



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES ZARAGOZA

AZUFRE EN EL SISTEMA AGUA-SEDIMENTO-SUELO PARA AMBIENTES RIBEREÑOS ASOCIADOS A DIFERENTES CONDICIONES DE SUELO

TESIS

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE

BIÓLOGO

PRESENTA:

MASCOT GÓMEZ ERNESTO

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

ASESOR: DR. GERARDO CRUZ FLORES



SEPTIEMBRE 2013



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

“No te rindas, que la vida es eso,
continuar el viaje, perseguir tus sueños...”

M. Benedetti

Toda manifestación de vida merece respeto.
Por favor, pensemos en nosotros,
en nuestro mundo, es el único que tenemos.

Puedes cerrar los ojos a las cosas que no quieres ver.
Pero puedes no puedes cerrar tu corazón
a las cosas que no quieres sentir.

Johnny Depp

DEDICATORIAS

A mi padre Raymundo Mascot Manzano†.

Que durante su vida se esforzó por brindarme lo mejor, por sus sabios consejos por encaminarme en este difícil camino y que, a pesar de todo sigue presente en cada una de mis decisiones.

A mi madre, Rebeca Gómez Crespo.

Por estar siempre conmigo, por su ayuda, por sus consejos y sapiencia, por ser el ejemplo de lucha que siempre me motiva a no rendirme en el camino y sobre todo, por el esfuerzo que pone en cada uno de los problemas que se me presentan.

A mis hermanos, Janett, Raymundo, David y Daniel, que a pesar de no entender lo que hago me apoyan incondicionalmente.

AGRADECIMIENTOS

A mi gloriosa y siempre amada Universidad Nacional Autónoma de México, por dejarme ser uno de sus miles de hijos que saldrá al mundo a enorgullecer esta maravillosa casa de estudios.

A mi Facultad de Estudios Superiores Zaragoza, por cobijarme bajo su protección y ser mi segundo hogar durante todo este tiempo, por brindarme los conocimientos necesarios para salir a enfrentarme al mundo, por permitirme compartir esta etapa de mi vida con excelentes profesores, amigos y compañeros.

A mi buen amigo y profesor, el Dr. Gerardo Cruz flores, por el tiempo brindado con sus anécdotas, sus enseñanzas, sus consejos y por brindarme todo su conocimiento para ser un excelente profesionista, por todos esos momentos en los que me ayudo por mínima que fuera la duda.

A la profesora Eloísa, por su tiempo, por todas esas palabras de aliento que tanto necesitaba en momentos difíciles, por sus consejos y su ayuda en la conclusión de este proyecto.

A mis tutores, la profesora Elvia Santos y Verónica Mitzui, por sus aportaciones y observaciones y ayuda en este trabajo, a mi amigo y profesor Armando Cervantes, por su ayuda y sapiencia en sus palabras de motivación para concluir este trabajo.

A Abril Rebollar Ruiz, por ser parte importante en mi vida, tu apoyo, tus consejos, esas noches de desvelos en que me explicabas, por motivarme a buscar siempre más, a superarme y sobre todo por todo el amor y cariño que me brindas aun en momentos de desesperación.

A mis amigos, compañeros y hermanos de carrera, a la siempre dulce y amable Ely, a mi amiga Lisset, a mi Naye querida, a la siempre alegre y enajenada Norma, a mi fiel amigo Panchito, a todos ustedes que me acompañaron en esta etapa de la vida, por todos esos grandes momentos que compartimos llenos de risas, tristezas, presiones y locuras vividas tanto en la facultad como en cada salida a campo, por todas esas comidas compartidas, perfiles realizados con caídas, accidentes y muchas anécdotas.

A mis compañeros y amigos de laboratorio, la siempre optimista Laura, mi Kari tan dulce acompañada de la desesperada Dafne y no olvidemos a la trabajadora de Alma y al siempre fiel Francisco, muchas gracias por su ayuda en los muestreos en campo, sus consejos y asesorías

en todas mis dudas (y miren que fueron muchas), todos ustedes fueron fundamentales para concluir este trabajo.

A todos los que me faltaron, amigos, profesores y compañeros, les doy las gracias, ya que de una u otra manera todos ustedes marcaron mi vida, incrementaron mis conocimientos y experiencias de vida.

DE CORAZÓN SE LOS AGRADEZCO

Ernesto Mascot Gómez

ÍNDICE

RESUMEN	1
INTRODUCCIÓN	2
ANTECEDENTES	4
MARCO TEÓRICO.....	7
a) Ciclo de azufre.....	7
a) Azufre en agua.....	9
b) Azufre en suelo.....	10
c) Azufre en sedimento	10
d) Cuenca del Valle de México	11
e) Región de los volcanes Popocatépetl e Iztaccíhuatl	12
f) Río Amecameca.....	13
g) Ambientes ribereños.....	13
JUSTIFICACIÓN	16
OBJETIVOS.....	17
General:	17
Específicos:	17
HIPÓTESIS.....	17
ZONA DE ESTUDIO.....	18
Geología	18
Edafología.....	20
Climatología.....	20
Hidrología	21
Vegetación.....	21
MÉTODOS.....	23
MUESTREO.....	23
a) Agua.....	24
b) Suelo.....	24
c) Sedimento	25
PROCESAMIENTO DE MUESTRAS.....	26
a) Determinaciones <i>In situ</i>	26
b) Determinaciones en laboratorio	27
c) Procesamiento de datos.....	30
RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	31

1. AGUA	31
2. SUELO	38
3. SEDIMENTO	43
4. ANÁLISIS DE CORRELACIONES (AC) EN VARIABLES DE AGUA-SEDIMENTO-SUELO	45
5. ANÁLISIS DE COMPONENTES PRINCIPALES (ACP)	48
6. ANÁLISIS DE CORRELACIONES CANÓNICAS (ACC).....	52
7. ANÁLISIS DE CORRELACIÓN ENTRE COMPARTIMENTOS DE AZUFRE	53
CONCLUSIONES	55
REFERENCIAS.....	56

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Ciclo biogeoquímico del azufre.	9
Figura 2. Distribución de los sitios de estudio.....	19
Figura 3. Sitios de estudio..	23
Figura 4. Muestreo de agua.	24
Figura 5. Diagrama de la toma de muestras de suelo y sedimento.....	24
Figura 6. Muestreo de suelo.	25
Figura 7. Comportamiento del pH en agua.....	34
Figura 8. Comportamiento del OD y su relación con los STS.	35
Figura 9. Comportamiento del OD en relación con los STD.....	36
Figura 10. Comportamiento del COP.	37
Figura 11. Comportamiento de los SO_4^{2-} en relación con el pH.....	38
Figura 12. Comportamiento de la D.A. y % de humedad con base al uso de suelo.....	39
Figura 13. Comportamiento del pH en relación con la MOS.	40
Figura 14. Relación entre la MOS y el Fósforo.	40
Figura 15. Relación Nitrógeno-MOS.....	41
Figura 16. Comportamiento del azufre y su relación con la MOS.....	42
Figura 17. Comportamiento de la AAS en relación con la MOS.....	43
Figura 18. Relación MOSed-pH.	44
Figura 19. Comportamiento entre la conductividad eléctrica del agua, suelo y sedimento.	44
Figura 20. Comportamiento del azufre en sedimento.....	45
Figura 21. Comportamiento del primer y segundo componente.	50
Figura 22. Comportamiento del tercer componente.....	51

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 1. Sitios de muestreo.....	30
Cuadro 2. Propiedades físicas y químicas determinadas en agua.....	31
Cuadro 3. Análisis de Componentes Principales.....	46
Cuadro 4. Pesos de los Componentes Principales.....	47
Cuadro 5. Correlaciones Canónicas.....	51
Cuadro 6. Coeficientes para las Variables Canónicas del Primer Conjunto.....	51
Cuadro 7. Coeficientes para las Variables Canónicas del Segundo Conjunto.....	51
Cuadro 8. Correlaciones entre los contenidos de azufre.....	52

RESUMEN

La alteración del ambiente ribereño se produce fácilmente, ya que las especies de estas comunidades responden al menor cambio de las propiedades físicas, químicas y biológicas del ecosistema. Ante este tipo de amenazas que afectan la disponibilidad de nutrientes en el sistema, se estudió la variación en las concentraciones de azufre en el agua, suelo y sedimento de ambientes ribereños sometidos a diferente uso de suelo. Los resultados encontrados señalan que existen variables que dependen del grado de conservación de cada sitio. Para el agua, la temperatura se encontró en un amplio intervalo, notándose que sus valores se incrementan a medida que el gradiente altitudinal disminuye y la vocación del suelo cambiaba. El pH se encontró en un intervalo de 6.9 hasta 8.1 localizándose los valores más bajos en los sitios con menor grado de perturbación. El OD se encuentra en concentraciones adecuadas en los sitios con nula o poca contaminación antrópica, mientras que en V. Libramiento, el más contaminado, la demanda de oxígeno fue más elevada lo cual impide disminuir su concentración. Las concentraciones de azufre como sulfato mostraron que las localidades con mejor grado de conservación presentaron valores por debajo de los 0.2 mg SO_4^{2-} , mientras que el sitio con mayor grado de perturbación las concentraciones encontradas fueron superiores a los $7.4 \text{ mg SO}_4^{2-} \text{ L}^{-1}$. Los resultados para las variables determinadas en suelo fueron los siguientes. El pH se encuentra en valores que van de 6.1 a 4.6 para el pH activo, clasificándose de moderado a fuertemente ácido. La MOS se ve afectada al modificar el uso del suelo, los sitios con mejor estado de conservación se clasificaron con alto a muy alto contenido de MOS, mientras que los sitios más perturbados se encontraron con muy bajo porcentaje de MOS. Para el azufre disponible se encontró que las concentraciones son adecuadas al estar dentro del rango de 0.2 a 2 por ciento de azufre. Se encontró que en los sitios con mejor estado de conservación la actividad arilsulfatasa fue superior debido a que no existe un aporte externo de azufre que impida el desarrollo de esta enzima, mientras que en los sitios donde el desarrollo de actividades antrópicas modifican las condiciones naturales del sistema la actividad enzimática se vio reducida al existir un aporte de fertilizantes que en su fórmula contienen el azufre necesario para que el sistema pueda subsistir. Finalmente, para el sedimento los resultados señalaron que el contenido de MOSed en los sitios mejor conservados son inferiores a los localizados en los puntos más perturbados. Los resultados también indican que el pH está inversamente relacionado con la MOSed y los resultados encontrados para azufre total en sedimento muestran que este elemento se encuentra en concentraciones adecuadas.

INTRODUCCIÓN

Los Ciclos Biogeoquímicos se definen en función del recorrido que realizan los elementos químicos en la naturaleza. Estos elementos pasan por los diferentes subsistemas que van desde la atmósfera, hidrósfera, geósfera, hasta los seres vivos (biósfera), regresando nuevamente a la atmósfera, dando lugar a una trayectoria cíclica.

Los ciclos no se desarrollan a una velocidad uniforme, sino que algunas etapas requieren períodos más prolongados que otras. Con base en esto se pueden diferenciar dos tipos de ciclos:

- Gaseosos: el principal reservorio del elemento se encuentra en la atmósfera, son ciclos relativamente rápidos. Ejemplos de ellos son los ciclos del carbono, oxígeno y nitrógeno.
- Sedimentarios: el principal reservorio se halla en la geósfera. Son ciclos lentos por la dificultad de acceso a la reserva del elemento. Ciclos del fósforo y azufre.

En cada ciclo biogeoquímico se pueden distinguir tres fases:

- Fase geoquímica: la materia fluye entre sistemas abióticos (atmósfera, hidrosfera, litosfera).
- Fase bioquímica: comprende la transferencia de materia orgánica dentro de la biocenosis.
- Fase biogeoquímica: paso de la materia orgánica a inorgánica y viceversa (Universidad de Navarra, 2000).

El azufre es un macronutriente esencial para el crecimiento y desarrollo de los organismos vivos por su participación en la síntesis de proteínas, juega un papel muy importante en la activación de la enzima nitrato reductasa necesaria para la conversión de nitratos a amonio utilizada en la síntesis de aminoácidos de los organismos vegetales. Los aminoácidos y la formación del enlace S-S son vitales para el mantenimiento de la estructura cuaternaria de las proteínas (Lazcano, 1998). Este elemento es uno de los más abundantes sobre la Tierra y es esencial para los seres vivos (Benavides, 1998). Además de ser un componente básico de las proteínas, es uno de los considerados macronutrientes importante para el desarrollo de las plantas, su concentración en ellas varía entre 0.1 y 0.5% con base en peso seco y junto con los demás macronutrientes representan 99% de la biomasa (Marschner, 1995).

Diversos factores como la erosión hídrica, la deforestación y el desgaste de bancos ribereños afectan la disponibilidad de nutrimentos en el sistema agua-suelo-sedimento siendo el azufre uno de los nutrientes afectados.

La erosión hídrica tiene efectos directos e indirectos que van desde las pérdidas de nutrimentos y materia orgánica en el suelo hasta la contaminación física y química de los recursos hídricos. En las pérdidas de nutrimentos también incide el efecto selectivo de la erosión, ya que comúnmente son las fracciones más finas y reactivas (arcillas y materia orgánica) las que son movilizadas por el agua de lluvia y de escurrimiento en proporciones mayores a las existentes en el suelo original. En esta selectividad, juega un papel importante el efecto de la cobertura vegetal, la cual incide de importante manera en la proporción de suelo y de nutrimentos que se conservan o pierden, de igual forma que la intensidad de las lluvias en la región (Sepúlveda *et al.*, 2009).

En las últimas décadas, la deforestación en países tropicales ha causado severas pérdidas de suelos en áreas montañosas y un aumento en la tasa de sedimentos transportados por los ríos. Este tipo de erosión consiste en el desprendimiento de partículas o agregados del suelo de los bordes de ríos o arroyos por el flujo de agua que, junto con la inestabilidad del suelo produce el deterioro de las áreas de bordes fluviales. La erosión de los bancos ribereños está determinada por el tamaño del canal, el caudal, la velocidad de la corriente y el régimen de transporte (Sepúlveda *et al.*, 2009).

La zona ribereña, es la región de transición donde se llevan a cabo un sin número de interacciones entre los medios terrestre y acuático, en las zonas de montaña estos ecosistemas son muy frágiles debido a las lluvias intensas, las fuertes pendientes y los suelos poco firmes que dan lugar a fuertes escorrentías de superficie, erosiones y deslizamientos de tierras. Estas áreas de ribera generalmente son ricas en nutrimentos dado que el sedimento arrastrado por la corriente, transporta elementos que con el tiempo ayudan a generar un rico suelo aluvial. Debido al movimiento y las características del agua, también se facilita el reciclamiento de los nutrientes ayudando en el crecimiento de las plantas (Granados *et al.*, 2006).

ANTECEDENTES

A pesar de la importancia del ambiente ribereño para la funcionalidad del ecosistema, existen pocos trabajos que hablan de esta interacción en la zona montañosa del país. En la cuenca del Valle del México y específicamente en el área del Parque Nacional Izta-Popo, es importante destacar la zona riparia para fomentar su preservación. De igual manera el estudio del azufre no ha tenido gran relevancia a pesar de la importancia nutrimental que representa para la vegetación.

En 2006, Granados realizó un trabajo bibliográfico en el cual describe ampliamente las características que tienen los ambientes ribereños, señalando la importancia que tienen estos ecosistemas al afirmar que son una zona de amortiguamiento ante factores físicos y químicos que alteran la estabilidad del bosque. Entre lo reportado señala asociaciones de plantas específicas del ambiente ribereño, las especies de microflora y microfauna que se desarrollan en este ambiente debido a las condiciones específicas de estos sistemas, así como factores que lo alteran y sus posibles consecuencias.

En 2009, Sepúlveda *et al.*, realizaron una investigación en los pantanos de Centla, en donde el objetivo fue determinar la importancia que tiene la vegetación ribereña ante la erosión fluvial, para ello utilizaron tres tipos de vegetación, arbórea, arbustiva y pastizales, Los resultados señalaron que el menor efecto erosivo se da en suelos donde la vegetación dominante fueron los matorrales. Los sitios en donde el grado de erosión fue superior se relacionaron suelos con una textura arenosa, la cual va acompañada de una baja densidad arbórea, alta dispersión y falta de asociación con otras especies vegetales.

Para el 2010, la importancia de la vegetación en los ambientes ribereños es tratada por Díaz y colaboradores en su trabajo “Composición florística del bosque ribereño del río San José, Reserva Forestal de Imataca, estado Bolívar, Venezuela” en el cual hacen una descripción de la estructura del bosque ribereño encontrando que estos ecosistemas albergan una mayor diversidad de especies vegetales en comparación con las encontradas en los bosques fuera de la zona riparia.

En México son escasos los estudios realizados en las zonas ribereñas, sin embargo, debido a la importancia que presentan estos sistemas en la naturaleza, cada día aumentan las investigaciones al respecto. En 2011, Briones realizó la caracterización de la vegetación ribereña del río Magdalena en el D.F., encontrando que las actividades antropogénicas como

son; el cambio de uso forestal del suelo a uso recreativo, la creación de caminos de terracería, el desmonte de vegetación para crear presas de gavión, son factores determinantes en el deterioro de la zona ribereña. También señala que, debido al relieve que posee la zona estudiada la erosión hídrica incrementa el aporte de sedimentos al afluente, lo cual disminuye la cantidad y calidad de sustrato para el desarrollo de vegetación ribereña.

En cuanto a los estudios sobre el azufre, en 1974, Pérez realizó una investigación en suelos de Costa Rica bajo diferentes condiciones de uso de suelo, encontrando que no solo las variaciones en el uso de suelo afectan las concentraciones de este nutrimento, sino que, factores ambientales como la precipitación y el nivel de escorrentía contribuyen en la concentración del azufre.

En 1978, Bornemisza *et al.*, con el objetivo de ampliar el conocimiento sobre la variación en las concentraciones del azufre en el suelo y las cantidades requeridas de este elemento para el cultivo de sorgo, efectuaron una investigación en la que relacionaron las concentraciones encontradas de este elemento con propiedades del suelo, encontrando que a pesar del aporte que brindan los fertilizantes de este elemento, si el suelo cuenta con buenas concentraciones de azufre, no se observará respuesta en el crecimiento de las plantas.

En 1985, Lopéz y Marvez estudiaron las necesidades nutrimentales del azufre en diferentes plantas de café cultivadas en Costa Rica y encontraron que la variedad de la especie y la posición en que se encuentran las hojas van a determinar el contenido de café en cada una de ellas. También encontraron que los periodos con mayor contenido de azufre fueron el de prefloración y maduración del grano, mientras que durante y después de la cosecha fueron el momento con menor contenido de azufre dentro de la planta.

En 1998, Figueroa *et al.*, realizaron una investigación para determinar la capacidad oxidativa del azufre elemental en diferentes suelos de la zona centro-sur de Chile relacionando las propiedades físicas y químicas de cada suelo con su nivel oxidativo, para ello se establecieron condiciones controladas de humedad y temperatura. Los resultados de esta investigación arrojaron que las diferencias entre las propiedades físicas y químicas, así como el uso agrícola del suelo inciden de manera directa o indirecta sobre la biomasa microbiana lo que va a influir determinantemente en la oxidación de S elemental.

López y colaboradores en el año 2006 realizaron una investigación sobre la relación existente entre el carbono y el azufre en sedimentos estuarinos, señalando la variación espacio-temporal en la disponibilidad de estos elementos en sedimentos, así como los factores que alteran la disponibilidad de este elemento dentro del estuario de los ríos Tinto y Odiel en España.

En 2009, Graniel y colaboradores identificaron el origen de sulfatos en el agua subterránea evaluando su comportamiento espacio-temporal en la Sierrita de Ticul en el estado de Yucatán, México. El resultado de su investigación afirma que en la época de lluvias se ve incrementada la concentración de sulfato y las zonas donde sucede esto se localizaron alrededor de las franjas agrícolas, esto debido a la infiltración de los fertilizantes sulfatados utilizados en la agricultura y no a la dilución de los yesos ubicados en los entornos como lo han mencionado algunos autores

En 2009 Baltazar presenta un estudio sobre la actividad enzimática arilsulfatasa, sulfatos del suelo y el azufre contenido en diferentes especies de pino y su relación con el gradiente altitudinal, encontrando que la actividad arilsulfatasa está relacionada con otras propiedades físicas y químicas del suelo como son la densidad aparente, el contenido de materia orgánica, entre otros. De igual manera, la altitud es un factor que se encuentra relacionado con la disponibilidad de azufre en suelo y con la actividad enzimática.

El primer trabajo sobre ambientes ribereños realizado dentro del Parque Nacional Izta-Popo lo realizó Ayala en el año 2011, en él integra parámetros de suelo, agua y vegetación con el objetivo de conocer la relación que existe entre estos compartimentos encontrando que la zona ribereña mantiene una importante conexión entre cada sistema y las variables estudiadas, y señala al ambiente ribereño como un elemento clave para evaluar la funcionalidad tanto de los ríos como del suelo estudiado.

MARCO TEÓRICO

El azufre es muy abundante en la corteza terrestre, se encuentra como: azufre elemental, sulfuros minerales, sulfatos, ácido sulfúrico en el gas natural y como azufre orgánico en aceites combustibles y carbón, también se presenta en rocas primarias bajo la forma de sulfuros, y tiende a estar en cantidades mayores en las rocas ígneas básicas. Estos sulfuros se oxidan fácilmente en suelos bien aireados (Russell y Russell, 1968).

El azufre es un componente básico de proteínas, enzimas, vitaminas y otros compuestos, por lo que reviste una gran importancia como nutrimento en la mayoría de los organismos (Pérez, 1974). Aproximadamente un 40% de las enzimas (entre ellas ferredoxinas, nitrogenasas) dependen para su actividad catalítica de la presencia de grupos sulfidrilo (SH). Estos grupos SH proporcionan sitios de unión para metales tóxicos o fisiológicamente importantes, se relacionan con la destoxificación de diversas drogas y se ven involucrados en diversas reacciones redox debido a su relativa facilidad de oxidación. También se sabe que la estructura terciaria y cuaternaria de muchas proteínas es resultado de la presencia de puentes disulfuro (S-S) formados por la oxidación de grupos SH de la cisteína (Benavides, 1998).

a) Ciclo de azufre

El ciclo biogeoquímico del azufre es muy complejo si se toman en cuenta los diferentes estados de oxidación que puede presentar dicho elemento, así como el hecho de que algunas de sus transformaciones proceden tanto por vías bióticas como abióticas. Sin embargo, aun cuando el azufre existe en varios estados de oxidación, sólo compuestos sulfurados con número de oxidación: -2, 0 y +6 se encuentran en cantidades significativas en la naturaleza (Fuentes y Massol-Deyá, 2002).

La reserva principal de azufre se encuentra, en forma de sulfatos en la hidrósfera y en los yesos y piritas de la litósfera. En la atmósfera, el azufre se encuentra en forma de:

- Sulfuro de hidrógeno (H_2S), que proviene de la actividad volcánica, la descomposición de la materia orgánica y del océano por la acción de ciertas algas.
- Dióxido de azufre (SO_2) y sulfatos (SO_4^{2-}) originados por la actividad volcánica y, mayoritariamente, por el uso de combustibles fósiles por el hombre.
- Sulfatos contenidos en las microgotas de aerosol de agua marina que los vientos transportan desde el mar al interior de los continentes.

Estos compuestos reaccionan con el vapor de agua de la atmósfera transformándose en ácido sulfúrico (H_2SO_4) que vuelve a la tierra como lluvia, formando parte de la llamada lluvia ácida. En la litósfera, el azufre se encuentra en su mayoría como yeso (sulfato de calcio hidratado), que se forma debido a la evaporación de aguas marinas ricas en sulfatos (el mar es el principal reservorio de este bioelemento). Otro cúmulo importante de azufre en el suelo son los sulfuros de hierro (piritas), que quedan en sedimentos arcillosos; estos pueden ser devueltos a la atmósfera por la actividad volcánica o mediante la quema de combustibles fósiles. Es también, en sus diferentes formas gaseosas, un elemento importante en la regulación del nivel de O_2 en la atmósfera (Benavides, 1998).

El azufre, en forma mineral y como sulfatos orgánicos, lo utilizan todos los organismos vivos. El sulfato es reducido a grupos sulfhídricos (-SH) en la síntesis proteica, con una producción de oxígeno, que se utiliza en las reacciones oxidativas metabólicas. Al morir los organismos, sus restos proteicos son descompuestos y reducidos a sulfuro de hidrógeno por la acción de bacterias descomponedoras anaerobias, como *Aerobacter*. El interés del ciclo del azufre en las aguas dulces se extiende más allá de las demandas nutritivas de los seres vivos, las cuales casi siempre son satisfechas por la abundancia de este anión. La descomposición de la materia orgánica que contiene azufre proteínico, y la reducción anaeróbica del sulfato en aguas estratificadas contribuyen a alterar las condiciones, modificando de manera importante el ciclo de otros nutrimentos, la productividad y la distribución de los organismos (Wetzel, 2001).

El sulfuro de hidrógeno (H_2S) del suelo o del agua puede oxidarse de nuevo a SO_4^{2-} por la acción bacteriana:

- En condiciones aerobias es oxidado por bacterias autótrofas quimiosintéticas (*Thiobacillus*).
- En condiciones anaerobias puede ser aprovechado por bacterias fotosintéticas (fotosíntesis anoxigénica).

En el suelo existen otras bacterias, las sulfobacterias o bacterias sulfatorreductoras que, en condiciones anaerobias, devuelven los sulfatos a sulfuros (*Desulfovibrio*). Parte del H_2S , tanto en medios terrestre como acuáticos puede quedar inmovilizado en forma de piratas o formando parte del petróleo o carbón. Este azufre puede volver a la atmósfera por la actividad volcánica, actividad biológica y la quema de combustibles fósiles.

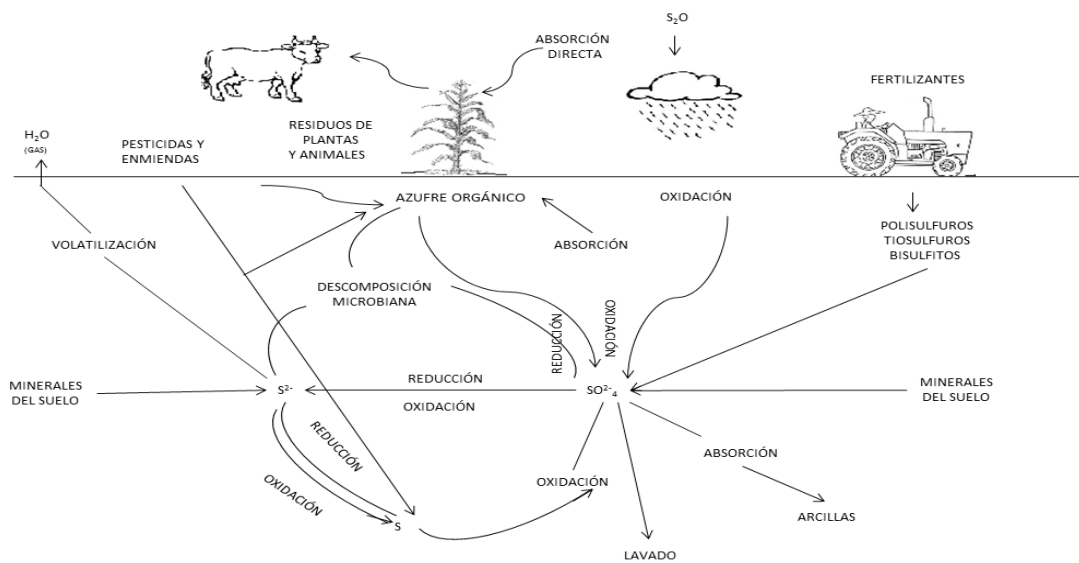


Figura 1. Ciclo biogeoquímico del azufre.

a) Azufre en agua

Los compuestos de azufre en las aguas naturales proceden de las rocas, sedimento, fertilizantes y del transporte atmosférico por la precipitación y deposición del material seco, siendo ésta última fuente de gran importancia debido al incremento en la combustión de productos industriales. Igual a otros nutrientes, el azufre tiene un ciclo dentro de los sistemas acuáticos presentándose en dos formas inorgánicas; el sulfuro de hidrógeno y el ion sulfato (Ramos, 2001).

Los sulfatos tienen enorme importancia ambiental porque forman compuestos con muchos agentes tóxicos, material orgánico y con el hidrógeno en aguas superficiales, constituyéndose como el primer agente acidificante en muchos ríos. La presencia de los sulfuros es común en las aguas residuales debido a la descomposición de la materia orgánica, a los residuos industriales, a la reducción bacteriana en los sulfatos; aunque también se encuentran a menudo en aguas subterráneas como son los manantiales y en algunas descargas de aguas residuales. La presencia del sulfuro de hidrógeno puede ser asociada con los procesos de descomposición del suelo; mientras que los sulfatos se distribuyen ampliamente en la naturaleza, siendo los drenados de minas una de sus principales fuentes por la oxidación de la piritita (De anda *et al.*, 2004).

b) Azufre en suelo

En los suelos forestales, gran parte del azufre se acumula en la materia orgánica de los horizontes superiores. A pesar de que este elemento se utiliza aproximadamente en las mismas cantidades que el fósforo, se encuentra más disponible en el suelo, debido a las bacterias que oxidan y pueden convertir el azufre libre y el que existe en los compuestos orgánicos, en sulfato y ácido sulfúrico (Pritchett, 1991).

El azufre orgánico presente en la materia orgánica proviene de los residuos vegetales, animales y microbianos que se incorporan al suelo; consiste en una parte importante de proteínas y sus derivados, como los aminoácidos, varios de los cuales fueron detectados en extractos de suelos (Bornemisza, 1987).

La mayor parte del azufre potencialmente mineralizable se encuentra en formación del ácido fúlvico, en ácido húmico asociado con arcillas y en las huminas de menos de dos micrones (Stewart y Saggar, 1979). En los suelos volcánicos, la mineralización del azufre depende del porcentaje de arcilla, disminuyendo cuando está aumenta. Se considera que esto se debe a la reabsorción de SO_4^{-2} por los coloides del suelo (Blasco, 1972).

La mayor parte del azufre inorgánico se encuentra en forma de sulfatos; solo en condiciones de anaerobismo, como ocurre en los suelos anegados y pantanosos, aparecen otras fracciones importantes: por ejemplo; los sulfuros y la pirita. Por lo general, al establecer ambientes aeróbicos, los sulfuros se oxidan rápidamente en sulfatos, junto con una fuerte acidificación de los suelo. En aquellos bien aireados, solo se encuentran algunos sulfuros poco solubles, derivados principalmente de los minerales primarios (Bornemisza, 1987).

Los depósitos de azufre más abundantes se encuentran en sedimentos y rocas en forma de minerales sulfatados (yeso, CaSO_4) y minerales sulfurados (pirita, FeS_2). El azufre, también en sus diferentes formas gaseosas, es un elemento importante en la regulación del nivel de O_2 en la atmósfera y se considera que la fuente primaria de azufre para la biosfera se encuentra en los océanos en forma de sulfato inorgánico (Huxtable, 1986).

c) Azufre en sedimento

El transporte de sedimentos está fuertemente relacionado con la hidrología y la geomorfología de la cuenca. Las variaciones que se producen son espaciales y temporales. La variación

espacial viene marcada, sobre todo, por la naturaleza y el tamaño del sedimento, ya que los tamaños gruesos (grava y arena) tendrán menor movilidad que los finos (limos y arcillas) que son transportados como carga suspendida. Las variaciones temporales estarán marcadas principalmente por la climatología y el régimen de los ríos. Los ríos de características torrenciales arrastran grandes cantidades de sedimentos por lo que se establecen variaciones en la composición de sus aguas.

Cuando el oxígeno y el nitrógeno se encuentran en mínima concentración en los sedimentos del agua dulce, el sulfato se convierte en un importante aceptador de electrones en la degradación de la materia orgánica (Hordijk, 1989).

El azufre en sedimento necesita de un ambiente anaerobio de gran complejidad y ampliamente distribuido, generalmente bajo una zona oxidada de sedimentos de espesor variable, constituyendo un medio aerobio y químicamente bajo un estado reducido. En los sedimentos se puede tener la presencia de minerales como la mackinawita, greigita y piritita (Ortega y Villalva, 1986).

d) Cuenca del Valle de México

La Cuenca del Valle de México (CVM) se encuentra localizada en la parte más elevada de la Mesa Central y tiene una superficie de 9,600 Km² aproximadamente, en donde, la mayor parte de la superficie corresponde al Estado de México (50%), Hidalgo (26.5%), el Distrito Federal (13.8%), Tlaxcala (8.7%) y Puebla (1.0%).

La CVM se encuentra rodeada de grandes montañas y volcanes entre los que destacan el Popocatepetl, Iztaccíhuatl y el Ajusco; así como de una cadena de sierras. Su ubicación privilegiada y sus abundantes recursos hídricos propician que en la CVM se concentre una gran cantidad de la población del Valle de México, no solo en la orillas del área lacustre, sino en las montañas que la circundan. Algunos estudios antropológicos sobre los asentamientos prehispánicos estimaban que a principios del siglo XVI se asentaban un millón de habitantes en esta zona. En los últimos 500 años, la cuenca y la ciudad de México han sufrido uno de los cambios urbanísticos y ecológicos más radicales del planeta; solo basta precisar que, el área lacustre a principios del siglo XVI estaba integrada por seis grandes lagos (Chalco, Xochimilco, Texcoco, San Cristóbal, Xaltocan y Zumpango) y fue sustituida a principios del siglo XIX por una megalópolis de 2 mil km² (Legorreta, 2009).

e) Región de los volcanes Popocatepetl e Iztaccíhuatl

México, con un territorio de 1 millón 972 mil 544 km², ocupa el cuarto lugar en diversidad biológica, que se distribuye en grandes y extensos sistemas montañosos de bosques holárticos, llanuras, áreas desérticas, selvas tropicales, lagunas, planicies costeras y manglares (Baltazar, 2009).

Debido a la importancia que representa en la zona, la región de los Volcanes Popocatepetl e Iztaccíhuatl forma parte del Programa Nacional las 60 montañas prioritarias de México de la Comisión Nacional Forestal, su cercanía a la Ciudad de México, los estados de México, Puebla, Morelos y Tlaxcala, la sitúa como un área estratégica para el centro del país, tan solo en agua; aproximadamente 17 millones de personas viven de la extracción de los acuíferos formados en las laderas de los volcanes. Los aportes en bienes vegetales, faunísticos y minerales han sido y son fundamentales para el desarrollo de las urbes próximas. Este territorio padece dos grandes amenazas: la natural, que es la actividad volcánica del Popocatepetl, y la antropogénica, que consistente en el deterioro de los ecosistemas por diversas actividades realizadas por el hombre (Contreras, 2001).

La subsistencia y el desarrollo de toda sociedad dependen del aprovechamiento sustentable de sus recursos naturales. Sin embargo, el ser humano, ha provocado la extinción de muchas especies animales y vegetales deteriorando así su entorno natural; en muchos casos, de manera irreversible. Por ello, aumenta la importancia de crear conciencia sobre la relación que existe entre los recursos naturales, la salud del planeta y la especie humana. Hoy en día, la naturaleza y su conservación son pilares del desarrollo sustentable y revisten importancia vital para ciudadanos, pueblos y gobiernos (CONAFOR, 2011).

Al igual que muchas de las áreas protegidas de nuestro país, la región de los Volcanes sufre amenazas de diversos tipos que atentan contra su conservación, la mayoría de ellas son realizadas por la acción del hombre, entre las más destacadas se presentan:

- Tala clandestina
- Ganadería no controlada
- Crecimiento urbano
- Cambio de los usos del suelo sin ordenamiento
- Extracción indiscriminada de plantas para consumo y uso medicinal

Actualmente, entre los impactos generados por actividades agrícolas, la erosión del suelo es considerada uno de los problemas más importantes en el manejo de ecosistemas, también ha sido señalada como la mayor fuente de contaminación difusa en ríos y lagunas. El movimiento de grandes masas de suelo para la implantación de cultivos, la creación de trillas por el ganado en los pastizales, el pisoteo de los márgenes desprotegidos de los ríos, además de la propensión natural del suelo a la erosión, donde se liberan sedimentos que impactan los cursos de agua (Bandeira, 2003).

f) Río Amecameca

Nace en las partes altas de los volcanes Iztaccíhuatl y Popocatepetl, y se nutre del agua proveniente de una gran cantidad de cañadas, barrancas y pequeños ríos o arroyos como Amilpulco, Chopanac, Amalacaxco, Nexpayantla, El Paraje, Tzonquinzinco, San José Corratitla, Alcalicán y Panoaya, en las cercanías de la población del mismo nombre. Su cuenca se caracteriza por lo accidentado de su topografía y por su cubierta altamente boscosa (Legorreta, 2009).

Alrededor del cauce que abastece agua a los Bienes Comunes de Amecameca y Chalma abundan bosques de pino-oyamel, estos bosques se encuentran en buen estado, y son atravesados por grandes barrancas pobladas por exuberantes franjas de bosque mesófilo. Desde el año 2001 la dirección del Parque Nacional está laborando para lograr la restauración y buena gestión del área. Desde entonces se ha logrado crear zonas de pastoreo semi-intensivo, provocando con esto que disminuya la compactación del suelo, se preserve el desarrollo de árboles jóvenes y la incidencia de incendios se vea reducida (Plan Hídrico, 2011).

g) Ambientes ribereños

A finales del siglo XVIII el científico Antonio Alzate escribió que, con la llegada de los españoles, las aguas, tierras y bosques de la región comenzaron a ser explotados en forma extensiva sin que se dejara los tiempos y espacios necesarios para el proceso de regeneración de las zonas afectadas (Glockner, 2002). La deforestación en países tropicales en las últimas décadas ha causado severas pérdidas de suelos en áreas montañosas y un aumento en la tasa de sedimentos transportados por los ríos. Los sedimentos provenientes de bancos ribereños pueden llegar a representar hasta el 85% de la carga sedimentaria en una cuenca (Sepúlveda, 2009).

El término ribereño designa la región de transición y de interacciones entre los medios terrestre y acuático, se caracteriza por una flora y fauna cuya composición está fuertemente determinada por la intensidad luminosa, el contenido en agua y la granulometría del suelo (Granados, 2006). La vegetación ribereña se distribuye en los costados del cuerpo de agua y no dentro de los mismos; es un indicador importante de deterioro ambiental debido a su fragilidad ante los cambios físicos, químicos y biológicos del ecosistema (Briones, 2011).

Los ríos que atraviesan los bosques están rodeados por la vegetación riparia que controla la temperatura y luminosidad en los cauces, aumenta la estabilidad de las orillas y proporciona cantidades importantes de detritos vegetales (madera y hojas muertas) los cuales reducen la velocidad de la corriente y crean zonas de calma favorables a la instalación de muchas especies animales (Granados, 2006).

Estos ecosistemas representan un importante acervo de biodiversidad dadas las condiciones particulares que presenta la vegetación asociada a los cuerpos de agua, su estructura y composición puede ser completamente diferente de las comunidades boscosas que rodea la zona de ribera, y por ello es importante su estudio de manera adicional. Así mismo, la alteración de estos ecosistemas se produce fácilmente, puesto que las especies ribereñas responden a la mínima alteración de las propiedades físicas, químicas y biológicas del ecosistema (Briones, 2011).

Las zonas ribereñas llevan a cabo una serie de funciones que proporcionan servicios ambientales, en ellos se incluyen (Daily, 1997):

- 1) Captación y provisión de agua para las actividades humanas.
- 2) Retención, infiltración y regulación de sedimentos, nutrimentos y contaminantes.
- 3) La regulación de inundaciones.
- 4) El mantenimiento de la biodiversidad.

En la actualidad, las zonas ribereñas se encuentran dentro de los ecosistemas más amplios y prolongadamente alterados, por la realización de actividades humanas que de manera directa o indirecta lo afectan intensamente. La tendencia al estado de deterioro permanente de estos ecosistemas se presenta por actividades como (Briones, 2011):

- a) La regulación del flujo a través de presas.
- b) La deforestación y en general el cambio de uso de suelo.
- c) El vertido de contaminantes directamente al agua o precipitados de la atmósfera.
- d) La emisión de gases de efecto invernadero que da como resultado el llamado cambio climático global.

JUSTIFICACIÓN

Los ecosistemas ribereños representan un importante acervo de biodiversidad y dadas las condiciones particulares de la vegetación ribereña asociada a diferentes cuerpos hídricos, es importante el estudio integrado del sistema agua-sedimento-suelo. Algunos de los problemas más evidentes de este micro hábitat son la erosión de suelo, pérdida de nutrimentos por arrastre en la corriente, aumento de escorrentías, infraestructura inadecuada, desmonte de tierras, contaminación.

Siendo el azufre un elemento abundante en la corteza terrestre e importante en la nutrición vegetal, la alteración en su concentración se produce fácilmente en estos ecosistemas ya que las comunidades ribereñas responden a la menor alteración de las propiedades físicas, químicas y biológicas del entorno. La disponibilidad del azufre en los ambientes riparios se ve influenciada por cambios en la vocación del suelo, el uso de fertilizantes, el contenido de residuos vegetales y animales, modificando el desarrollo del ciclo biogeoquímico de este elemento en la naturaleza, por ello es necesario realizar estudios en los que se demuestre la dinámica del azufre cuando se presentan diferentes cambios al interior del ecosistema.

OBJETIVOS

General:

- Evaluar los contenidos de azufre en el agua, suelo y sedimento en la subcuenca alta (2300 a 3700 m s.n.m.) del río Amecameca y su importancia como indicadores de calidad del suelo y agua de ambientes ribereños.

Específicos:

- Identificar mediante observación los factores naturales y antropogénicos que alteran el afluente.
- Caracterizar por sus propiedades físicas y químicas el agua, el sedimento y el suelo de ambientes ribereños con diferentes condiciones de uso de suelo.
- Determinar los contenidos de sulfatos en el agua
- Determinar los contenidos de azufre extractable en suelo.
- Determinar los contenidos de azufre total en sedimento.
- Determinar si la actividad enzimática arilsulfatasa (AAS) puede ser utilizada como indicador de calidad en suelos ribereños.
- Relacionar las concentraciones y contenidos de azufre de los compartimentos estudiados del sistema agua-suelo-sedimento.
- Analizar las variaciones del azufre en función del uso de suelo.

HIPÓTESIS

El azufre es un elemento esencial para el desarrollo de las plantas (Marschner, 1995). Factores como la erosión hídrica impactan al ambiente ribereño cambiando sus propiedades físicas y químicas, lo que repercute en la disponibilidad de los nutrimentos, incluyendo el azufre (Flores *et al.*, 2005).

Los contenidos del azufre en el sistema agua-sedimento-suelo, están en función del uso del suelo, aumentando su concentración y disponibilidad en sitios adyacentes al ambiente ribereño donde existe aporte de fertilizantes, mientras que, en los sitios donde las actividades agrícolas pecuarias son menos frecuentes, la concentración de este elemento se verá reducida.

ZONA DE ESTUDIO

El Parque Nacional abarca una superficie de 40,008 ha y se encuentra distribuido entre los estados de México, con el 71.14%; Puebla con 27.61%; y Morelos con 1.25%, ocupando parte de los Municipios de Texcoco, Ixtapaluca y Tlalmanalco, Amecameca, Atlautla y Ecatzingo en el Estado de México, así como Tlahuapan, San Salvador el Verde, Domingo Arenas, San Nicolás de los Ranchos y Tochimilco, en el estado de Puebla y Ocuituco, Yecapixtla y Tetela del Volcán en Morelos (CONANP, 2011).

El área de estudio se localiza a las orillas del río Amecameca, en el municipio del mismo nombre, en el Edo. de México, al interior del Parque Nacional Izta-Popo y la zona de influencia, donde el uso de la tierra, el desarrollo urbano y el turismo en zonas montañosas condicionan la cantidad y la calidad del agua de los ríos y los acuíferos del Valle de México.

Geología

Su formación inicia a mediados de la era Terciaria, cuando constituye lo que hoy se conoce como la Sierra Nevada, en un evento denominado Formación Xochitepec, el cual consiste en la acumulación de productos volcánicos por alrededor de 20 millones de años y que han formado estratos de considerable espesor, así como afloramientos en grandes superficies que se extienden hasta las aplanadas cumbres situadas al noreste del Iztaccíhuatl (Peña, 2009).

Durante el Plioceno se desarrollan en la base de la Sierra extensos abanicos aluviales, que se conocen como Formación Tarango, la cual consta de horizontes de suelos y conglomerados casi planos que se formaron en las condiciones de un clima semiárido, en el que a pesar de las lluvias escasas, se lograron arrastrar y depositar aluviones de un espesor considerable.

El Cuaternario (dos millones de años a la fecha), se caracterizó por movimientos tectónicos producidos por la fractura Clarión, lo que aunado a un clima lluvioso y al desarrollo de glaciares, dio origen a un proceso de erosión muy acentuado en las partes elevadas y a una degradación de depósitos aluviales, lacustres y fluviales en las partes bajas, que se conocen como formación Clástica Aluvial. Durante el Cuaternario, los primeros movimientos de la fractura Clarión dieron origen al Iztaccíhuatl y el Popocatepetl, los cuales están formados por lavas de andesita porfirítica de piroxena (CONANP, 2011).

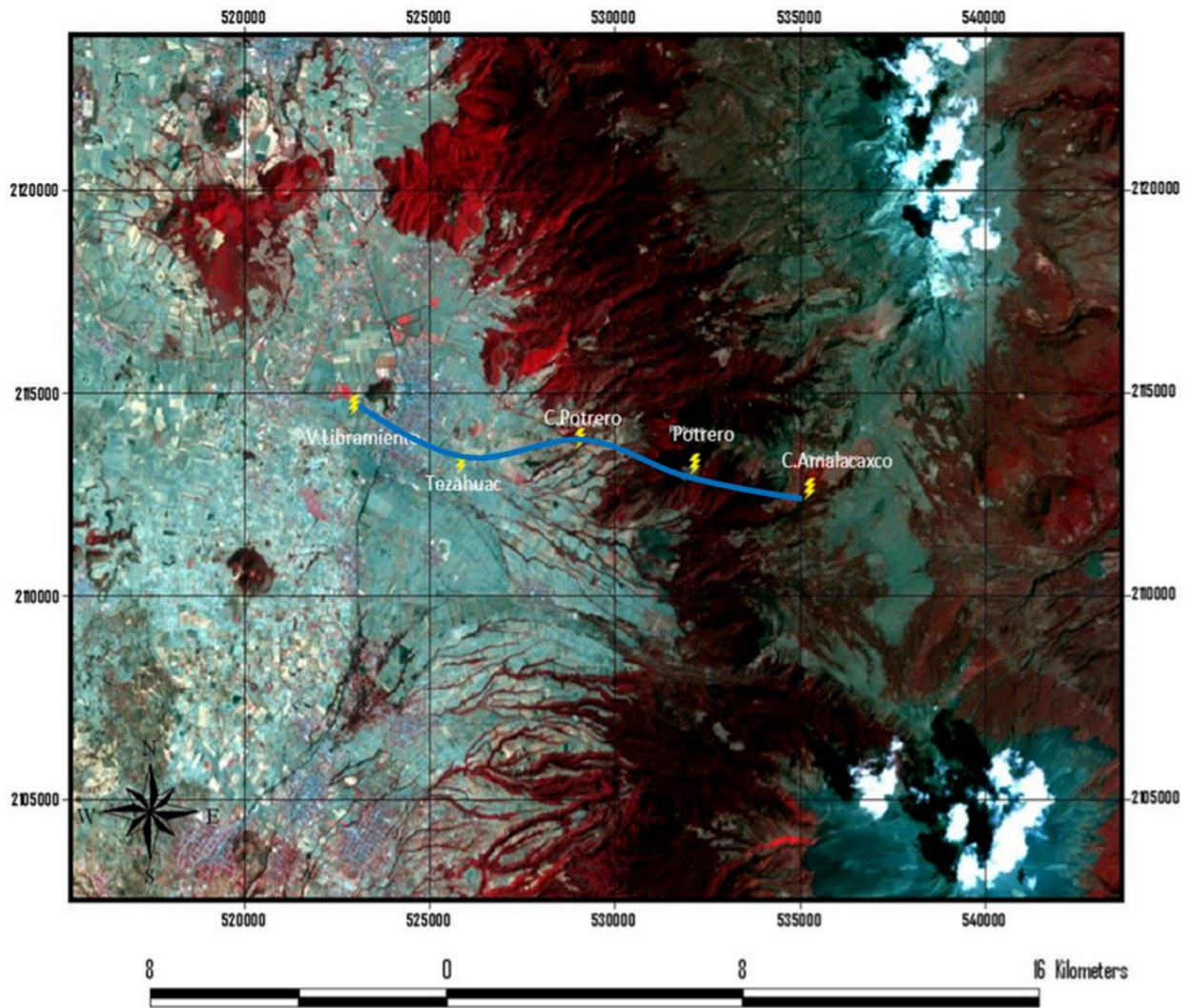


Figura 2. Distribución de los sitios de estudio.

Edafología

De acuerdo con la FAO, las unidades de suelo presentes en el área del Parque son:

- Litosoles; suelos someros, con menos de 0.1 m de espesor, formados sobre tepetates y que conservan las características del material parental. Aunque esos suelen estar asociados con Regosoles y Andosoles en áreas muy restringidas, generalmente son poco desarrollados debido a la velocidad de percolación del agua que impide el establecimiento de algún tipo de vegetación, lo que aunado al clima presente a altitudes mayores a los 4000 m s.n.m., dificulta el desarrollo del suelo.
- Regosoles; son suelos formados a partir del material suelto como arena grava o piedra, se localizan dentro del Parque a altitudes por debajo de los 3900 m y normalmente son pobres en contenido de material orgánica y nutrientes.
- Andosoles; se derivan de cenizas volcánicas recientes, por lo que son suelos ligeros con alta retención de humedad y buen contenido de nutrientes. Por su contenido de materia orgánica y la proporción de vidrios volcánicos presentes pueden formar Andosoles húmicos, que se presentan en áreas forestales poco alteradas, también pueden formar Andosoles vitricos en zonas con vegetación de coníferas, cuando presentan más del 60% de vidrios, ceniza y texturas gruesas.
- Cambisoles; son suelos mejor desarrollados, con horizontes A y B bien definidos, pero pobres en contenido de nutrientes. Presentan potencial para el desarrollo forestal, con adecuadas prácticas de manejo para la conservación de suelo y captación de humedad.
- Fluvisoles; son suelos formados en cañadas, escurrimientos y zonas de depósitos de material reciente, de textura gruesa, su fertilidad es baja debido al escaso contenido de nutrientes.

Climatología

De acuerdo con la estación meteorológica Amecameca, el clima prevaleciente en la zona es de tipo Cb (w2) (w)' gw'', el cual corresponde a un clima templado subhúmedo, con lluvias de verano, con temperatura media anual es de 14º C; siendo el mes más frío enero con 10.8º C y el más cálido mayo con 16.2º C. La precipitación media anual es de 928 mm; el mes más seco es febrero con una precipitación de 6.9 mm y el más húmedo, septiembre con una precipitación de 185.6 mm. El porcentaje de lluvia invernal es de 3.4% y la relación precipitación-temperatura es de 66.3. Con una oscilación térmica de 5.4, se le considera templado con verano fresco largo (CONANP, 2011).

Hidrología

La microcuenca de Amecameca presenta corrientes subterráneas alimentadas por la filtración de agua de lluvia, la que no se filtra es captada para los sistemas de agua de algunas poblaciones incluida Amecameca, también se forman algunos ríos y arroyos como son: Palo Rechino, Amalacaxco, Alcalican-Los Reyes, Chopanac, Estotzongo, La Coronilla- Amipulco, llegando la mayoría al Río Amecameca para luego unirse a la subcuenca de Chalco (Plan de Desarrollo Municipal, 2009-2012).

Es importante hacer notar que todos estos escurrimientos superficiales de la Sierra Nevada, conforman las trayectorias fluviales, subcuencas y cuencas hidrológicas que permiten la vida humana y la actividad económica en un sinnúmero de asentamientos, razón por la cual, la protección y conservación de los ecosistemas de la Sierra Nevada son estratégicos y de seguridad nacional (CONANP, 2011).

Vegetación

El Parque Nacional es el remanente más importante de bosques de coníferas y praderas de alta montaña en el centro del país. Su importancia radica no sólo en la extensión de bosques en buen estado de conservación (más de 21,000 hectáreas de bosque conservado que representan 52.72% de la superficie total del parque), sino en la diversidad de su flora y fauna (CONANP, 2011).

La distribución de la vegetación en esta zona atiende a la altitud, de modo que pueden distinguirse tres pisos fundamentales de vegetación.

- a) De 2,400 a 3,100 m s.n.m. se encuentra la asociación de *Q. laurina* con *Q. crassifolia*, *Q. rugosa*, *Abies*, *Arbutus*, *Juniperus* y *Pinus*. Los zacatonales y pastizales alpino y subalpino del parque se consideran en buen estado; hay una combinación de zacatonales primigenios y zacatonales secundarios como consecuencia de la introducción de éstos para uso de la ganadería, los cuales son utilizados para la engorda del ganado.
- b) El pastizal alpino se establece entre los 4,000 y los 4,500 msnm. Bajo este rubro se consideran las asociaciones de vegetación en que dominan las gramíneas amacolladas. Así, se distinguen al menos dos grandes comunidades vegetales: el zacatonal, que se desarrolla en los llanos sobre sitios bajos y mal drenados, dedicados históricamente al pastoreo de ganado, donde predominan gramíneas que rara vez exceden los 30 cm de

alto o estoloníferas de los géneros: *Agrostis*, *Bromas*, *Calamagrostis*, *Festuca*, *Muhlenbergia* y *Poa* y ciperáceas como *Carex peucophila*.

- c) El pastizal subalpino y alpino se distribuye por arriba del límite arbóreo y constituye vegetación clímax. Los pastizales subalpinos se caracterizan por la presencia de gramíneas amacolladas que oscilan entre 60 y 120 cm de altura y se localizan en altitudes de 2,700 a 4,300 m (Baltazar, 2009).

MÉTODOS

Se realizó la búsqueda de información en cartas de hidrológicas y edafológicas, artículos y libros publicados sobre investigaciones en la zona del Parque Nacional Izta-Popo y su área de influencia, para ubicar el área de estudio. Se seleccionaron afluentes que suministran agua a las comunidades aledañas al municipio de Amecameca con un caudal que atraviesa sitios con diferente de uso del suelo.

MUESTREO

Los muestreos se realizaron en afluentes sometidos a diferentes condiciones de uso de suelo que impactan en su calidad y el régimen del caudal. Los sitios de muestreo se localizaron en zonas forestales con baja perturbación humana, en zonas con uso recreacional con poca alteración aparente en el río, de igual manera se estudió zonas agrícolas y finalmente zonas urbanas con notoria modificación antrópica. En cada punto se realizó la caracterización ecológica del sitio, indicando exposición, pendiente, tipo de vegetación dominante, altitud, estratos vegetales, coordenadas geográficas.



Figura 3. Sitios de estudio. A) Cañada Amalacaxco, B) Potrero, C) Cañada Potrero, D) Alcalican, E) Tezahuac y F) Vías Libramiento.

a) Agua

Para la determinación de parámetros de agua *in situ* la colecta se llevó a cabo manualmente y de forma directa a nivel superficial en botellas DBO, botellas de plástico de 1000 mL, y botellas de 250 mL para las determinaciones *ex situ* antes de 24 horas, las cuales se conservaron a 4°C en una hielera hasta su procesamiento en el laboratorio de acuerdo a lo establecido en el APHA-AWWA-WPCF (1992).



Figura 4. Muestreo de agua.

b) Suelo

Para la determinación de las propiedades físicas y químicas del suelo se trazaron cuadrantes de 30 m × 2 m (1 m de amplitud a cada lado del cauce) y de 30 m × 10 m (5 m de amplitud a cada lado del arroyo). En ellos se tomaron un total de ocho submuestras a una profundidad de 0 a 0.2 m para formar dos muestras compuestas correspondientes a cada una a las distancias señaladas las cuales fueron etiquetadas y posteriormente, almacenadas en bolsas con cierre hermético para su procesamiento en el laboratorio.

Para determinar la densidad aparente y porcentaje de humedad del suelo, se tomaron muestras de 0 a 0.1 m de profundidad con tubos de PVC con el objetivo de tener muestras sin perturbar su estructura.

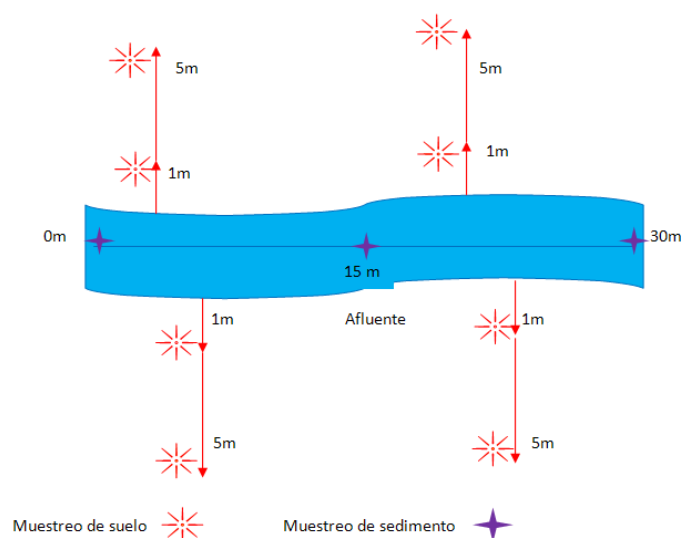


Figura 5. Diagrama de la toma de muestras de suelo y sedimento.

c) Sedimento

Con el fin de representar mejor el sistema ribereño, en los seis sitios estudio se colectó a lo largo de un transecto de 30 m dentro del cauce una muestra compuesta a las distancias de 0, 15 y 30 m con el fin de representar mejor el sistema, posteriormente la muestra se almacenó en bolsas con cierre hermético para evitar la pérdida de sedimento.



Figura 6. Muestreo de suelo.

PROCESAMIENTO DE MUESTRAS

a) Determinaciones *In situ*

Para los parámetros de agua registrados *in situ* los muestreos se llevaron a cabo manualmente a nivel superficial. En cada estación se midió:

- Temperatura del agua; basada en la NMX-AA-007-SCFI-2011 que establece el método de prueba para la determinación de la temperatura, en aguas naturales superficiales o de poca profundidad, en aguas residuales y residuales tratadas, con incertidumbre estimada en $\pm 0,2^{\circ}\text{C}$. El método no es aplicable a la determinación de la temperatura en aguas profundas ni tampoco a aguas industriales sobrecalentadas o sometidas a altas presiones.
- pH; se refiere al potencial de actividad de ion hidrógeno. De acuerdo a lo establecido en la NMX-AA-008-SCFI-2011, el valor de pH es un parámetro regulado por límites máximos permisibles en descargas de aguas residuales al alcantarillado o a cuerpos receptores, también es un parámetro de calidad del agua para usos y actividades agrícolas, para contacto primario y para el consumo humano. Para determinar este parámetro en campo se utilizó un medidor de pH (Checker Hanna modelo HI 98107).
- Conductividad; Este método se basa en la propiedad que adquiere el agua de conducir la corriente eléctrica cuando tiene iones disueltos. La determinación de conductividad es de gran importancia pues da una idea del grado de mineralización del agua natural, potable, residual, residual tratada, de proceso o bien del agua para ser usada en el laboratorio en análisis de rutina o para trabajos de investigación. La determinación de este parámetro se hizo con base en la NMX-AA-093-SCFI-2009 con un equipo portátil Combo Hanna modelo HI 98129.
- Sólidos Totales Disueltos (STD); El principio de este método descrito en la NMX-AA-034-SCFI-2012, se basa en la medición cuantitativa de los sólidos y sales disueltas así como la cantidad de materia orgánica contenidos en aguas naturales y residuales, mediante la evaporación y calcinación de la muestra, a temperaturas específicas, en donde los residuos son pesados y sirven de base para el cálculo del contenido de estos. Las aguas naturales o residuales con altos contenidos de sólidos suspendidos o sales disueltas no se pueden utilizar en forma directa por las industrias o por las plantas potabilizadoras. De ello se deriva el interés por determinar en forma cuantitativa estos parámetros en campo con equipo portátil (Combo Hanna modelo HI 98129).

- Oxígeno disuelto (OD) (método de Winkler con modificación azida de sodio); descrito en la NOM-AA-012-SCFI-2001, consiste en la oxidación del hidróxido de manganeso disuelto para producir un precipitado de manganeso con valencia más alta. Se acidifica la muestra y los iones yoduro reducen al manganeso a su estado divalente produciéndose yodo equivalente al contenido de oxígeno original. El yodo se titula con una solución normalizada de tiosulfato de sodio. El punto final de la valoración se detecta visualmente con un indicador de almidón.

En todos los sitios también se midió el ancho del caudal, el perfil batimétrico y la velocidad de la corriente, todo esto de acuerdo al método de Sección-velocidad.

b) Determinaciones en laboratorio

Las muestras de suelo y sedimento se secaron a temperatura ambiente. En el laboratorio se tamizaron con un tamiz de malla 2 mm y se almacenaron en frascos de polietileno previamente etiquetados con los datos del sitio y fecha de colecta. Los análisis y las técnicas realizadas se hicieron de acuerdo a lo establecido en la NOM-021-SEMARNAT-2000.

- 1) **Agua:** Los parámetros determinados *ex situ* antes de 24 horas de realizado el muestreo, fueron:
 - Alcalinidad (volumétrica con dos indicadores); es la capacidad para neutralizar ácidos, es decir, la cantidad de iones bicarbonato y carbonatos en el agua que funcionan como solución amortiguadora y resisten cambios en la concentración de iones hidronio cuando se añaden soluciones ácidas o básicas. Este método esta descrito en la NOM-AA-036-SCFI-2001.
 - Dureza total (método complejométrico); el cual se establece en la NOM-AA-072-SCFI-2001 y está definida por la cantidad de iones de calcio y magnesio presentes en el agua. Las aguas se pueden calificar en poco productivas y en muy productivas de acuerdo a la concentración de Ca^{2+} y Mg^{2+} . El método consiste en una valoración empleando un indicador visual de punto final, el negro eriocromo T, que es de color rojo en la presencia de calcio y magnesio y vira a azul cuando estos se encuentran acomplejados o ausentes. El complejo del EDTA con el calcio y el magnesio es más fuerte que el que estos iones forman con el negro de eriocromo T, de manera que la competencia por los iones se desplaza hacia la formación de los complejos con EDTA desapareciendo el color rojo de la solución y tornándose azul.

- Carbono Orgánico Particulado (COP); la determinación de este parámetro se realizó con base en la oxidación con dicromato de potasio de acuerdo al Manual of Chemical and Biological Methods for Seawater Analysis (Parson *et al.* 1984).
- Concentración del ion sulfato (método turbidimétrico) de acuerdo a la norma NMX-AA-074-1981. El bario en presencia de sulfatos precipita como sulfato de bario BaSO_4 , formando flóculos que causan cierto grado de turbidez en la solución y este grado de turbidez es proporcional a la concentración de sulfatos presentes.
- DBO_5 , procedimiento experimental que mide el oxígeno requerido por los organismos en sus procesos metabólicos al consumir la materia orgánica presente en las aguas residuales o naturales. Las condiciones estándar del ensayo incluyen incubación en la oscuridad a 20°C generalmente cinco días y la determinación de oxígeno disuelto antes y después de la incubación.

2) **Suelo:** entre las propiedades químicas se determinaron:

- pH potencial en solución salina KCl 1N en relación 1:2 (Jackson, 1964); pH activo en agua relación 1:2 (Jackson, 1964); pH en solución de NaF 1N en relación 1:50; es una de las mediciones más comunes e importantes en los análisis químicos del suelo, ya que controla reacciones químicas y biológicas en este medio. Se basa en la determinación de la actividad del ion H^+ mediante el uso de un electrodo cuya membrana es sensible al H^+ . Se mide potenciométricamente en la suspensión sobrenadante de una mezcla de relación suelo: agua 1:2. La determinación de pH en solución de KCl 1N se fundamenta en que el potasio promueve la floculación del suelo y desplaza los H^+ de los sitios de intercambio hacia la solución, aumentando la acidez del suelo; aumentando la hidrólisis de Al^{3+} y Fe^{2+} .
- Conductividad eléctrica; es una medida de la capacidad que posee un material para transportar corriente eléctrica. La determinación se realiza en una solución acuosa que posee iones con esta habilidad. La conductividad eléctrica del suelo depende de la concentración total de dichos iones en la solución, de la movilidad de cada uno de ellos, su valencia y de la temperatura a la que se hace la determinación.
- Materia orgánica (MOS) (Walkley y Black, 1964); este método se basa en la oxidación del carbono orgánico del suelo por medio de una disolución de dicromato de potasio y el calor de reacción que se genera al mezclarla con ácido sulfúrico concentrado, después se adiciona ácido fosfórico para evitar interferencias de Fe^{3+} y el dicromato de potasio residual es valorado con sulfato ferroso.

- S-disponible, dado que el azufre como ion sulfato presenta un comportamiento similar al ion fosfato en suelo, la determinación se hizo por el método de extracción Bray y Kurtz, (1945). Para la determinación se utilizó el método turbidimétrico de sulfato de bario, el principio se basa en una solución de ácido clorhídrico 6N combinada con 0.5 mL de goma de acacia y cloruro de bario, en donde el ion sulfato al reaccionar con el cloruro de bario forma cristales de sulfato de bario, que van a permitir determinar la concentración del ion sulfato.
- P-disponible (Bray y Kurtz, 1945); es ampliamente utilizado en estudios de fertilidad de suelos para la determinación de fósforo disponible en suelos ácidos. La solución extractora de P consiste en una combinación de HCl y NH_4F la cual remueve formas de P ácidos solubles como los fosfatos de calcio y una porción de fosfatos de aluminio y hierro. El NH_4F disuelve los fosfatos de aluminio y de hierro al formar un ion complejo con estos iones metálicos en solución ácida.
- N-total, método semi-microKjeldhal modificado para incluir nitratos; se basa en la transformación del nitrógeno en sulfato amoniacal al combinar la muestra por medio de una digestión con una solución de ácido sulfúrico concentrado, un catalizador y una mezcla de sulfatos. Posteriormente se determina el contenido de nitrógeno destilando dicha solución con hidróxido de sodio 6N (Bremmer, 1965).

Las propiedades físicas que se determinaron fueron:

- Densidad aparente (método del cilindro); es calculada a partir del conocimiento de dos parámetros: la masa del suelo y el volumen total, es decir, el volumen total de los sólidos y el volumen ocupado por el espacio poroso.
- Humedad del suelo mediante el método de gravimetría; descrito en la NOM-021-SEMARNAT-2000, 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.

Finalmente, como propiedad biológica se determinó la actividad de la enzima arilsulfatasa por el método de Tabatai y Bremner (1970), el cual se fundamenta en la estimación colorimétrica del p-Nitrofenol liberado por la actividad arilsulfatasa cuando el suelo es incubado con p-Nitrofenil Sulfato.

3) **Sedimento:** al igual que en suelo se determinó pH activo en agua relación 1:2 (Jackson, 1964) y materia orgánica (Walkley y Black, 1964).

- La concentración de Azufre total se obtuvo por medio de una digestión con HNO_3 - HClO_4 y cuantificación turbidimétrica; el principio se basa en que el ion sulfato se precipita con cloruro de bario, en condiciones que permitan la formación de cristales de sulfato de bario de tamaño uniforme, midiendo la transmitancia de la suspensión de sulfato de bario.

c) **Procesamiento de datos**

A partir de los resultados obtenidos de los análisis físicos, químicos y biológicos para agua, suelo y sedimento se generó una base de datos para la interpretación de resultados, realizar graficas útiles para identificación del comportamiento de cada variable con base en los diferentes usos de suelo estudiados, así como para realizar el análisis estadístico. El análisis estadístico se desarrolló a través del software Statgraphics Centurion XVI.I.

El primer análisis estadístico realizado fue un Análisis de Correlación (AC) con todos los parámetros registrados para determinar qué variables presentaron mayor importancia dentro del sistema ribereño. Con las variables más significativas del AC se realizó un Análisis de Componentes Principales (ACP) para reducir el número de parámetros y seleccionar los de mayor influencia en esta investigación. Después de la identificación de los componentes que definen el sistema se realizó un Análisis de Correlaciones Canónicas (ACC) entre las variables de agua y suelo más significativas para identificar la interacción de las variables más significativas mediante el ACP. Por último, se realizó un segundo Análisis de Correlación entre las diferentes especies químicas del azufre en agua suelo y sedimento con el objetivo de establecer la dinámica de interacción entre ellas.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La investigación se realizó en afluentes del río Amecameca, el en periodo comprendido entre Octubre del 2010 y Noviembre del 2011. La condición para seleccionar cada sitio de muestreo fue que el suelo adyacente al río se encontrara bajo diferentes condiciones de uso. En el Cuadro 1, se presentan las características que prevalecieron en cada uno de los sitios estudiados.

En los sitios con buen estado de conservación (Cañada Amalacaxco y Potrero, 3651 y 3347 m s.n.m. respectivamente) se encontraron especies forestales como *Pinushartwegii*, *Abies religiosa*, *Quercuscrassipes* y *Cupresussp.* Mientras que en zonas con altitudes entre 2600 y 2400 m (zonas con alta perturbación del bosque) se presentaron especies como *Clethra mexicana*, *Alnus jorullensis*, *Crataegus pubescens*, *Buddleja sessiliflora*, especies que de acuerdo al Programa Municipal de Desarrollo Urbano Sustentable 2007, se encuentran en zonas con fuerte perturbación.

1. AGUA

El uso de suelo fue la variable que influyó en el comportamiento, no solo de otros parámetros del suelo sino también en los del agua, entre las más significativas se encontraron: el OD, la temperatura, el pH, la conductividad eléctrica, la alcalinidad, la dureza de calcio y total, los STD, los STS y los sulfatos. La mayoría de estos parámetros tienen un comportamiento similar en los diferentes usos de suelo estudiados, notándose que en los sitios con mejor nivel de conservación presentaron concentraciones inferiores a los sitios donde la contaminación antrópica es evidente. En el Cuadro 2 se presentan los valores mínimos y máximos así como el promedio de las variables determinadas en agua con un comportamiento similar entre ellas.

Granados, *et al.* (2006) señalaron que la reducción de zonas forestales ocasiona un incremento de la temperatura de la zona ribereña tanto del agua, como del suelo, con severas consecuencias para las propiedades físicas, químicas y biológicas del sistema. En el Cuadro 2 se puede apreciar que la temperatura se encontró en un amplio intervalo, percibiéndose un ligero incremento en ella a medida que el gradiente altitudinal desciende y la vocación del suelo se va perdiendo. La modificación del uso de suelo para el desarrollo de actividades antrópicas generalmente trae como consecuencia la tala del bosque, lo que provoca que la temperatura del sistema se incremente al no contar con la protección que la vegetación proporciona, afectando el OD, el pH, la concentración de sulfatos en agua y la AAS en el suelo.

Cuadro 1. Sitios de muestreo.

# Sitio	Localidad	Altitud	Ubicación	Uso de suelo	Vegetación dominante
		m snm	Longitud / Latitud		
1	Cañada Amalacaxco	3651l	2112632E / 535280N	1-Forestal	<i>Pinus hartwegii</i> y zacatonal
2	Potrero	3347	2111719E / 539397N	2-Forestal-Perturbado	<i>Abies religiosa</i>
3	Cañada Potrero	3221	ND	2-Forestal-Perturbado	<i>Abies religiosa</i> y <i>Pinus patula</i>
4	Alcalican	2684	2113867E / 529075N	3-Pecuario	<i>Abies religiosa</i> , <i>Arbutus xalapensis</i> , <i>Quercus crassipes</i> , <i>Cupresus sp.</i>
5	Tezahuac	2518	2113274E / 525870N	4-Agrícola-pecuario	<i>Clethra mexicana</i> , <i>Alnus jorullensis</i> , <i>Crataegus pubescens</i> , <i>Buddleja sessiliflora</i> .
6	Libramiento	2463	2114682E / 522978N	5-Urbano	<i>Alnus jorullensis</i> , y <i>Buddleja sessiliflora</i> .

Cuadro 2. Propiedades físicas y químicas determinadas en agua.

Localidad	T. Ambiente	pH	Cond	O.D	Alc. Tot.	Dureza Calcio	Dureza total	Sulfatos	STD	STS
	°C		µS	mg L ⁻¹	mg de CaCO ₃ L ⁻¹	mg de CaCO ₃ L ⁻¹	mg de CaCO ₃ L ⁻¹	mg de SO ₄ ²⁻ L ⁻¹	Ppm STD L ⁻¹	cm de STS L ⁻¹
Amalacaxco Media	11.2	7.34	42	9.86	31.78	13.81	66.28	0.122	21.25	0.1
Min.	6	7.27	41	6.56	11.56	11.84	40.08		20	0.01
Máx.	19	7.42	43	14.45	52.22	17.76	118.39		22	0.26
Potrero Media	11.6	7.37	47	13.83	47.65	13.4	61.04	0.134	23	0.18
Min.	7	7.22	39	12.5	37.24	9.87	33.91		21	0.01
Máx.	14	7.6	59	15.07	62.49	15.79	94.96		28	0.41
C. Potrero Media	9.8	7.37	44.5	16.09	44.94	15.04	44.92	0.129	32.25	0.23
Min.	7	6.97	26	10.55	23.11	11.1	30.83		21	0.01
Máx.	13	7.75	69	27.48	53.5	25.6	71.53		52	0.69
Alcalican Media	13.3	7.43	63.5	12.38	34.09	13.32	53.03	0.148	31	0.093
Min.	12	7.24	62	10.99	23.54	12.58	42.55		30	0.06
Máx.	15	7.82	65	13.65	39.8	14.06	72.79		32	0.12
Tezahuac Media	11.9	7.3	62.6	12.61	39.94	16.9	89.2	0.2	31.3	0.58
Min.	9.8	7.27	61	9.4	36.38	14.8	19.95		31	0.01
Máx.	15	7.35	64	14.8	44.51	18.75	113.46		32	1.17
Vías Libramiento Media	17.2	7.54	898.25	0	302.03	64.28	524.85	7.47	449.75	3.89
Min.	14	7.12	670	0	81.32	49.08	184.98		335	35
Máx.	19	7.83	1056	0	437.1	79.54	1504.54		530	8.54

En el Cuadro 2 se puede observar que la temperatura y el pH presentan un comportamiento similar, notándose un ligero incremento en su valor conforme el grado de conservación de los sitios va disminuyendo. Se considera al pH un parámetro que define la calidad del agua con usos y actividades agrícolas, para contacto primario y consumo humano. En los sitios estudiados los valores de pH estuvieron en un intervalo de 6.9 hasta 7.8, observándose en la figura 7 que los valores más bajos se encontraron en los sitios con mejor grado de conservación (Cañada Amalacaxco, Potrero y C. Potrero). Es bien sabido que el aporte de fertilizantes al suelo ocasiona cambios en el valor de pH, generando acidez en los suelos debido a la liberación de iones hidrógeno (Chien, *et al.* 2008), sin embargo, los resultados obtenidos muestran todo lo contrario, indicando que el aporte de fertilizantes utilizados en la agricultura no influyó en la conducta del pH. Una práctica recurrente en el cultivo que puede explicar el comportamiento del pH en el agua es el encalado de suelo, que se utiliza para reducir los niveles de acidez y mejorar el rendimiento de los cultivos, incrementando el valor de pH en el agua al no tener vegetación ribereña que reduzca el arrastre de sedimentos hacia el caudal.

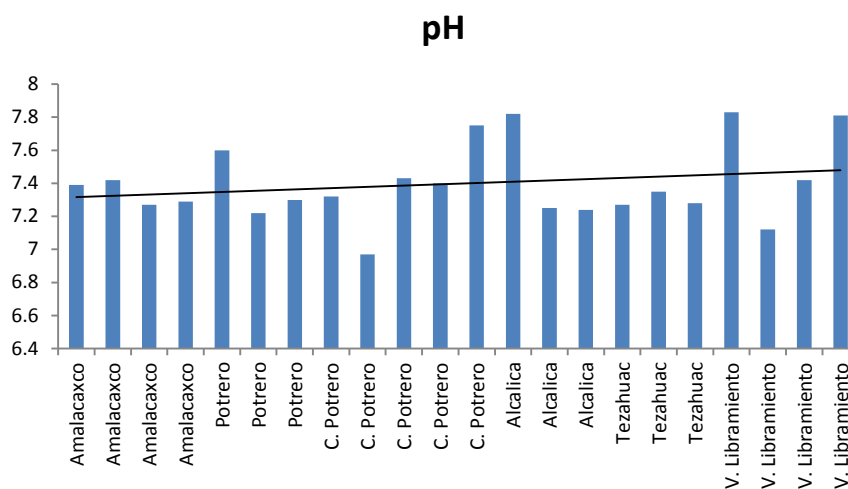


Figura 7. Comportamiento del pH en agua.

El oxígeno disuelto (OD) proporciona información sobre las reacciones biológicas y bioquímicas que ocurren dentro del agua, es un factor que afecta la vida acuática, además de ser necesario en muchas reacciones orgánicas e inorgánicas. Dado que los niveles de oxígeno disuelto en aguas naturales dependen de la actividad física, química y bioquímica del sistema (APHA-AWWA-WPCF. 1992), en el Cuadro 2 puede observarse que los valores obtenidos en los sitios con poca o moderada contaminación (9.86 a 16.09 mg O L⁻¹) se encuentra en concentraciones adecuadas de acuerdo a lo dicho por Segnini y Chacón (2005), que establecen un valor de 6.2 mg L⁻¹ como el mínimo requerido por un sistema lóxico. Mientras que en el sitio V. Libramiento,

donde el alto grado de perturbación en que se encuentra y los procesos de descomposición del material orgánico, la demanda de oxígeno es mayor a lo que se produce en el sistema, provocando que en este sitio no se encuentre este elemento y la zona no sea apta para el desarrollo de actividades humanas.

Los sólidos totales disueltos (STD) y los sólidos totales suspendidos (STS), se refieren a las sustancias orgánicas e inorgánicas solubles, y a los sólidos constituidos por materia orgánica en suspensión coloidal en el medio acuoso respectivamente y dependen fuertemente del suelo adyacente porque en el río, no solo se reflejan las propiedades de éste, sino también de los factores ambientales. Los sólidos pueden afectar negativamente la calidad del agua, son importantes como indicadores ya que su alta concentración disminuye el paso de la luz a través de agua evitando la actividad fotosintética, importante para la producción de oxígeno. En los afluentes estudiados las concentraciones oscilaron entre 20 y 530 ppm STD L⁻¹ y de 0.01 a 8.54 cm STS L⁻¹, encontrándose los valores más altos en la localidad de V. Libramiento, donde se observó un mayor grado de contaminación antrópica y no solo se reciben los aportes naturales del caudal sino que hay evidente descarga de actividades agrícolas y domésticas desarrolladas en la zona. En las figuras 8 y 9 se pueden observar que el OD se encuentra en relación inversa con los STS y STD, donde se confirma lo dicho por Ceccon (2009), la alta concentración de materiales suspendidos en el caudal impide la autodepuración natural del sistema y el desarrollo de organismos productores de oxígeno por lo tanto, se ve reducida la calidad del agua pudiendo, con ello, llevar a la destrucción del ecosistema.

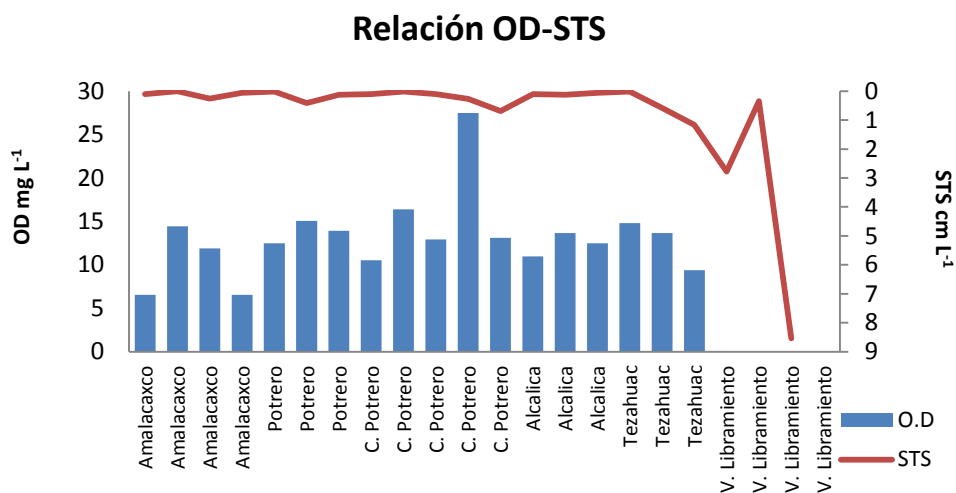


Figura 8. Comportamiento del OD y su relación con los STS.

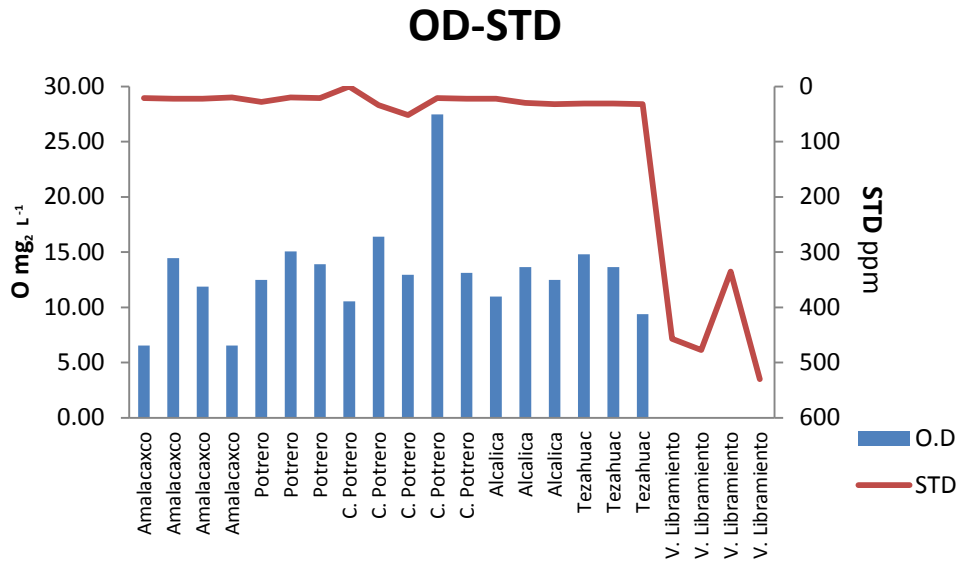


Figura 9. Comportamiento del OD en relación con los STD.

Los resultados encontrados para el Carbono Orgánico Particulado (COP) mostraron que el uso de suelo juega un papel fundamental para determinar la concentración de este parámetro encontrándose que en los sitios con mejor estado de conservación (C. Amalacaxco, Potrero y C. Potrero) los valores fluctuaron entre 50.9 y 177.3 $\mu\text{g C L}^{-1}$, mientras que los sitios con mayor grado de perturbación las concentraciones de COP se encontraron en un máximo de 573.3 $\mu\text{g C L}^{-1}$ (Figura 10). El comportamiento observado corresponde a lo reportado por Ayala (2011) al encontrar que las sustancias que se incorporan al sistema, el manejo, así como el uso que se da al suelo y agua, y la altitud a la que se toma la muestras, son variables que afectan las concentraciones del COP dado que son factores que tienden a incrementar la tendencia eutrófica del sistema.

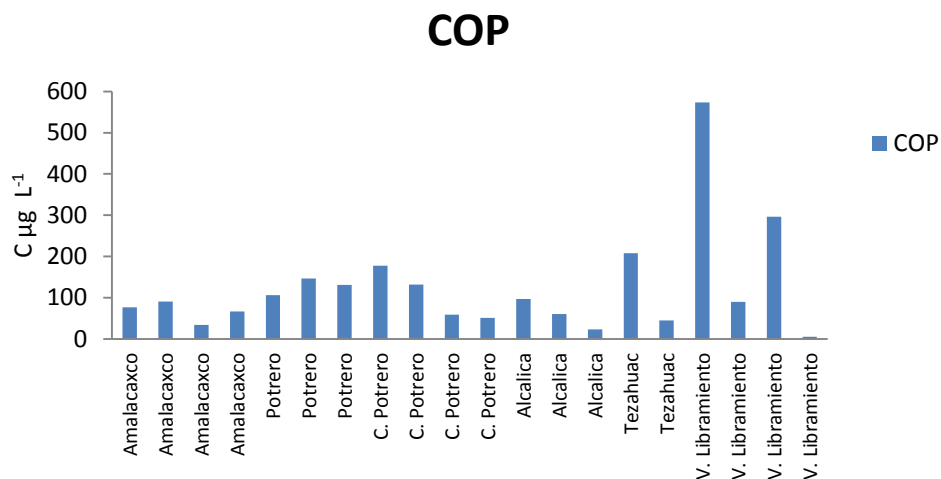


Figura 10. Comportamiento del COP.

La oxigenación del agua es importante, ya que de la disponibilidad de este elemento depende que se lleven a cabo algunos ciclos biogeoquímicos de otros nutrientes, tal es el caso del azufre, en el cual una parte de su ciclo se desarrolla en el agua donde los sulfatos que se encuentran son producto de la oxidación de sulfuros. Los resultados mostraron que los sitios con mayor conservación presentaron valores por debajo de $0.2 \text{ mg SO}_4^{2-} \text{ L}^{-1}$, mientras que en el sitio con mayor grado de perturbación las concentraciones fueron superiores a $7.4 \text{ mg SO}_4^{2-} \text{ L}^{-1}$ (Figura 11). Los resultados encontrados en esta investigación difieren a lo reportado por Fuentes y Massol-Deyá (2002), quienes señalan que uno de los productos liberados en las reacciones de oxidación del azufre son los iones H^+ , que generan acidificación del medio, sin embargo, los resultados mostraron que hay un incremento en el valor del pH lo cual lo hace un sitio moderadamente alcalino, esto posiblemente se deba a las prácticas agrícolas realizadas en la zona, utilizando compuestos que mitigan la acidez del medio.

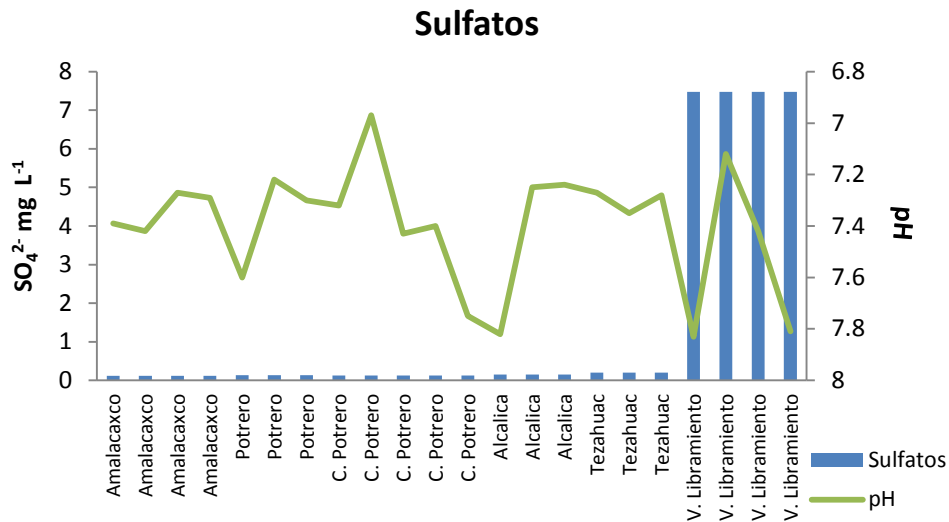


Figura 11. Comportamiento de los SO_4^{2-} en relación con el pH.

2. SUELO

Los resultados mostraron diferencias importantes sobre las variables determinadas entre los diferentes usos de suelo estudiados.

La densidad aparente (DA) se utiliza como medida para determinar la porosidad de un suelo. Pese a las diferentes condiciones en que se encontraron los sitios estudiados, en la figura 12 se observa que los valores estuvieron en el intervalo de 0.6 a 1.9 g cm^{-3} , lo que significa que es una densidad relativamente baja indicando que el suelo tiene buenas condiciones de aireación y son propios para el desarrollo radical de las especies forestales que crecen en ellos por el buen contenido de humedad (Zamora y Cristancho. 2008). Manifestando la importancia que tiene conservar una buena estructura del suelo para la retención de agua, los resultados muestran que los suelos con uso forestal y pecuario poseen buen porcentaje de humedad, mientras que, en los sitios con uso de suelo agrícola y urbano se encontró un bajo porcentaje de humedad, esto indica que, a pesar de tener un aporte constante de agua estos sitios no poseen buena retención de agua.

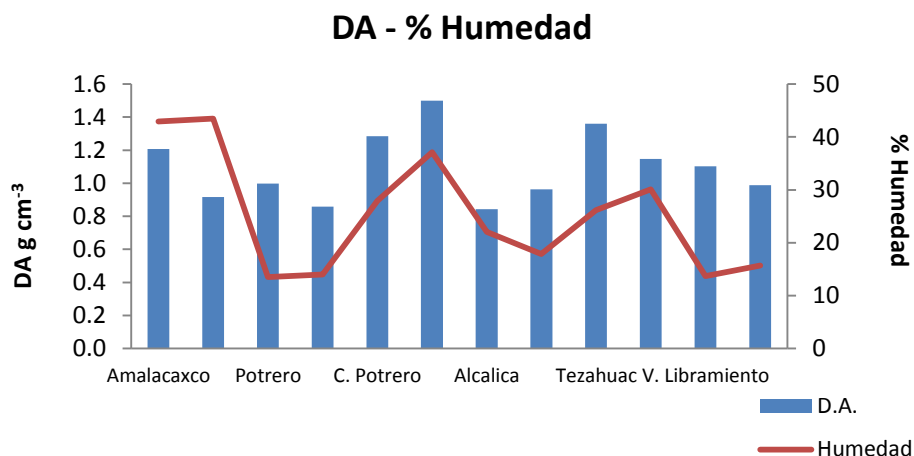


Figura 12. Comportamiento de la D.A. y % de humedad con base al uso de suelo.

La materia orgánica del suelo (MOS) es considerada uno de los parámetros más importantes para determinar la calidad de un suelo. Los valores encontrados para la MOS disminuyen conforme el suelo se va degradando, lo cual indica que esta variable se ve afectada al modificar el uso del suelo. De acuerdo a la NOM-021-SEMARNAT-2000, los sitios con mejor estado de conservación se clasificaron con alto y muy alto contenido de MOS, mientras que los sitios más perturbados tuvieron bajo porcentaje de MOS. En los suelos forestales los valores de pH se encontraron de moderada a extremadamente ácidos como resultado de la liberación de ácidos orgánicos durante la descomposición de la materia orgánica.

Se determinaron tres tipos de pH: potencial, activo y en solución de NaF. Los resultados muestran que el pH activo se encuentra en valores que van de 4.6 a 6.1 clasificándose de fuertemente a moderada ácido. La determinación del pH en NaF es importante, ya que de ello depende la movilidad y el intercambio de iones, las reacciones redox en el suelo, la actividad microbiana y la disponibilidad de nutrientes (Sainz, *et al.* 2011). En la figura 13 se observa la relación de los diferentes tipos de pH determinados y el comportamiento de la MOS con respecto a cada valor pH determinado.

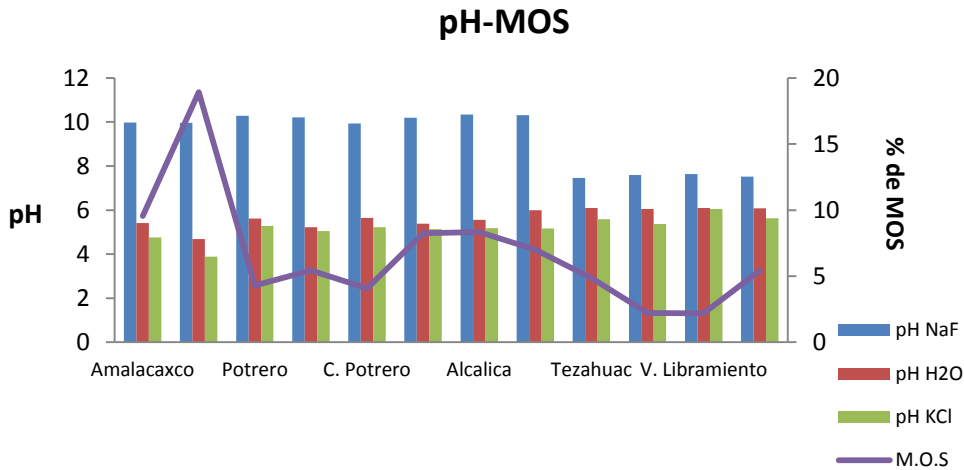


Figura 13. Comportamiento del pH en relación con la MOS.

Un parámetro muy relacionado con la materia orgánica es el fósforo, el cual, se encuentra en los suelos tanto en forma orgánica como inorgánica y su solubilidad dentro de este sistema es baja. La forma orgánica se encuentra en el humus y la materia orgánica, y sus niveles pueden variar desde 0 hasta de 0.2%. La fracción inorgánica está asociada a compuestos de hierro, aluminio, calcio, flúor, entre otros, y normalmente son más abundantes que los compuestos orgánicos (Fernández *et al.*, 2006). Los resultados muestran que la disponibilidad de fósforo aumenta conforme se van modificando las propiedades naturales del suelo, sin embargo, debido a que el contenido de MOS disminuye (figura 14), el incremento de este nutrimento se presenta por el aporte de fertilizantes utilizados en los sitios Tezahuac y V. Libramiento donde el uso del suelo es agrícola-pecuario y urbano respectivamente.

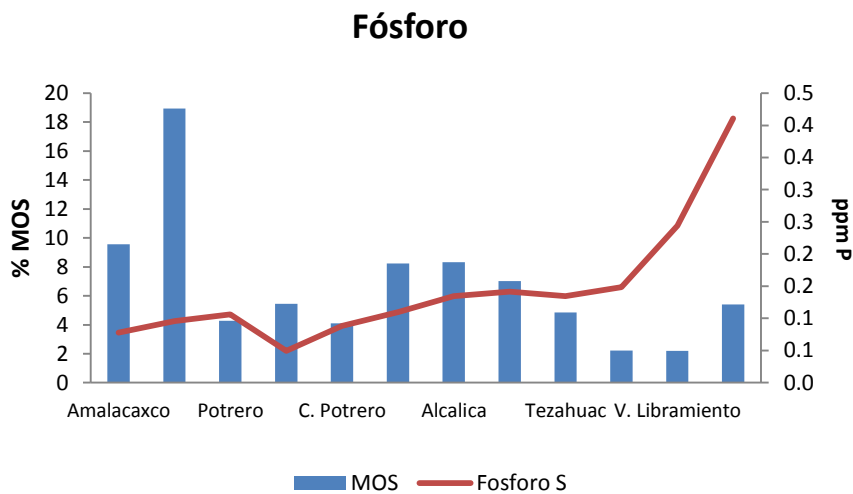


Figura 14. Relación entre la MOS y el Fósforo.

La materia orgánica de los suelos es un componente muy importante de los sistemas. Las propiedades biológicas, químicas y físicas de los suelos están altamente correlacionadas con el contenido de carbono en suelo. Es aceptado, en la ciencia contemporánea, que la materia orgánica es la fuente primaria del nitrógeno (Franco, 2001). El nitrógeno se encuentra en distintas formas en el suelo y puede encontrarse en diversos estados de oxidación y reducción, siendo absorbido por las plantas y microorganismos como nitrato (NO_3^-) o amonio (NH_4^+). De acuerdo a lo establecido en la NOM-021-SEMARNAT-2001 los resultados para este nutrimento se encuentran en una disponibilidad media, entre 0.3 y 0.8 %. Los resultados también mostraron que el sitio con mejor grado de conservación (C. Amalacaxco) presentó valores muy elevados, entre 3210 y 6476 ppm de N, lo que indica un aporte extraordinario por algún factor presente únicamente en este sitio, mientras que en los puntos restantes, se puede notar un incremento en la concentración de este nutrimento conforme se van perdiendo las propiedades naturales del sistema ocasionado, al igual que para el fósforo por el aporte de fertilizantes.

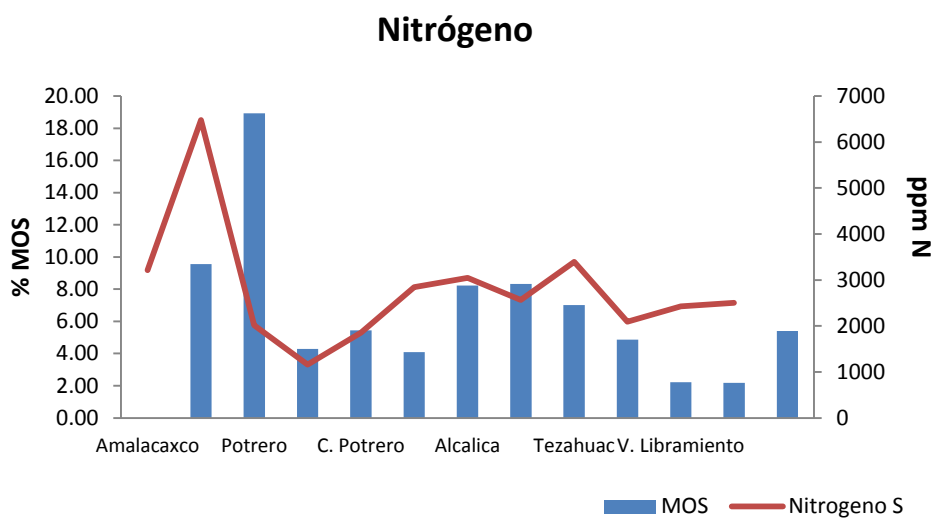


Figura 15. Relación Nitrógeno-MOS.

Asociado con el nitrógeno, aproximadamente 80% del azufre incorporado en compuestos orgánicos de las plantas lo hace por medio de las proteínas cuando ambos elementos se encuentran en proporciones adecuadas (Benavides, 1998). El sulfato es la principal forma inorgánica de azufre en la mayoría de los suelos, aunque pueden estar presentes las formas elementales y en sulfuro bajo condiciones predominantemente anaerobias. Los resultados muestran que las concentraciones de azufre tienden a aumentar conforme se van perdiendo las propiedades naturales del suelo, observándose en la figura 16 que el sitio V. Libramiento,

en donde las propiedades del suelo han sido modificadas completamente por prácticas agrícolas desarrolladas en la zona y la descarga de aguas domésticas, presenta un incremento en la concentración de azufre ocasionado por aportes de fertilizantes. De acuerdo a lo reportado en anteriores investigaciones (Benavides, 1998), todos los sitios poseen concentraciones adecuadas de azufre al estar dentro del intervalo de 0.2 a 2 % de S.

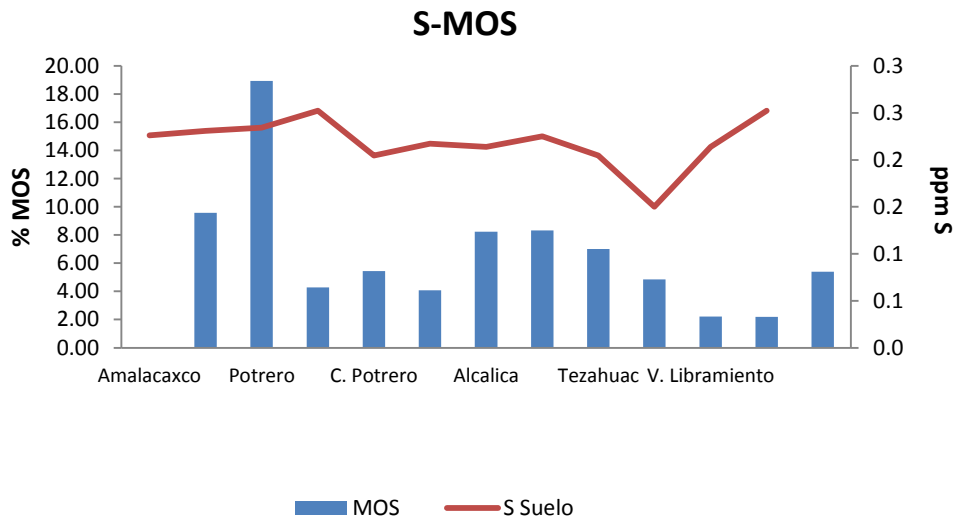


Figura 16. Comportamiento del azufre y su relación con la MOS.

Existen parámetros físicos y químicos utilizados frecuentemente que buscan establecer estándares de salud y calidad para el suelo, sin embargo, los parámetros biológicos son los que dan una mejor idea sobre cuáles son las condiciones en las que se encuentra el sistema. Dentro de estos se consideran las actividades realizadas por enzimas, ya que están muy relacionadas con propiedades físicas y químicas, además de que son muy sensibles a los cambios generados en el ambiente (Cerón y Melgarejo, 2005).

En la figura 17 se puede observar que existe una estrecha relación entre la AAS y la MOS con el uso de suelo, observándose que los sitios con mejor estado de conservación C. Amalacaxco y Potrero, la actividad enzimática fue superior (0.024 y $0.021 \mu\text{g. p-NP}^{g-1/h}$) a la localizada en los sitios con mayor grado de perturbación Tezahuac y V. Libramiento (0.014 y $0.008 \mu\text{g. p-NP}^{g-1/h}$), debido a que en la zona conservada se encuentra un buen contenido de materia orgánica la cual puede funcionar como sustrato para que la enzima arilsulfatasa realice su actividad catalítica y, posiblemente, a que no existe un aporte externo de azufre que limite el desarrollo de esta enzima, mientras que en los sitios donde las actividades antrópicas modifican las condiciones naturales del sistema la AAS se vio considerablemente reducida ya que, al tratarse de una zona agrícola existe un aporte de fertilizantes que contienen el azufre, lo que provoca

una inhibición automática de esta enzima, además de que los contenidos de materia orgánica disminuyeron considerablemente por lo que, al verse reducido el sustrato para que la enzima trabaje se redujo también la actividad catalítica de la ASS.

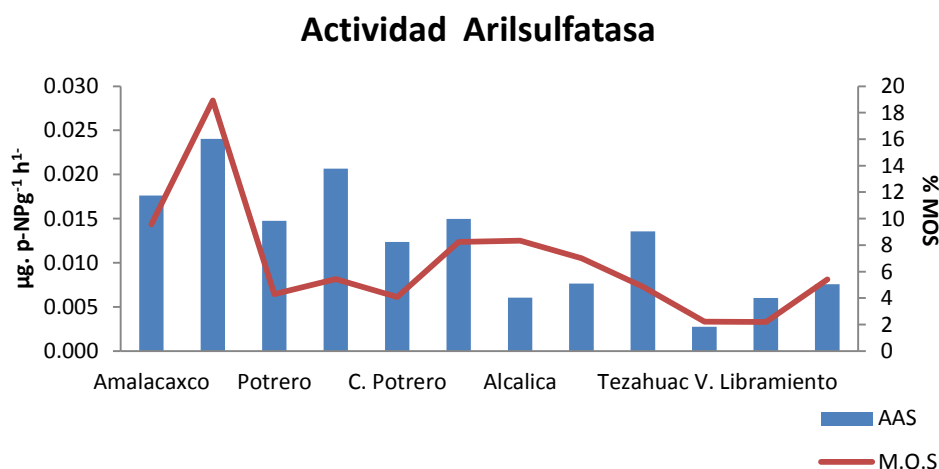


Figura 17. Comportamiento de la AAS en relación con la MOS.

3. SEDIMENTO

Los resultados señalan que la materia orgánica en sedimento (MOS_{Sed}) es una variable que también se ve afectada por el uso de suelo, ya que en los sitios con mejor grado de conservación se encontraron valores inferiores a los registrados corriente abajo en donde los sitios están más perturbados (Tezahuac, y V. Libramiento), esto indica que existe un comportamiento inverso entre el uso del suelo y la MOS_{Sed}, y se puede explicar debido a que existe un aporte de material orgánico por parte del suelo y la vegetación ribereña hacia el caudal del río, el cual es arrastrado corriente abajo provocando que los contenidos de MO se acumulen en los sitios donde las condiciones naturales del sistema se encuentran más alteradas.

Los resultados del pH están muy relacionados con la MOS_{Sed} (figura 18), ya que se observó que en los sitios donde la concentración de la materia orgánica es relativamente baja, los valores del pH se encuentran cercanos a la neutralidad, mientras que, cuando la MOS_{Sed} aumentó, el valor del pH disminuyó, esto ocasionado posiblemente por la liberación de ácidos orgánicos e inorgánicos que son resultado de la oxidación de MOS_{Sed}. También es probable que esta reducción se deba al arrastre de partículas de suelo contaminadas con fertilizantes u otros compuestos, lo que hace que se vaya modificando el pH del afluente.

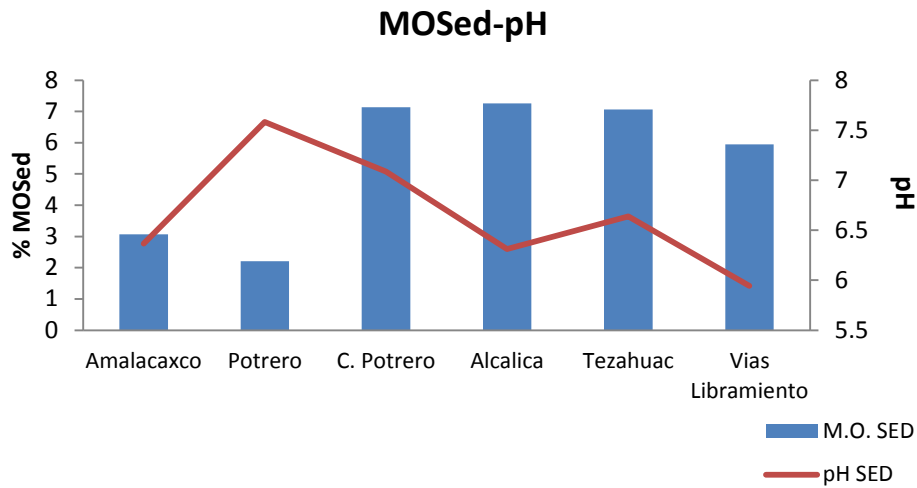


Figura 18. Relación MOSed-pH.

La conductividad eléctrica del sedimento se encontró dentro del intervalo que va de 0.02 a 0.25 dSm^{-1} , localizándose los valores más elevados en el sitio V. Libramiento (el más contaminado) lo que indica la relación que existe entre el sedimento y el agua, pues los valores en ambos sistemas para este parámetro fueron muy similares, señalando que el arrastre de materiales juega un papel importante en este parámetro.

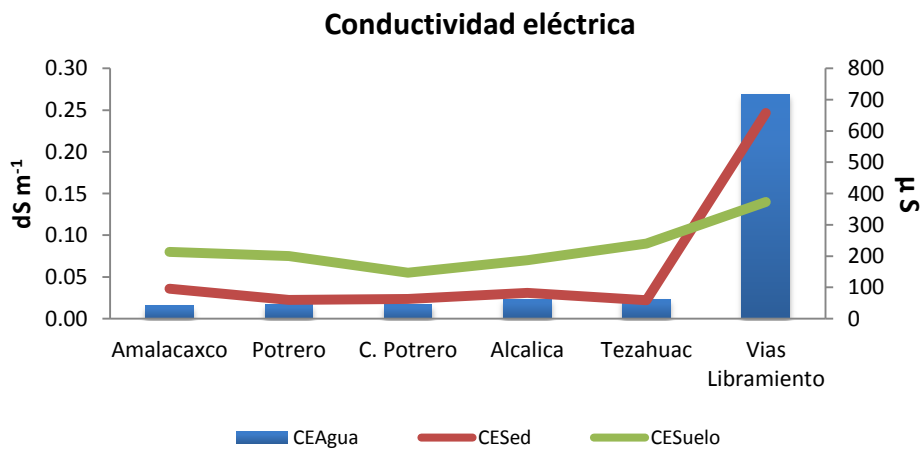


Figura 19. Comportamiento entre la conductividad eléctrica del agua, suelo y sedimento.

Los resultados para azufre total en sedimento muestran que este elemento se encontró en concentraciones adecuadas a pesar de que en los sitios más conservados se encontraron menores concentraciones (0.04 y 0.02 %) en comparación con los sitios más perturbados (0.02 y 0.25 %), en donde se observó un incremento ocasionado, posiblemente, por el aporte de fertilizantes al sistema pues se trata de sitios con uso de suelo agrícola (figura 20).

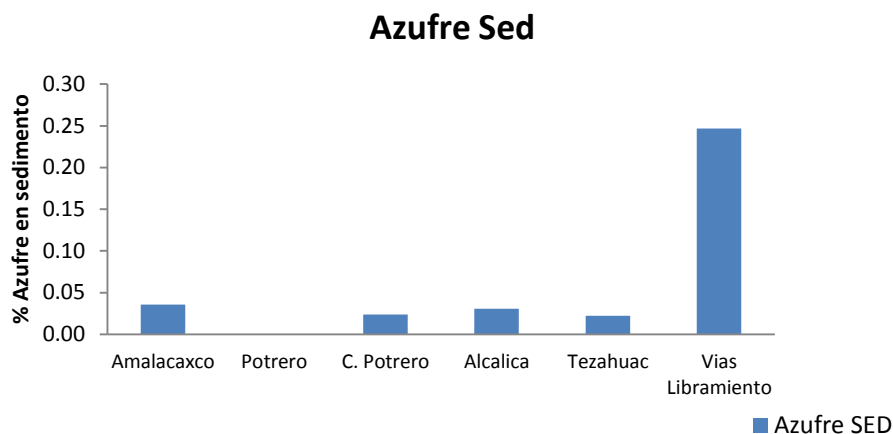


Figura 20. Comportamiento del azufre en sedimento.

4. ANÁLISIS DE CORRELACIONES (AC) EN VARIABLES DE AGUA-SEDIMENTO-SUELO

Con ayuda del programa Statgraphics Centurion XVI.I, se realizó un Análisis de Correlación (AC) entre las variables de agua, suelo y sedimento. Se seleccionaron las variables con correlaciones significativas ($p < 0.05$) y con un coeficiente de correlación ($r > 0.5$).

El AC arrojó que las concentraciones del azufre dependen del uso al que es sometido el suelo, ya que se relacionaron significativamente con variables utilizadas como indicadores de calidad, tal es el caso de los sulfatos en agua que se correlacionaron de manera positiva con la MOS, los STD; y de manera negativa con el OD. Otro ejemplo en el que se expresa la relación del azufre con variables indicadoras de calidad se presenta entre la actividad enzimática AAS y los diferentes tipos de pH determinados en el suelo con los cuales hubo una correlación negativa, esto posiblemente se deba a que la actividad arilsulfatasa se manifiesta mejor bajo un medio ácido (Marschner, 1995).

Otras variables destacadas en el AC fueron; en agua: Sólidos Totales Disueltos (STD), Sulfatos, Oxígeno Disuelto (OD), Conductividad eléctrica, Dureza total, Dureza Calcio, Temperatura y Alcalinidad Total; en suelo: Uso de suelo, Materia Orgánica (MOS), Fósforo, pH potencial, pH activo, pH en solución salina de NaF, Conductividad Eléctrica (CES) y la Actividad Arilsulfatasa (AAS) y en sedimento: pH, Conductividad Eléctrica (CESed).

El cambio de uso de suelo está dado por el movimiento de grandes masas de suelo para la implantación de cultivos, la creación de trillas por el ganado en los pastizales, el pisoteo de los

márgenes desprotegidos de los ríos, además de la propensión natural del suelo a la erosión que libera sedimentos llegando a los cursos de agua. Se ha reportado que la erosión proveniente de las áreas cultivadas contribuye con 38%, y la de los pastos con 26% de los sedimentos que alcanzan el agua (Ceccon, 2003). Las actividades agrícolas han sido señaladas como la mayor fuente de contaminación difusa en ríos (Auquilla *et ál.*, 2005).

Auquilla *et ál.*, (2005) señalan que el OD puede ser empleado como indicador de calidad del agua pues la mayoría de los procesos de descomposición de la materia orgánica e inorgánica demandan oxígeno. Esto concuerda con lo observado en esta investigación ya que el OD presentó una correlación negativa con el uso de suelo ($r=-0.54$, $p=0.00$), y a medida que el afluente va corriente abajo hacia sitios perturbados, la concentración de STD y sales aumentan, lo cual provoca que la cantidad de oxígeno presente en el afluente se vea reducida debido a la presencia de sólidos en el caudal que impiden el flujo y movimiento del agua. Los STD afectan negativamente la calidad del agua pues son importantes indicadores ya que su presencia disminuye el paso de la luz a través de agua evitando la actividad fotosintética en las corrientes y limitante para la producción de oxígeno.

La temperatura es un factor determinante en la interacción suelo-agua-sedimento, ya que incrementa la solubilidad de sales, acelera la velocidad de reacciones metabólicas, la descomposición de la materia orgánica y provoca una disminución en la solubilidad de los gases (Ayala. 2011). Los resultados encontrados señalaron que la temperatura tiene una correlación ligeramente negativa con el OD con un nivel de confianza del 95%, ya que a medida que la temperatura del sistema aumenta, la solubilidad de los gases disminuye siguiendo a ley de Henry, por lo tanto, la concentración del OD se ve reducida (Wetzel, 2001).

Al incrementarse la temperatura también se aumenta la solubilidad de las sales, esto quedo comprobado con la correlación positiva entre la variación de la temperatura y la conductividad eléctrica ($r=0.5618$, $p=0.00$). Lo anterior se relaciona con la presencia de STD, variable que indica la presencia de aniones en el agua como carbonatos, bicarbonatos, nitratos, nitritos, sulfatos. Los valores de STD y de la conductividad aumentaron conforme disminuyó el gradiente altitudinal, esto se puede explicar ya que a medida que se incorporan partículas de suelo o residuos vegetales al afluente son arrastrados corriente abajo lo que hace que los sitios con menor altitud tengan concentraciones más elevadas de estas variables.

De los elementos evaluados, el fósforo fue el único nutrimento que presentó una correlación significativa con la temperatura ($r = 0.52$, $p = 0.00$), debido a que la temperatura es determinante en la liberación de fósforo del suelo, que puede ser incorporado al agua por medio del arrastre de partículas ocasionado por el lavado del suelo.

El pH activo y potencial determinado en suelo mostró una variación directamente proporcional con la variación del uso de suelo ($r = 0.83$; $r = 0.81$, respectivamente), mientras que en el pH determinado con NaF se encontró un comportamiento inverso ($r = -0.84$), esto se debe a que, a medida que cambia la vocación del suelo (de forestal conservado a forestal bajo manejo o a actividades agropecuarias), se reducen las propiedades naturales del suelo, perdiéndose el contenido de MOS y humedad, factores que en su ausencia disminuyen de manera notable los contenidos de alófono y minerales amorfos (Campos *et al.*, 2001).

Se observó una correlación ligeramente negativa ($r = -0.62$, $p = 0.00$), entre uso de suelo y la MOS, debido a que, a medida que se va modificando el sistema, la presencia de residuos vegetales se ven reducidos, por disminución del número de árboles que aportan hojarasca y son una barrera natural contra la erosión del sistema, además de que se ven reducidos los procesos de adsorción química desarrollados en presencia de la MOS (Ceccon, 2003). Al igual que otras variables, la MOS es un buen indicador de la calidad del suelo, su presencia supone la existencia de microorganismo que ayudan en el desarrollo de ciclos biogeoquímicos de otros nutrimentos.

El AC determinó que la concentración de sulfatos en agua puede ser un parámetro indicador de calidad, ya que se correlacionó de manera significativa con el uso de suelo ($r = 0.76$, $p = 0.00$), y a medida que el suelo se va alterando las concentraciones de azufre en el agua aumentaron. De igual manera se encontró que los sulfatos se correlacionan positivamente con la temperatura, la conductividad eléctrica, la dureza total, los STD y la alcalinidad, esto posiblemente se deba, al incremento en la solubilidad de las sales presentes en el medio al aumentar la temperatura.

Por otra parte, tanto en agua como en suelo se encontró una relación inversa entre las concentraciones de azufre disponible y el OD, lo que ratifica lo esperado, debido a que una parte del ciclo del azufre se lleva a cabo dentro del sistema acuático liberándose compuestos como el ion SO_4^{2-} y ácido sulfhídrico (H_2S) útiles en procesos metabólicos.

Los cambios en el ambiente modifican la concentración de oxígeno ya que al quitar la vegetación adyacente a la zona de ribera se van perdiendo franjas naturales de protección al caudal, lo que provoca que aumenten las partículas de suelo arrastradas dentro del afluente teniendo como consecuencia no solo la contaminación física en el sistema sino que también se presenta una reducción en la cantidad de oxígeno dentro del sistema, además de que lo convierten en un sitio vulnerable a procesos de erosión eólica e hídrica.

Entre los compartimentos de azufre estudiados, la actividad enzimática ASS presente en el suelo, resulto ser la que mejor se relaciona con otras variables indicadoras de calidad. Entre los resultados obtenidos se puede observar que la AAS posee una correlación negativa entre el uso de suelo ($r = -0.73$, $p = 0.00$), y el pH ($r = -0.79$, $p = 0.00$) esto último, de acuerdo con Lillo *et al.* (2011), la ASS se desarrolla mejor en ambientes ácidos, por lo tanto, al volverse más alcalino el medio la actividad enzimática también se ve frenada. Contrario a esto se observó una correlación ligeramente positiva entre la AAS y la MOS ($r=0.6001$, $p=0.00$), esto se debe porque la presencia de MOS contribuye en el desarrollo de microorganismos que al morir o sufrir el proceso de apoptosis libera sustancias al medio, entre las que se encuentran las enzimas capaces de catalizar numerosas reacciones.

5. ANÁLISIS DE COMPONENTES PRINCIPALES (ACP)

Con el objetivo de seleccionar las variables de agua, suelo y sedimento más representativas de esta investigación se realizó un Análisis de Componentes Principales (ACP). Para ello, se emplearon las variables de mayor peso resultantes del AC. Las variables utilizadas para el ACP fueron OD, Alcalinidad Total, Dureza Calcio, Dureza total, STD, Uso de suelo, pH en solución de NaF, pH activo, pH potencial, CES, MOS, Fosforo, Nitrógeno, Azufre del Suelo, la AAS, pH_{Sed} y CES_{Sed}.

Resultado de este análisis se logró determinar un total de 17 componentes de los cuales 3 componentes tuvieron valores mayores o igual a 1.0, y que juntos presentan una varianza acumulada de 80.859% de los datos (Cuadro 3).

Cuadro 3. Análisis de Componentes Principales.

<i>Numero de Componente</i>	<i>Eigenvalor</i>	<i>% de Varianza</i>	<i>% Acumulativo</i>
1	9.94972	58.528	58.528
2	2.24984	13.234	71.762
3	1.54648	9.097	80.859
4	0.861594	5.068	85.927
5	0.627103	3.689	89.616
6	0.605315	3.561	93.177
7	0.312473	1.838	95.015
8	0.259808	1.528	96.543
9	0.180881	1.064	97.607
10	0.161202	0.948	98.555
11	0.12011	0.707	99.262
12	0.0701056	0.412	99.674
13	0.0338983	0.199	99.874
14	0.0100966	0.059	99.933
15	0.00857899	0.050	99.984
16	0.00185527	0.011	99.995
17	0.000931392	0.005	100.000

En el cuadro 4 se muestra el peso de las variables que conforman cada componente. Dentro del primer componente las variables de mayor peso fueron hacia el extremo positivo son; Fosforo, Dureza Calcio, STD, Uso de suelo, pH potencial y CESed.

Cuadro 4. Pesos de los Componentes Principales.

	<i>Componente 1</i>	<i>Componente 2</i>	<i>Componente 3</i>
C.E. Sed	0.292285	0.167529	-0.158121
pH Sed	-0.214784	-0.257438	-0.0444887
OD	-0.221484	-0.336497	-0.0627423
Alc. Tot	0.263215	0.118016	-0.272787
Dureza Calcio	0.28761	0.128876	-0.18858
Dureza total	0.217822	0.146223	-0.252137
STD	0.294959	0.13201	-0.188105
Uso de suelo	0.283485	-0.17009	0.182114
pH NaF	-0.249961	0.0626734	-0.374859
pH H ₂ O	0.242681	-0.223647	0.328429
pH KCl	0.273582	-0.302066	0.092444
CES	0.269666	0.248633	0.0823123
MOS.	-0.206242	0.385376	0.191594
Fósforo	0.299928	-0.0391986	0.0565833
Nitrógeno	0.00932318	0.361923	0.607076
Azufre S	-0.129952	0.374545	-0.200205
AAS	-0.184827	0.25656	0.121432

En la figura 21 se observa que el peso de este primer componente está inclinado hacia el extremo positivo señalando la relación entre las variables del agua a partir de las características del suelo, por lo tanto, está determinado por las variables del suelo, y explica la importancia que representa este factor en el ambiente ribereño ya que, a partir del suelo se va a establecer la calidad del agua en cuanto al material aportado por el suelo y el contenido del sedimento arrastrado en el caudal.

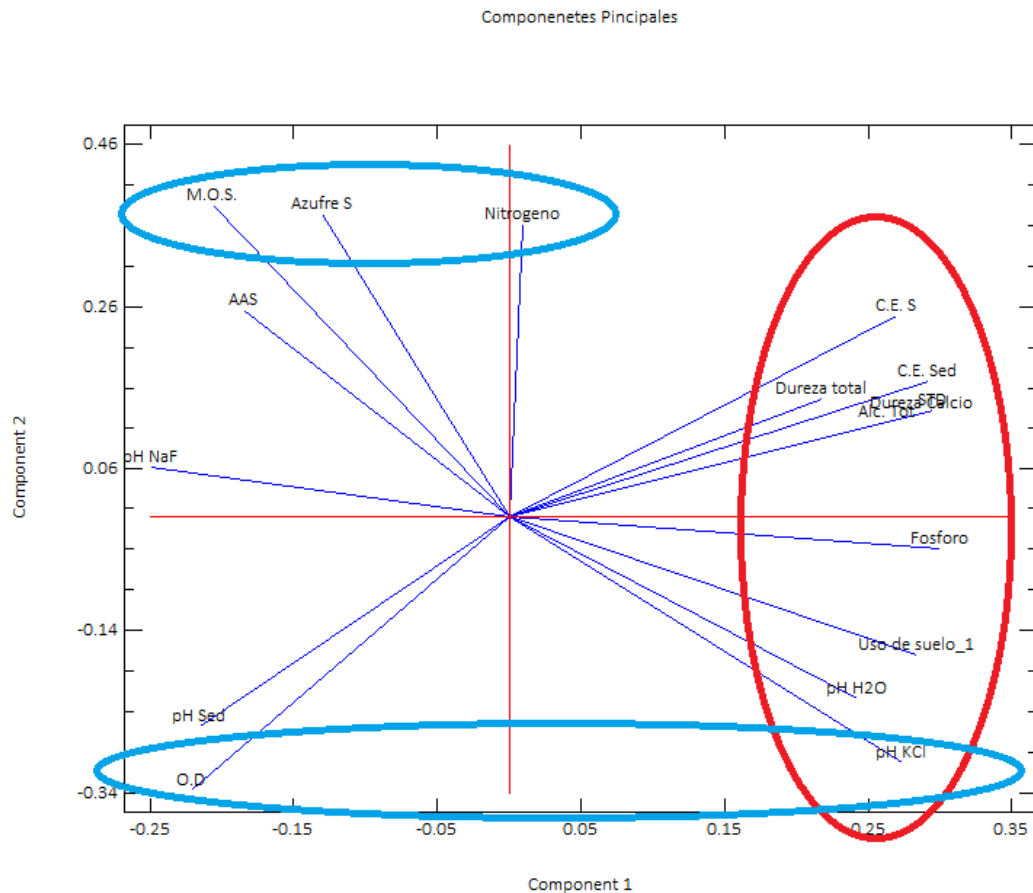


Figura 21. Comportamiento del primer (rojo) y segundo (azul) componente.

El segundo componente está determinado, en el extremo positivo por MOS, el nitrógeno y el azufre en suelo, mientras que en el extremo negativo se encontró el OD y el pH potencial (figura 21). Este componente determina el comportamiento del OD y su papel en la oxidación de la MOS, la cual modifica los valores del pH al liberar H^+ lo que va a generar una acidificación del sistema.

El tercer componente (figura 22) está determinado principalmente por las variables del suelo, en el extremo negativo se encuentran el azufre en suelo y el pH en solución salina de NaF del

suelo; del lado contrario se encuentran el pH activo y el nitrógeno del suelo. Al igual que el primer componente, éste nos señala las características de sistemas a partir de las propiedades del suelo.

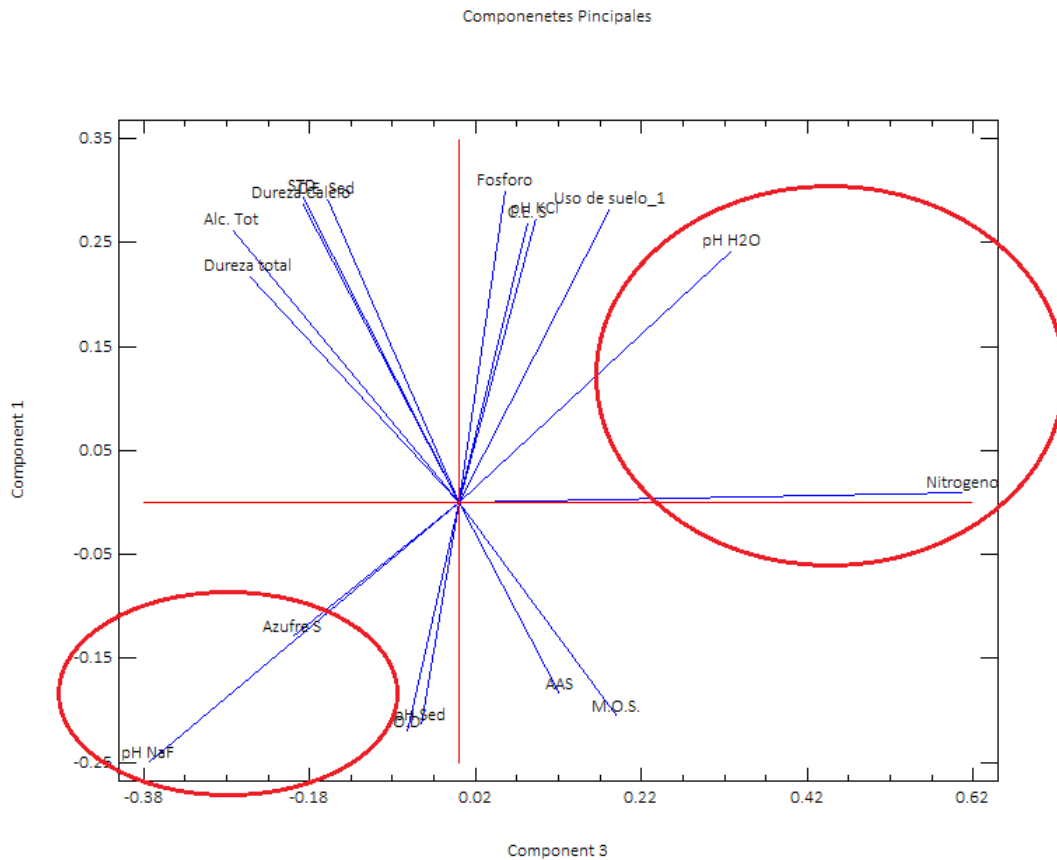


Figura 22. Comportamiento del tercer componente.

A pesar de que el ACP relacionó diferentes variables de agua, suelo y sedimento en el comportamiento del sistema, no se encontró relación en las concentraciones de azufre determinadas en agua y sedimento dentro de algún componente, mientras que, el azufre disponible en suelo se incluyó dentro del segundo componente, que determina el comportamiento del agua a través de las variables del suelo.

6. ANÁLISIS DE CORRELACIONES CANÓNICAS (ACC).

Las correlaciones canónicas constituyen una generalización de las correlaciones simples y múltiples, estimando la correlación existente entre un conjunto de variables X_i y otro conjunto de variables dependiente Y_i (Martínez. 2009).

Una vez identificadas las variables estadísticamente más significantes, se realizó un Análisis de Correlaciones Canónicas (ACC) el cual permitió identificar asociaciones entre dos conjuntos de variables.

El Cuadro 5 muestra el resultado del ACC, en donde se arrojan cinco correlaciones canónicas de las cuales únicamente existen dos correlaciones con valores de P inferiores a 0.05. Ambas correlaciones explican el 25.32% de la varianza total de los datos. En este cuadro se aprecia que la primera correlación, a pesar de que posee una magnitud de 0.9464 únicamente expresa el 2.63 % del funcionamiento del sistema. La segunda correlación presenta una magnitud de 0.7222 expresando el 25.31 % del comportamiento del sistema.

Cuadro 5. Correlaciones Canónicas

Número	Eigenvalor	Correlaciones Canónicas	Lambda de Wilks	Chi-Cuadrada	G.L.	Valor-P
1	0.895847	0.946492	0.0263735	110.88	35	0.0000
2	0.521695	0.722284	0.253218	41.8919	24	0.0133
3	0.366997	0.605803	0.529407	19.398	15	0.1963
4	0.10164	0.318811	0.836341	5.45092	8	0.7085
5	0.0690353	0.262746	0.930965	2.18179	3	0.5355

Los Cuadros 6 y 7 muestran los coeficientes canónicos para cada uno de los conjuntos determinados. La primera correlación está determinada por los STD y el fósforo con significancia positiva, mientras que las variables con significancia negativa fueron los sulfatos y la dureza total y el pH potencial. Esta correlación explica el comportamiento en el sistema acuático, al relacionar el contenido de sulfatos y de iones Ca^{2+} y Mg^{2+} a partir de los sólidos disueltos dentro del caudal.

La segunda correlación está determinada positivamente por la dureza de calcio, dureza total, los STD y la MOS, mientras que, de manera negativa está determinada por la alcalinidad total, la DBO5 y los STS. Este coeficiente explica el nivel de contaminación que presenta el afluente.

Cuadro 6. Coeficientes para las Variables Canónicas del Primer Conjunto.

Alc. Tot	0.00139131	-2.81138	1.22609	0.636368	-2.38977
Dureza Calcio	0.537232	1.57324	-0.545575	3.43571	2.54142
Dureza total	-1.05753	4.7094	-0.578537	-4.40907	2.51453
Sulfatos	-2.90218	-0.948228	11.4111	-1.54517	-2.9046
DBO5	-0.120836	-1.19165	0.346469	-0.445302	0.42922
STD	3.39103	1.08406	-12.0507	-3.29348	2.73575
STS	0.830505	-4.33447	1.40227	5.07087	-2.3412

Cuadro 7. Coeficientes para las Variables Canónicas del Segundo Conjunto.

pH H ₂ O	0.38912	0.173766	1.1345	2.21195	2.25901
pH KCl	-1.03702	0.843901	1.07664	-1.43501	-2.78282
MOS	-0.0230491	1.53286	1.92662	0.414027	2.04798
Fósforo	1.57285	0.246155	-0.241018	-0.0666064	2.00096
Nitrógeno	-0.309445	0.0458818	-1.47837	-0.33626	-2.08843

Complementando el ACC se realizó un análisis de comparación de dos muestras para identificar si existen diferencias entre las variables del suelo y las distancias en que se tomaron las muestras. Los resultados encontrados señalan que los parámetros con valor de $p < 0.05$ y estadísticamente diferentes entre ambas distancias fueron: DA, pH activo, pH potencial, MOS, Conductividad eléctrica (CES), Fósforo, Azufre y la ASS.

La diferencia entre ambas distancias se puede dar por la acción que genera el caudal del río cuando aumenta su contenido de agua, lo que provoca un efecto de erosión sobre el suelo. Otra razón puede ser consecuencia de la acción que genera el ganado en la zona adyacente a la zona ribereña, donde se modifican las propiedades del suelo al compactarlo, modificando así la DA, además, al modificarse la vocación del suelo de uso forestal a uso agrícola-pecuario se reduce el aporte de materia orgánica que, de acuerdo al ACM, al modificar el contenido de MOS se modifica también la conductividad eléctrica, la cual está en estrecha relación con el pH, el fósforo y el azufre.

Tanto la DA, el pH, la MOS, fósforo y la ASS son variables sensibles a cambios en la estructura y vocación del suelo, por lo tanto, se puede decir que cualquier alteración del suelo se verá reflejada en estos parámetros pudiendo ser utilizados como indicadores de calidad del suelo.

7. ANÁLISIS DE CORRELACIÓN ENTRE COMPARTIMENTOS DE AZUFRE

Finalmente, para determinar si existe o no relación entre los tres compartimentos estudiados y las concentraciones de azufre determinadas en cada uno de ellos, se hizo un Análisis de Correlación (Cuadro 8).

Cuadro 8. Correlaciones entre los contenidos de azufre.

	Sulfatos	Azufre sedimento	Azufre Suelo	AAS
Sulfatos		0,3268	-0,0570	-0,5911
		(57)	(66)	(66)
		0,0131	0,6492	0,0000
Azufre sed			0,2851	0,3081
			(57)	(57)
			0,0316	0,0197
Azufre Suelo				0,3692
				(132)
				0,0000

En el Cuadro 8 se aprecia que los resultados señalan que todas las formas de azufre determinadas se relacionan entre sí, de manera significativa debido a que presentan un valor de P inferior a 0.05. También se observa que el azufre determinado tanto en suelo como en agua no se relacionan entre sí, sin embargo, para el azufre determinado en sedimento ambos compartimentos se relacionaron, esto era de esperarse ya que tanto el suelo como el agua contribuyen en el contenido del azufre en sedimento.

Por otro lado, la actividad enzimática fue la única de las formas determinadas de azufre que se relacionó con todas las demás, sin embargo, el coeficiente de correlación con mayor significancia se dio únicamente con los sulfatos del agua de manera inversa. Esto quiere decir que, a medida que la actividad enzimática ve disminuida su actividad el contenido de sulfatos en el agua se incrementa, o viceversa. Esto puede tener diversas causas, como ya se mencionó anteriormente, la AAS se desarrolla mejor en los sitios con buen estado de conservación ya que no existe un aporte externo de azufre que pueda suplir las necesidades del sistema, y a medida que se van modificando la vocación del suelo hacia un uso agrícola, la AAS disminuye su actividad debido a los fertilizantes que son suministrados al suelo para mejorar el rendimiento de los cultivos provocando que lleguen al agua por medio del arrastre de algunas partículas del suelo con altos contenidos de nutrimentos entre los que se encuentra el azufre ya que en esos sitios no existe una barrera de vegetación que absorba dichos nutrimentos e impida el efecto erosivo sobre el suelo.

CONCLUSIONES

- a) Se identificaron cinco diferentes usos de suelo: Forestal, Forestal-Perturbado, Pecuario, Agrícola-Pecuario y Urbano.
- b) Los factores antropogénicos que afectan al sistema son la tala y el desmonte que se hacen durante la conversión de áreas forestales hacia terrenos agrícolas y agostaderos.
- c) La reducción en la vegetación adyacente a los ambientes ribereños provoca que se incrementen los contenidos de STD, STS, conductividad eléctrica, alcalinidad, dureza de calcio; y disminuye la concentración de oxígeno dentro del sistema.
- d) En sedimento la conductividad eléctrica fue la única variable que se correlacionó positivamente con el cambio en uso de suelo.
- e) El cambio en el uso de suelo incrementó los valores de pH activo, potencial y la concentración de fósforo, mientras que la MOS, pH en NaF y nitrógeno del suelo disminuyeron sus valores.
- f) Los sulfatos en agua presentaron concentración 30 veces mayor en los sitios con alto nivel de perturbación (V. Libramiento $7.4 \text{ mg SO}_4^{2-} \text{ L}^{-1}$), respecto a sitios mejor conservados (C. Amalacaxco $0.2 \text{ mg SO}_4^{2-} \text{ L}^{-1}$).
- g) El azufre en sedimento presentó un comportamiento similar, en sitios de uso forestal y pecuario, las concentraciones de este elemento fueron de 0.04%, mientras que en sitios con uso agrícola y urbano los contenidos de azufre se incrementaron considerablemente hasta 0.25 %.
- h) El poder amortiguador del suelo quedó evidenciado ante el azufre disponible en suelo debido a que no presentó diferencia significativa entre los diferentes usos de suelo.
- i) A pesar de que no se correlacionó con el uso de suelo, la AAS puede ser empleada como indicador de calidad por la relación que tiene con la MOS, que es el sustrato donde realiza su acción catalítica.

REFERENCIAS

- Aparicio M. 1994. Fundamentos de hidrología de superficie. Ed. LIMUSA Grupo Noriega Editores. México. pp 303.
- APHA, AWWA and WPCF. 1992. Métodos normalizados para el análisis de aguas potables y residuales. edición 17. Ed. Díaz Santos. Washington. pp 1995.
- Auquilla R. Astorga Y. Jiménez F. 2005. Influencia del uso de suelo en la calidad del agua en la subcuenca del río Jabonal, Costa Rica. Recursos Naturales y Ambiente Núm. 48. pp. 81-92.
- Ayala M.2011. Interacción ecológica del sistema agua-suelo en ambientes ribereños del Parque Nacional Izta-Popo y zonas de influencia. Tesis de licenciatura. México Facultad de Estudios Superiores Zaragoza. Universidad Nacional Autónoma de México. pp 7-28.
- Baltazar M. 2009. Actividad arilsulfatasa y azufre en suelo y tejido foliar en cuatro especies de coníferas en bosque templado. Tesis de licenciatura. México. Universidad Nacional Autónoma de México. pp 32-36.
- Bandeira, M. 2003. Los bosques ribereños y la restauración y conservación de las cuencas hidrográficas. Revista Ciencias. No. 72 pp. 46-53.
- Benavides A. 1998. El azufre en las plantas. Departamento de Horticultura UAAAN, Saltillo. México. pp 1-7.
- Blasco, L.M. 1972. Contenido y metabolismo del azufre en suelos volcánicos de Centroamérica. In 2º Panel sobre suelos volcánicos de América. Plasto Colombia. IICA. Serie de informes y conferencias, cursos y reuniones No. 82 pág. 107-123.
- Bornemisza, E., Fassbender, H. 1987. Química de suelos con énfasis en suelos de América Latina. 2da edición. Ed. IICA San José Costa Rica. pp 137-145.
- Bremmer, J. 1965. Total nitrogen. In: C.A. Black (ed.), Methods of soil analysis. Part 2. Agronomy 9. American Society of Agronomy. Madison, Wisconsin. pp 1149-1178.
- Briones J. 2011. Deterioro ambiental en la vegetación ribereña del río Magdalena, D.F., México. Tesis de licenciatura. México Facultad de Ciencias Universidad Nacional Autónoma de México. pp.2-15.
- Campos A., Oleschko K., Cruz L., Etchevers J., Hidalgo C. 2001. Estimación del alófono y su relación con otros parámetros químicos en andisoles de montaña del volcán Cofre de Perote. Publicado en Terra Vol. 9 No. 2. pp. 105-116.
- Ceccon E. 2003. Los bosques ribereños y la restauración y conservación de cuencas hidrográficas. Ciencias Núm. 72. pp. 46-53.

- Cerón L., Melgarejo L. 2005. Enzimas del suelo: indicadores de calidad. Acta Biológica Colombiana. Vol. 10 No. 1 pp. 5-18.
- Chien S., Gearhart M., Collamer D. 2008. Acidez generada por los fertilizantes nitrogenados: Nueva valuación de requerimientos de cal. Consultado el 17-02-13. Disponible en [http://www.ipni.net/publication/ia-lacs.nsf/0/91EE9C2C2F58FDF78525799500760514/\\$FILE/4.pdf](http://www.ipni.net/publication/ia-lacs.nsf/0/91EE9C2C2F58FDF78525799500760514/$FILE/4.pdf)
- CONANP, 2011. Ubicación geográfica. Disponible en <http://iztapopo.conanp.gob.mx/> (consultada el 20-Febrero-2012).
- Contreras S.S. 2001. Ordenamiento ecológico regional en la zona de influencia de los volcanes Popocatepetl e Iztaccíhuatl, México. pp. 1-6.
- De Anda P., Miranda G. 2004. Contribución al conocimiento de la calidad del agua en diferentes corrientes superficiales del Parque Nacional Izta-Popo y su zona de influencia. Tesis de licenciatura. Facultad de Estudios Superiores Zaragoza. Universidad Nacional Autónoma de México.
- Daily, G. 1997. Ecosystem Services: Benefits supplied to Human Societies by natural Ecosystems. Ecology Vol. 2 pp 1-16.
- Díaz P., Wilmer A., Rueda J., Acosta O., Martínez O, Castellanos H. 2010. Composición florística del bosque ribereño del río San José, Reserva Forestal de Imataca, estado Bolívar, Venezuela. Acta Botánica Venezuelica, Vol. 33, Núm. 1. pp. 1-21.
- Escudero, A., Mediavilla S. 2003. Dinámica interna de los nutrientes. Revista Ecosistemas Vol. 12 No. 1 pp 1-8.
- Figueroa H. Longeri L. Vidal I. 1998. Capacidad de oxidación de azufre en algunos suelos de la zona centro-sur de Chile. Agricultura Técnica Vol. 58 Núm. 2. pp. 151-168.
- Flores, F., Agraz C., Benítez D. 2005. Ecosistemas acuáticos costeros: importancia, retos y prioridades para su conservación. In: Conservación y restauración. pp 249-266.
- Franco, U. and S. Schenk (2001). Modelling of Carbon Dynamics in a Rural Area of Central Germany. In: *Sustainable Management of Soil Organic Matter*. Rees R.M. et al. (ed). CABI Publishing. UK.
- Fuentes F., Massol-Deyá A. 2002. Manual de laboratorios, ecología de microorganismos. 3^{ra} parte. Universidad de Puerto Rico. Pág. 1-21.
- Granados D., Hernández M., Flores G. 2006. Ecología de las zonas ribereñas. Revista Chapingo. pp. 55-59.
- Graniel E. Pacheco A. Coronado V. 2009. Origen de los sulfatos en el agua subterránea del sur de la sierra de Ticul, Yucatán. Facultad de Ingeniería. Universidad Autónoma de Yucatán. pp. 49-58.

- Glockner J. 2002. El Popocatépetl y los pueblos volcaneros. Centro Universitario para la Prevención de Desastres Regionales.
- Hordijk, A., Van Engelen M., Jonker A. 1989 Determination of total sulfur in freshwater. In Water Research. Vol. 23. pp. 853–859.
- Huxtable, R. J. 1986. Biochemistry of Sulphur and effects of sulfur deficiency plants. Plant Soil.
- Jackson, M. 1964. Análisis químico de suelos. Ed Omega. Barcelona, España.
- Landa, R., Meave, J. y Carabias, J. 1997. Environmental deterioration in rural Mexico: an examination of the concept. Ecological Applications. Vol. 7 Núm. 1. pp. 316-329.
- Lazcano I. 1998. El papel del azufre y el potasio en la producción de hortalizas de alta calidad en México. En Informaciones agronómicas. Vol.2 Núm.3 pp. 1-5.
- Legorreta C. 2009. Ríos, lagos y manantiales del Valle de México. Universidad Autónoma Metropolitana. pp. 12-20, 206.
- López N. Borrego J. Morales J. Carro B. 2006. Variación estacional de los contenidos de carbono orgánico, inorgánico y azufre en los sedimentos del estuario de los ríos Tinto y Odiel (SO España). Geogaceta Núm 40. pp. 295-298.
- López C. y Marvez R. 1985. Contenido y variación estacional del azufre en seis cultivares de café (*Coffea arabica* L.). Agronomía Costarricense Vol. 9. Núm. 2. pp. 235-240.
- Marschner H. 1995. Mineral nutrition of higher plants. Ed. Academic Press Inc. United States of America. pp. 261-275.
- Martínez J. 2009. Contenido foliar de N, P, Ca, Mg y K en especies arbóreas de bosques templados y calidad del suelo en la Sierra de Manantlán y la Sierra Juárez. Tesis para obtener título de Biólogo. Universidad Nacional Autónoma de México.
- NMX-AA-007-SCFI-2011. Análisis de agua. Determinación de la temperatura en aguas naturales, residuales y residuales tratadas.
- NMX-AA-008-SCFI-2011. Análisis de agua. Determinación del pH.
- NOM-AA-012-SCFI-2001. Análisis de agua. Determinación de oxígeno disuelto en aguas naturales, residuales y residuales tratadas.
- NMX-AA-034-SCFI-2012. Análisis de agua. Determinación de sólidos y sales disueltas en aguas naturales, residuales y residuales tratadas.
- NMX-AA-093-SCFI-2009. Análisis de agua. Determinación de la conductividad electrolítica.
- NOM-021-SEMARNAT-2000. Que establece las especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de suelos, estudio, muestreo y análisis. Secretaria del medio ambiente y recursos naturales.

- NOM-AA-036-SCFI-2001. Análisis de agua. Determinación de acidez y alcalinidad en aguas naturales, residuales y residuales tratadas.
- NOM-AA-072-SCFI-2001. Análisis de agua. Determinación de dureza total en aguas naturales, residuales y residuales tratadas.
- NMX-AA-074-1981. Análisis de agua. Determinación del ion sulfato.
- Ortega P., Villalva A. 1986. El sistema del azufre en el ambiente marino. Departamento de Geología. Universidad de Sonora. Vol. 3 No. 2. pp 23-29.
- Parsons, T.; Yoshiaki, L.; Carol, M. 1984. A manual of chemical and biological methods for seawater analysis. Pergamon Press. Oxford, England. pp. 173.
- Peña J. 2009. Contenido foliar de Zn, Mn, Cu y Fe en Pinus, Abies y Quercus en bosques de áreas naturales protegidas. Tesis de Licenciatura. México. Facultad de Ciencias. Universidad Nacional Autónoma de México. pp 56-65.
- Pérez A. 1974. Evaluación del azufre disponible en algunos suelos agrícolas de Costa Rica. Tesis de Maestría en Ciencias. Instituto Interamericano de Ciencias Agrícolas de la OEA. Turrialba, Costa Rica. pp 3-11, 28-50.
- Plan de desarrollo municipal de Amecameca 2009-2012. H. Ayuntamiento Del Municipio de Amecameca.
- Pritchett, W. 1991. Suelos forestales. Ed. Limusa. México. pp 634.
- Ramos S. 2001. Análisis de calidad del agua y biomasa del fitoplancton de la presa Emiliano Zapata, Morelos, México. Tesis de licenciatura. Facultad de Estudios Superiores Zaragoza, Universidad Nacional Autónoma de México. México. pp 60-61.
- Russell E., y Russell W. 1968. Las condiciones del suelo y el crecimiento de las plantas. Ed. Aguilar. Madrid, España. pp 803-811.
- Sainz H., Echeverria H. & Angelini H. 2011. Niveles de materia orgánica y pH en suelos agrícolas de la región Pampeana y Extrapampeana Argentina. Informaciones agronómicas No. 2. pp 6-11.
- Segnini S. & Chacón M. 2005. Caracterización físico química del habitat interno y ribereño de ríos andinos en la Cordillera de Mérida, Venezuela. Ecotrópicos. Vol. 18. Núm. 1. pp. 38-61.
- Sepúlveda A., Geissen V., Ochoa S., Jarquín A., Hernández S., Capetillo E. & Zamora L. 2009. Influencia de tres tipos de vegetación ribereña en el control de la erosión fluvial en Pantanos de Centla, México. pp 1153-1163.
- Stewart, J.W.B.; Saggar S. 1979. The nature and forms of sulfur in organic matter fractions of soils selected along an environmental gradient. Soil Science Soc Society of America Journal Vol.43 No 5 pp 981-985.

- Tabatabai M., Bremner J. 1970. Arylsulfatase Activity of Soils. In Soil Science Society of America Journal. Vol.34No2. pp. 225-229.
- Universidad de Navarra. 2000.España. Libro electrónico - Ciencias de la tierra y del medio ambiente. Disponible en:
<http://www1.ceit.es/Asignaturas/Ecologia/Hipertexto/04Ecosis/130Ciclos.htm>
- Wetzel R. 2001. Limnology. Lake and river ecosystems. Academic Press. New York.
- Zamora J.,Cristancho F.2008. La humedad en las propiedades físicas del suelo. Universidad Nacional de Colombia. Bogotá, Colombia.