971575 | -0.53922 |
| STD | 2.17844 | 3.129 | 2.10645 |

Cuadro 11. Coeficientes de variables canónicas del segundo conjunto (sedimento y suelo).

| | Coeficiente 1 | Coeficiente 2 | Coeficiente 3 |
|----------|---------------|---------------|---------------|
| MO-sed | 0.134366 | 0.267231 | 0.0750823 |
| N-sed | 0.145907 | 0.45097 | -0.211705 |
| P-sed | 0.11504 | 0.175522 | 0.154394 |
| pH-sed | 0.0531098 | -0.0602683 | 0.592128 |
| CE-sed | 0.473636 | -1.45249 | 0.671599 |
| MO-suelo | -0.146866 | -0.363555 | 0.350832 |
| N-suelo | -0.285184 | -0.462721 | 0.238074 |
| P-suelo | 0.615359 | 0.937266 | -0.141588 |
| pH-suelo | -0.0947604 | -0.115431 | 0.448614 |
| CE-suelo | -0.458893 | -0.840159 | 0.116141 |

En el coeficiente uno las variables que se correlacionaron significativamente de forma negativa fueron las durezas y conductividad en suelo. Los nitratos, sólidos totales disueltos, conductividad en sedimento y fósforo en suelo presentaron una correlación positiva.

Para el coeficiente dos las variables correlacionadas con dirección negativa fueron las durezas y las conductividades del agua, sedimento y suelo. Los fosfatos, sólidos totales disueltos y fósforo en suelo presentaron dirección positiva.

El coeficiente tres presenta dirección positiva en la mayoría de las variables como son la conductividad, durezas, sólidos totales disueltos, pH y conductividad en sedimento, pH en suelo y únicamente las variables que mostraron dirección negativa fueron el fósforo total y los fosfatos.

Para este análisis las variables que más se correlacionaron fueron las durezas, sólidos totales disueltos y conductividad del agua con las conductividades del suelo y sedimento. Segnini y Chacón (2005), mencionan en los resultados de su trabajo que la mayor variabilidad ambiental entre los cuerpos de agua se presentó para las condiciones químicas relacionadas con la mineralización del agua como son la dureza, conductividad y alcalinidad y tuvieron diferencias importantes en el contenido de sólidos disueltos entre los cuerpos de agua estudiados, además que las variables del agua como la dureza y conductividad están altamente relacionadas entre sí.



Para el caso del fósforo se encontró una correlación entre los fosfatos presentes en el agua y el fósforo del suelo, de acuerdo a Sande *et al.* (2006), el fósforo del suelo y el fósforo en las aguas superficiales y subsuperficiales tienden a aumentar o disminuir de forma exponencial por lo que existe una relación de este elemento entre agua y suelo, tal es el caso de este trabajo.

En el segundo análisis de correlaciones canónicas se tomaron en cuenta las siguientes variables de sedimento para el conjunto 1: altitud, uso de suelo, materia orgánica, nitrógeno, fósforo, pH y conductividad eléctrica. En el conjunto 2 las variables de suelo fueron: densidad aparente, humedad, materia orgánica, nitrógeno, fósforo, pH y conductividad eléctrica.

Se obtuvieron dos correlaciones canónicas con valores-P menores que 0.05 (Cuadro 12), estos conjuntos tienen una correlación estadísticamente significativa con un nivel de confianza del 95.0%.

Cuadro 12. Correlaciones canónicas entre las variables de sedimento y suelo.

| Número | Correlación Canónica | Valor-P |
|--------|----------------------|---------|
| 1 | 0.939608 | 0.0000 |
| 2 | 0.902348 | 0.0000 |

La Figura 41 muestra las variables canónicas de la correlación con magnitud de 0.902348 donde se distingue que los puntos se dispersan más en cuanto a una linealidad sin embargo se percibe un comportamiento lineal, si se realizaran correlaciones posteriores a estas dos la dispersión de puntos se va haciendo mayor.

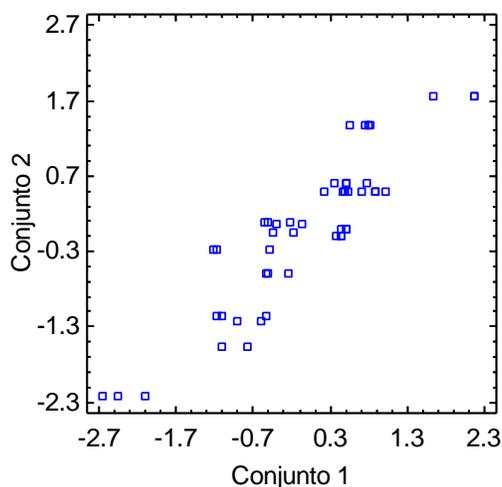


Figura 41. Gráfica de dispersión donde se muestran las variables canónicas.

Los Cuadros 13 y 14 muestran los coeficientes de variables canónicas para ambos conjuntos. Las variables que marcaron correlación significativa dentro del coeficiente uno,



fueron nitrógeno en suelo con una dirección positiva, mientras que el uso de suelo, materia orgánica y pH en suelo tuvieron dirección negativa.

El coeficiente dos tiende hacia una dirección positiva, en él se encuentra la altitud, uso de suelo, materia orgánica y pH en suelo, la única variable que está en una dirección negativa es el nitrógeno en suelo.

Cuadro 13. Coeficientes de variables canónicas del primer conjunto (sedimento).

| | Coeficiente 1 | Coeficiente 2 |
|-----------|---------------|---------------|
| Alt | -0.39155 | 1.58454 |
| Uso Suelo | -1.36082 | 1.44822 |
| MO-sed | -0.0532033 | -0.0517362 |
| N-sed | 0.105469 | -0.000100224 |
| P-sed | -0.0791285 | -0.112511 |
| pH-sed | -0.00566957 | -0.277421 |
| CE-sed | 0.186534 | -0.72212 |

Cuadro 14. Coeficientes de variables canónicas del segundo conjunto (suelo).

| | Coeficiente 1 | Coeficiente 2 |
|----------|---------------|---------------|
| DA | -0.0282781 | 0.245633 |
| Hum | 0.184687 | 0.206477 |
| MO-suelo | -0.519384 | 0.931978 |
| N-suelo | 0.599119 | -0.958019 |
| P-suelo | -0.2786 | -0.462976 |
| pH-suelo | -1.0978 | 0.768641 |
| CE-suelo | -0.243645 | 0.271416 |

El uso del suelo afecta los sistemas globales como la atmósfera, clima, vegetación dichos cambios ocurren en un modo localizado que en su conjunto llegan a sumar un total significativo y se reflejan en buena medida a algunos sistemas principalmente (INEGI, 2009). En este sentido se habla de una relación que se tiene entre el uso de suelo, la altitud y los nutrimentos como el carbono y el nitrógeno además de un parámetro importante como el pH en el suelo.

9.8. ANÁLISIS DE COMPARACIONES MÚLTIPLES

Para determinar si existen diferencias significativas en las concentraciones de carbono orgánico particulado, nitratos, amonio, ortofosfatos y fósforo total del agua con respecto a los distintos usos de suelo se realizó una prueba de Tukey HSD con un nivel de confianza de 95%.

De acuerdo a este análisis se obtuvo que en ambos afluentes el fósforo en forma de ortofosfatos y total tuvieron diferencias significativas entre los sitios forestales y los sitios agrícolas y pecuarios (Figura 42 y 43). El sitio de muestreo con uso urbano “Vías Libramiento” presentó un comportamiento completamente modificado, evitando apreciar el comportamiento de los demás sitios, por lo que a lo largo de este análisis no se trabajó.

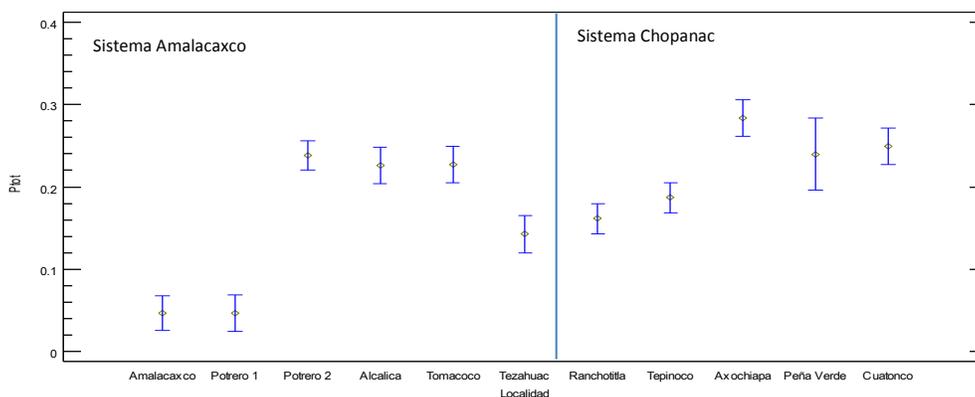


Figura 42. Comportamiento del fósforo total en el agua para ambos sistemas.

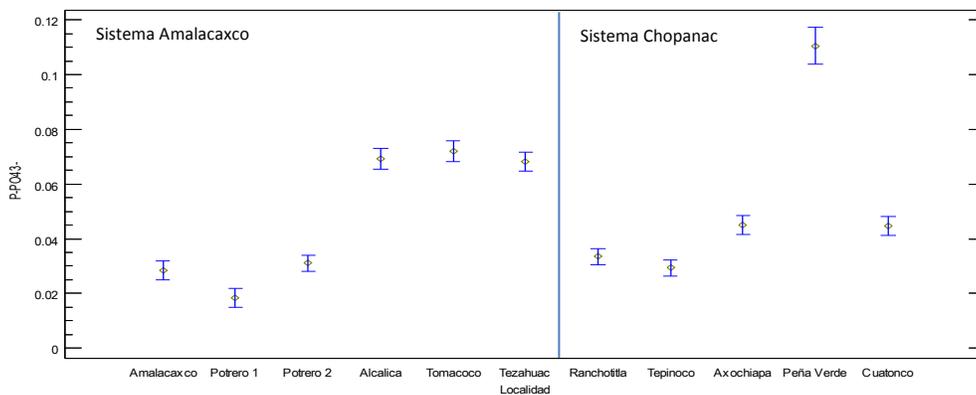


Figura 43. Comportamiento de los ortofosfatos en el agua para ambos sistemas.

Los nitratos en el agua son afectados por el cambio en el uso del suelo, ya que en el sistema Amalacaxco presentaron diferencias significativas la zona forestal conservada con los demás usos de suelo, al igual que el sitio “Tomacoco” el cual presentó actividad agrícola y pecuaria. En el sistema Chopanac prácticamente todos los sitios mostraron diferencias significativas (Figura 44).

Tanto amonio como carbono orgánico particulado no presentaron diferencias significativas en los distintos usos de suelo.

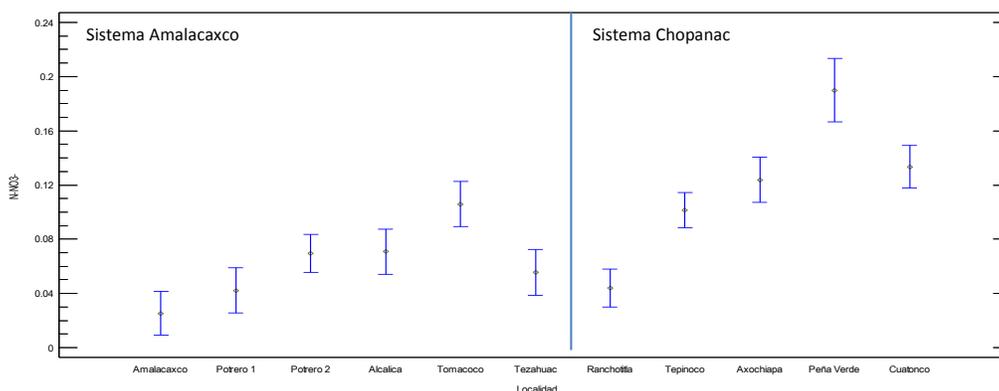


Figura 44. Comportamiento de los nitratos en el agua para ambos sistemas.

9.9. ANÁLISIS PRUEBA DE HIPÓTESIS

Se realizó una prueba de hipótesis para comparar en ambos afluentes, el comportamiento de C, N y P en agua-sedimento-suelo, en función del uso de suelo. Se le asignó un número identificador a Amalacaxco, Chopanac y V. Libramiento (zona urbana), quedando tres sitios a comparar para cada una de las variables de estudio.

Como resultado del análisis para verificar homocedasticidad y normalidad a través del sesgo y la curtosis, se trabajaron pruebas no paramétricas (Kruskal-Wallis) para todos los nutrimentos del agua, sedimento y suelo; exceptuando el nitrógeno en sedimento, el cual se trabajó paramétricamente (ANOVA).

- **Nitratos y Amonio**

Se observó que hay una semejanza en los NO_3^- para el afluente Amalacaxco y Chopanac pero no tienen semejanza con el sitio urbano ya que la concentración de NO_3^- en esta zona es demasiado alta a comparación de los demás sitios de muestreo (Figura 45).

En el afluente Amalacaxco, las concentraciones de nitratos fueron menores que en el sistema Chopanac, tuvieron una mediana de 0.0545 y 0.123 mg L^{-1} respectivamente, además el sistema Chopanac representó mayor dispersión en sus resultados y se mostró una ligera diferencia de variabilidad.

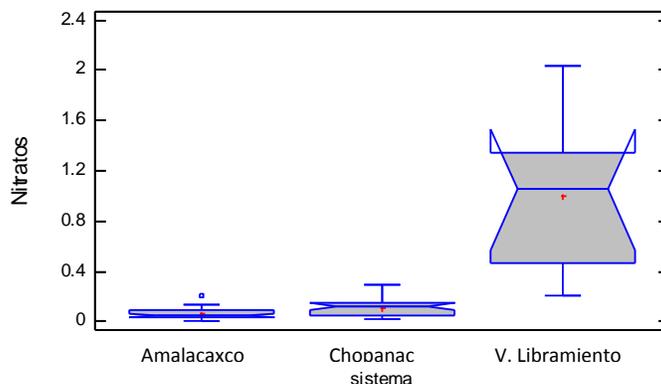


Figura 45. Gráfico de caja y bigotes para nitratos en los tres sistemas.

Para el amonio se observa en la gráfica de caja y bigotes (Figura 46) que la distribución de Amalacaxco y Chopanac son similares sin embargo para Vías Libramiento hubo una discrepancia en los valores con una mediana de 1.24 mg L^{-1} .

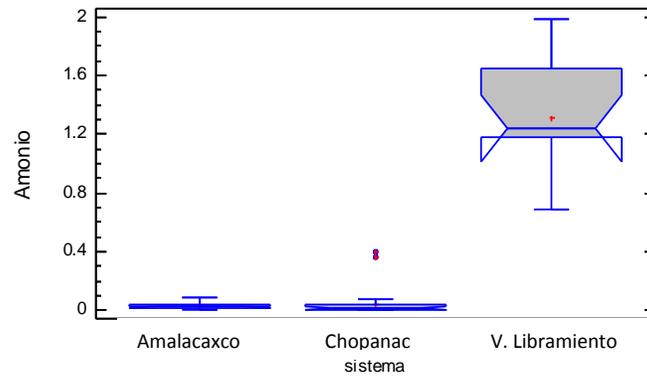


Figura 46. Gráfico de caja y bigotes para amonio en los 3 sistemas.

Se pudo apreciar que las concentraciones para ambos afluentes fueron semejantes, la mediana en Amalacaxco fue de 0.024 mg L^{-1} y en Chopanac de 0.018 mg L^{-1} , en dispersión Chopanac es ligeramente mayor que Amalacaxco y los valores se encontraron más distribuidos hacia el tercer cuartil, en ambos afluentes existieron valores atípicos que alargan las líneas de máximos.

• Carbono Orgánico Particulado

El sistema Chopanac tuvo una mediana de $97.29 \text{ } \mu\text{g L}^{-1}$ se identificaron dos valores atípicos que sesgan el promedio y se colocan fuera de las cajas de cuartiles además que alargan la línea de máximos por lo que se hace más dispersa la distribución a comparación del sistema Amalacaxco donde presentó una mediana de $67.87 \text{ } \mu\text{g L}^{-1}$. La estación de muestreo Vías Libramiento mostró un comportamiento muy diferente con una mediana de $283.8 \text{ } \mu\text{g L}^{-1}$ (Figura 47).

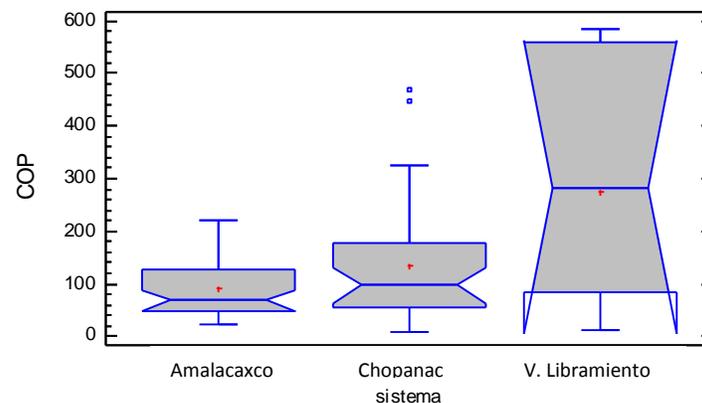


Figura 47. Gráfico de caja y bigotes para carbono orgánico particulado en los tres sistemas.

- **Fósforo total y Ortofosfatos**

El fósforo total del afluyente Chopanac presentó una mediana de 0.15 mg L^{-1} y una dispersión en sus datos mayor que Amalacaxco el cual mostró una mediana de 0.103 mg L^{-1} (Figura 48), contrario con lo obtenido en ortofosfatos (Figura 49). La estación de muestreo Vías Libramiento mostró un comportamiento muy diferente, su mediana del fósforo total fue de 9.2 mg L^{-1} .

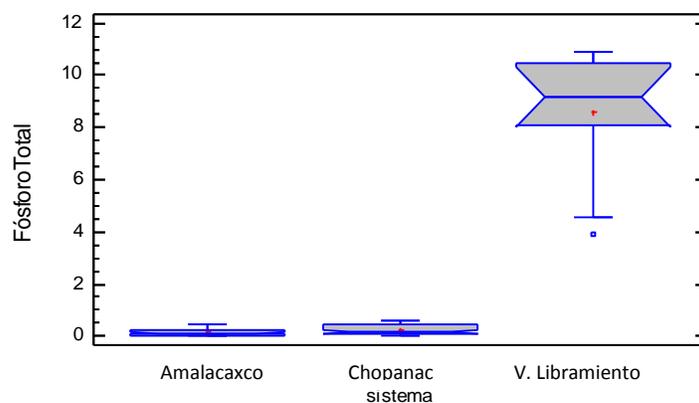


Figura 48. Gráfico de caja y bigotes para fósforo total en los tres sistemas.

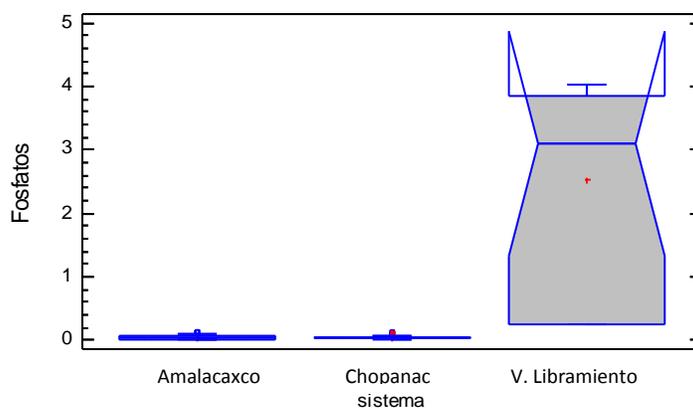


Figura 49. Gráfico de caja y bigotes para fosfatos en los sistemas Amalacaxco y Chopanac.

- **Nitrógeno en sedimento**

Se realizó la prueba de Tukey para probar la semejanza de los tres sitios encontrando diferencias entre el grupo de Vías Libramiento.

En el siguiente Cuadro se muestran los resultados de la comparación múltiple con un nivel del 95.0% de confianza.



Cuadro 15. Intervalos de confianza de Tukey HSD, 95.0%

| Contraste | Sig. | Diferencia | +/- Límites |
|-----------|------|------------|-------------|
| 1 - 2 | | -0.0158161 | 0.0390893 |
| 1 - 3 | * | -0.289111 | 0.0617824 |
| 2 - 3 | * | -0.273295 | 0.0659491 |

| Sistema | Casos | Media | Grupos Homogéneos |
|---------|-------|-----------|-------------------|
| 1 | 60 | 0.0686667 | X |
| 2 | 29 | 0.0844828 | X |
| 3 | 9 | 0.357778 | X |

Se identificaron 2 grupos homogéneos. Encontrando diferencias significativas de los sistemas 1 y 2 con el 3.

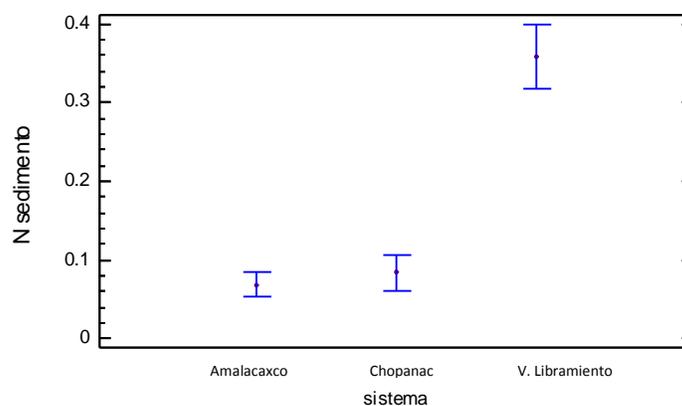


Figura 50. Medias e intervalos de confianza al 95% de Tukey HSD, para el nitrógeno en sedimento para los tres sistemas.

En la Figura 50 se observa el comportamiento del nitrógeno en sedimento para los dos afluentes y la zona con uso de suelo urbano, presentando similitud entre Amalacaxco y Chopanac pero no en Vías Libramiento ya que las concentraciones en el sedimento fueron superiores en esta zona. Sin embargo se distingue que el afluente de Chopanac tuvo una distribución más amplia con una media de 0.084 % mientras que Amalacaxco contó con una media de 0.068 %.

- **Fósforo en sedimento**

En la Figura 51 se observó que en el afluente Amalacaxco la línea que representa la mediana tuvo un valor de 0.05 mg kg⁻¹ al igual que la mediana del afluente Chopanac, aparentemente no hay mucha diferencia entre estos dos sistemas, la diferencia se muestra para la zona urbana ya que la distribución de los datos se hace más dispersa con una mediana de 0.16 mg kg⁻¹.

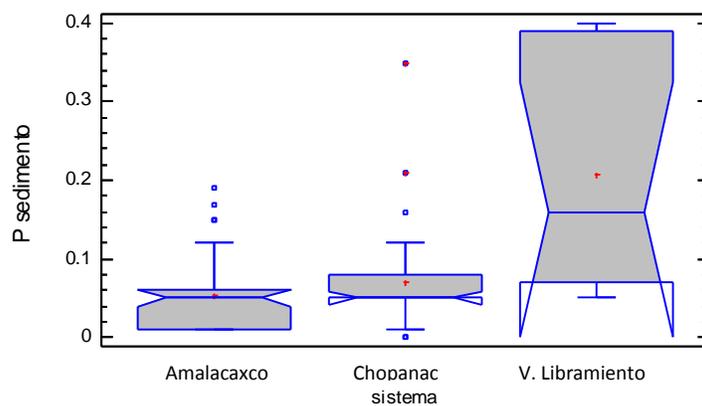


Figura 51. Gráfico de caja y bigotes para fósforo en el sedimento de los tres sistemas.

- **Materia orgánica en sedimento**

El sistema Amalacaxco presentó una menor dispersión en los datos a comparación de los otros sistemas con una mediana de 2.88 %, en el afluente Chopanac la dispersión de los datos se hace más amplia, se comportó más homogéneo con una mediana de 3.48 %, para el sitio de Vías Libramiento se notó un incremento en las concentraciones del carbono ya que tuvo una mediana de 7.69 %, mayor a comparación de los sistemas 1 y 2 además la distribución de datos es más amplia en la parte superior conforme a la mediana (Figura 52).

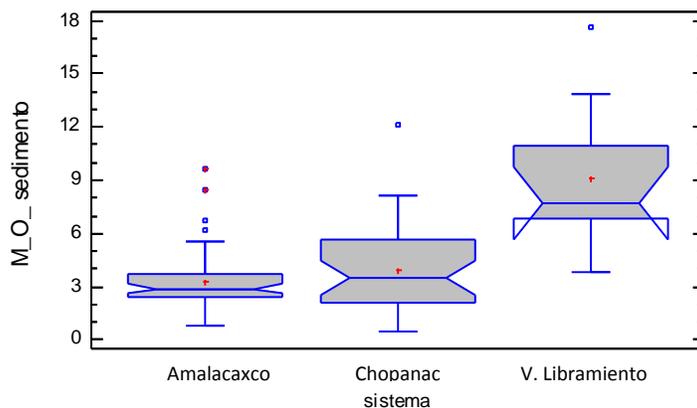


Figura 52. Gráfico de caja y bigotes para la materia orgánica en sedimento de los tres sistemas.

- **Nitrógeno en suelo**

El sistema Amalacaxco tuvo una mediana de 0.28 %, el afluente Chopanac presentó una mediana mayor con un valor de 0.42 % y una dispersión en los datos mayor que el sistema 1, mientras que para la zona con uso urbano se identifica una menor dispersión en los datos con una mediana de 0.23 % lo que indica que las concentraciones de nitrógeno más bajas se encuentran en este sistema, como se muestra en la Figura 53.

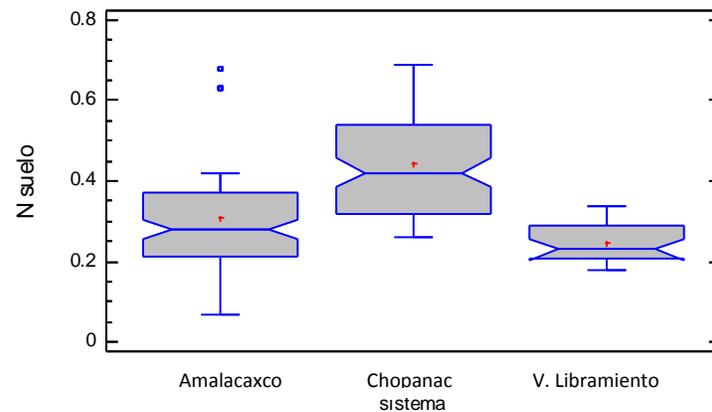


Figura 53. Gráfico de caja y bigotes del nitrógeno en suelo para los tres sistemas.

- **Fósforo en suelo**

La Figura 54 muestra que el sistema Amalacaxco presentó una mediana de 0.11 mg kg⁻¹, el afluente Chopanac una mediana de 0.23 mg kg⁻¹ que se encuentra en el centro de la caja al igual que la media además de la distribución que es menos dispersa provocando que los datos estén más cercanos entre sí, a diferencia de la zona Vías Libramiento, donde se observa una distribución en los datos más amplia con una mediana de 0.335 mg Kg⁻¹.

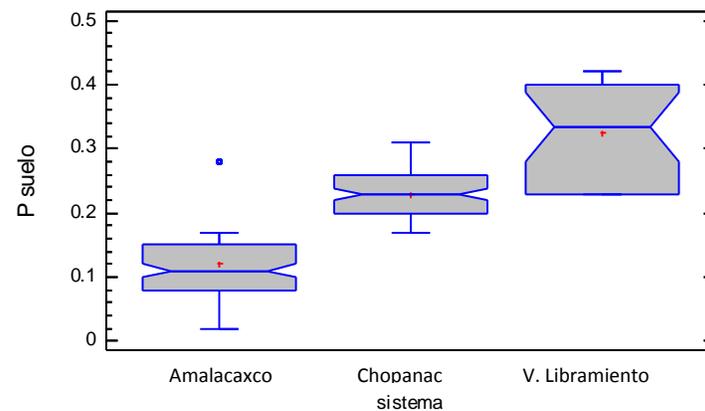


Figura 54. Gráfico de caja y bigotes del fósforo en suelo para los tres sistemas.

- **Materia orgánica en suelo**

En Amalacaxco se observaron dos valores atípicos con una mediana de 6.95 %, mientras que Chopanac tuvo una mediana de 8.12 %, sin embargo en Vías Libramiento se presentó una disminución en el carbono orgánico del suelo con una mediana de 3.7 %, como se muestra en la Figura 55.

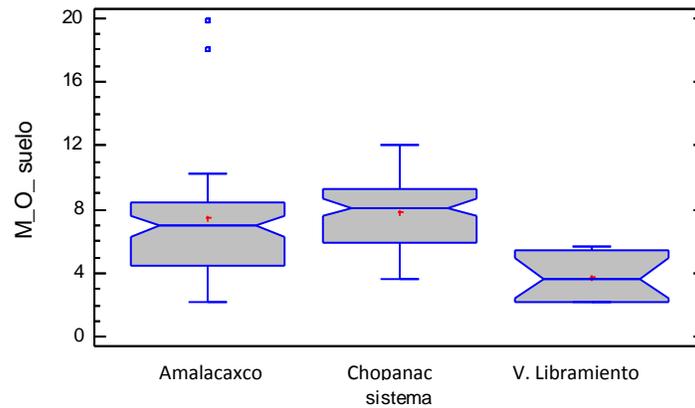


Figura 55. Gráfico de caja y bigotes para la materia orgánica en suelo para los tres sistemas.



10. CONCLUSIONES

- Las actividades que se llevan a cabo a lo largo de ambos sistemas no afectaron en gran medida el pH del agua, ya que se encontró dentro de los límites establecidos para aguas naturales.
- La conductividad eléctrica del agua aumentó en presencia de actividades agropecuarias a lo largo del cauce, y en la zona urbana. Su valor nos dice que los suelos de esta zona presentan riesgo medio de transformarse en suelos salinos. Lo que se corrobora con la concentración de los sólidos totales disueltos y sedimentables.
- Las actividades económicas y principalmente los núcleos de población elevan la saturación de bases particularmente calcio y magnesio, esto conduce a una mayor dureza y alcalinidad en el agua a medida que el afluente corre por los sitios donde se desarrollan estas acciones.
- Durante la época de lluvias el cauce del río recibió mayores aportes de fósforo.
- Las localidades forestales presentaron mayores concentraciones de nitratos y amonio durante la época de estiaje. En localidades agrícolas, pecuarias y urbana las diversas fuentes de aporte de nitrógeno al cauce generaron mayores concentraciones durante la época de lluvias.
- Factores como la erosión y el ensanchamiento del cauce provocan concentraciones de carbono orgánico particulado superiores durante la época de lluvias.
- Las modificaciones en el uso de suelo se dieron por la ganadería, agricultura y principalmente los asentamientos humanos, lo que provocó el incremento en las concentraciones de carbono, nitrógeno y fósforo en el sistema hídrico.
- Las zonas forestales y forestales recreativas mostraron diferencias en el fósforo total, ortofosfatos y nitratos del agua en comparación a los usos de suelos agrícola, pecuario y urbano.
- Los nutrientes, sales disueltas y el sistema amortiguador condicionan al sistema hídrico; mientras que el pH y la conductividad al sedimento.



- El pH del suelo aumentó conforme disminuye la altitud y se va modificando el uso de suelo de forestal a agropecuarios y urbanos.
- En las zonas forestales los porcentajes de materia orgánica en el suelo fueron mayores que en las zonas donde la vegetación ribereña fue reemplazada por campos agrícolas, áreas de pastoreo y actividad antrópica.
- En los afluentes Amalacaxco y Chopanac el fósforo del suelo, fue un factor limitante para la productividad primaria.
- El porcentaje de nitrógeno total en el suelo aumentó conforme se presentaron las actividades agropecuarias y urbanas.
- Los nutrimentos, pH y conductividad eléctrica definen el estado del sistema edáfico, siendo más evidente con forme el uso de suelo se va modificando.
- En el sistema Amalacaxco la cantidad de agua aumentó conforme se descendió en el gradiente altitudinal.
- El aforo del afluente Chopanac se redujo a partir de los 2700 msnm, debido a la captación y entubamiento del agua.
- En ambos sistemas lóticos la influencia humana genera variaciones notables en el caudal, volviendo intermitentes los flujos permanentes de agua, dado que el recurso hídrico es desviado o entubado para diversas actividades.
- En el sistema agua-sedimento se registró una dinámica activa entre los nutrimentos, lo que no se observó con claridad entre el sistema hídrico y edáfico.
- Los afluentes Amalacaxco y Chopanac tuvieron un comportamiento similar en cuanto al carbono, nitrógeno y fósforo del agua-sedimento-suelo.
- La modificación en la vocación del suelo por actividades recreativas, agropecuarias y ganaderas perturban el ambiente ribereño, pero las alteraciones aún son amortiguadas por el ecosistema. Lo que no sucede con el uso de suelo destinado a asentamientos humanos que altera con gran impacto la calidad del agua, sedimento y suelo de los sistemas ribereños.



11. BIBLIOGRAFÍA

Aparicio, M. 1994. Fundamentos de hidrología de superficie. Limusa, Grupo Noriega Editores. México. 303 pp.

Arcos, I. 2005. Efecto del ancho los ecosistemas riparios en la conservación de la calidad del agua y la biodiversidad en la microcuenca del río Sesesmiles, Copán, Honduras. Tesis de Posgrado. CATIE. Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza. Turrialba, Costa Rica.

Aquilla, R., Astorga Y., Jiménez, F. 2005. Influencia del uso del suelo en la calidad del agua en la subcuenca del río Jabonal, Costa Rica. Recursos Naturales y Ambiente. 48:81-92.

APHA, AWWA y WPCF. 1992. Métodos normalizados para el análisis de aguas potables y residuales. 17° edición. Ed. Diaz Santos. Washington. 1995 pp.

Ayala, M. 2011. Interacción ecológica del sistema agua-suelo en ambientes ribereños del Parque Nacional Izta-Popo y zonas de influencia. Tesis de Licenciatura. Facultad de Estudios Superiores Zaragoza, UNAM. México.

Banderas, A. 2007. Caracterización de la cuenca hidrológica. En: Arredondo, J., Díaz, G., Ponce, J. *Limnología de presas mexicanas, aspectos teóricos y prácticos*. AGT editores, UAM Iztapalapa. México. 3: 238-252.

Barrionuevo, S. 2004. Captura de CO₂ en un bosque de la región chaqueña semiárida de Argentina: evaluación y consecuencias. Revista de Ciencias Forestales. No. 011. Santiago del Estero, Argentina. 78 pp.

Bray, R., Kurtz, L. 1945. Determination of total, organic, and available phosphorus in soil. Soil Sci. 59:39-45.

Bremner, J. 1965. Total nitrogen. In: C.A. Black (ed.), Methods of soil analysis. Part 2. Agronomy 9. American Society of Agronomy. Madison, Wisconsin. 1149-1178.

Buckman, H., Brady, N. 1991. Naturaleza y propiedades de los suelos. Editorial Limusa. México.

Cabrera, M., Hernández, G., Gómez, R., Cañizares, M. 2003. Determinación de nitratos y nitritos en agua. Comparación de costos entre un método de flujo continuo y un método estándar. Revista de la Sociedad Química de México. 47(1): 88-92.

Camacho, F., Trejo, I., Bonfil C. 2006. Estructura y composición de la vegetación ribereña de la barranca del río Tembembe. Sociedad Botánica de México, Boletín de la Sociedad de Botánica de México. 078: 18.



Camargo, J., Alonso, A. 2007. Contaminación por nitrógeno inorgánico en los ecosistemas acuáticos: problemas medioambientales, criterios de calidad del agua, e implicaciones del cambio climático. *Ecosistemas* 16 (2): 98-110.

Cardona, A. 2003. Calidad y riesgo de contaminación de las aguas superficiales en la microcuenca del Río La Soledad, Valle de Angeles, Honduras. Tesis de posgrado. CATIE. Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza. Turrialba, Costa Rica.

Castañeda, A., Vargas, J., Gómez, A., Valdez, J., Vaquera, H. 2005. Acumulación de Carbono en la biomasa aérea de una plantación de *Bambusa oldhamii*. *Revista Agrociencia*. México. 39(1): 107-116.

Ceccon, E. 2003 Los bosques ribereños y la restauración y conservación de las cuencas hidrográficas. *Ciencias*. México. 72: 48-49

Cervantes, A. 1985. Manual de técnicas básicas para el análisis de ambientes acuáticos, séptimo semestre. *Biología*. Departamento de biología sección de limnología contaminación. UNAM. FES Zaragoza.

Cervantes, A., Marques, M., Rivera, P. 2006. Análisis estadístico. Un enfoque práctico con Statgraphics. Facultad de Estudios Superiores Zaragoza. UNAM. México, D.F. 113 pp.

Cervantes, C., Pérez, J., Gómez, J. 2000. Avances en la Eliminación Biológica del Nitrógeno de las Aguas Residuales. *Revista Latinoamericana de Microbiología* 42:73-82.

CICEANA. 2012. Centro de Información y Comunicación Ambiental de Norte América, A.C. Saber más. Ciclo del nitrógeno. <http://www.ciceana.org.mx/recursos/ciclo%20del%20nitrogeno.pdf> (Octubre 2012).

CONAGUA. 2002. Comisión Nacional del Agua. Determinación de la disponibilidad de agua en el Acuífero Zona Metropolitana de la Ciudad de México. Gerencia de Aguas Subterráneas, Subgerencia de Evaluación y Modelación Hidrogeológica. México, D.F.

CONAGUA. 2007. Comisión Nacional del Agua. Organismo de Cuenca Aguas del Valle de México <http://www.conagua.gob.mx/ocavm/Espaniol/TmpContenido.aspx?id=510b0111-d204-4734-957a-a14f8064598c%7CConsejos%20de%20Cuenca%7C0%7C5%7C0%7C0%7C0> (Noviembre 2012).

CONANP, 2010. Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas. Parque Nacional Iztapopo Zoquiapan. <http://iztapopo.conanp.gob.mx> (Septiembre 2010).

CONANP, 2012. Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas. Plan de Manejo del Parque Nacional Iztaccíhuatl Popocatepetl.



http://iztapopo.conanp.gob.mx/documentos/programa_de-manejo_izta_popo.pdf

(Noviembre, 2012).

Cruz, F., Guerra, H., Ángeles, C. 2008. Descripción de propiedades físicas y químicas de agua y suelo en ambientes riparios en la exposición occidental del PN Izta-Popo. <http://www.camafu.org.mx/index.php/> (Enero, 2012).

Cruz, G. 2003. La cuenca como unidad de planeación ambiental. En: *4^{to}. Seminario sobre instrumentos económicos para cuencas ambientales*. Dirección General de Investigación en Política y Economía Ambiental. Instituto Nacional de Ecología. México, D.F. 7-11.

Cuadras, C. 2012. Nuevos métodos de análisis multivariante. CMC Editions. Barcelona, Spain. 297 pp.

De la Lanza, G. 1990. Algunos conceptos sobre hidrología y calidad del agua. En: de la Lanza, G., Arredondo, J. *La acuicultura en México: de los conceptos a la producción*. Instituto de Biología. UNAM. México. 288 pp.

Diario Oficial. 2011. Convenio de Coordinación de acciones para la instrumentación del proceso dirigido a la formulación, aprobación, expedición, ejecución, evaluación y modificación del Programa de Ordenamiento Ecológico Regional de la Cuenca del Valle de México, que suscriben la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, la Secretaría de Desarrollo Social, los estados de México e Hidalgo y el Gobierno del Distrito Federal. Primera sección. México. 59-69.

Diario Oficial de la Federación. 2013. Acuerdo por el que se da a conocer el resumen del Programa de Manejo del Parque Nacional Iztaccíhuatl Popocatepetl. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales.

http://dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5294188&fecha=02/04/2013

Dieter, H., Möller, R. 1991. Ammonium. The drinking-water regulations, introduction and explanations. Erich-Schmidt Verlag. Berlin 1991:362-368.

Domínguez, A. 1989. Tratado de fertilización. Segunda edición. Ed. Mundi-Prenda. España. 601 pp.

Dourojeanni, A., Jouravlev, A. 2002. Gestión de recursos a nivel de cuencas. Curso manejo de cuencas hidrográficas I. CATIE, CR. 16.

Escobedo, D., Martínez, A., Jiménez, Á., Ulloa, A., Zavala, A. 2007. Intercambio de carbono orgánico particulado del sistema lagunar San Ignacio-Navachiste, Sinaloa, con el mar adyacente. En: Hernández, B., Gaxiola, G. *Carbono en ecosistemas acuáticos de*



México. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. Instituto Nacional de Ecología. Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada. Primera edición. 11:171-185.

FAO. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación. 2012. El estado de los bosques en el mundo. Roma. 50 pp.

Faustino, J., Jiménez, F., Campos, J. 2008. La cogestión de cuencas hidrográficas en América Central. Programa Focucenas II. CATIE. 34 pp.

Feijoó, C. 2009. La destrucción morfológica y biológica de los arroyos pampeanos. Programa de Investigación en Ecología y Acuática. Departamento de Ciencias Básicas. Universidad Nacional de Luján. Buenos Aires, Argentina. 1-9.

García, A. 2004. Dinámica del paisaje post-fuego en el pastizal tropical de alta montaña. Volcán Iztaccíhuatl. Venezuela. 29(11): 604-611.

García, M. 2003. Indicadores de calidad del suelo y estado nutrimental de *Abies religiosa* (H.B.K.) Schl. Et Cham., en la exposición occidente de los volcanes Iztaccíhuatl y Popocatepetl. Tesis de Licenciatura. Facultad de Estudios Superiores Zaragoza, UNAM. México.

Gardi, C. 2001. Land use, agronomic management and water quality in a small Northern Italian watershed. Agriculture, Ecosystem and Environment. (87):1-12.

Gayoso, J., Gayoso, S. 2003. Diseño de zonas ribereñas requerimiento de un ancho mínimo. Facultad de Ciencias Forestales. Universidad Austral de Chile.

GESAMP. 1990. IMO/FAO/UNESCO/WMO/WHO/IAEA/UN/UNEP Joint group of experts on the scientific aspects of marine pollution. Review of potentially harmful substances. Nutrients. Rep. Stud. Gesamp. 34-40.

González del Tánago, M., Vidal-Abarca, M., Suárez, M., Molina, C., 1994. Consideraciones sobre el estado actual de las riberas de los principales cauces fluviales de la cuenca del Río Segura (S.E. de España). Anales de Biología. Biología ambiental 20(9):117-130.

González, E., Pozo, J., 1995. EL carbono orgánico disuelto en el rio Aguera (norte de España) en condiciones de estabilidad hidrológica. Limnética, 11 (2): 57-62 Asociación Española de Limnología, Madrid. España.

Granados, D., Hernández, M., López, G. 2006. Ecología de las zonas ribereñas. Revista Chapingo. Serie Ciencias Forestales y del ambiente. 12(1): 55-69.



Gutierrez, Y. 2009. Uso del suelo, vegetación ribereña y calidad del agua de la microcuenca del río Gaira, Santa Marta, Colombia. Tesis de Posgrado. CATIE. Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza. Turrialba, Costa Rica.

Hernández, M., Granados, D. 2006. El Parque Nacional Iztaccíhuatl-Popocatepetl-Zoquiapan y el impacto ecológico-social de su deterioro. México. 12(2): 101-109.

INEGI. 2009. Instituto Nacional De Estadística y Geografía. Guía para la interpretación de cartografía uso de suelo y vegetación escala 1:250 000 serie III. México.

Jackson, M. 1964. Análisis químico de suelos. Ed Omega. Barcelona, España.

Jaramillo, V. 2004. El ciclo global del carbono. En: Martínez, J., Fernández, A., Osnaya, P. *Cambio climático: una visión desde México*. Primera edición. Instituto Nacional de Ecología. México D.F. <http://www2.ine.gob.mx/publicaciones/libros/437/jaramillo.html> (Marzo, 2013).

Jarquín, S., Salgado, G., Palma, L., Camacho, C., Guerrero, P. 2011. Análisis de nitrógeno total en suelos tropicales por espectroscopía de infrarojo cercano (NIRS) y quimiometría. 45(6): 653-662.

Johnson, D. 2000. Métodos multivariados aplicados al análisis de datos. International Thomson Editores. 566 pp.

Kammerbauer, J., Ardon, C. 1999. Land use dynamics and landscape change pattern in a typical watershed in the hillside region of central Honduras. *Agriculture, Ecosystem and Environment*. (75):93-100.

Kevern, R., Darrell, L., King, L. y Ring, R. 1996. Lake classification systems, part 1. *The Michigan Riparian February*.

Kingston, E., Bowersox, V., Claybrooke, R., Zorrilla, G. 2000. El nitrógeno en la lluvia Nacional. Programa Nacional de Deposición Atmosférica. IL, USA. 1-13.

Legorreta, J. 2009. Ríos, lagos y manantiales del Valle de México. Universidad Autónoma Metropolitana, México, D. F. 365 pp.

León, H. 2007. Estimación del contenido de C en suelos de bosques templados y su relación con la calidad del suelo. Tesis de Licenciatura. Facultad de Estudios Superiores Zaragoza, UNAM. México.

Lessard, R., Gignac, L., Rochette, P. 2011. El ciclo del carbono: midiendo el flujo del CO₂ del suelo. http://www.greenteacher.com/articles/el_ciclo_del_carbono.pdf (Septiembre, 2011).



Lomas, B., Terrazas, D., Tchikoué, M. 2005. Propuesta de ordenamiento ecológico territorial para el Parque Nacional Zoquiapan y Anexas. 11(1): 57-71.

López, H. 2004. Fábrica de agua en la región del Parque Nacional Iztaccíhuatl-Popocatepetl. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, Informe final SNIB-CONABIO proyecto No. BQ010. México D. F. (Edición digital: CONABIO 2006).

Macías J. L. 2005. Geología e historia eruptiva de algunos de los grandes volcanes activos de México. Boletín de la Sociedad Geológica de México. Temas Selectos de la Geología Mexicana. 17: 379-424.

Margalef, R. 1983. Limnología. Ediciones Omega. Barcelona, España. 1009 pp.

Martínez, D., Bustamante G., Jaramillo V., Silva G., Tornero C., Vargas L., 2010. Disposición de los productores forestales de la región Izta-Popo a aceptar pagos por mantener los servicios ambientales hidrológicos. 12(3): 549-556.

Martínez, S. 2012. Actividad enzimática de suelos ribereños y su fertilidad en bosques del Parque Nacional Izta-Popo. Tesis de licenciatura. Facultad de Estudios Superiores Zaragoza, UNAM. México.

Mee, L. 1979. Coastal Lagoons. En: RILEY, J. P. and G. SKIRROW (Eds.), Chemical Oceanography, Academic Press, London, 42:441-490.

Metcalf y Eddy. 1991. Wastewater Engineering Treatment, Disposal, Reuse. Ed. McGraw-Hill. Tercera edición. 1334 pp.

Morales, B., Chávez, G. 2010. Estimación de la carga de nutrientes procedentes de la cuenca de drenaje superficial del río Tepenaguasapa. 23(1): 18-26.

Morales, M., Fernández, J. 2005. Aspectos relevantes de la interacción entre la vegetación de ribera, la hidráulica y la morfología de cauces. III Congreso de Ingeniería Civil, territorio y medio ambiente. Valencia, España. 14 pp.

National Research Council. 1977 Drinking water and health. National Academy of Sciences. USA.

Norma Mexicana NMX-AA-004-SCFI-2000 que establece el método para la determinación de sólidos sedimentables en aguas naturales, residuales y residuales tratadas.

Norma Mexicana NMX-AA-012-SCFI-2001 que establece el método para la determinación de oxígeno disuelto en aguas naturales, residuales y residuales tratadas.



Norma Mexicana NMX-AA-028-SCFI-2001 que establece el método de análisis para la determinación de la demanda bioquímica de oxígeno en aguas naturales, residuales (DBO₅), y residuales tratadas.

Norma Mexicana NMX-AA-029-SCFI-2001 que establece dos métodos de análisis para la determinación de fósforo total en aguas residuales, naturales y residuales tratadas.

Norma Mexicana NMX-AA-036-SCFI-2001 que establece el método de prueba para la determinación de acidez y alcalinidad en aguas naturales, residuales y residuales tratadas.

Norma Mexicana NMX-AA-072-SCFI-2001 que establece el método de análisis para la determinación de dureza total en aguas naturales, residuales y residuales tratadas.

Norma Oficial Mexicana NOM-001-ECOL-1996 que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en aguas y bienes nacionales.

Norma Oficial Mexicana NOM-021-SEMARNAT-2000 que establece las especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de suelos, estudio, muestreo y análisis. Segunda sección. Secretaria de Medio Ambiente y Recursos Naturales. Diario Oficial. 2002.

Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-1994, que establece los límites permisibles de calidad y los tratamientos de potabilización del agua para uso y consumo humano.

Odum, E. 1987. Ecología. Tercera edición. Editorial Interamericana. México D.F. 639 pp.

Olías, M., Cerón, J., Fernández, I. 2005. Sobre la utilización de la clasificación de las aguas de riego del U.S. Laboratory Salinity (USLS). GEOGACETA. 37: 111-113.

Pacheco, J., Cabrera, A. 2003. Fuentes principales de nitrógeno de nitratos en aguas subterráneas. Ingeniería. 7(2): 47-54.

Páez, F., Ramírez, G., Ruíz, A., Soto, M. 2007. La contaminación por nitrógeno y fósforo en Sinaloa: flujos, fuentes, efectos y opciones de manejo. Serie Lagunas Costeras de Sinaloa. Primera edición. Instituto de Ciencias del Mar y Limnología. UNAM. Mazatlán, México.

Parsons, T., Yoshiaki, L., Carol, M. 1984. A manual of chemical and biological methods for seawater analysis. PergamonPress. Oxford, England. 173 pp.

PMDU. Plan Municipal de Desarrollo Urbano de Amecameca. 2003. Gobierno del Estado de México. Secretaría de Desarrollo Urbano y Vivienda. <http://es.scribd.com/marfermax/d/42852719-PMDU-AMECAMECA> (Mayo, 2012).



- PRONATURA. 2011. Pro Naturaleza, Asociación Civil. Programa Restauración, protección y conservación de los Recursos Naturales del Parque Nacional Iztaccíhuatl Popocatepetl http://www.pronatura.org.mx/centro_occidente/izta_popo_antecedentes (Agosto 2011).
- Reynolds, J. 2002. Manejo integrado de aguas subterráneas. Un reto para el futuro. Editorial San José. UNED. Costa Rica. 348.
- Richards, L. 1990. Diagnóstico y rehabilitación de suelos salinos y sódicos. Departamento de agricultura de los Estados Unidos de America, Limusa. México D.F.
- Rivas, Z., Sánchez, J., Troncone, F., Márquez, R., Ledo, H., Colina, M., Gutiérrez, E. 2009. Nitrógeno y fósforo totales de los Ríos Tributarios al Sistema Lago de Maracaibo, Venezuela. *Interciencia* 34(5): 308-314.
- Rodríguez, R., Jiménez, J., Aguirre, O., Treviño, E. 2006. Estimación del carbono almacenado en un bosque de niebla en Tamaulipas, México. *Ciencia UANL*. 9(2): 179-188.
- Ruano, M., Trejos, J. 2012. El Análisis Canónico para el Estudio de las Relaciones entre Dos Conjuntos de Variables Cuantitativas. 19 pp.
- Sandia, L., Cabeza, M., Arandia, J., Bianchi, G. 1999. Riesgos sobre la salud asociados a las actividades agrícolas: un caso de estudio de la geografía rural. *Revista Geográfica Venezolana*, 40(2):281-295.
- Sánchez, A., López, L. 2003. Clasificación y ordenamiento de la vegetación del norte de la Sierra Nevada, a lo largo de un gradiente altitudinal. *México*. 74(1): 47-71.
- Sánchez, A., López, L., Granados, D. 2005. Semejanza florística entre los bosques de Abies religiosa de la Faja Volcánica Transmexicana. *México*. 56:62-76.
- Sánchez, F., García, J., Ballester, A., Molina, J., Schmidt, G., López, A., Palacios, E. 2011. "Restaurar juntos" guía metodológica para proyectos participativos de restauración de ríos. VII Congreso Ibérico sobre Gestión y Planificación del Agua. Talavera de la Reina, España.
- Sande, F., López, P., Mirás, B., Vidal, J. 2006. Fracciones de fósforo en el agua de drenaje de una cuenca agroforestal en condiciones atlánticas. *Edafología*. 13(2): 87-92
- Segnini, S., Chacón, M. 2005. Caracterización fisicoquímica del hábitat interno y ribereño de ríos andinos en la cordillera de Mérida, Venezuela. *ECOTROPICOS* 18 (1): 38-61.
- SEMARNAT. 2005. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. Comisión Estatal del Agua y Medio Ambiente del Estado de Morelos. Modelo de ordenamiento ecológico y por riesgo eruptivo del territorio del volcán Popocatepetl y su zona de influencia.



SEMARNAT. 2010. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. Bitácora del Ordenamiento Ecológico Regional Cuenca del Valle de México. http://www.semarnat.gob.mx/temas/ordenamientoecologico/Paginas/Bit_cuenca_V_Mexico.aspx (Enero, 2013).

Soledad, A. 2013. Comportamiento nutrimental del sistema agua-suelo en la zona occidental del Parque Nacional Izta-Popo. Tesis de Licenciatura. Facultad de Estudios Superiores Zaragoza, UNAM. México.

Sutton, D., Harmon, N. 1988. Fundamentos de ecología. Editorial Limusa. Novena reimpresión. México.

Terrádez, M. 2013. Análisis de componentes principales. Proyecto *e-Math*. Financiado por la Secretaría de Estado de Educación y Universidades (MECD). http://www.uoc.edu/in3/emath/docs/Componentes_principales.pdf (Mayo, 2013).

Torres, I. 2005. Efecto del ancho los ecosistemas riparios en la conservación de la calidad del agua y la biodiversidad en la microcuenca del río Sesesmiles, Copan, Honduras. Tesis de posgrado. Escuela de posgrado, Programa de Educación para el Desarrollo y la Conservación del Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza. Costa Rica.

Turk, A, Turk, J., Wittes, J., Wittes, R. 1981. Tratado de ecología. Editorial Interamericana. Segunda edición. México.

Ureña, J., Ollero, A. 2000. Criterios y propuestas para la ordenación de áreas fluviales. Ciudad y Territorio, Estudios Territoriales. 126: 689-710.

Wetzel, R. 2001. Limnology Lake and River Ecosystems. Third Edition. Academic Press. USA, California. 575 pp.

WHO. 2001. Nitrate and Nitrite in Drinking-water. Background document for development of World Health Organization Guidelines for Drinking-water Quality.

WRB. 2007. Base Referencial Mundial del Recurso Suelo. Un marco conceptual para clasificación, correlación y comunicación internacional. IUSS Grupo de Trabajo. Informes sobre Recursos Mundiales de Suelos No. 103. FAO, Roma.

Yanai, R. 1992. Phosphorus budget of a 70-year-old northern hardwood forest. Biogeochemistry 17(1): 1-22.

Zinck, A. 2005. Suelos, información y sociedad. Gaceta ecológica. Instituto Nacional de Ecología. México. 076: 7-22.



ANEXO

ANÁLISIS DE CORRELACIONES MÚLTIPLES

| | Alt | T-agua | pH | CE | STS | STD | Alc-tot | D-Ca |
|---------------------------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| N-NO ₃ ⁻ | -0.4206 | 0.5073 | 0.1793 | 0.8270 | 0.8889 | 0.8270 | 0.6876 | 0.7135 |
| | (83) | (83) | (83) | (77) | (83) | (77) | (83) | (83) |
| | 0.0001 | 0.0000 | 0.1048 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 |
| N-NH ₄ ⁺ | -0.4166 | 0.6275 | 0.0595 | 0.8826 | 0.7577 | 0.8792 | 0.7795 | 0.8496 |
| | (104) | (104) | (104) | (98) | (104) | (98) | (104) | (104) |
| | 0.0000 | 0.0000 | 0.5484 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 |
| P-tot | -0.4248 | 0.6452 | 0.0526 | 0.9440 | 0.8911 | 0.9435 | 0.8525 | 0.8922 |
| | (105) | (105) | (105) | (99) | (105) | (99) | (105) | (105) |
| | 0.0000 | 0.0000 | 0.5944 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 |
| P-PO ₄ ³⁻ | -0.3827 | 0.5752 | 0.0926 | 0.9063 | 0.7921 | 0.9047 | 0.6287 | 0.7807 |
| | (100) | (100) | (100) | (94) | (100) | (94) | (100) | (100) |
| | 0.0001 | 0.0000 | 0.3597 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 |
| COP | -0.2407 | 0.3202 | -0.0445 | 0.3709 | 0.1857 | 0.4056 | 0.2397 | 0.3345 |
| | (73) | (73) | (73) | (69) | (73) | (69) | (73) | (73) |
| | 0.0402 | 0.0057 | 0.7087 | 0.0017 | 0.1158 | 0.0005 | 0.0411 | 0.0038 |
| MO-sed | -0.2910 | 0.3032 | 0.4194 | 0.6452 | 0.6733 | 0.6280 | 0.4995 | 0.6295 |
| | (104) | (101) | (101) | (93) | (101) | (93) | (101) | (101) |
| | 0.0027 | 0.0021 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 |
| N-sed | -0.4475 | 0.4431 | 0.1530 | 0.7283 | 0.6262 | 0.7172 | 0.4965 | 0.6523 |
| | (95) | (92) | (92) | (84) | (92) | (84) | (92) | (92) |
| | 0.0000 | 0.0000 | 0.1454 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 |
| P-sed | -0.3582 | 0.3410 | 0.3234 | 0.6203 | 0.3858 | 0.6138 | 0.1034 | 0.3720 |
| | (108) | (105) | (105) | (96) | (105) | (96) | (105) | (105) |
| | 0.0001 | 0.0004 | 0.0008 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.2939 | 0.0001 |
| MO-suelo | 0.3837 | -0.1842 | -0.0326 | -0.2996 | -0.2906 | -0.2989 | -0.1745 | -0.2292 |
| | (208) | (202) | (202) | (190) | (202) | (190) | (183) | (182) |
| | 0.0000 | 0.0087 | 0.6454 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0181 | 0.0019 |
| N-suelo | 0.1527 | -0.0041 | 0.0322 | -0.2279 | -0.2277 | -0.2350 | -0.0991 | -0.1186 |
| | (229) | (223) | (223) | (208) | (223) | (208) | (182) | (181) |
| | 0.0208 | 0.9512 | 0.6326 | 0.0009 | 0.0006 | 0.0006 | 0.1833 | 0.1118 |
| P-suelo | -0.5754 | 0.6544 | 0.2036 | 0.5721 | 0.4440 | 0.5668 | 0.5030 | 0.5601 |
| | (258) | (252) | (252) | (234) | (252) | (234) | (209) | (208) |
| | 0.0000 | 0.0000 | 0.0012 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 |



Variaciones C, N y P en sitios con distinto uso de suelo en dos sistemas ribereños del río Amecameca



| | D-tot | OD | DBO ₅ | DQO | Prom-gas | Vel-corr | Área | N-NO ₃ ⁻ |
|---------------------------------|---------|---------|------------------|---------|----------|----------|---------|--------------------------------|
| N-NO ₃ ⁻ | 0.8289 | -0.5965 | -0.4357 | 0.3503 | 0.4419 | 0.2016 | 0.4360 | |
| | (83) | (83) | (83) | (43) | (76) | (76) | (76) | |
| | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0213 | 0.0001 | 0.0807 | 0.0001 | |
| N-NH ₄ ⁺ | 0.5569 | -0.7070 | -0.4570 | 0.5146 | 0.5055 | 0.1814 | 0.5536 | 0.8198 |
| | (104) | (104) | (104) | (43) | (98) | (98) | (98) | (81) |
| | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0004 | 0.0000 | 0.0739 | 0.0000 | 0.0000 |
| P-tot | 0.7383 | -0.6966 | -0.4331 | 0.6158 | 0.4261 | 0.1702 | 0.4807 | 0.8544 |
| | (105) | (105) | (105) | (43) | (99) | (99) | (99) | (81) |
| | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0921 | 0.0000 | 0.0000 |
| P-PO ₄ ³⁻ | 0.6276 | -0.6324 | -0.3995 | 0.7747 | 0.3113 | 0.0710 | 0.4579 | 0.6134 |
| | (100) | (100) | (100) | (41) | (94) | (94) | (94) | (79) |
| | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0023 | 0.4963 | 0.0000 | 0.0000 |
| COP | -0.0037 | -0.2374 | -0.0605 | 0.0142 | 0.2332 | 0.0427 | 0.2025 | 0.3517 |
| | (73) | (73) | (73) | (37) | (67) | (67) | (67) | (70) |
| | 0.9749 | 0.0431 | 0.6109 | 0.9333 | 0.0576 | 0.7314 | 0.1002 | 0.0028 |
| MO-sed | 0.6692 | -0.2429 | -0.1947 | 0.2824 | 0.2414 | 0.0646 | 0.3146 | 0.6244 |
| | (101) | (101) | (101) | (34) | (92) | (92) | (92) | (69) |
| | 0.0000 | 0.0144 | 0.0511 | 0.1056 | 0.0205 | 0.5407 | 0.0023 | 0.0000 |
| N-sed | 0.4943 | -0.4682 | -0.3711 | 0.3516 | 0.5063 | 0.2432 | 0.5521 | 0.7484 |
| | (92) | (92) | (92) | (34) | (83) | (83) | (83) | (64) |
| | 0.0000 | 0.0000 | 0.0003 | 0.0415 | 0.0000 | 0.0267 | 0.0000 | 0.0000 |
| P-sed | 0.2465 | -0.5240 | -0.2929 | 0.4399 | 0.2745 | 0.0349 | 0.3357 | 0.4068 |
| | (105) | (105) | (105) | (34) | (96) | (96) | (96) | (69) |
| | 0.0112 | 0.0000 | 0.0024 | 0.0092 | 0.0068 | 0.7355 | 0.0008 | 0.0005 |
| MO-suelo | -0.1693 | 0.1186 | 0.2066 | -0.4362 | -0.2042 | -0.0274 | -0.2382 | -0.4302 |
| | (182) | (183) | (182) | (43) | (188) | (188) | (188) | (83) |
| | 0.0223 | 0.1098 | 0.0051 | 0.0035 | 0.0050 | 0.7089 | 0.0010 | 0.0000 |
| N-suelo | -0.1307 | 0.0905 | 0.1789 | -0.2952 | -0.3039 | -0.1133 | -0.3312 | -0.0902 |
| | (181) | (182) | (181) | (43) | (208) | (208) | (208) | (74) |
| | 0.0794 | 0.2244 | 0.0160 | 0.0546 | 0.0000 | 0.1031 | 0.0000 | 0.4447 |
| P-suelo | 0.3274 | -0.3455 | -0.2791 | 0.1196 | 0.1042 | -0.1496 | 0.1895 | 0.3862 |
| | (208) | (209) | (207) | (43) | (234) | (234) | (234) | (83) |
| | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.4449 | 0.1120 | 0.0220 | 0.0036 | 0.0003 |



Variaciones C, N y P en sitios con distinto uso de suelo en dos sistemas ribereños del río Amecameca



| | N-NH ₄ ⁺ | P-tot | P-PO ₄ ³⁻ | COP | MO-sed | N-sed | P-sed | MO-suelo |
|---------------------------------|--------------------------------|---------|---------------------------------|---------|---------|---------|---------|----------|
| N-NO ₃ ⁻ | 0.8198 | 0.8544 | 0.6134 | 0.3517 | 0.6244 | 0.7484 | 0.4068 | -0.4302 |
| | (81) | (81) | (79) | (70) | (69) | (64) | (69) | (83) |
| | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0028 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0005 | 0.0000 |
| N-NH ₄ ⁺ | | 0.9527 | 0.6455 | 0.3049 | 0.5124 | 0.7172 | 0.3132 | -0.4949 |
| | | (103) | (99) | (73) | (86) | (80) | (87) | (91) |
| | | 0.0000 | 0.0000 | 0.0087 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0031 | 0.0000 |
| P-tot | 0.9527 | | 0.7625 | 0.2390 | 0.6125 | 0.7294 | 0.3529 | -0.4862 |
| | (103) | | (99) | (73) | (87) | (81) | (88) | (92) |
| | 0.0000 | | 0.0000 | 0.0417 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0007 | 0.0000 |
| P-PO ₄ ³⁻ | 0.6455 | 0.7625 | | 0.3325 | 0.5648 | 0.6163 | 0.6853 | -0.4519 |
| | (99) | (99) | | (71) | (83) | (77) | (84) | (88) |
| | 0.0000 | 0.0000 | | 0.0046 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 |
| COP | 0.3049 | 0.2390 | 0.3325 | | -0.1099 | 0.3402 | 0.4221 | -0.1796 |
| | (73) | (73) | (71) | | (63) | (57) | (63) | (73) |
| | 0.0087 | 0.0417 | 0.0046 | | 0.3911 | 0.0096 | 0.0006 | 0.1284 |
| MO-sed | 0.5124 | 0.6125 | 0.5648 | -0.1099 | | 0.4596 | 0.2916 | -0.1591 |
| | (86) | (87) | (83) | (63) | | (94) | (104) | (82) |
| | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.3911 | | 0.0000 | 0.0027 | 0.1533 |
| N-sed | 0.7172 | 0.7294 | 0.6163 | 0.3402 | 0.4596 | | 0.5103 | -0.4862 |
| | (80) | (81) | (77) | (57) | (94) | | (95) | (75) |
| | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0096 | 0.0000 | | 0.0000 | 0.0000 |
| P-sed | 0.3132 | 0.3529 | 0.6853 | 0.4221 | 0.2916 | 0.5103 | | -0.1634 |
| | (87) | (88) | (84) | (63) | (104) | (95) | | (85) |
| | 0.0031 | 0.0007 | 0.0000 | 0.0006 | 0.0027 | 0.0000 | | 0.1350 |
| MO-suelo | -0.4949 | -0.4862 | -0.4519 | -0.1796 | -0.1591 | -0.4862 | -0.1634 | |
| | (91) | (92) | (88) | (73) | (82) | (75) | (85) | |
| | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.1284 | 0.1533 | 0.0000 | 0.1350 | |
| N-suelo | -0.2294 | -0.2122 | -0.1568 | -0.0615 | -0.0225 | -0.1563 | -0.0689 | 0.6693 |
| | (86) | (87) | (84) | (63) | (86) | (83) | (89) | (193) |
| | 0.0336 | 0.0484 | 0.1544 | 0.6321 | 0.8371 | 0.1583 | 0.5212 | 0.0000 |
| P-suelo | 0.3440 | 0.3655 | 0.3243 | 0.2101 | 0.3670 | 0.4369 | 0.3787 | -0.0994 |
| | (104) | (105) | (100) | (73) | (104) | (95) | (108) | (208) |
| | 0.0003 | 0.0001 | 0.0010 | 0.0745 | 0.0001 | 0.0000 | 0.0001 | 0.1530 |



| | N-suelo | P-suelo | pH-sed | CE-sed | pH-suelo | CE-suelo |
|---------------------------------|---------|---------|---------|---------|----------|----------|
| N-NO ₃ ⁻ | -0.0902 | 0.3862 | -0.5435 | 0.9112 | 0.2210 | 0.0212 |
| | (74) | (83) | (69) | (69) | (83) | (83) |
| | 0.4447 | 0.0003 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0447 | 0.8494 |
| N-NH ₄ ⁺ | -0.2294 | 0.3440 | -0.6172 | 0.9209 | 0.2059 | 0.0490 |
| | (86) | (104) | (87) | (87) | (104) | (102) |
| | 0.0336 | 0.0003 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0360 | 0.6244 |
| P-tot | -0.2122 | 0.3655 | -0.6275 | 0.9336 | 0.2093 | 0.0462 |
| | (87) | (105) | (88) | (88) | (105) | (104) |
| | 0.0484 | 0.0001 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0321 | 0.6413 |
| P-PO ₄ ³⁻ | -0.1568 | 0.3243 | -0.5476 | 0.7869 | 0.1812 | 0.0410 |
| | (84) | (100) | (84) | (84) | (100) | (98) |
| | 0.1544 | 0.0010 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0712 | 0.6884 |
| COP | -0.0615 | 0.2101 | -0.3287 | 0.6260 | 0.2895 | 0.0228 |
| | (63) | (73) | (63) | (63) | (73) | (73) |
| | 0.6321 | 0.0745 | 0.0085 | 0.0000 | 0.0130 | 0.8479 |
| MO-sed | -0.0225 | 0.3670 | -0.2876 | 0.5338 | 0.1204 | 0.1072 |
| | (86) | (104) | (104) | (104) | (104) | (100) |
| | 0.8371 | 0.0001 | 0.0031 | 0.0000 | 0.2232 | 0.2882 |
| N-sed | -0.1563 | 0.4369 | -0.5785 | 0.7402 | -0.0063 | 0.3774 |
| | (83) | (95) | (95) | (95) | (95) | (93) |
| | 0.1583 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.9515 | 0.0002 |
| P-sed | -0.0689 | 0.3787 | -0.5466 | 0.4931 | 0.0999 | 0.1822 |
| | (89) | (108) | (107) | (108) | (108) | (104) |
| | 0.5212 | 0.0001 | 0.0000 | 0.0000 | 0.3034 | 0.0642 |
| MO-suelo | 0.6693 | -0.0994 | 0.3276 | -0.4020 | -0.2069 | -0.1534 |
| | (193) | (208) | (84) | (85) | (208) | (208) |
| | 0.0000 | 0.1530 | 0.0024 | 0.0001 | 0.0027 | 0.0270 |
| N-suelo | | 0.2288 | 0.2269 | -0.1939 | -0.1573 | 0.0537 |
| | | (229) | (88) | (89) | (229) | (225) |
| | | 0.0005 | 0.0335 | 0.0687 | 0.0172 | 0.4224 |
| P-suelo | 0.2288 | | -0.1188 | 0.4064 | 0.2810 | 0.3200 |
| | (229) | | (107) | (108) | (258) | (254) |
| | 0.0005 | | 0.2229 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 |



ANÁLISIS PRUEBA DE HIPÓTESIS

ANOVA Simple - Nitratos del agua por sistema

Verificación de Varianza

| | Prueba | Valor-P |
|----------|---------|---------|
| Levene's | 55.8355 | 0.0 |

Prueba de Kruskal-Wallis para Nitratos por sistema

| sistema | Tamaño Muestra | Rango Promedio |
|---------|----------------|----------------|
| 1 | 40 | 29.2125 |
| 2 | 35 | 48.1 |
| 3 | 8 | 79.25 |

Estadístico = 32.6145 Valor-P = 8.27658E-8

Prueba de la Mediana de Mood para Nitratos por sistema

Total n = 83

Gran mediana = 0.089

| sistema | Tamaño de Muestra | n<= | n> | Mediana | LC inferior 95.0% | LC superior 95.0% |
|---------|-------------------|-----|----|---------|-------------------|-------------------|
| 1 | 40 | 31 | 9 | 0.0545 | 0.033 | 0.079 |
| 2 | 35 | 13 | 22 | 0.123 | 0.0663029 | 0.135814 |
| 3 | 8 | 0 | 8 | 1.0535 | | |

Estadístico = 22.1936 Valor-P = 0.0000151606

ANOVA Simple – Amonio del agua por sistema

Verificación de Varianza

| | Prueba | Valor-P |
|----------|---------|----------|
| Levene's | 32.1483 | 1.57E-11 |

Prueba de Kruskal-Wallis para Amonio por sistema

| sistema | Tamaño Muestra | Rango Promedio |
|---------|----------------|----------------|
| 1 | 53 | 50.0189 |
| 2 | 41 | 44.2439 |
| 3 | 10 | 99.5 |

Estadístico = 27.7203 Valor-P = 9.56333E-7

Prueba de la Mediana de Mood para Amonio por sistema

Total n = 104

Gran mediana = 0.0265

| sistema | Tamaño de Muestra | n<= | n> | Mediana | LC inferior 95.0% | LC superior 95.0% |
|---------|-------------------|-----|----|---------|-------------------|-------------------|
| 1 | 53 | 28 | 25 | 0.024 | 0.0177398 | 0.034 |
| 2 | 41 | 24 | 17 | 0.018 | 0.0111029 | 0.0360932 |
| 3 | 10 | 0 | 10 | 1.24 | 0.734422 | 1.96204 |

Estadístico = 11.3649 Valor-P = 0.00340515



ANOVA Simple - COP del agua por sistema

Verificación de Varianza

| | Prueba | Valor-P |
|----------|---------|-------------|
| Levene's | 9.82105 | 0.000173984 |

Prueba de Kruskal-Wallis para COP por sistema

| sistema | Tamaño Muestra | Rango Promedio |
|---------|----------------|----------------|
| 1 | 35 | 32.6857 |
| 2 | 31 | 38.7097 |
| 3 | 7 | 51.0 |

Estadístico = 4.69728 Valor-P = 0.0954989

Prueba de la Mediana de Mood para COP por sistema

Total n = 73

Gran mediana = 83.4

| sistema | Tamaño de Muestra | n<= | n> | Mediana | LC inferior 95.0% | LC superior 95.0% |
|---------|-------------------|-----|----|---------|-------------------|-------------------|
| 1 | 35 | 22 | 13 | 67.87 | 55.2003 | 109.337 |
| 2 | 31 | 13 | 18 | 97.297 | 57.1058 | 166.612 |
| 3 | 7 | 2 | 5 | 283.8 | | |

Estadístico = 4.39358 Valor-P = 0.11116

ANOVA Simple – Fósforo Total del agua por sistema

Verificación de Varianza

| | Prueba | Valor-P |
|----------|--------|-------------|
| Levene's | 36.592 | 1.04827E-12 |

Prueba de Kruskal-Wallis para Fósforo Total por sistema

| sistema | Tamaño Muestra | Rango Promedio |
|---------|----------------|----------------|
| 1 | 53 | 42.0755 |
| 2 | 42 | 55.4762 |
| 3 | 10 | 100.5 |

Estadístico = 31.4263 Valor-P = 1.49922E-7

Prueba de la Mediana de Mood para Fósforo Total por sistema

Total n = 105

Gran mediana = 0.126

| sistema | Tamaño de Muestra | n<= | n> | Mediana | LC inferior 95.0% | LC superior 95.0% |
|---------|-------------------|-----|----|---------|-------------------|-------------------|
| 1 | 53 | 35 | 18 | 0.103 | 0.0602194 | 0.131465 |
| 2 | 42 | 18 | 24 | 0.15 | 0.105431 | 0.248416 |
| 3 | 10 | 0 | 10 | 9.168 | 4.10659 | 10.872 |

Estadístico = 16.3019 Valor-P = 0.000288457



ANOVA Simple - Fosfatos del agua por sistema

Verificación de Varianza

| | Prueba | Valor-P |
|----------|---------|---------|
| Levene's | 41.3151 | 0.0 |

Prueba de Kruskal-Wallis para Fosfatos por sistema

| sistema | Tamaño Muestra | Rango Promedio |
|---------|----------------|----------------|
| 1 | 50 | 45.88 |
| 2 | 40 | 45.025 |
| 3 | 10 | 95.5 |

Estadístico = 26.7623 Valor-P = 0.00000154401

Prueba de la Mediana de Mood para Fosfatos por sistema

Total n = 100

Gran mediana = 0.04

| sistema | Tamaño de Muestra | n<= | n> | Mediana | LC inferior 95.0% | LC superior 95.0% |
|---------|-------------------|-----|----|---------|-------------------|-------------------|
| 1 | 50 | 27 | 23 | 0.038 | 0.0265351 | 0.0518595 |
| 2 | 40 | 24 | 16 | 0.038 | 0.033273 | 0.044727 |
| 3 | 10 | 0 | 10 | 3.103 | 0.242622 | 4.0198 |

Estadístico = 11.8848 Valor-P = 0.00262578

ANOVA Simple – Nitrógeno Total del sedimento por sistema

Verificación de Varianza

| | Prueba | Valor-P |
|----------|---------|-----------|
| Levene's | 2.50883 | 0.0867414 |

Tabla de Medias para N sedimento por sistema con intervalos de confianza del 95.0%

| sistema | Casos | Media | Error Est. (s agrupada) | Límite Inferior | Límite Superior |
|---------|-------|-----------|----------------------------|-----------------|-----------------|
| 1 | 60 | 0.0686667 | 0.00937116 | 0.0528889 | 0.0844445 |
| 2 | 29 | 0.0844828 | 0.0134794 | 0.0617881 | 0.107177 |
| 3 | 9 | 0.357778 | 0.0241962 | 0.31704 | 0.398516 |
| Total | 98 | 0.099898 | | | |

Pruebas de Múltiple Rangos para N sedimento por sistema

Método: 95.0 porcentaje Tukey HSD

| sistema | Casos | Media | Grupos Homogéneos |
|---------|-------|-----------|-------------------|
| 1 | 60 | 0.0686667 | X |
| 2 | 29 | 0.0844828 | X |
| 3 | 9 | 0.357778 | X |

| Contraste | Sig. | Diferencia | +/- Límites |
|-----------|------|------------|-------------|
| 1 - 2 | | -0.0158161 | 0.0390893 |
| 1 - 3 | * | -0.289111 | 0.0617824 |
| 2 - 3 | * | -0.273295 | 0.0659491 |

* indica una diferencia significativa.



ANOVA Simple – Fósforo Extractable del sedimento por sistema

Verificación de Varianza

| | Prueba | Valor-P |
|----------|---------|--------------|
| Levene's | 12.6685 | 0.0000114169 |

Prueba de Kruskal-Wallis para P sedimento por sistema

| sistema | Tamaño Muestra | Rango Promedio |
|---------|----------------|----------------|
| 1 | 63 | 49.6032 |
| 2 | 39 | 57.8333 |
| 3 | 9 | 92.8333 |

Estadístico = 14.9138 Valor-P = 0.000577435

Prueba de la Mediana de Mood para P sedimento por sistema

Total n = 111

Gran mediana = 0.05

| sistema | Tamaño de Muestra | n<= | n> | Mediana | LC inferior 95.0% | LC superior 95.0% |
|---------|-------------------|-----|----|---------|-------------------|-------------------|
| 1 | 63 | 40 | 23 | 0.05 | 0.03 | 0.0579265 |
| 2 | 39 | 23 | 16 | 0.05 | 0.05 | 0.0611005 |
| 3 | 9 | 1 | 8 | 0.16 | 0.0507778 | 0.399222 |

Estadístico = 8.89315 Valor-P = 0.0117186

ANOVA Simple –MO del sedimento por sistema

Verificación de Varianza

| | Prueba | Valor-P |
|----------|---------|------------|
| Levene's | 7.04439 | 0.00135171 |

Prueba de Kruskal-Wallis para M_O_ sedimento por sistema

| sistema | Tamaño Muestra | Rango Promedio |
|---------|----------------|----------------|
| 1 | 62 | 47.629 |
| 2 | 36 | 54.4722 |
| 3 | 9 | 96.0 |

Estadístico = 19.113 Valor-P = 0.0000707411

Prueba de la Mediana de Mood para M_O_ sedimento por sistema

Total n = 107

Gran mediana = 3.23

| sistema | Tamaño de Muestra | n<= | n> | Mediana | LC inferior 95.0% | LC superior 95.0% |
|---------|-------------------|-----|----|---------|-------------------|-------------------|
| 1 | 62 | 39 | 23 | 2.885 | 2.63 | 3.36 |
| 2 | 36 | 16 | 20 | 3.485 | 2.27489 | 5.26603 |
| 3 | 9 | 0 | 9 | 7.69 | 3.95167 | 17.3483 |

Estadístico = 13.5 Valor-P = 0.00117089



ANOVA Simple – Nitrógeno Total del suelo por sistema

Verificación de Varianza

| | Prueba | Valor-P |
|----------|---------|-------------|
| Levene's | 8.08977 | 0.000404316 |

Prueba de Kruskal-Wallis para N suelo por sistema

| sistema | Tamaño Muestra | Rango Promedio |
|---------|----------------|----------------|
| 1 | 112 | 93.5045 |
| 2 | 93 | 154.887 |
| 3 | 24 | 60.75 |

Estadístico = 61.6925 Valor-P = 0.0

Prueba de la Mediana de Mood para N suelo por sistema

Total n = 229

Gran mediana = 0.31

| sistema | Tamaño de Muestra | n<= | n> | Mediana | LC inferior 95.0% | LC superior 95.0% |
|---------|-------------------|-----|----|---------|-------------------|-------------------|
| 1 | 112 | 75 | 37 | 0.28 | 0.25 | 0.3 |
| 2 | 93 | 21 | 72 | 0.42 | 0.35 | 0.53 |
| 3 | 24 | 20 | 4 | 0.23 | 0.21 | 0.29 |

Estadístico = 51.4968 Valor-P = 6.57074E-12

ANOVA Simple – Fósforo Extractable del suelo por sistema

Verificación de Varianza

| | Prueba | Valor-P |
|----------|---------|-------------|
| Levene's | 25.8963 | 5.76947E-11 |

Prueba de Kruskal-Wallis para P suelo por sistema

| sistema | Tamaño Muestra | Rango Promedio |
|---------|----------------|----------------|
| 1 | 126 | 71.869 |
| 2 | 108 | 176.144 |
| 3 | 24 | 222.167 |

Estadístico = 155.073 Valor-P = 0.0

Prueba de la Mediana de Mood para P suelo por sistema

Total n = 258

Gran mediana = 0.17

| sistema | Tamaño de Muestra | n<= | n> | Mediana | LC inferior 95.0% | LC superior 95.0% |
|---------|-------------------|-----|----|---------|-------------------|-------------------|
| 1 | 126 | 117 | 9 | 0.11 | 0.11 | 0.13 |
| 2 | 108 | 14 | 94 | 0.23 | 0.22 | 0.24 |
| 3 | 24 | 0 | 24 | 0.335 | 0.23 | 0.4 |

Estadístico = 175.811 Valor-P = 0.0



ANOVA Simple – MO del suelo por sistema

Verificación de Varianza

| | <i>Prueba</i> | <i>Valor-P</i> |
|----------|---------------|----------------|
| Levene's | 5.27428 | 0.00583979 |

Prueba de Kruskal-Wallis para M_O_suelo por sistema

| <i>sistema</i> | <i>Tamaño Muestra</i> | <i>Rango Promedio</i> |
|----------------|-----------------------|-----------------------|
| 1 | 84 | 94.5476 |
| 2 | 108 | 122.981 |
| 3 | 16 | 32.0 |

Estadístico = 35.7068 Valor-P = 1.76345E-8

Prueba de la Mediana de Mood para M_O_suelo por sistema

Total n = 208

Gran mediana = 7.02

| <i>sistema</i> | <i>Tamaño de Muestra</i> | <i>n<=</i> | <i>n></i> | <i>Mediana</i> | <i>LC inferior 95.0%</i> | <i>LC superior 95.0%</i> |
|----------------|--------------------------|---------------|--------------|----------------|--------------------------|--------------------------|
| 1 | 84 | 46 | 38 | 6.95 | 5.83 | 7.61279 |
| 2 | 108 | 44 | 64 | 8.12 | 6.99 | 9.01 |
| 3 | 16 | 16 | 0 | 3.685 | 2.17 | 5.64 |

Estadístico = 20.3962 Valor-P = 0.0000372405