



**BENEMÉRITA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA
DE PUEBLA**



INSTITUTO DE CIENCIAS

POSGRADO EN CIENCIAS AMBIENTALES

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

**ESTUDIO DE LA LLUVIA ÁCIDA Y SUELOS DE LA REGIÓN
NORESTE DEL POPOCATÉPETL**

TESIS

Que para obtener el grado de:

MAESTRA EN CIENCIAS AMBIENTALES

Presenta

DIANA ATONAL SANDOVAL

Director de tesis:

Dr. JOSÉ VÍCTOR R. TAMARÍZ FLORES

Agosto 2018



**BENEMÉRITA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE
PUEBLA**



INSTITUTO DE CIENCIAS

POSGRADO EN CIENCIAS AMBIENTALES

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

**ESTUDIO DE LA LLUVIA ÁCIDA Y SUELOS DE LA REGIÓN
NORESTE DEL POPOCATÉPETL**

TESIS

Que para obtener el grado de:

MAESTRA EN CIENCIAS AMBIENTALES

Presenta

DIANA ATONAL SANDOVAL

Comité tutorial:

Director	Dr. José Víctor R. Tamaríz Flores
Integrante Comité Tutorial	Dra. Rosalía del Carmen Castelán Vega
Integrante Comité Tutorial	Dra. María Lilia Cedillo Ramírez
Integrante Comité Tutorial	Mtra. Sandra Esther Barillas Arriaga
Integrante Comité Tutorial	Dr. Fernando Hernández Aldana

Agosto 2018

AGRADECIMIENTOS

A través de estas líneas quiero expresar mi más sincero agradecimiento a todas las personas que con su soporte científico y humano han colaborado en la realización de este trabajo de investigación.

Quiero agradecer en primer lugar a las instituciones que han hecho posible la realización del trabajo presentado en esta tesis, al posgrado en Ciencias Ambientales por darme la oportunidad de realizar esta maestría y permitirme alcanzar un logro más en mi vida profesional y ser parte de la comunidad dedicada a la conservación de los recursos naturales. Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por la ayuda económica brindada durante los años de maestría.

A los profesores del Departamento de Ciencias Agrícolas, muy especialmente a mi tutor y director de tesis al Doctor José Víctor R. Tamaríz, por compartir sus conocimientos y por la acertada orientación que me permitió un buen aprovechamiento en el trabajo realizado para que esta tesis llegara a buen término, y a los maestros Abel y César por su gran ayuda en las cuestiones de laboratorio.

A mi comité tutorial, a la Dra. Rosalía Castelán, Dra. María Lilia Cedillo, Mtra. Sandra Barillas, Dr. Fernando Aldana, por sus constantes conocimientos y aportaciones para la buena elaboración de este trabajo.

A mis compañeros de maestría, en especial a Juan Gómez, Luis Gutiérrez, Antonio Pacheco por su apoyo durante las salidas al campo y a mis amigas: Cristina Covarrubias, Diana Robelo y Karen Saez, por formar parte de esta etapa de mi vida y su apoyo incondicional en los buenos y malos momentos. Y agradezco al resto de la generación 2016-2018, por la bonita amistad brindada durante estos años.

Agradezco infinitamente a mi familia, a mis tías: Enriqueta y Guadalupe Sandoval, por el apoyo incondicional que me han brindado desde mis inicios en esta universidad, por permitirme seguir con ellas y cuidarme como a una hija. A mi padre Angel Atonal y a mi hermano Angel, por la ayuda que siempre me han brindado para cumplir con mis metas y a quienes les dedico todo mi esfuerzo.

Finalmente agradezco a mi madre Lucía Sandoval, por darme la vida, la educación y la fuerza para salir adelante en cada etapa de mi vida a pesar de ya no estar aquí, cada uno de mis pasos está dedicado a ella.

Contenido

I. INTRODUCCIÓN	1
II. JUSTIFICACIÓN	3
III. MARCO DE REFERENCIA	4
3.1 Marco teórico	4
3.1.1 Contaminación atmosférica	4
3.1.2 Lluvia ácida	5
3.1.3 Fuentes de contaminantes atmosféricos	5
3.1.4 Génesis de la lluvia ácida	7
3.1.5 Efecto de la lluvia ácida sobre el suelo	8
3.1.6 Antecedentes	8
IV. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN	12
4.1 Pregunta de investigación	12
V. HIPÓTESIS	12
5.1 Hipótesis general	12
VI. OBJETIVOS	12
6.1 Objetivo general	12
6.2 Objetivos específicos	12
VII. METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN	13
7.1 Localización	13
7.1.1. Caracterización de la zona de estudio	13
7.2 Fase de campo	15
7.2.1 Sitios de muestreo	15
7.2.2 Muestreo de lluvia	21
7.2.3 Muestreo de suelo	22
7.3 Fase de Laboratorio	22

7.4 Análisis estadístico.....	23
VIII RESULTADOS Y DISCUSIÓN	25
8.1 Lluvia general	25
8.1.1 Estadística de lluvia	30
8.2 Descripción de perfiles de suelo.....	32
8.2.1 Punto 1 Xalitzintla	32
8.2.2 Punto 2 Truchera “El Rinconcito”	33
8.2.3 Punto 3 Truchera (zona abierta).....	34
8.2.4 Punto 4 Centro Ecoturístico Apatlaco	36
8.2.5 Apatlaco (zona abierta).....	38
8.2.6 Parque Nacional Iztaccíhuatl-Popocatepetl	39
8.3 Punto 1. Xalitzintla	40
8.3.1 Lluvia.....	40
8.3.2 Suelo.....	40
8.4 Punto 2. Truchera “El Rinconcito”	46
8.4.1 Lluvia.....	46
8.4.2 Suelo.....	46
8.5 Punto 3. Truchera (zona abierta).....	51
8.5.1 Suelo.....	51
8.6 Punto 4 Centro Ecoturístico Apatlaco	56
8.6.1 Lluvia.....	56
8.6.2 Suelo.....	57
8.7 Punto 5. Apatlaco (zona abierta).....	62
8.7.1 Suelo.....	62
8.8 Punto 6. Parque Nacional Iztaccíhuatl-Popocatepetl.	67
8.8.1 Lluvia.....	67

8.8.2 Suelo	68
8.9 Estadística de suelo	73
IX CONCLUSIONES	75
X. RECOMENDACIONES	76
XI. BIBLIOGRAFÍA	77

I. INTRODUCCIÓN

La contaminación es un fenómeno que ha ido en aumento con las actividades del ser humano, sin embargo, en años recientes se le ha prestado mayor atención debido a que ha aumentado la frecuencia y la gravedad de los incidentes de contaminación en todo el mundo y cada día hay más pruebas de sus efectos adversos sobre el ambiente y la salud (Santizo, 2016).

La contaminación atmosférica es producto de la explotación extensiva e intensiva de los recursos naturales, de las concentraciones industriales, urbanas y de la enorme cantidad de sustancias contaminantes arrojadas tanto a la atmósfera como al medio terrestre (García-Guadalupe *et al.*, 2016; Gómez, 2003; Pardos, 2006; Santizo, 2016).

Estas situaciones han dado lugar a que poco a poco se pierda la capacidad asimiladora y regeneradora de la naturaleza propiciando graves consecuencias que no solo se traducen en efectos directos al ser humano, sino también, en la generación de fenómenos que afectan el medio ambiente, tal es el caso de las lluvias ácidas, causadas por emisiones de óxidos de azufre (SO_x) y óxidos de nitrógeno (NO_x) que agregan un alto grado de acidez al agua y como consecuencia, efectos adversos al ser humano y a los ecosistemas (Garcés y Hernández, 2004; García-Guadalupe *et al.*, 2016).

El efecto de la lluvia ácida sobre los ecosistemas se presenta mediante mecanismos indirectos como el de la acidificación del suelo, que afecta la relación de las plantas con los microorganismos (Pardos, 2006); la lixiviación de nutrientes como el magnesio, calcio y potasio, indispensables para la vida, la liberación del ion aluminio, el cual es tóxico para todas las plantas bloqueando la absorción de nutrientes en las raíces afectando directamente el desarrollo de éstas y haciéndolas vulnerables a la acción del viento, frío, sequía, enfermedades y parásitos (Garcés y Hernández, 2004; Granados, *et al.*, 2010).

El debilitamiento y demás afectaciones a los ecosistemas pueden llegar a causar la pérdida parcial o total. El resultado final puede ser un ecosistema diferente, con otra composición de especies más simplificada, y con una menor resistencia ante nuevas perturbaciones (Hernández *et al.*, 2007).

De acuerdo a esto, es importante evaluar la calidad de la atmosfera reflejada en la acidez de las lluvias así como el comportamiento que puedan tener los suelos ante la presencia de ésta, lo anterior permitirá determinar el grado de contaminación en la zona de estudio, en este caso, la región noreste del Popocatépetl.

II. JUSTIFICACIÓN

La lluvia es uno de los factores de mayor relevancia para el planeta, al no escapar de los efectos de la contaminación sufre alteraciones provocando las lluvias ácidas, éstas afectan todo lo que esté en contacto con ella, por tal razón, es de suma importancia conocer el grado de acidez de la lluvia, para poder determinar los posibles efectos que causa en los suelos de un ecosistema, cuyas afectaciones se verían reflejadas en la pérdida de biodiversidad (Velasco *et al.*, 2002). Éste fenómeno afecta no sólo las áreas industriales, sino las zonas aledañas hasta donde los contaminantes pueden dispersarse, contribuyendo al declive y muerte de los bosques (Velasco *et al.*, 2002). Los bosques rodeados de ciudades pasan por un severo proceso de declinación debido al estrés constante al que están sometidos por efecto del acarreo de contaminantes provenientes de la ciudad (González-Medina *et al.*, 1998). Como ejemplo de lo anterior está la región Iztaccíhuatl-Popocatepetl, dos volcanes que ofrecen además de un gran paisaje, servicios ambientales como: sumideros de dióxido de carbono, regulación de climas, generación de oxígeno, asimilación de contaminantes, protección de la biodiversidad, retención de suelo evitando la erosión e inundaciones, provisión de agua, continuidad a los ciclos de nutrientes, etc. (Franco, 2014; Pérez *et al.*, 2007), esta región es denominada como “los pulmones del centro del país” por encontrarse situada en medio de zonas metropolitanas, las ciudades de México y Puebla, son el remanente más importante de bosques de coníferas y praderas de alta montaña en el centro del país, por lo cual es de gran importancia evaluar los posibles efectos que la contaminación y las emisiones constantes del volcán tienen sobre la lluvia y evaluar el comportamiento de los suelos de la región, el resultado de este trabajo servirá como medio generador del conocimiento de los niveles de contaminación en esta región (tomando la lluvia como indicador de calidad del aire), y como una base para ampliar los trabajos de investigación que permitan contemplar más de un recurso natural, viendo las posibles interacciones entre lluvia y suelos, lo anterior permitirá establecer medidas de prevención y control ante los contaminantes precursores de lluvia ácida, o bien, implementar posibles medidas de amortiguamiento ante la degradación de los ecosistemas.

III. MARCO DE REFERENCIA

3.1 Marco teórico

3.1.1 Contaminación atmosférica

Con el paso del tiempo a medida que las necesidades del hombre aumentan, la naturaleza sufre mayor daño a causa del poder que el mismo está ejerciendo sobre ella (Pardos, 2006). Las consecuencias para la contaminación del aire se reflejaron con el establecimiento de las comunidades permanentes, donde la utilización de combustible para generar fuego tuvo un impacto ambiental mayor y más intenso, a pesar de esto, aún no se hablaba de contaminación atmosférica. En Europa durante los siglos XII y XIII, la obtención de madera para el combustible se tornó tan difícil que fue necesario un combustible alternativo, y el carbón fue la solución. A mediados del siglo XVIII, comenzó la Revolución Industrial y el movimiento se expandió rápidamente por todo el mundo. Las distintas industrias emergentes requerían energía, y energía en esa época significaba combustión de carbón. Además de la contaminación producida por esta causa, muchas industrias incluyeron procesos químicos que generaron sus propios contaminantes tóxicos. La industria metalúrgica comenzó a prosperar y desplazó rápidamente al carbón como la fuente principal de dióxido de azufre en la atmósfera. Este desarrollo se expandió a Europa y América del Norte a finales del siglo XIX y durante el siglo XX al resto del planeta, propiciando el auge de ciudades sobrepobladas, contaminadas y, en consecuencia, efectos nocivos en los ecosistemas y en la salud humana (Hernández *et al.*, 2007).

No es hasta el último tercio del siglo XX cuando el acusado deterioro de algunos bosques del Centro y Norte de Europa llega a constituir un problema de Estado, que trasciende de los ámbitos científico y forestal, y se asoma a la opinión pública (Pardos, 2006). Los efectos se agravaron considerablemente después de la segunda guerra mundial cuando el mundo aumentó el consumo de energía, así como la extracción, producción y uso de diversas sustancias (tanto naturales como sintéticas) para las cuales los mecanismos naturales de asimilación o regeneración han sido rebasados o no existe. Es pues a partir de entonces que la contaminación atmosférica pasa a ser considerada como un problema de interés público en muchos países industrializados (Hernández *et al.*, 2007).

3.1.2 Lluvia ácida

La lluvia “natural” (la lluvia que no está contaminada) es algo ácida, debido a la presencia en ella de dióxido de carbono atmosférico, el cual forma ácido carbónico (H_2CO_3), debido a esta fuente de acidez, el pH de la lluvia natural es alrededor de 5.6 y puede alcanzar un valor cercano a un 7.0. (Bluhm *et al.*, 2009).

El fenómeno de la lluvia ácida se refiere a la precipitación que es significativamente más ácida que la lluvia “natural” (pH inferior a 5.6). En lugares contaminados por ácido sulfúrico y ácido nítrico el pH de esa lluvia varía entre 5 y 3 (Garcés y Hernández, 2004).

Éste fenómeno emergió como una nueva clase de estrés ambiental a finales de 1960 en los países escandinavos y en New Hampshire (EEUU). Consiste en la transferencia desde la atmósfera a la superficie terrestre, en forma húmeda o seca, de ácidos fuertes: sulfúrico y nítrico (Pardos, 2006). El término “lluvia ácida” fue utilizado por primera vez por el químico inglés Robert Angus Smith en 1872, quien investigaba la química del aire de las industrias británicas en 1850, las cuales funcionaban gracias al carbón y vertían grandes cantidades de humo a la calle. Smith demostró que estas fábricas hacían emisiones directas al aire de hollín y sustancias que cambiaban la química de la lluvia haciéndola más ácida (Granados, *et al.*, 2010). Aunque sólo fue en la Conferencia de Estocolmo en 1972, donde se habló por vez primera del tema. Al inicio de la década de los 70, ya se tenían cifras alarmantes de la contaminación de ríos y bosques de los países industrializados por esta causa (Garcés y Hernández, 2004).

3.1.3 Fuentes de contaminantes atmosféricos

Se ha determinado que las principales sustancias involucradas en el cambio de la naturaleza del agua de lluvia son las enormes descargas a la atmósfera de dióxido de azufre (SO_2) y óxidos de nitrógeno (NO_x) emitidos desde diversas fuentes (García-Guadalupe *et al.*, 2016).

3.1.3.1 Óxidos de azufre (SO_x)

El estudio de los compuestos de azufre suele limitarse al gas dominante, el bióxido de azufre (SO₂), es un gas inodoro cuando se halla en bajas concentraciones, pero en alta concentración, despiden un olor muy fuerte. (Granados *et al.*, 2010; Santizo, 2016).

Las principales fuentes de emisión son la combustión de carbón, combustibles fósiles en un 80% aproximadamente, el resto proviene de la erupción de volcanes, incineración de materia orgánica, aerosoles marinos, fundición de metales y emisión de automóviles. Está muy relacionado con un ácido fuerte, el ácido sulfúrico (SO₂; Santizo, 2016).

3.1.3.2 Óxidos de nitrógeno (NO_x)

El nitrógeno es un gas sin color, olor, ni sabor, que constituye el 78% del aire. Aunque en condiciones normales no es perjudicial para la salud, se puede combinar con oxígeno para formar diversos óxidos de nitrógeno (Santizo, 2016). Los óxidos de nitrógeno están conformados por un grupo de compuestos químicos gaseosos muy reactivos (Granados *et al.*, 2010).

La importancia biológica del óxido nítrico (NO) y del dióxido de nitrógeno (NO₂) es la mejor estudiada, ambos se consideran contaminantes ambientales, y son los más abundantes óxidos de nitrógeno producidos por el hombre en áreas urbanas (Santizo, 2016).

Tanto el NO como el NO₂ se producen de forma natural en cantidades muy superiores a las generadas por la actividad humana (Santizo, 2016). De manera más puntual, los óxidos de nitrógeno (NO_x) se producen de procesos tales como la actividad bacteriana del suelo, las erupciones volcánicas, los relámpagos y la combustión de combustibles fósiles, tanto en fuentes estacionales como en automóviles (Garcés y Hernández, 2004; García *et al.*, 2006; Gómez, 2003; Santizo, 2016).

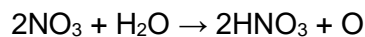
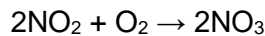
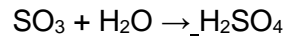
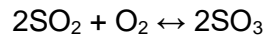
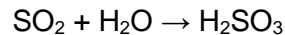
Los óxidos de nitrógeno se forman también como subproductos de la combustión de carbón y combustible para producir electricidad. El amoníaco procede de la emanación del estiércol y fertilizantes nitrogenados. Todos ellos afectan a ecosistemas forestales y

acuáticos al conducir a alteraciones en las interacciones de muchos elementos, como. N, S, H⁺, Ca²⁺, Mg²⁺ y Al³⁺ (Pardos, 2006).

3.1.4 Génesis de la lluvia ácida

La lluvia ácida se forma cuando los gases contaminantes antes mencionados, se combinan con el agua, teniendo como acelerador de las reacciones a la luz solar. Estas reacciones producen ácidos fuertes, principalmente ácido nítrico (NO₂) y ácido sulfúrico (SO₂), que se diluyen en vapor de agua, para finalmente caer a la tierra en forma de lluvia ácida, nieve y niebla, fenómeno que se conoce como deposición húmeda, estos ácidos son transportados lejos de la fuente, la dirección que toma depende en gran medida de la circulación atmosférica general. Parte de esta mezcla vuelve a la tierra como finas partículas (sulfatos y nitratos), esto se conoce como deposición seca.

La lluvia ácida se forma a través de las siguientes reacciones fotoquímicas:



El proceso de generación de las precipitaciones ácidas húmedas sigue entonces, dos etapas:

Etapa fotoquímica: Esta ocurre en fase gaseosa. El bióxido de azufre y el óxido de nitrógeno se oxidan a trióxido de azufre (SO₃) y trióxido de nitrógeno (NO₃), respectivamente, gracias a la energía proporcionada por la radiación ultravioleta del Sol y por demás agentes oxidantes de la atmósfera.

Etapa catalítica: Tiene lugar en fase líquida y consiste en la transformación de los óxidos de nitrógeno y azufre en los ácidos ya mencionados (Granados *et al.*, 2010; Santizo, 2016).

3.1.5 Efecto de la lluvia ácida sobre el suelo

Las consecuencias de la acidez son principalmente una alteración del pH medio originando una acidificación, cuando la lluvia ácida cae al suelo, progresivamente lo van acidificando, al ir disminuyendo su capacidad amortiguadora. Si esta lluvia sigue cayendo por mucho durante años consecutivos, el pH del suelo baja formándose un suelo con alto contenido de aluminio volviéndose tóxico (Campillo y Sadzawka. 2006; Zapata, 2004). Lo que se traduce en cambios en la composición del suelo que llevan a una lixiviación de nutrientes como el P, Ca, Mg, Na y K, afectando su biodisponibilidad, y aumentando la vulnerabilidad de los árboles (Granados *et al.*, 2010; Schenkel, 1969). Esta acidificación también tiene como consecuencia la liberación de elementos como Fe, Zn, Mn y Co, los cuales son tóxicos para las plantas propiciando un bajo estado nutrimental y afectaciones en su crecimiento y reproducción (Campillo y Sadzawka. 2006; Castro *et al.*, 1995; De Vries, 1994; Delgado y Serey, 2002; López y Herrera, 2011; Pardos, 2006; Velasco *et al.*, 2002).

Los microorganismos del suelo se ven afectados a medida que disminuye el pH, ya que disminuye también su actividad descomponedora de la materia orgánica lo cual provee de nutrientes disponibles para las plantas. De igual manera se ve afectado el crecimiento de hongos micorrícicos, los cuales presentan múltiples beneficios para las plantas, entre los que se pueden destacar el aumento en la absorción de agua y nutrientes minerales, mayor crecimiento y supervivencia de las plantas, protección frente a infecciones de organismos patógenos y estrés ambiental (Pereira *et al.*, 2007; Ramos y Zúñiga, 2008; Thiers *et al.*, 2014; Vázquez-García *et al.*, 2002).

3.1.6 Antecedentes

La declinación forestal se ha presentado desde hace cerca de 200 años como un proceso natural, sin embargo, en la actualidad los agentes causales se deben principalmente a los cambios climáticos producidos por las actividades humanas (Castro *et al.*, 1995; González-Medina *et al.*, 1998). Desde 1985 se comenzó a cuestionar sobre el mal estado de los ecosistemas forestales y si el fenómeno causante era la lluvia ácida con sus respectivas consecuencias (acidificación del suelo). En cualquier caso, esta constatado y la hipótesis más aceptada por la comunidad científica es que los árboles

que son más vulnerables a factores adicionales de estrés son causados por contaminantes atmosféricos (Pardos, 2006; Navarro *et al.*, 2007).

A lo largo de los años se han realizado investigaciones sobre el deterioro de los recursos forestales como consecuencia de la acidez de la lluvia, en Alemania en los años 70 se estudió la declinación de varias especies de importancia comercial, cuyas afectaciones se detectaron en la presencia de metales pesados en el suelo, consecuencia de la acidificación por lluvia (Castro *et al.*, 1995). En República Checa en los años 80 se observaron afectaciones en el monte Jizera por aguas con concentraciones de pH del orden 4 a 5 (Křeček y Hořická, 2006). Estudios sobre el decaimiento forestal en regiones de Europa y Norte América han relacionado a la contaminación como principal causante (Navarro *et al.*, 2007).

En general, los efectos de la acidez de la lluvia en plantas incluyen: la inhibición de la fotosíntesis, reducción del suministro de nutrientes, pérdida de hojas (necrosis foliar o defoliación) por deficiencias de calcio y magnesio, reducción del crecimiento particularmente del eje del árbol y ramas primarias, clorosis (decoloración del follaje), manchas en el follaje por rompimiento de tejidos celulares y pérdida de estructuras reproductiva, supresión del crecimiento del cambium en los árboles (Gómez, 2003; González-Medina *et al.*, 1998; Granados *et al.*, 2010; Hernández *et al.*, 2007; Pardos, 2006).

Dentro de un bosque, la deposición atmosférica aumenta con la densidad del follaje (superficie foliar), su altura y su irregularidad (la turbulencia de la masa aérea por encima de las copas. (Křeček y Hořická, 2006). Los árboles dominantes, las situaciones de borde, con árboles más expuestos a la luz y al aire, así como los que se sitúan a elevadas alturas, que se encuentran frecuentemente envueltos en brumas y nieblas, se mostraron más proclives a los daños (Granados *et al.*, 2010; Pardos, 2006).

Lo anterior conlleva a un debilitamiento progresivo de las comunidades vegetales lo que propicia el ataque de insectos y hongos, que suelen acabar con la vida del árbol afectado (Pardos, 2006). La reducción del vigor de los bosques naturales, varía en función de su proximidad a las ciudades y la intensidad con que algunos factores (vientos, número de industrias y automóviles, etc.) actúan sobre la vegetación (González-Medina *et al.*, 1998).

Se han realizado estudios sobre la composición química del agua de lluvia en diferentes regiones de México, concluyendo que los principales iones presentes son: CO_3^{-2} , Cl , HCO_3^- , SO_4^{-2} , NO_3^- , PO_4^{-3} , NH_4^+ , Na^+ , Mg^{+2} , Ca^{+2} , Co^{+2} , Cu^{+2} , Ni^{+2} , Fe^{+2} , Pb^{+2} , Cd^{+2} , Zn^{+2} y Mg^{+2} , siendo el sulfato el principal anión ácido y el amonio el principal catión neutralizante al igual que las partículas suspendidas (Alarcón *et al.*, 2011; Báez *et al.*, 2009; Bravo *et al.*, 2000; Bravo *et al.*, 2006; Bravo *et al.*, 2016; Ramírez *et al.*, 2010; Singh *et al.*, 2016; Shen *et al.*, 2013; Teutli y Peláez, 2010).

Se midió también el rango de pH del agua de lluvia en diferentes sitios dentro del país y con diferentes finalidades como en el Golfo de México, donde su principal contribución es determinar los efectos negativos sobre los sitios arqueológicos y cuyos valores reportan acidez en la lluvia desde 4.2 a 5.4 (Bravo *et al.*, 2006; Marín *et al.*, 2010; Parungo *et al.*, 1990; Sosa *et al.*, 2008; Sosa *et al.*, 2014; Sosa *et al.*, 2015)

Dentro del país se realizaron estudios en Monterrey con una variación de pH entre 5.4 a 8.5 con un promedio de 6.6, valor más alto que el de la lluvia ácida (Ramírez *et al.*, 2010). En los estados Tabasco y Veracruz se registraron lluvias ácidas con valor mínimo de 5.2 (Bravo *et al.*, 1996; Bravo *et al.*, 2005). En México se han realizado diversos estudios sobre los efectos de la lluvia ácida por efecto de la contaminación atmosférica, ya que las características de la zona acentúan la problemática de la calidad del aire (Gómez, 2003). La Ciudad de México presenta emisiones elevadas de SO_2 por consumo de combustibles y de hidrocarburos y óxidos de nitrógeno (Báez *et al.*, 1986). Se ha estudiado la lluvia en diferentes zonas de la ciudad, en Chapultepec se registraron valores de pH que van de 5.07 a 4.65, en la zona de Rancho Viejo el pH entre 4.67 y 4.42; aún en zonas montañosas obtuvieron valores menores a 4.5. Ésta acidez parece ser causada por efecto de los vientos que arrastran los contaminantes desde la ciudad (Báez *et al.*, 1986). En el Desierto de los Leones en Ciudad de México atribuyen la declinación de oyamel (*Abies religiosa*) al efecto de contaminantes atmosféricos presentes en los bosques (López, 1997). Por otro lado en regiones del noroeste del Valle de México se han registrado valores de pH en lluvia de hasta 3.88, siendo más bajos que algunos datos reportados en zonas urbanas, esto lo atribuyen a la presencia de vientos en la zona metropolitana (Velasco *et al.*, 2002). En el Distrito Federal el pH promedio reportado fue de 4.6 (Alarcón *et al.*, 2011; Aguilar *et al.*, 1981; Aguilar *et al.*, 1984; Bravo *et al.*, 1989), en la Zona Metropolitana de la Ciudad de México se han realizado estudios en diferentes periodos, de 1980 a 1985 la lluvia registra valores desde

4.05 a 6.22 (Bravo *et al.*, 1991), mientras que de 2003-2009 los valores promedio anuales de pH son de 4.16 (Bravo *et al.*, 2013), asimismo durante el 2007 se registró un promedio anual de 3.8 (Báez *et al.*, 1993; Bravo *et al.*, 2015). Se encontró además la presencia de metales traza (As, Cd, Cr, Cu, Fe, Hg, Mn, Ni, Pb, Zn, V y Al) en la lluvia de la Ciudad de México (Báez *et al.*, 2007; García, 2007).

La lluvia en Puebla durante el 2010 tuvo un rango de pH de 5 a 8, de las cuales el 11% de las muestras fueron consideradas ácidas con un pH entre 5 y 5.5 (Teutli *et al.*, 2010). En la región Popocatepetl se registraron pH de lluvia de 4.68 a 6.05 en septiembre de 1992, en julio de 1994: 6.28 a 7.37 y en julio de 1995: 6.54 a 6.6 (Báez *et al.*, 1997).

IV. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

4.1 Pregunta de investigación

¿Existe la presencia de lluvia ácida en la región noreste del Popocatepetl y cómo es su distribución durante el 2017, así como qué características químicas presentó el suelo durante las épocas: secas-lluvia-secas?

V. HIPÓTESIS

5.1 Hipótesis general

La lluvia ácida no se presenta en la región noreste del Popocatepetl por lo cual los suelos no tienen cambios significativos en sus propiedades químicas analizadas.

VI. OBJETIVOS

6.1 Objetivo general

- Evaluar el tipo de la lluvia en función de su acidez en la región noreste del Popocatepetl y el comportamiento de las concentraciones de algunos metales y nutrientes.

6.2 Objetivos específicos

- Determinar los valores de pH y contenido de metales en el agua de lluvia de la región noreste del Popocatepetl durante el 2017.
- Conocer los valores de pH, conductividad eléctrica y concentraciones de bases intercambiables en los suelos ante la presencia de lluvia ácida.
- Medir la variaciones de metales totales en suelos (Cd, Pb, Cr y Ni) y nutrientes (N, P, K, Cu, Fe, Zn, Mn y Al).

VII. METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN

7.1 Localización

La región Popocatepetl se ubica en la parte central del Eje Volcánico Transmexicano (Figura 1). Localizado en los límites de los estados de México y Puebla.

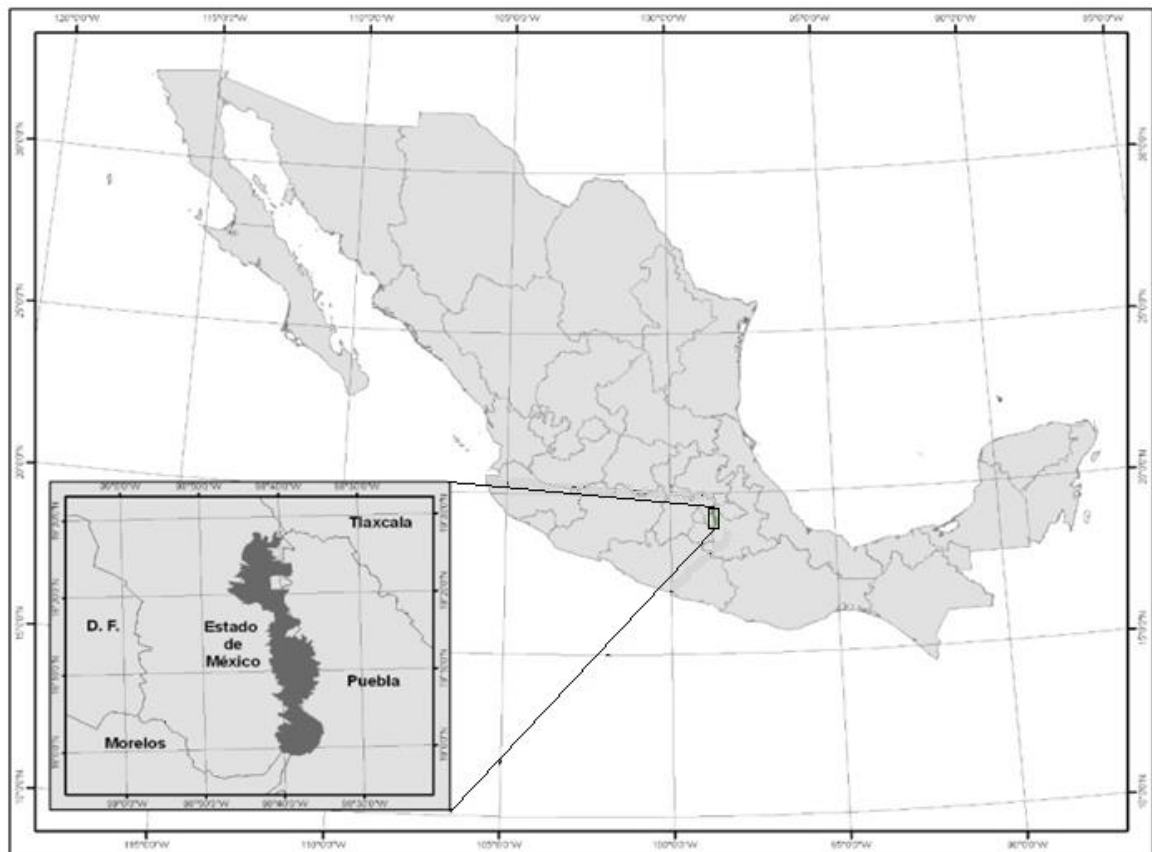


Figura 1. Localización del Parque Nacional Iztaccíhuatl-Popocatepetl-Zoquiapan en la República Mexicana (CONANP, 2013).

7.1.1. Caracterización de la zona de estudio

Clima: Debido a su topografía y ubicación, el parque tiene una variedad de climas que van del templado húmedo a los climas frío y muy frío; la temperatura disminuye con la altura a razón de 0.68°C por cada 100 metros (CONANP, 2013)

Se registra el clima frío subhúmedo de alta montaña E(T)HC (w2), con lluvias en verano y humedad alta con temperatura media anual entre -2 y 5°C. Por debajo de los 2000 m

se presenta un clima C(w₂)(w), semifrío subhúmedo, con lluvias en verano (La precipitación media anual es de 928 mm, el mes más seco es febrero con una precipitación de 6.9 mm, septiembre con una precipitación de 185.6 mm) y humedad alta (mayor de 55.0), porcentaje de lluvia invernal <5 mm, y con temperatura media anual de 12 a 18°C (Castro, 2013).

Suelos: En general se presentan suelos Andosoles derivados de cenizas volcánicas recientes, son poco desarrollados con menos de 10 cm de espesor y de rápido escurrimiento. En las cumbres y laderas abruptas se encuentran litosoles asociados con regosoles a aproximadamente 4000 m, por arriba de los 5000 m no existe formación de suelo (Castro, 2013).

Hidrología: En la Sierra Nevada algunos de los arroyos están directamente alimentadas por el deshielo de la nieve de los glaciares del Iztaccíhuatl así como por la precipitación pluvial que es mayor a los 1000 mm anuales. En la vertiente Noreste se encuentra la laguna de Chachopa, único depósito perenne de la Sierra Nevada (Castro, 2013).

Vegetación: La distribución de la vegetación en esta zona atiende a la altitud, de modo que pueden distinguirse dos pisos fundamentales de vegetación: los bosques de coníferas y pradera de alta montaña o pastizal alpino. Los bosques se encuentran formados por asociaciones dominadas por *Pinus montezumae* frecuentemente asociado con especies de los géneros *Quecus*, *Abies*, *Arbutus*, *Alnus*, *Salix* y *Buddleia*. También se establecen asociaciones vegetales de transición entre *Pinus* y *Abies* lo que implica que son zonas de amplia diversidad florística y ecológica conformando rodales mixtos de *Pinus ayacaguite* con *Abies religiosa*. En esta zona de econtono también es frecuente la asociación de *Pinus montezumae* con *Pinus hartwegii*. Entre los géneros mejor representados pueden citarse: *Pinus*, *Sernecio*, *Ribes*, *Muhlenbergia*, *Agrostis*, *Lupinus* y *Festuca* (Castro, 2013).

Uso de suelo: La Sierra Nevada se encuentra rodeada en su mayor parte por asentamientos humanos por debajo de la cota altitudinal de los 2500 metros sobre el nivel del mar. Luego una zona de transición con presencia de actividades agrícolas y pecuarias que va desde los 2300 a los 3000 metros sobre el nivel del mar, donde se nota poca vegetación natural. Una tercera zona que corresponde al uso de suelo forestal que inicia en la cota de los 3000 metros sobre el nivel del mar y sube hasta los 3600 metros

sobre el nivel del mar, y una última zona que se encuentra por arriba de los 3600 metros sobre el nivel del mar y hasta las cumbres de los volcanes (CONANP, 2013).

7.2 Fase de campo

7.2.1 Sitios de muestreo

El muestreo de lluvia se llevó a cabo durante el año 2017 y el de suelo abarcó el año 2017 y principios del 2018. Se seleccionaron cuatro puntos estratégicos de la zona noreste del Popocatepetl (Figura 2), estos puntos se eligieron de acuerdo a la colaboración y facilidades del personal que labora en cada punto para los muestreos y su evaluación a diferentes altitudes (Tabla 1).

Tabla 1. Georreferenciación de los puntos de muestreo

Punto	Nombre	Coordenada	Altitud (msnm)
1	Santiago Xalitzintla	N 19° 05.379' W 098° 31.873'	2652
2	Truchera El Rinconcito	N 19° 05.903' W 098° 32.910'	2687
3	Centro Ecoturístico Apatlaco	N 19° 06.181' W 0.98° 37.344'	3555
4	Oficinas Parque Nacional Izta-Popo	N 19° 05.163' W 0.98° 38.748'	3671

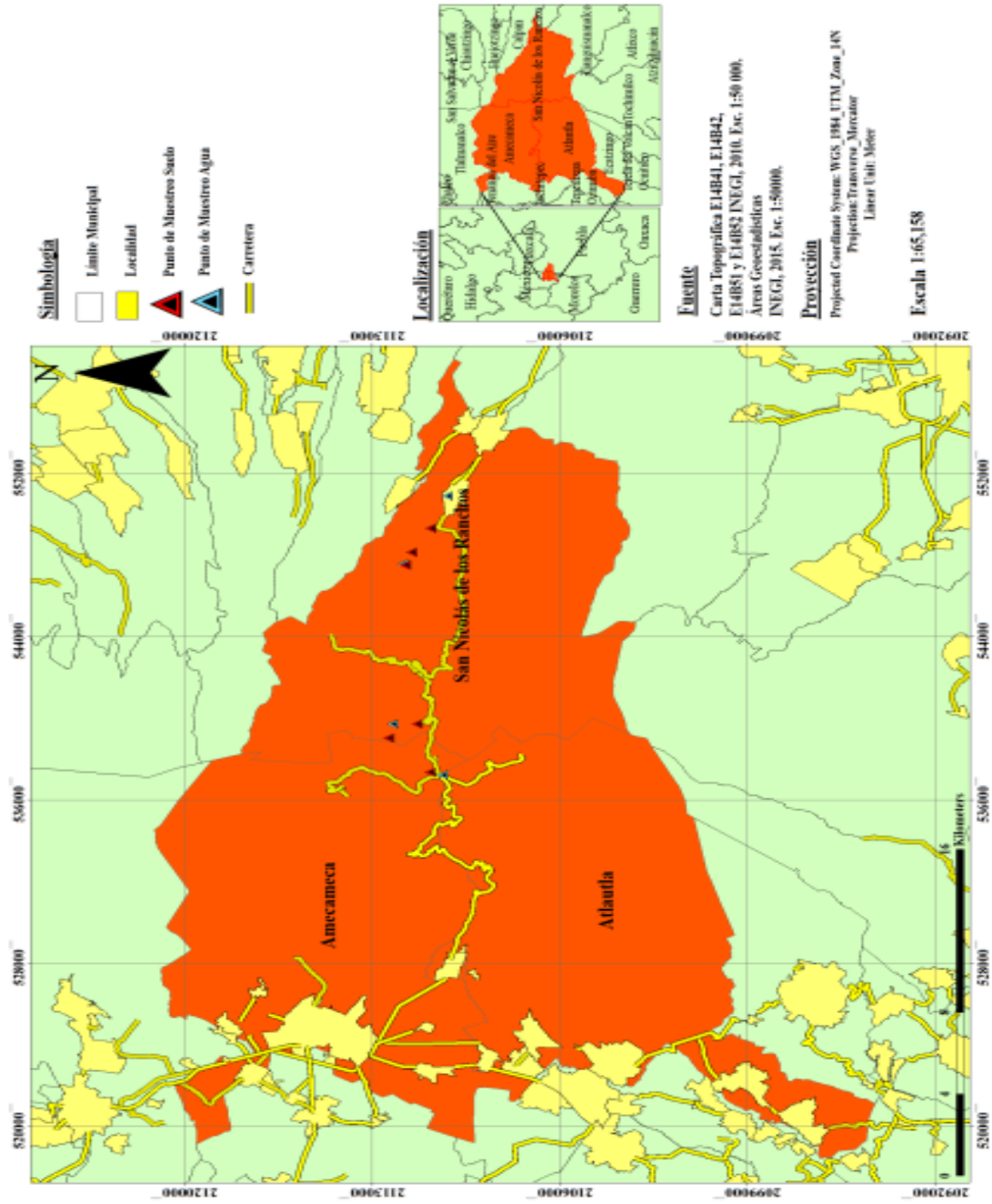


Figura 2. Localización de los puntos de muestreo de suelo y agua.

7.2.1.1. Caracterización de los puntos de muestreo

Punto 1. Santiago Xalitzintla (Figura 3): Es la comunidad del estado de Puebla más cercana al volcán Popocatepetl, perteneciente al municipio de San Nicolás de los Ranchos, se encuentra a 2 kilómetros de la cabecera municipal sobre la carretera a Paso de Cortés, a una altitud de 2560 msnm. En su territorio se presenta la transición de los climas fríos de la Sierra Nevada a los templados del valle de Puebla. La vegetación predominante son las zonas de cultivo con remanentes de bosque de pino-encino. Las actividades económicas realizadas son la agricultura de temporal principalmente de maíz, calabaza, haba, y frutales como manzano, duraznos, pera, nogales, entre otros. De igual manera se dedican a la elaboración de ladrillos, azulejos, marmolería, artesanías de piedra de cantera proveniente de los suelos de la región.



Figura 3. Punto 1 Santiago Xalitzintla

Punto 2. Truchera “El Rinconcito” (Figura 4): Ubicada aproximadamente a 2 km al norte de la carretera bosque a Paso de Cortés, cuya entrada se ubica en el km 25+300. Se encuentra a 2687 msnm. Se encuentra localizada en la parte baja de montañas, del lado sur se encuentra la ladera de la montaña con vegetación de bosque de pino-encino, su estado de conservación es poco perturbado y del lado norte presenta algunos terrenos dedicados a la agricultura de temporal principalmente de maíz, y árboles frutales. Su principal actividad es la cría y venta de truchas para lo cual cuenta con una serie de estanques establecidos en caídas de agua para el aprovechamiento y mantenimiento de la cría y manutención de las truchas.



Figura 4. Punto 2 Truchera “El Rinconcito”

Punto 3. Centro Ecoturístico Apatlaco (Figura 5): localizado 2 km al norte de la carretera paso de Cortés a 3555 msnm, es un parque ubicado entre montañas donde predomina bosque de pino con pastizal en donde debido a las actividades ha tenido una moderada afectación. Es una zona recreativa con numerosas cabañas y actividades como la caminata, tirolesa, gotcha, paseo en lancha en una laguna localizada en el centro del parque, paseo a caballo entre otras. La zona está administrada por sus ejidatarios y los días con mayor actividad son los fines de semana y periodos vacacionales.

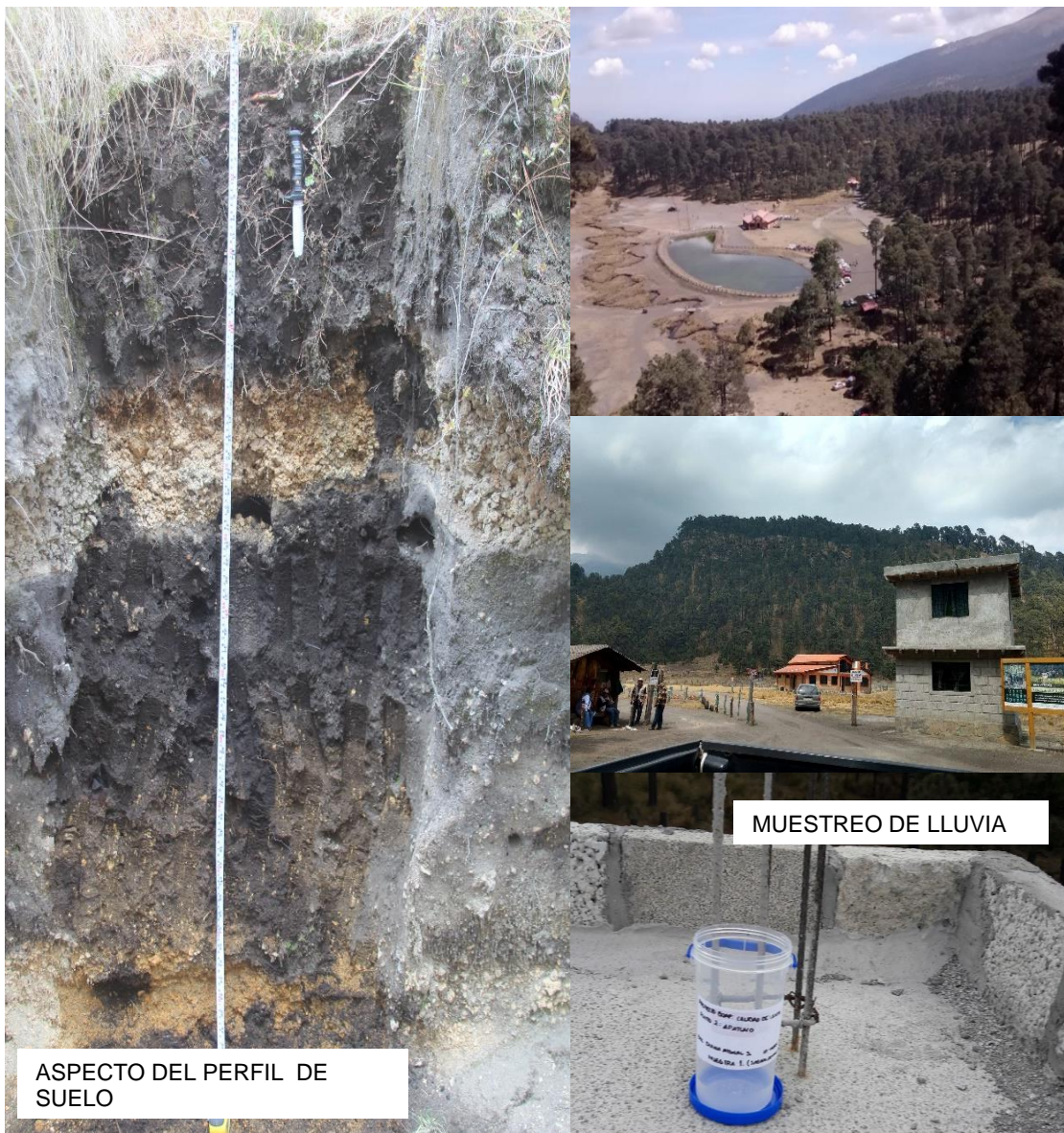


Figura 5. Punto 3. Centro Ecoturístico Apatlaco

Punto 4. Parque Nacional Izta-Popo (Figura 6): Localizado dentro de los límites del estado de México en el municipio de Amecameca, es un puerto montañoso ubicado entre los volcanes Iztaccíhuatl y Popocatepetl a 3671 msnm, donde se encuentran las instalaciones del Parque Nacional Iztaccíhuatl- Popocatepetl, es aquí donde se lleva a cabo el registro y control del turismo y de las actividades propias del parque (alpinismo, ciclismo de montaña, caminatas, campismo), los días de mayor actividad son los fines de semana, mientras que el tránsito de vehículos es constante. Las oficinas se encuentran en un pequeño valle, del lado noreste se encuentra una pequeña loma conocida como la montaña caracol, al sur se encuentra el volcán Popocatepetl y al norte el Iztaccíhuatl. La vegetación predominante es el pastizal y en menor abundancia, con estado de perturbación moderadamente alta debido a las actividades realizadas en la zona.

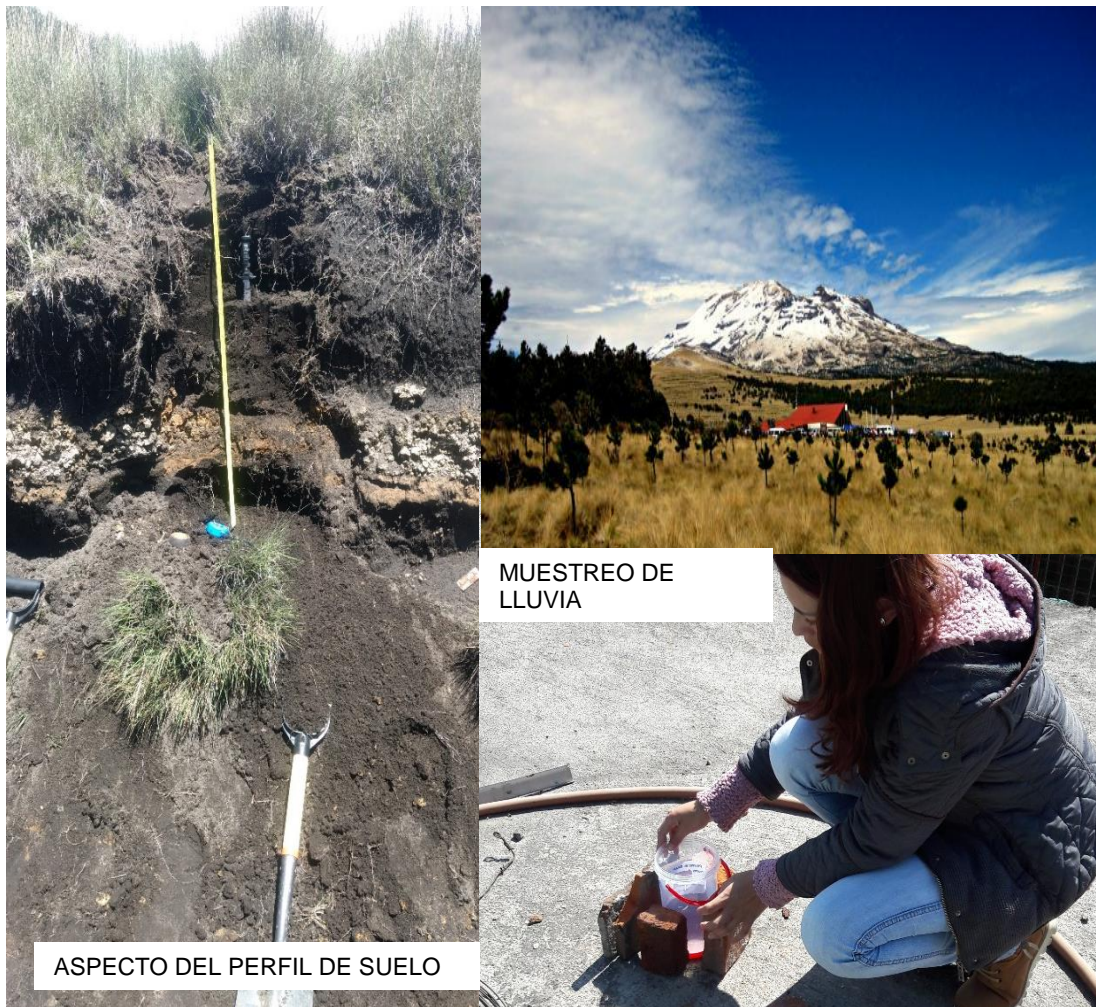


Figura 6. Punto 4. Oficinas del Parque Nacional Iztaccíhuatl- Popocatepetl.

7.2.2 Muestreo de lluvia

En cada punto se colocaron tres receptores de agua cada uno con una capacidad de 1.5 litros (Figura 7), dos de los cuales captaron el agua correspondiente a dos días de la semana (lunes-martes y miércoles-jueves) y el tercer receptor captó lo de tres días (viernes-sábado y domingo), completando así, los siete días de la semana. Los colectores fueron colocados en el techo de las edificaciones para disminuir la contaminación por polvo del suelo. Una vez concluido el tiempo de exposición de cada colector éste era cerrado por personal de cada uno de los puntos, para conservar la muestra, las cuales fueron recogidas los viernes de cada semana para su posterior análisis.



Punto 1. Santiago Xalitzintla.

Los receptores se colocaron sobre la cafetería de la Telesecundaria Gregorio Torres Quintero localizada en el centro de la comunidad de Santiago Xalitzintla



Punto 2. Truchera “El Rinconcito”

Los colectores de lluvia se instalaron sobre una edificación alejada de la vegetación para evitar incidencia de esta durante la captación de la lluvia.



Punto 3. Centro Ecoturístico Apatlaco

En este punto los receptores se ubicaron en el techo de la casa perteneciente a los encargados del centro, siendo ellos los encargados de abrir y cerrar los colectores en los días especificados.



Punto 4. Parque Nacional Izta- Popo

Los receptores se colocaron sobre las oficinas del Parque por tener un mejor acceso y seguridad de los guardaparques quienes se encargaban de abrir y cerrar los colectores.

Figura 7. Receptores de agua colocados en los puntos de muestreo.

7.2.3 Muestreo de suelo

En la región noroeste del Popocatepetl los tipos de suelos predominantes corresponden a Andosoles, por lo que se seleccionó un perfil representativo cercano a cada uno de los puntos de muestreo de lluvia, en el punto Truchera y Apatlaco se obtuvieron dos perfiles, uno bajo vegetación y otro en una zona abierta para comparar la incidencia de la lluvia ácida en ambos casos, siendo un total de seis perfiles.

Cada perfil se muestreó en tres momentos diferentes: antes, durante y después del periodo de lluvias (marzo-2017, julio-2017 y enero 2018 respectivamente). En cada muestreo se tomó aproximadamente medio kilogramo a dos profundidades: 0-10 y 10-20 cm. Las muestras de suelo fueron etiquetadas para su posterior análisis en el laboratorio del Departamento de Ciencias Agrícolas, BUAP.

7.3 Fase de Laboratorio

Los análisis se basaron en la NOM-021-RECNAT-2000. Que establece las especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de suelos (Tabla 2).

Tabla 2. Parámetros medidos en suelo y el método utilizado.

Parámetro	Método	Extracción	Determinación
pH	Relación 1:2	Agua destilada	Potenciómetro
Conductividad	Relación 1:5	Agua destilada	Conductímetro
Materia orgánica	AS-07 Walkley y Black	Dicromato de potasio	Titulación FeSO ₄ 1N
Fósforo	AS-11 Bray y Kurtz	Solución extractora Bray-Kurtz	Espectrofotómetro
	AS-12	Acetato de amonio 1N	Microkjeldahl y titulación HCl 0.01N

Capacidad de Intercambio Catiónico y bases intercambiables			Fotómetro de llama Espectrofotómetro de Absorción Atómica
Nitrógeno total	AS-25	Mezcla de catalizadores (K_2SO_4 , HgO , $CuSO_4$)	Microkjeldahl y titulación H_2SO_4 0.025N
Al intercambiable	AS-33 Barnhisel y Bertsch	Cloruro de potasio 1M	Titulación HCl 0.1M
Metales	Digestión ácida	HNO_3 y HF	Espectrofotómetro de Absorción Atómica

7.4 Análisis estadístico

7.4.1 Correlación de Pearson

El coeficiente de correlación de Pearson se define en términos de la covarianza de las variables aleatorias X y Y. La covarianza es una medida que indica la forma en que X y Y varían conjuntamente. Su valor fluctúa entre 1 y -1. La asociación entre X y Y es positiva cuando en la medida que aumenta una de ellas lo hace la otra y es perfecta cuando el valor es igual a 1. Por el contrario, la asociación es negativa cuando en la medida que aumenta una variable disminuye la otra y es perfecta cuando el valor es igual a -1. Cuando no existe una correlación lineal el valor es 0. (Márquez de Cantú, 1988; Reyes, 1990). En el presente trabajo se utilizó para evaluar el nivel de asociación entre el número de emisiones del Popocatepetl con los valores de pH registrados en la lluvia, lo cual permitió determinar si la lluvia ácida de la región se debía principalmente al volcán o a otros factores como la contaminación atmosférica.

7.4.2 Análisis de varianza

El análisis de la varianza (o Anova: Analysis of variance) Es una técnica estadística diseñada para medir si existen diferencias entre los valores medios de una variable dependiente calculados para los distintos grupos que se pueden obtener con otra variable independiente y nominal (Márquez de Cantú, 1988; Reyes, 1990). Para esto la hipótesis nula a contrastar es que se consideran iguales las medias en todos los grupos, o lo que es lo mismo, no existen diferencias entre las medias obtenidas para cada uno de los grupos formados por la variable independiente o factor, en este caso los grupos corresponden a los sitios de muestreo en la región noreste del Popocatepetl.

VIII RESULTADOS Y DISCUSIÓN

8.1 Lluvia general

Se obtuvieron los promedios mensuales de pH de las lluvias colectadas durante el 2017 (Figura 8). Se observa que durante los primeros meses de la temporada de lluvia los valores de pH se mantienen por arriba de 5.6 que es el límite de la lluvia ácida (Bluhm *et al.*, 2009; Garcés y Hernández, 2004; García-Guadalupe *et al.*, 2016; Granados, *et al.*, 2010). En los puntos más alejados del volcán (Xalitzintla y Truchera) se registra la acidez en lluvia a partir de Julio hasta el final de la temporada de lluvias, mientras que en Apatlaco y Parque la mayor incidencia de lluvia ácida se reporta en el mes de Julio. En Agosto se observa una disminución de pH en Xalitzintla y Truchera y un aumento de este en Apatlaco y Parque, esto puede indicar el efecto de los vientos que transportaron los contaminantes hacia los puntos más alejados del volcán, para el mes de Septiembre se presenta una marcada acidez de lluvia en los cuatro puntos de muestreo y para el último mes se observa un aumento de pH en Apatlaco y Parque pudiendo deberse al efecto de los vientos.

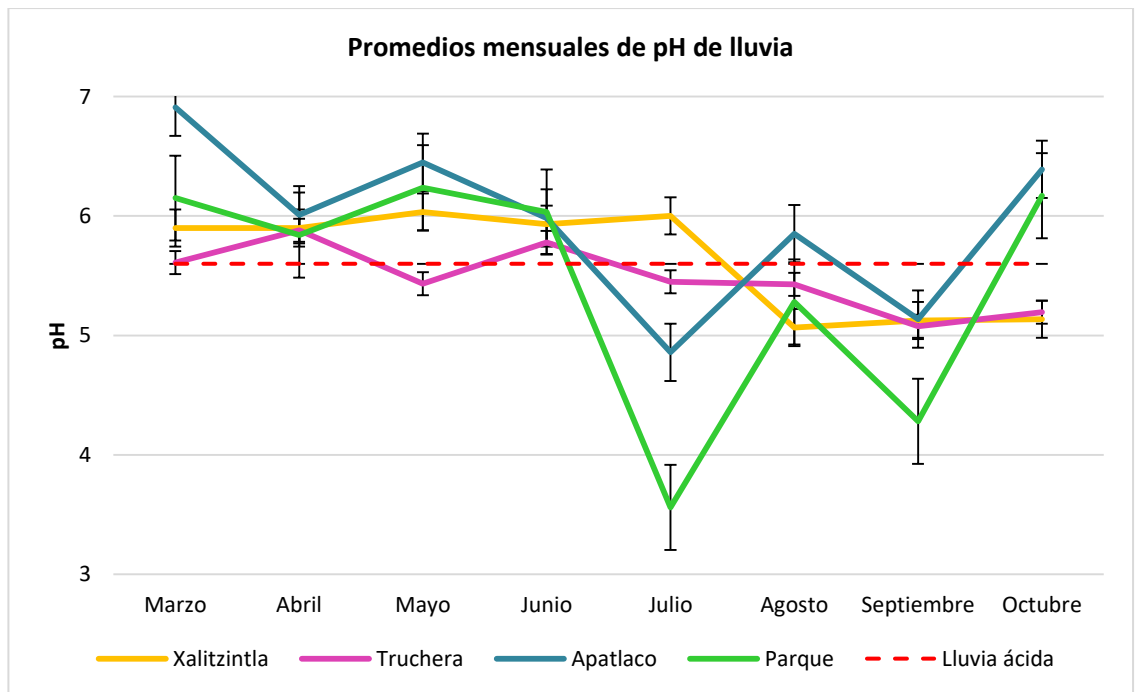


Figura 8. pH promedio mensuales de las muestras de lluvia colectadas en la región noreste del Popocatepetl.

Del total de muestras colectadas (143 muestras), el 50% correspondieron a lluvia ácida, lo cual se considera un porcentaje alto comparado con un estudio realizado en el estado de Puebla y cuya incidencia de lluvia ácida solo alcanzó el 11% (Teutli *et al.*, 2009). Lo anterior puede indicar que a pesar de que el estudio se realizó en una zona natural, el efecto de los elementos precursores de la lluvia ácida es mayor que en la ciudad donde se esperaría una mayor contaminación, pudiendo deberse el efecto de la dispersión de los contaminantes hacia la región noreste del Popocatepetl sumado a la incidencia del mismo volcán.

El rango de pH de las muestras individuales de lluvia colectadas semanalmente va de 2.3 a 7 (Tabla 3), el valor más bajo se clasifica como lluvia fuertemente ácida López y Herrera (2001). Comparados con otras evaluaciones de acidez de lluvia, el rango de este estudio alcanza valores más ácidos. Estudios realizados en Puebla y Monterrey mantienen un rango de pH de 5 a 8 (Teuti *et al.*, 2009; Ramírez *et al.*, 2010), comparado con la Ciudad de México, una de las ciudades con más altos niveles de contaminación, el pH de la lluvia registro un rango de 4.11 a 6.92 (Báez *et al.*, 2007). Un estudio sobre la caracterización de la lluvia en la región de Tlamacas en el Popocatepetl registra un pH de 4.68 a 6.05 en septiembre de 1992, en julio de 1994: 6.28 a 7.37 y en julio de 1995: 6.54 a 6.6 (Báez *et al.*, 1997).

Tabla 3. Valores de pH registrados en lluvia durante el 2017.

		Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct
Xalitzintla	Min	-	-	5.6	4.8	5.47	4.76	4.86	-
	Máx	5.9	5.9	6.25	6.7	6.53	5.50	5.39	5.14
	Prom	5.90	5.90	6.03	5.93	6.00	5.07	5.13	5.14
Truchera	Min	-	-	4.44	5.08	4.98	4.99	5.36	-
	Máx	5.61	5.88	6.28	6.25	6.04	5.71	4.79	5.2
	Prom	5.61	5.88	5.43	5.78	5.45	5.43	5.08	5.20
Apatlaco	Min	-	-	6.16	5.08	2.30	5.75	4.84	-
	Máx	6.91	6.01	6.93	6.74	6.43	6.04	5.43	6.39
	Prom	6.91	6.01	6.45	5.98	4.86	5.85	5.14	6.39
Parque	Min	-	-	5.87	5.40	2.86	4.92	3.83	-
	Máx	6.15	5.84	6.60	6.78	4.70	5.75	4.73	6.17
	Prom	6.15	5.84	6.24	6.03	3.56	5.28	4.28	6.17

Lo anterior puede indicar que en la zona noreste del Popocatepetl no solo está incidiendo la contaminación de la ciudades de Puebla y México, sino que tiene una fuente de acidez

adicional, en este caso el volcán Popocatepetl, quien inició su actividad en diciembre de 1994, la cual se ha caracterizado por la ocurrencia de exhalaciones y explosiones acompañadas por emisiones de ceniza (con pH de 3.9 a 5.8) y gases volcánicos como CO₂, SO₂, H₂S, HCl y HF (Armienta, 2002; CENAPRED, 2012; OPS, 2005; García, 2007; Narváez y Cano, 2004) los cuales pueden contribuir a la acidificación de la lluvia como lo reportan en un estudio en zona volcánica, cuyos valores de pH en lluvia son de 2.4 a 3.77 (Alfaro *et al.*, 1986). Esto se puede corroborar mediante datos obtenidos del Centro Nacional de Prevención de Desastres (Tabla 4).

Tabla 4. Número de emisiones registradas de volcán Popocatepetl en 2017 (CENAPRED)

Mes	Total de emisiones	Emisiones con dirección a la zona de muestreo
Marzo	2272	1031
Abril	2055	533
Mayo	1984	355
Junio	3562	349
Julio	2302	448
Agosto	8755	696
Septiembre	4082	1167
Octubre	616	119

La figura 9 muestra el comportamiento de los valores de pH de lluvia y emisiones volcánicas semanales, se observa que durante los primeros meses de muestreo de lluvia las emisiones fueron relativamente bajas y el pH de la lluvia en general se mantiene por arriba del límite de la lluvia ácida. En la semanas del 9 al 23 de junio se observa un aumento en la cantidad de emisiones que van de 800 a 1500 seguidas de tres semanas de emisiones constantes con un promedio de 640, lo anterior pudo verse reflejadas en la disminución del pH de la semana del 14 de julio en Apatlaco y Parque, pudiendo ser estos los sitios más afectados por encontrarse a mayor altitud y ser más cercanos al cráter del volcán.

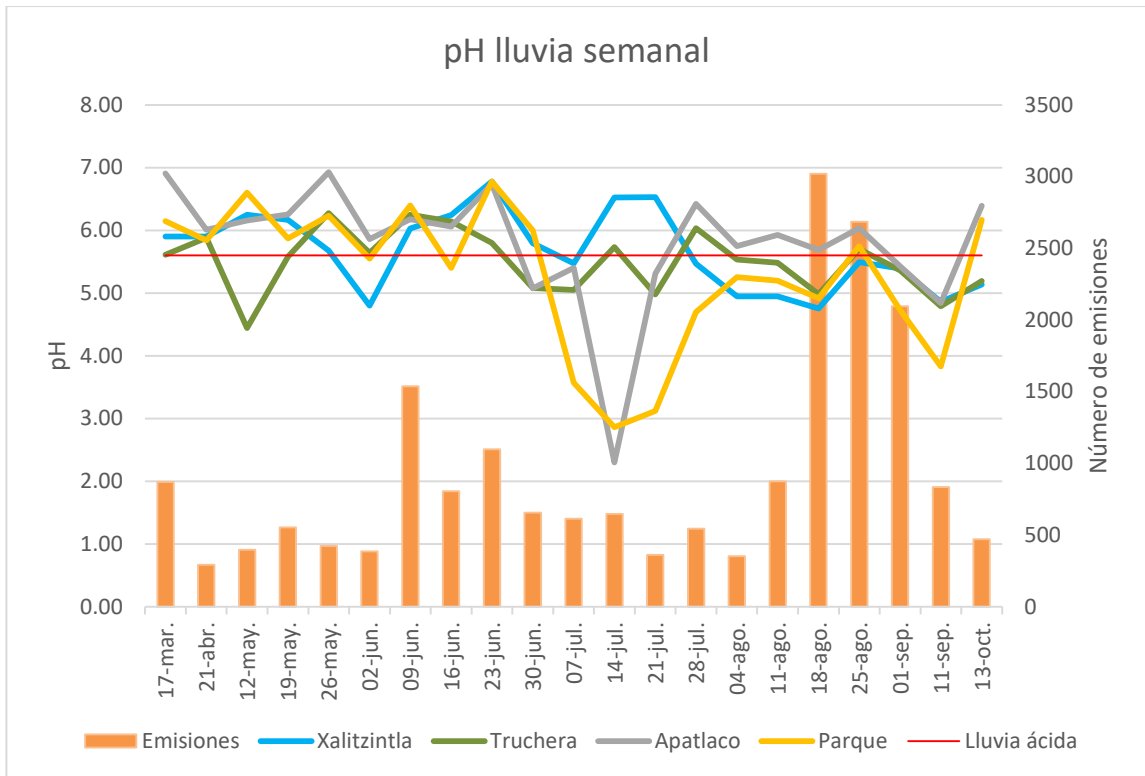


Figura 9. Comportamiento semanal de lluvia y emisiones volcánicas durante el 2017.

Para finales de julio se observa una disminución en la cantidad de emisiones y un aumento en el pH de la lluvia en Apatlaco, Truchera y Parque, mientras que el comportamiento del sitio Xalitzintla presenta una disminución en esas semanas pudiendo ser afectado por contaminación de la ciudad y de la misma comunidad, la cual utiliza la quema de madera y basura para elaborar tabiques contribuyendo a la contaminación de la región. Esta contaminación afecta la acidez de la lluvia para principios de agosto observándose una disminución del pH, a mediados de este mes se presentó un considerable aumento en cuanto al número de emisiones rebasando las 3000 para la semana del 18 de agosto y manteniéndose arriba de las 2000 hasta el final del mes, esto se ve reflejado en un aumento en la acidez de la lluvia para la segunda semana de septiembre en donde los cuatro puntos de muestreo presentan lluvia ácida siendo ésta más marcada en el punto más alto y cercano al volcán, para la última semana de muestreo los valores de pH en la lluvia de Apatlaco y Parque aumentan, mientras que los de Xalitzintla y Truchera se mantienen ácidos pudiendo asociarse a la contaminación proveniente de la ciudad de Puebla o al efecto de la dispersión de las emisiones hacia las zonas más alejadas al volcán.

Se realizaron histogramas con los valores semanales de pH en lluvia (Figura 10). En el sitio de Xalitzintla se observa una mayor frecuencia de pH entre los intervalos 4.5- 5.5 correspondientes a lluvia ácida. Mientras que en Truchera, Apatlaco y Parque se observan mayores frecuencias en los intervalos de 5-7, sin embargo, los valores mínimos reportados en estos tres sitios son menores a los registrados en Xalitzintla, esto indica que la acidez de la lluvia es mayor para estos sitios, esto puede asociarse tanto a las constantes emisiones del volcán, como a la contaminación de las ciudades de México y Puebla las cuales rodean la zona de estudio.

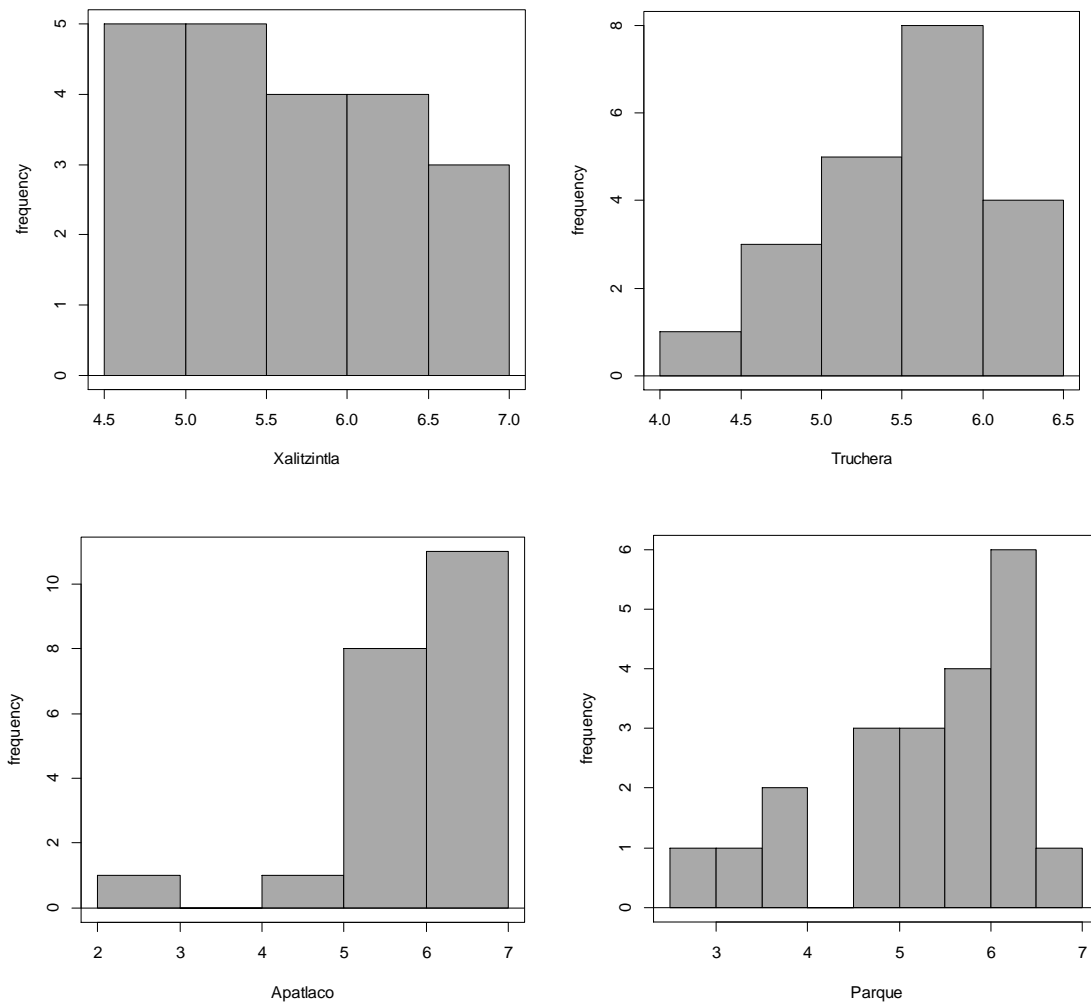


Figura 10. Histogramas de la frecuencia de pH de lluvia semanal en la región noreste del Popocatepetl.

Se determinó la conductividad en las muestras obtenidas, los valores reportados se encuentran en el rango 0.08 - 1.00 dS/m, considerados bajos en comparación con Teutli

et al. (2010) cuyo rango va de 30 a 340 dS/m. Lo mismo sucedió con las concentraciones de metales presentes (Zn, Mn, Pb, Ni y Cd; Tabla 5). Lo anterior puede deberse a que dicho estudio se realizó en el centro de la ciudad por lo que la concentración de metales presentes es mayor.

Tabla 5. Concentración de metales obtenidos en agua de lluvia.

	Contenido de metales en lluvia en Puebla (Teutli <i>et al.</i> 2010)			Contenido de metales en lluvia en Popocatépetl 2017		
	(mg/L)			(mg/L)		
	Min	Max	Promedio	Min	Max	Promedio
Zn	0	9.7	0.97	0.07	6.89	0.87
Pb	1.035	16.56	24.84	0.03	0.17	0.09
Mn	0	2.75	0.55	0	0.02	0.01
Cd	0	8.9	2.8	0	0.019	0.002
Ni	2.36	234.5	63.72	0	0.01	0

Las concentraciones de metales tienen el siguiente orden Zn>Pb>Mn>Cd>Ni, lo cual coincide con estudios de metales en la ceniza volcánica (Zn>Mn>Pb>Cu>Ni>Co>V>Ti>Cd>Se>As>Sb>Cr), siendo ésta la principal fuente de emisión en la zona de estudio (Armienta, 2002; Narváez y Cano, 2004; OPS, 2005). Sin embargo, el volcán no es la única fuente de emisión de acidez y demás elementos, ya que la zona de estudio se encuentra rodeada de dos grandes metrópolis (México y Puebla) que emiten constantemente contaminantes a la atmósfera, los cuales pueden ser acarreados por acción de los vientos (Krug y Frick, 1983; Lobersli *et al.*, 1991).

8.1.1 Estadística de lluvia

Se realizó una ANOVA para determinar si existían diferencias estadísticas entre los valores de pH registrados durante el 2017, se obtuvo un valor de $p=0.23$ lo cual indica

que estadísticamente no existen diferencias entre el pH registrado en cada uno de los cuatro sitios de muestreo, lo cual descarta que el gradiente altitudinal influya en la concentración de iones ácidos en la lluvia (Granados *et al.*, 2010; Pardos, 2006).

Se realizó una correlación de Pearson entre el pH de la lluvia mensual y el número total de emisiones así como el número de estas dirigidas hacia la zona noreste del Popocatepetl, se obtuvo una correlación negativa ($R = -0.324$) entre el número total de emisiones y la acidez de la lluvia, esto indica que entre más aumenten las exhalaciones del volcán el pH de la lluvia se verá disminuido, de igual manera se obtuvo un valor negativo para el número de emisiones dirigidas hacia la zona de estudio ($R = -0.29$), este valor es menor comparado con las emisiones totales, lo cual indica que existe mayor incidencia de las emisiones totales en el pH de la lluvia. Los bajos valores obtenidos en las correlaciones corroboran que hay una afectación del volcán hacia la acidez de la lluvia, sin embargo, existen aún factores que influyen sobre esta, como puede ser la contaminación de las ciudades de las cuales se encuentra rodeada la zona Iztaccíhuatl-Popocatepetl.

8.2 Descripción de perfiles de suelo

8.2.1 Punto 1 Xalitzintla

Tipo de suelo: Maduro, Erosión laminar moderada, Relieve casi llano (5°), Influencia humana muy fuerte, drenado, Roca madre ígnea extrusiva, vegetación introducida, uso de suelo: agropecuario, cultivo: maíz.



HA: (0-52 cm); Color: Negro; Separación: Abrupta/Plana; Sistema radicular: Raíces gruesas/abundante desarrollado; Porosidad: Pequeños, muy abundante; Fases brillosas: Escasas. Reacción NaF: ++, HCl: Nulo; Humedad: Seco. Consistencia: Suelta; Estructura: Subangular. Textura: Arenosa-franca.

HC: (52+ cm); Color: Pardo amarillento; Humedad: Seca; Consistencia: Muy compacta; Porosidad: Grandes/Abundante; Estructura: Subangular; Textura: Grava; Reacciones: NaF: Nulo, HCl: Nulo.

8.2.2 Punto 2 Truchera “El Rinconcito”

Tipo de suelo: Maduro, Erosión leve en surcos, Relieve alomado (37°), Influencia humana fuerte, drenado, Roca madre ígnea extrusiva, vegetación bosque de pino-encino, uso de suelo: agroforestal.

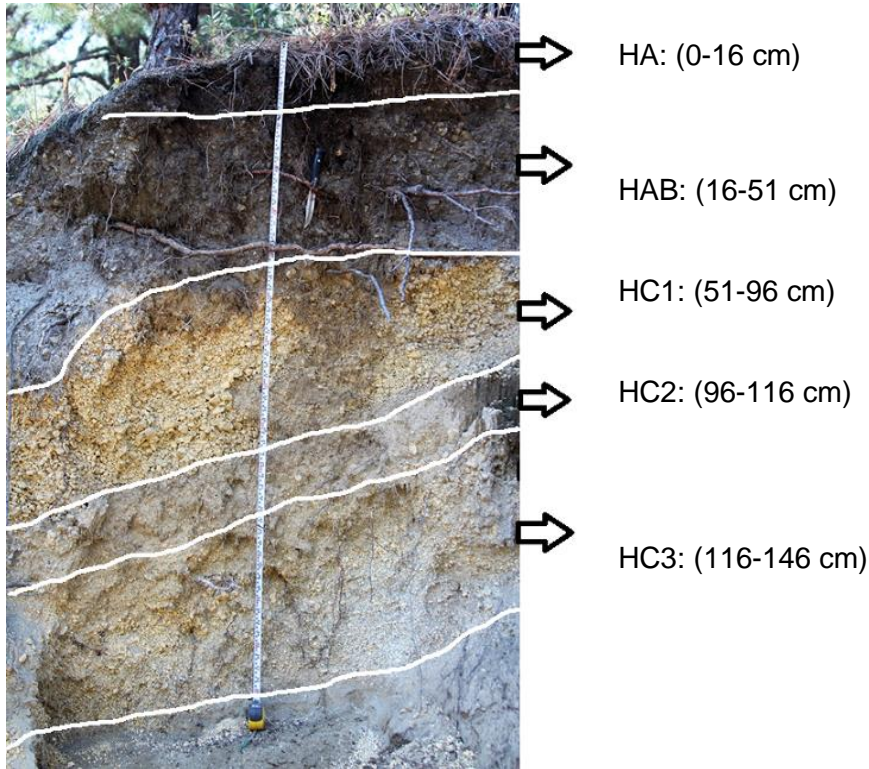


HA: (0-25 cm); Color: Negro; Separación: Abrupta/Plana; Sistema radicular: Raíces gruesas/abundante desarrollado; Porosidad: Pequeños, abundante; Reacción NaF: ++, HCl: Nulo; Humedad: Húmedo. Consistencia: Suelta; Estructura: Granular. Textura: Arenosa.

HC: (25+ cm); Color: Pardo amarillento; Humedad: Húmedo; Consistencia: Muy compacta; Porosidad: Grandes/Abundante; Estructura: Subangular; Textura: Grava; Reacciones: NaF: Nulo, HCl: Nulo.

8.2.3 Punto 3 Truchera (zona abierta)

Tipo de suelo: Maduro, Erosión laminar moderada, Relieve alomado (45°), Influencia humana fuerte, drenado, Roca madre ígnea extrusiva, vegetación bosque de pino, uso de suelo: agroforestal, cultivo: maíz.



HA: Color: Negro; Separación: difusa/Plana; Sistema radicular: Raíces gruesas/abundante; Porosidad: Pequeños; Reacción NaF: +, HCl: Nulo; Humedad: húmedo. Consistencia: Suelta; Estructura: granular; Textura: Arenosa-franca.

HAB: Color: Grisáceo; Separación: Irregular/abrupta; Sistema radicular: Raíces gruesas/abundante; Humedad: medianamente húmedo; Consistencia: Friable; Porosidad: Medio/abundante; Estructura: subangular; Textura: Arenosa, Reacciones: NaF: ++, HCl: Nulo.

HC₁: Color: Amarillento; Separación: Clara/plana; Sistema radicular: Raíces gruesas/mediano; Humedad: ligeramente húmedo; Consistencia: Muy compacta; Porosidad: Grandes/Abundante; Estructura: Subangular; Textura: Grava; Reacciones: NaF: Nulo, HCl: Nulo.

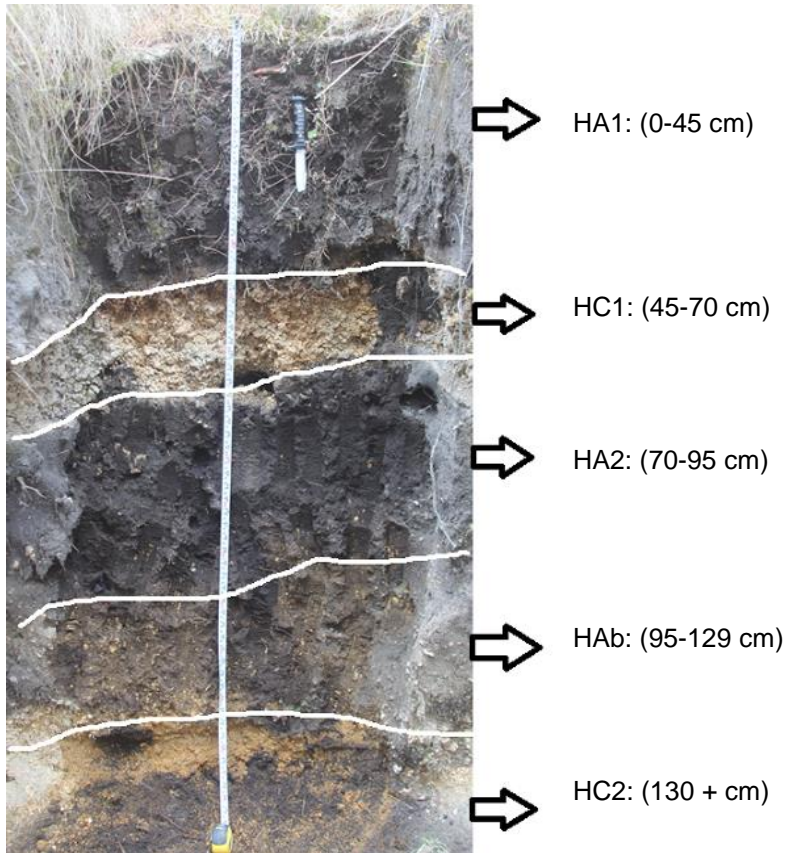
HC₂: Color: Amarillento pardo; Separación: Gradual/plana; Sistema radicular: Raíces gruesas/poco desarrollado; Humedad: Seca; Consistencia: Compacta; Porosidad:

Media/Moderada; Estructura: Subangular; Textura: Arenosa. Reacciones: NaF: Nulo, HCl: Nulo.

HC₃: Color: Amarillento pardo; Separación: Gradual/plana; Sistema radicular: Raíces gruesas/medianamente desarrollado; Humedad: Seca; Consistencia: Compacta; Porosidad: Grandes/Abundante; Estructura: Subangular; Textura: Arenosa. Reacciones: NaF: Nulo, HCl: Nulo.

8.2.4 Punto 4 Centro Ecoturístico Apatlaco

Tipo de suelo: Maduro, Erosión laminar leve, Relieve alomado (40°), Influencia humana fuerte, drenado, Roca madre ígnea extrusiva, vegetación bosque de pino/pastizal, uso de suelo: agroforestal.



HA₁: Color: Pardo oscuro; Separación: Abrupta/Plana; Sistema radicular: Raíces finas/abundante; Porosidad: Pequeños/Abundante; Reacción NaF: +++, HCl: Nulo; Humedad: húmedo. Consistencia: Suelta; Estructura: granular/migajosa; Textura: Limo-Arenosa.

HC₁: Color: Amarillento; Separación: Abrupta/Plana; Sistema radicular: Nulo; Porosidad: Muy grandes/Abundantes; Fases brillosas: Frecuentes. Reacción NaF: Nulo, HCl: Nulo; Humedad: Húmedo. Consistencia: Muy compacta; Estructura: Subangular. Textura: Gravas.

HA₂: Color: Negro; Separación: Gradual/Irregular; Porosidad: Finas/poco desarrollado; Reacción NaF: +++, HCl: Nulo; Humedad: Húmedo. Consistencia: Suelta; Estructura Migajosa. Textura: Limosa.

HAb: Color: Pardo amarillento; Separación: Clara/Plana; Porosidad: Grandes/Moderadamente desarrollado; Fases brillosas: Escasas. Reacción NaF: ++, HC₁: Nulo; Humedad: húmedo. Consistencia: Suelta; Estructura: migajosa, Textura: Limo-arenosa

HC₂: Color: Pardo amarillento; Porosidad: Grandes/Moderado, Reacción NaF: Nulo, HCl: Nulo; Humedad: Húmedo. Consistencia: Suelta; Estructura: Migajosa. Textura: Limo-arenosa.

8.2.5 Apatlaco (zona abierta)

Tipo de suelo: Maduro, Erosión en surcos/leve, Relieve alomado (45°), Influencia moderada, drenado, Roca madre ígnea extrusiva, vegetación bosque de pino/pastizal, uso de suelo: agroforestal.



HA: (0-10 cm). Color: Negro; Separación: Difusa; Sistema radicular: Raíces finas/abundante; Porosidad: Pequeños/Muy abundante; Reacción NaF: +, HCl: Nulo; Humedad: húmedo. Consistencia: Friable; Estructura: granuar/migajosa; Textura: Franca.

HA₁B: (10-30 cm). Color: Gris oscuro; Separación: Difusa/Plana; Sistema radicular: fino/abundante; Porosidad: Fino/Abundantes; Reacción NaF: +++, HCl: Nulo; Humedad: Ligeramente húmedo. Consistencia Friable; Estructura: Migajosa. Textura: Franca.

HB: (30-46cm). Color: Grisáceo; Separación: Gradual/plana; Porosidad: abundante; Reacción NaF: ++, HCl: Nulo; Humedad: Ligeramente húmedo. Consistencia: Friable; Estructura Migajosa. Textura: Franco arenosa.

HC: (46-70 cm). Color: Pardo amarillento; Porosidad: Grandes/Moderado, Reacción NaF: Nulo, HCl: Nulo; Humedad: Húmedo. Consistencia: Compacta; Estructura: Subangular. Textura: Franco arenosa

8.2.6 Parque Nacional Iztaccíhuatl-Popocatépetl

Tipo de suelo: Maduro, Erosión laminar leve, Relieve ligeramente ondulado (30°), Influencia humana muy fuerte, drenado, Roca madre ígnea extrusiva, vegetación pastizal/pino, uso de suelo: forestal.



HA: (0-9 cm). Color: Gris; Separación: Difusa/ondulada; Sistema radicular: Raíces finas/medio; Porosidad: Pequeños/Muy abundante; Reacción NaF: +, HCl: Nulo; Humedad: Ligeramente húmedo. Consistencia: Friable; Estructura: granuar; Textura: Limosa.

HAB: (9-55cm). Color: Negro; Separación: Clara/Irregular; Sistema radicular: fino/poco; Porosidad: Fino/moderado; Reacción NaF: ++, HCl: Nulo; Humedad: Ligeramente húmedo. Consistencia ligeramente compacto, Estructura: Migajosa. Textura: Limosa.

HC: (55-75 cm). Color: Pardo amarillento, Separación: Abrupta/plana; Porosidad: grande/ abundante; Reacción NaF: Nulo, HCl: Nulo; Humedad: Ligeramente húmedo. Consistencia: Compacta; Estructura Suangular, Textura: Grava.

HA₂: (75+ cm). Color: Pardo oscuro; Porosidad: pequeño/moderado, Reacción NaF: +, HCl: Nulo; Humedad: Ligeramente húmedo. Consistencia: ligeramente compacta; Estructura: Migajosa. Textura: Limosa.

8.3 Punto 1. Xalitzintla

8.3.1 Lluvia

El 48% de las muestras registradas en este punto correspondieron a lluvia ácida, el rango de pH en este sitio fue de 4-7, siendo en el mes de Julio el reporte más ácido. La acidez en lluvia fue más abundante en los meses de Agosto, Septiembre y Octubre (Figura 11). Esto se puede asociar con las emisiones volcánicas que tuvieron un aumento considerable a partir de Agosto.

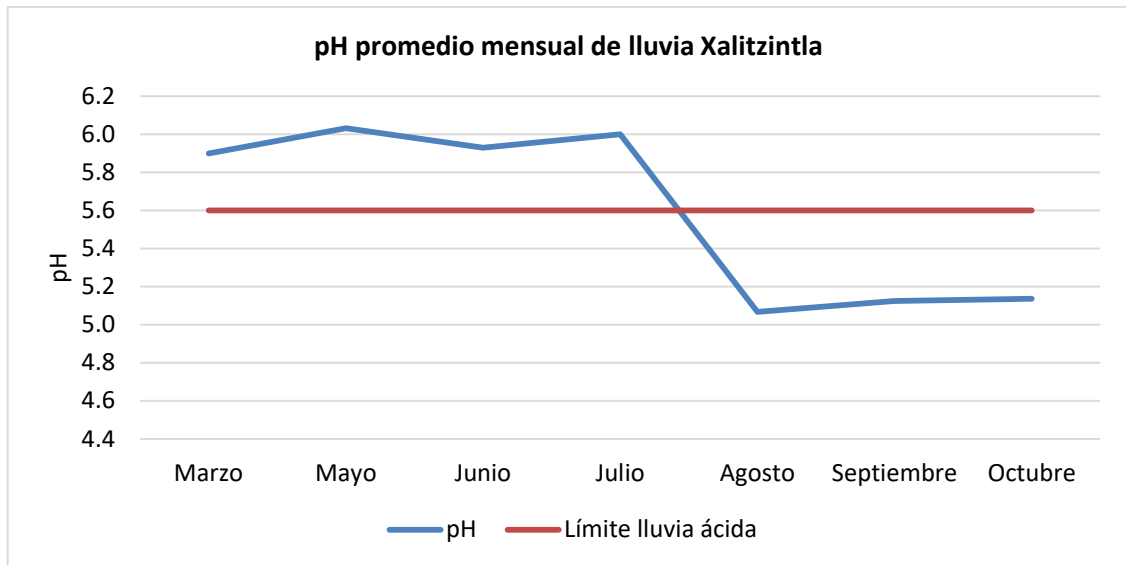


Figura 11. Promedio mensual de pH de lluvia en Santiago Xalitzintla durante el 2017.

8.3.2 Suelo

Este sitio es representativo de la zona baja de la región, con relieve ondulado, donde se han deforestado grandes extensiones para dedicarlos a la actividad agrícola, con cultivos anuales de maíz, haba, frijol, y trigo, así como frutales de la región como pera, manzana y nogal principalmente, estos suelos reciben fertilizantes tanto químicos como abonos orgánicos.

El pH de estos suelos, durante los dos primeros muestreos, presenta poca variación siendo moderadamente ácido (Figura 12), valores reportados para Andosoles (Alcalá *et al.*, 2009; Campos *et al.*, 2001; Cruz y Geissert, 2000; Mahecha-Pulido *et al.*, 2015; Meza-Pérez y Geissert-Kientz, 2006; Pose *et al.*, 1980; Quantin y Geissert, 1988; Sadzawka *et al.*, 2006; Vivanco *et al.*, 2010), sin embargo se observó una disminución en el horizonte superficial a fuertemente ácido en el tercer muestreo, lo que indica un efecto externo el cual puede ser atribuible a la lluvia ácida que se presentó durante esta

época del año y al uso de fertilizantes y abonos agrícolas (Ramírez, 2002; Sadzawka *et al.*, 2006).

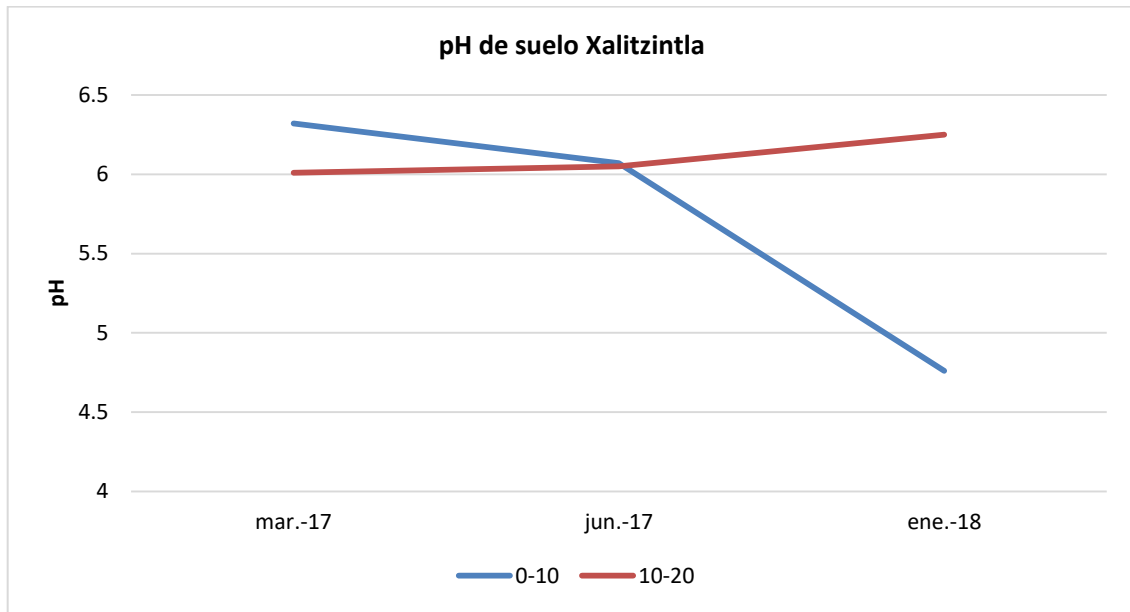


Figura 12. pH de suelo de P1 Xalitzintla medido en agua a dos profundidades (0-10 y 10-20 cm).

Se midió de igual manera el pH en cloruro de potasio (KCl). Este método se fundamenta en que el K promueve un desplazamiento de los H^+ de los sitios de intercambio hacia la solución del suelo, además aumenta la hidrólisis de Al^{3+} y Fe^{2+} incrementando la concentración de H^+ lo cual promueve mayor acidez (NOM-021, 2002). Los resultados obtenidos mediante este procedimiento muestran una disminución de 0.2 a 1 unidad, de acuerdo con la NOM-021 la disminución puede ser hasta de 1.5 unidades con respecto a los valores obtenidos al medir el pH en agua. Los valores se encuentran dentro del rango de los Andosoles (Acevedo-Sandoval *et al.*, 2010; Fernández *et al.*, 1980; Giménez *et al.*, 2009; Meza-Pérez y Geissert-Kientz, 2006; Ortiz *et al.*, 2004; Quantin y Geissert, 1988; Sadzawka *et al.*, 1995).

La conductividad de los suelos tienen valores bajos en las dos profundidades y en los tres muestreos, (<1) de acuerdo a la NOM-021 clasifica los efectos como despreciables, es decir, casi nulos al igual que en el estudio de Capulín *et al.* (2009).

Los contenidos de materia orgánica del suelo (MOS) fueron muy bajos (0.067- 1.049%) en ambas profundidades analizadas y para los tres muestreos, lo cual muestra el efecto de la labranza y el uso agrícola, que aunado a los efectos erosivos como la erosión

hídrica provocan que la materia orgánica se esté eliminando constantemente (Mahecha-Pulido *et al.*, 2015; Vivanco *et al.*, 2010). Esta condición también se ve reflejada en el % de N, cuyos rangos van de 0.07 – 0.14, correspondientes a contenidos bajos de acuerdo a la NOM-021 y en comparación con estudios (Figura 13; Capulín *et al.*, 1995; Hernández *et al.*, 2017; Martini, 1969; Meza-Pérez y Geissert- Kientz, 2006; Miguel, 2002; Quantin y Geissert, 1988).

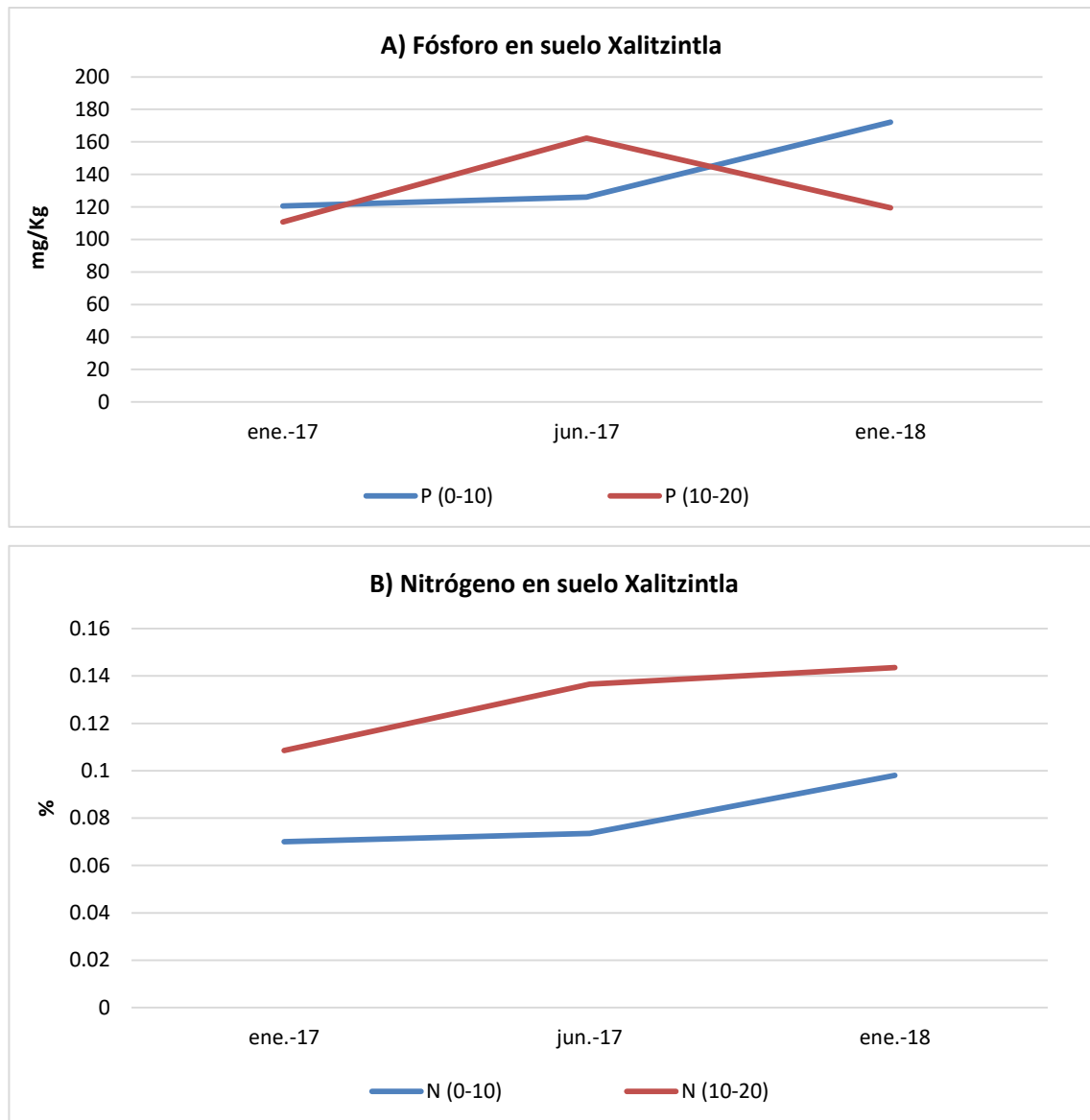


Figura 13. Comportamiento del fósforo (A) y nitrógeno (B) durante los meses de muestreo de suelo en P1 Xalitzintla.

Por otro lado, los valores determinados de Fósforo (para los tres muestreos y ambas profundidades) muestran contenidos muy elevados que rebasan los valores para

Andosoles (110-172 mg/kg_{suelo}, Beltrán, 2004; Hernández *et al.*, 2017; Martini, 1969; Ojeda y Quintero, 1980; Ortiz *et al.*, 2004; Sadzawka *et al.*, 1995; Vivanco *et al.*, 2010), lo anterior se puede deber al empleo de fertilizantes y abonos (Conti, 2002; INEGI, 2000; Miguel, 2002; Sadzawka *et al.*, 2006). Sin embargo existen estudios con reportes de altas concentraciones de este elemento en suelo con rango que van de 176 a 800 mg/kg_{suelo} (Cerón y Aristizábal, 2010; Negrín, 2005; Pérez *et al.*, 1979; Pose *et al.*, 2015).

La capacidad de intercambio catiónico (CIC) es baja en el horizonte superficial (10-11 cmol/kg) y muy baja en el más profundo (2.2-3.1; NOM-021, 2000). Los valores coinciden con otros estudios (Martini, 1969; Vivanco *et al.*, 2010), sin embargo se encuentran por debajo de valores comunes reportados para los Andosoles (Acevedo-Sandoval *et al.*, 2010; INEGI, 2000; Mahecha-Pulido *et al.*, 2015; Ojeda y Quintero, 1980; Quantin y Geissert, 1988; Roqueme *et al.*, 2014; Sadzawka *et al.*, 1995). La CIC está relacionada a la mineralogía, contenido de alófono, contenido de arcilla, aluminio, y a la cantidad de materia orgánica presente (Acevedo-Sandoval *et al.*, 2009; Acevedo-Sandoval *et al.*, 2010; Fuentes, 1971; Galán y Romero, 2008; Martini, 1969; Ramírez, 2002; Thiers *et al.*, 2014; Vivanco *et al.*, 2010).

Las concentraciones de bases intercambiables, durante los tres muestreos y en ambas profundidades presentaron el siguiente orden Ca>Mg>Na> K, cambiando este orden solo en el muestreo 3 entre K>Na (Tabla 6). Los valores coinciden con los reportados para Andosoles (Acevedo-Sandoval *et al.*, 2010; INEGI, 2000; Mahecha-Pulido *et al.*, 2015; Martini, 1969; NOM-021, 2002; Ojeda y Quintero, 1980; Quantin y Geissert, 1988; Sadzawka *et al.*, 1995; Urrego, 1997; Vivanco *et al.*, 2010).

Tabla 6. Concentraciones de bases intercambiables en suelo de P1 Xalitzintla.

cmol/kg	Profundidad	Marzo 2017	Junio 2017	Enero 2018
Ca	0-10	3.68	4.24	6.24
	10-20	2.97	4.16	5.10
Mg	0-10	0.58	0.72	1.03
	10-20	0.53	0.70	0.90
K	0-10	0.03	0.04	0.12
	10-20	0.04	0.05	0.06
Na	0-10	0.08	0.07	0.06

10-20

0.11

0.09

0.08

Por lo que se refiere a los micronutrientes, el orden fue Fe>Mn>Zn>Cu (Tabla 7; Baker, 1990). Las concentraciones de Mn, Zn y Cu se encuentra dentro de los valores promedios reportados (Alloway, 1990; Galán y Romero, 2008; Mahecha *et al.*, 2015; Roqueme *et al.*, 2014; Smith, 1990). Los valores de Fe₂O₃ son debido a las altas concentraciones de óxidos de Fe presentes en estos (Alcalá *et al.*, 2009; Alloway, 1990, Hernández y Bethencourt, 2017; Martini, 1969; Sadzawka *et al.*, 2006; Thiers *et al.*, 2014).

Tabla 7. Concentración de micronutrientes en suelo de P1 Xalitzintla.

	Profundidad	Marzo 2017	Junio 2017	Enero 2018
Fe₂O₃ (%)	0-10	0.80	0.82	0.77
	10-20	0.66	0.71	1.21
Mn (mg/kg)	0-10	237.93	248.93	223.93
	10-20	317.93	209.93	335.93
Zn (mg/kg)	0-10	68.9	58.9	61.9
	10-20	71.9	72.9	73.9
Cu (mg/kg)	0-10	11.98	12.98	11.98
	10-20	8.98	7.98	9.98

La concentración de elementos potencialmente tóxico (EPT's) Pb y Cd no presentaron valores para ambas profundidades durante los tres muestreos (Tabla 8). Las concentraciones de Ni rebasan los valores reportados para suelos agrícolas y Andosoles (Cortes *et al.*, 2016; Galán y Romero, 2008; Machecha-Pulido *et al.*, 2015; McGrath y Smith, 1990; Roqueme *et al.*, 2014), lo anterior se puede asociar a los principales minerales presentes en los suelos que son ricos en Ni, como hornblenda, olivino y biotita (Alloway, 1990, Azcárate, 2009; Besoain, 1969; Cruz-Flores y Etchevers-Barra, 2011; García *et al.*, 2002; Martini, 1969, Thiers *et al.*, 2014). Las concentraciones de Cr se encuentran dentro de los valores reportados para estos suelos (Alloway, 1990; Mahecha-Pulido *et al.*, 2015; McGrath y Smith, 1990).

El porcentaje de Al_2O_3 es medio y se deben a la mineralogía de los suelos (Acevedo-Sandoval *et al.*, 2009; Alcalá *et al.*, 2009; Azcárate *et al.*, 2009; Beltrán, 2004; Campos *et al.*, 2001; Cardona *et al.*, 1996; Casierra-Posada y Niño-Medina, 2007; Espinosa, 1996; Fuentes, 1971; Hernández y Bethencourt, 2017; Krug y Frink, 1983; Martini, 1969; OPS, 2005; Ortiz *et al.*, 2004; Ortiz *et al.*, 2006; Quantin y Geissert, 1988; Sadzawka *et al.*, 2006; Urrego, 1997; Zapata 2004). El Al intercambiable se encuentra ligeramente abajo de los valores reportados para los Andosoles, aunque se observa un aumento para el tercer muestreo (Fuentes, 1971; Martini, 1969; Meza-Pérez y Geissert-Kientz, 2006; Ojeda y Quintero, 1980; Ortiz *et al.*, 2004; Ortiz *et al.*, 2006).

Tabla 8. Concentraciones de metales en suelo de P1 Xalitzintla.

	Profundidad	Marzo 2017	Junio 2017	Enero 2017
Al_2O_3 (%)	0-10	1.36	1.42	1.16
	10-20	1.13	1.07	1.66
Al int (cmol/kg)	0-10	0.34	0.4	0.56
	10-20	0.29	0.4	0.48
Ni (mg/kg)	0-10	1267.47	1451.47	1348.47
	10-20	1652.47	1417.47	1727.47
Cr (mg/kg)	0-10	3.3	2.3	1
	10-20	4.4	8.5	15.7
C/N	0-10	5.57	0.64	3.66
	10-20	0.36	0.46	4.24

La relación C/N indica la potencialidad del suelo para transformar la materia orgánica en nitrógeno mineral (Cruz-Flores y Etchevers-Barra, 2011). Los valores obtenidos para este sitio de muestro se encuentran por debajo para los reportados en otros estudios (Fassbender, 1975; Hernández *et al.*, 2017; Miguel, 2002; Quantin y Geissert, 1988), lo cual puede deberse al manejo agrícola de los suelos en este sitio.

8.4 Punto 2. Truchera “El Rinconcito”

8.4.1 Lluvia

El 59% de las muestras de lluvia analizadas en este punto corresponden a lluvia ácida teniendo un rango de pH de 3.3 a 7. El valor más ácido se registró en Mayo, esto se puede atribuir a que las emisiones volcánicas de los días anteriores a la fecha de muestreo tuvieron dirección hacia este punto de muestreo lo cual pudo afectar la acidez de lluvia. Sin embargo la mayor abundancia de lluvia ácida se registra a partir del mes de Julio, coincidiendo con los meses en que el número de exhalaciones del Popocatépetl aumentan (Figura 14).

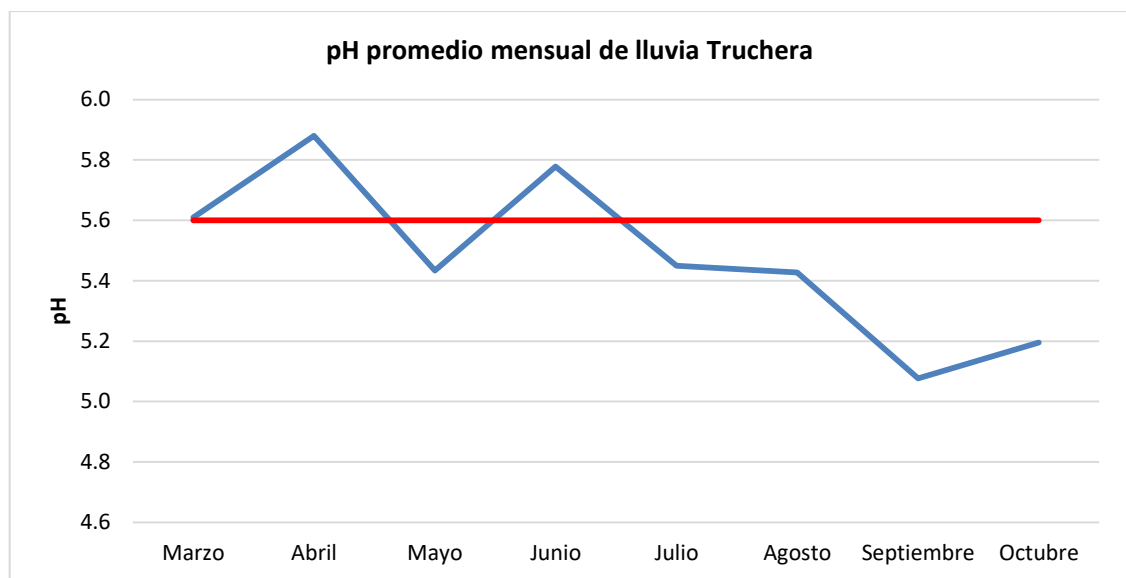


Figura 14. Promedio mensual de lluvias analizadas durante el 2017 en el punto La Truchera.

8.4.2 Suelo

Este sitio es parte de una zona agrícola con remanentes de bosque de pino-encino poco perturbados, las regiones mayormente planas son utilizadas para la siembra de cultivos anuales de maíz, haba, frijol, y trigo, así como frutales de la región.

El pH del suelo muestra un decremento a lo largo de los tres muestreos en ambas profundidades (Figura 15), sin embargo las concentraciones se mantienen moderadamente ácidas con un intervalo de 5.9 a 6.6, dentro del rango de los Andosoles (Alcalá *et al.*, 2009; Campos *et al.*, 2001; Cruz y Geissert, 2000; Mahecha-Pulido *et al.*,

2015; Meza-Pérez y Geissert-Kientz, 2006; Pose *et al.*, 1980; Quantin y Geissert, 1988; Sadzawka *et al.*, 2006; Vivanco *et al.*, 2010). Se observa que los valores de la profundidad 10- 20 cm son más altos que los superficiales, esto pudiera indicar la incidencia de algún factor que pueda estar acidificándolo como la acidez de la lluvia reportada anteriormente, así como las deposiciones procedentes de las emisiones volcánicas, entre otros (Campillo y Sadzawka. 2006; Zapata, 2004).

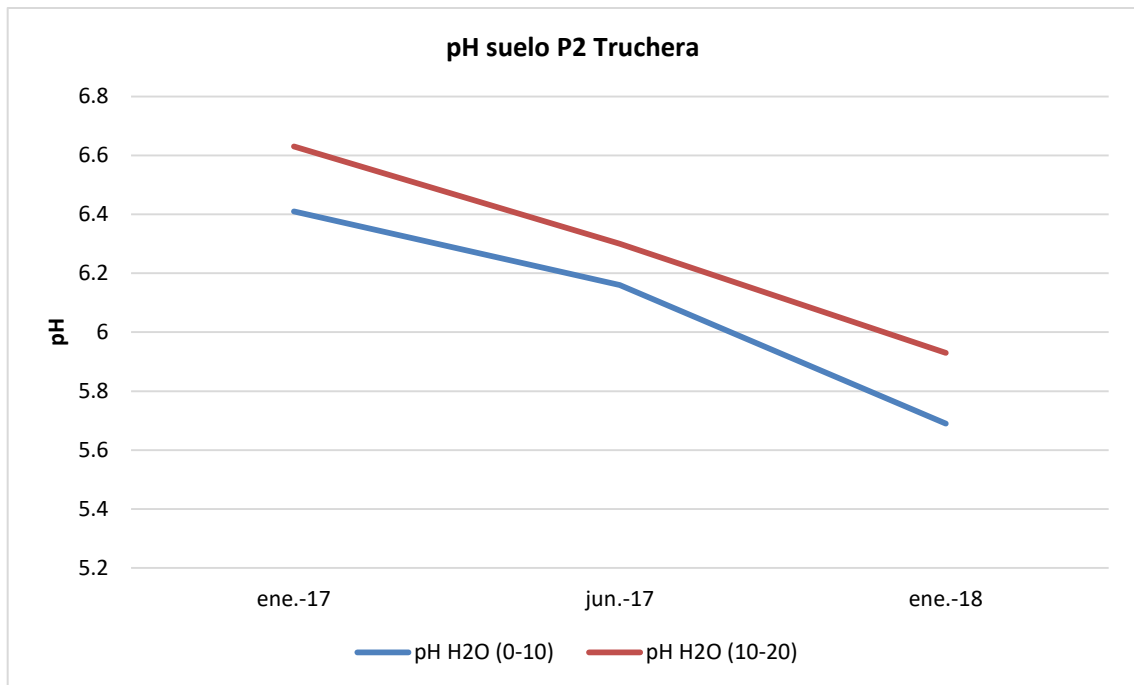


Figura 15. pH medido en agua de los suelos de P2 Truchera.

El pH medido en KCl se encuentra en un rango de 4.5-5.8, estando dentro del intervalo para los Andosoles (Acevedo-Sandoval *et al.*, 2010; Fernández *et al.*, 1980; Giménez *et al.*, 2009; Meza-Pérez y Geissert-Kientz, 2006; Ortiz *et al.*, 2004; Quantin y Geissert, 1988; Sadzawka *et al.*, 1995).

Por otro lado, los valores de conductividad presentan intervalos de 0.37 -1.37 dS/m y 1.02-1.83 dS/m en el horizonte superior e inferior respectivamente clasificados como ligeramente salinos de acuerdo con la NOM 021.

El porcentaje de MOS registrado para los tres muestreos fueron altos y medios (2.32-11.09), debido a la presencia de bosque en la zona de muestreo, los valores coinciden con lo reportado para Andosoles (Acevedo-Sandoval *et al.*, 2010; Fernández *et al.*, 1980; Fuentes, 1971; Hernández *et al.*, 2017; INEGI, 2000; Martini. 1969; Miguel, 2002; Ortiz

et al., 2004; Thiers *et al.*, 2014). Los valores de nitrógeno están en el rango 0.05-0.35% (Figura 16), coincidiendo con otros estudios (Meza-Pérez y Geissert- Kientz, 2006; Martini, 1969; Quantin y Geissert, 1988; Sadzawka *et al.*, 1995). Por otro lado, el fósforo presenta valores altos (42-89 mg/kg_{suelo}) los cuales se reportan en estudios en suelos forestales (Negrín, 2005; Pérez *et al.*, 1979; Pose *et al.*, 2015; Sadzawka *et al.*, 1995) y que están asociados a los altos contenidos de materia orgánica (Fassbender, 1975; Rojas, 2006; Thiers *et al.*, 2014; Vivanco *et al.*, 2010).

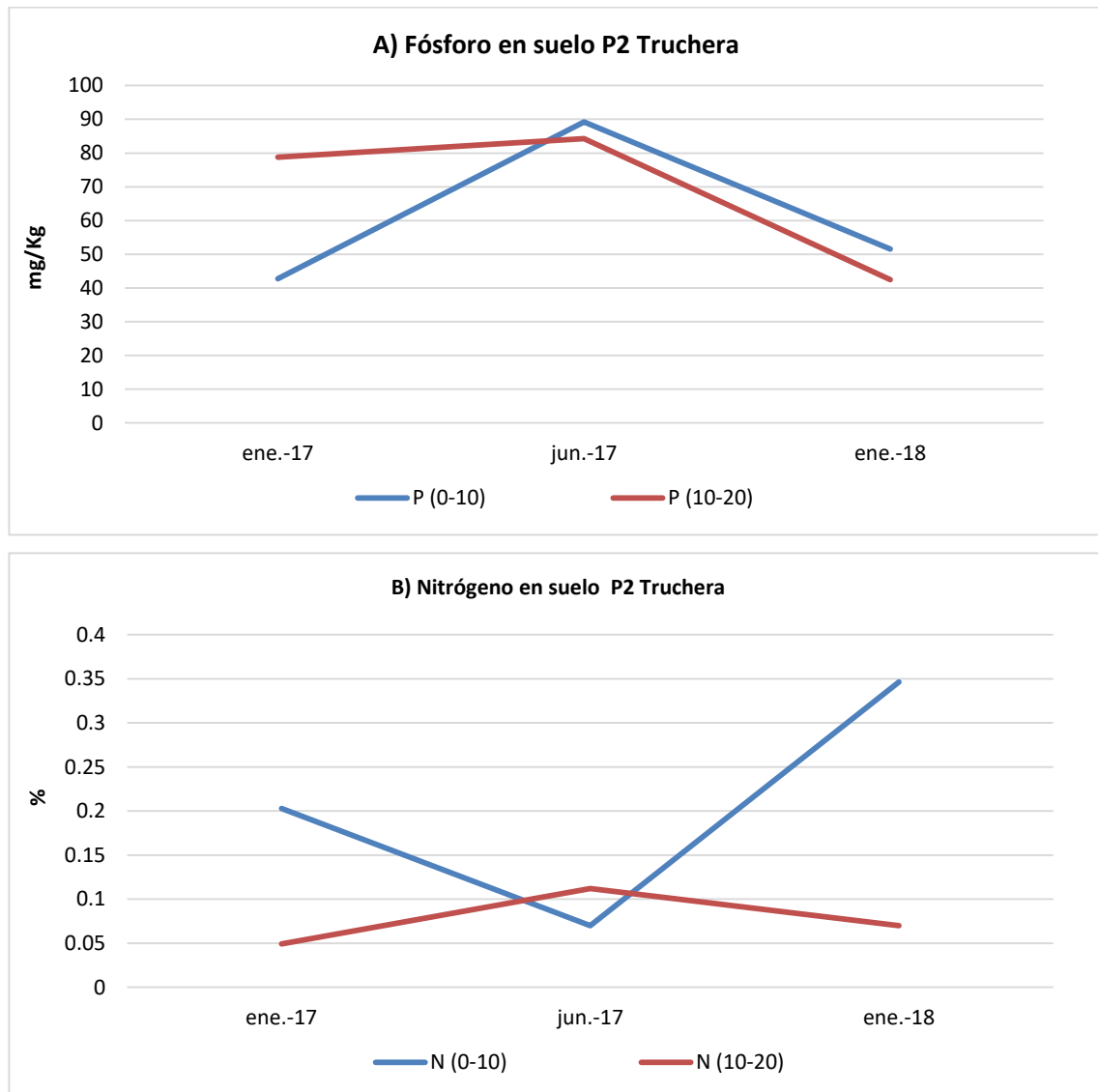


Figura 16. Contenido de Fósforo (A) y nitrógeno (B) en suelo de la P2 Truchera.

La CIC se encuentra en el intervalo de 7.6-16.5 cmol/kg siendo de media a baja de acuerdo con la NOM-021, coincidiendo con valores reportados por otros estudios en

suelos de origen volcánico (Mahecha-Pulido *et al.*, 2015; Martini, 1969; Vivanco *et al.*, 2010), sin embargo, los valores anteriormente reportados se encuentran por debajo de los valores promedios para Andosoles (Acevedo-Sandoval *et al.*, 2010; INEGI, 2000; Mahecha-Pulido *et al.*, 2015; Ojeda y Quintero, 1980; Quantin y Geissert, 1988; Roqueme *et al.*, 2014; Sadzawka *et al.*, 1995).

La concentración de bases sigue el patrón Ca>Mg>K>Na (Tabla 9). Los cuatro cationes tuvieron un comportamiento similar en ambas profundidades en los tres muestreos, se observa un aumento en el segundo muestreo, lo cual puede deberse al acarreo de las lluvias de estos cationes hacia el suelo y su posterior lixiviación reflejada en la disminución de su concentración (Báez *et al.*, 2009; García, 2007; Ramírez *et al.*, 2010; Salve *et al.*, 2008; Teutli *et al.*, 2009). Las concentraciones de Ca y Na coinciden con Sadzawka *et al.* (1995), sin embargo las concentraciones se encuentran por encima de las registradas para suelos Andosoles, mientras que Mn y K se encuentran dentro de los rangos promedio (Acevedo-Sandoval *et al.*, 2010; INEGI, 2000; Mahecha-Pulido *et al.*, 2015; Martini, 1969; NOM-021, 2002; Ojeda y Quintero, 1980; Quntin y Geissert, 1988; Sadzawka *et al.*, 1995; Urrego, 1997; Vivanco *et al.*, 2010).

Tabla 9. Concentraciones de bases intercambiables en suelo de P2 Truchera.

cmol/kg	Profundidad	Marzo 2017	Junio 2017	Enero 2018
Ca	0-10	22.33	22.72	19.60
	10-20	7.18	15.41	8.06
Mg	0-10	2.47	2.61	2.22
	10-20	0.97	1.97	0.91
K	0-10	0.31	0.49	0.30
	10-20	0.13	0.36	0.19
Na	0-10	0.18	0.41	0.30
	10-20	0.17	0.13	0.15

El orden de los micronutrientes continúa siendo Fe>Mn>Zn>Cu (Tabla 10; Baker, 1990). Las concentraciones de Mn, Zn y Cu se encuentran dentro de los valores promedios reportados (Alloway, 1990; Galán y Romero, 2008; Mahecha *et al.*, 2015; Roqueme *et al.*, 2014; Smith, 1990). Los valores de Fe₂O₃ son debido a las altas concentraciones de

óxidos de Fe presentes en estos (Alcalá *et al.*, 2009; Alloway, 1990, Hernández y Bethencourt, 2017; Martini, 1969; Sadzawka *et al.*, 2006; Thiers *et al.*, 2014).

Tabla 10. Concentración de micronutrientes en suelo de P2 Truchera.

	Profundidad	Marzo 2017	Junio 2017	Enero 2018
Fe₂O₃ (%)	0-10	1.02	0.76	0.90
	10-20	0.80	0.78	0.95
Mn (mg/kg)	0-10	388.93	317.93	293.93
	10-20	193.93	277.93	236.93
Zn (mg/kg)	0-10	73.9	66.9	79.9
	10-20	50.9	84.9	53.9
Cu (mg/kg)	0-10	41.98	17.98	16.98
	10-20	28.98	16.98	17.98

De igual manera no se presentaron valores de Pb y Cd en los muestreos realizados. Por el contrario se encontraron altas concentraciones de Ni en comparación con estudios en Andosoles (Cortes *et al.*, 2016; Galán y Romero, 2008; Machecha-Pulido *et al.*, 2015; McGrath y Smith, 1990; Roqueme *et al.*, 2014), asociados a los principales minerales presentes en los suelos (Alloway, 1990, Azcárate, 2009; Besoain, 1969; Cruz-Flores y Etchevers-Barra, 2011; García *et al.*, 2002; Martini, 1969, Thiers *et al.*, 2014). Las concentraciones de Cr se encuentran dentro de los valores reportados para estos suelos de acuerdo a McGrath y Smith (1990).

El porcentaje de Al₂O₃ se debe a la mineralogía de los suelos (Tabla 11; Acevedo-Sandoval *et al.*, 2009; Alcalá *et al.*, 2009; Azcárate *et al.*, 2009; Beltrán, 2004; Campos *et al.*, 2001; Cardona *et al.*, 1996; Casierra-Posada y Niño-Medina, 2007; Espinosa, 1996; Fuentes, 1971; Hernández y Bethencourt, 2017; Krug y Frink, 1983; Matini, 1969; OPS, 2005; Ortiz *et al.*, 2004; Ortiz *et al.*, 2006; Quantin y Geissert, 1988; ; Sadzawka *et al.*, 2006; Urrego, 1997; Zapata 2004). El Al intercambiable se encuentra ligeramente abajo de los valores reportados para los Andosoles, (Fuentes, 1971; Martini, 1969; Meza-Pérez y Geissert-Kientz, 2006; Ojeda y Quintero, 1980; Ortiz *et al.*, 2004; Ortiz *et al.*, 2006), al igual que el sitio anterior se registra un aumento en el tercer muestreo en ambos horizontes, probablemente debido a la disminución del pH.

Tabla 11. Concentraciones de metales en suelo de P2 Truchera.

	Profundidad	Marzo 2017	Junio 2017	Enero2017
Al₂O₃ (%)	0-10	2.25	1.64	1.58
	10-20	1.06	1.30	1.35
Al int (cmol/kg)	0-10	0.24	0.4	0.48
	10-20	0.24	0.4	0.44
Ni (mg/kg)	0-10	1721.47	1407.47	1366.47
	10-20	1170.47	1293.47	1328.47
Cr (mg/kg)	0-10	9.1	2.5	53.9
	10-20	5.9	0.8	53.9
C/N	0-10	31.70	63.96	10.67
	10-20	27.46	33.57	31.42

La relación C/N se encuentra en su mayoría por arriba de lo reportado por Quantin y Geissert (1988), pero dentro del rango promedio (Hernández *et al.*, 2017; Martini, 1969; Miguel, 2002). Estos valores indican que en este sitio la mineralización de la materia orgánica es casi nula (Cruz-Flores y Etchevers-Barra, 2011).

8.5 Punto 3. Truchera (zona abierta)

8.5.1 Suelo

Este sitio se encuentra en la entrada de la Truchera “El Rinconcito” sobre relieve montañoso, cuya vegetación está siendo retirada para abrir caminos hacia las zonas de cultivo.

El pH de los suelos se encuentra en los rangos 6-6.7 en el horizonte superficial y de 6.3 a 6.8 en el horizonte más profundo, clasificándose como moderadamente ácidos y neutros de acuerdo con la NOM-021 (Figura 17). Ambos muestreos y profundidades muestran un aumento en su concentración en el segundo y tercer muestreo, sin embargo los valores siguen dentro del rango de los reportados para los Andosoles (Alcalá *et al.*, 2009; Campos *et al.*, 2001; Cruz y Geissert, 2000; Mahecha-Pulido *et al.*, 2015; Meza-Pérez y Geissert-Kientz, 2006; Pose *et al.*, 1980; Quantin y Geissert, 1988; Sadzawka *et al.*, 2006; Vivanco *et al.*, 2010). Este aumento puede deberse a la acumulación de iones presentes en la lluvia que caen libremente en el suelo, así como el acarreo y acumulación

de estos por la pendiente del perfil de 45° (Báez *et al.*, 2009; Ramírez *et al.*, 2010; Singh *et al.*, 2016; Shen *et al.*, 2013; Teutli y Peláez, 2010).

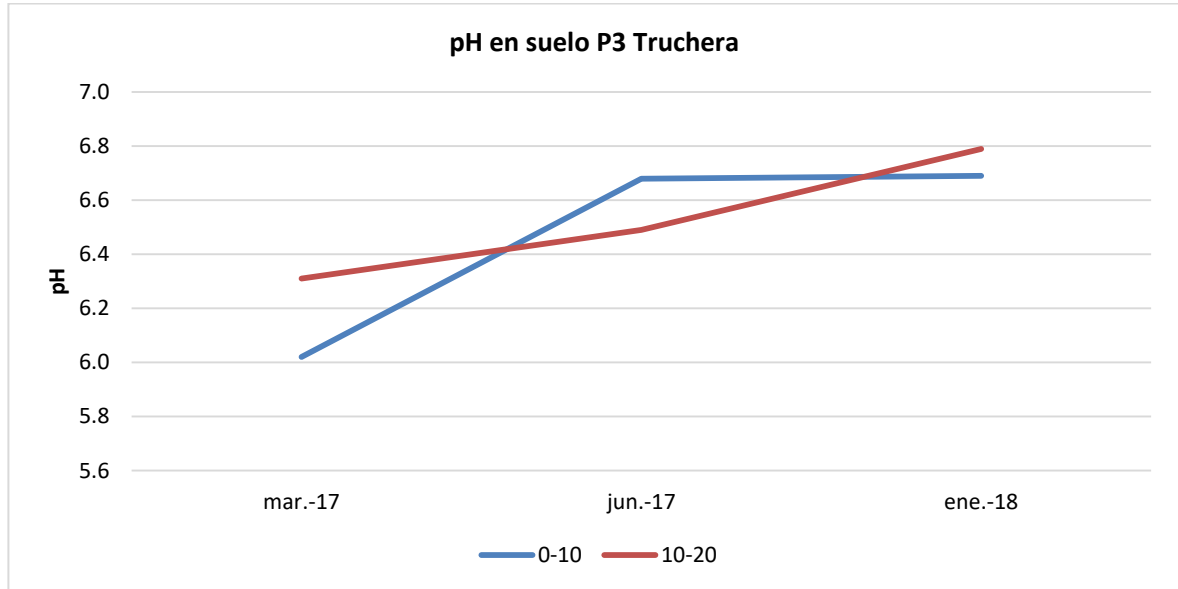


Figura 17. pH medido en agua en suelo de P3 Truchera

Los valores de pH en KCl tienen un rango de 5.0-5.6, más altos en comparación con el perfil 2 de la Truchera y al igual que estos siguen dentro del rango de los suelos volcánicos (Acevedo-Sandoval *et al.*, 2010; Fernández *et al.*, 1980; Giménez *et al.*, 2009; Meza-Pérez y Geissert-Kientz, 2006; Ortiz *et al.*, 2004; Quantin y Geissert, 1988; Sadzawka *et al.*, 1995).

La conductividad registrada en este punto 0.27-1.71 dS/m en el horizonte superior y .023-.048 dS/m, clasificados como ligeramente salinos al igual que el punto 2 de la Truchera (NOM-021, 2000).

La MOS reportada abarca intervalos de 3.28 - 5.31%, valores más bajos comparados con los porcentajes del punto 2 de la Truchera, esto se debe a que el uso de suelo está siendo cambiado de bosque a zona agrícola y caminos de acceso. Sin embargo, los valores siguen dentro de los rangos reportados para Andosoles (Acevedo-Sandoval *et al.*, 2010; Fernández *et al.*, 1980; Fuentes, 1971; Hernández *et al.*, 2017; INEGI, 2000; Martini, 1969; Miguel, 2002; Ortiz *et al.*, 2004; Thiers *et al.*, 2014). El porcentaje de Nitrógeno reportado se encuentra entre 0.05-0.33 (Figura 18), coincidiendo con el punto 2 de la Truchera y con los reportados para suelos volcánicos (Meza-Pérez y Geissert-

Kientz, 2006; Martini, 1969; Quantin y Geissert, 1988; Sadzuka *et al.*, 1995). El fósforo reportado en este sitio tiene los siguientes valores: 25-88 mg/kg_{suelo}, estando en el rango de Andosoles (Negrín, 2005; Pérez *et al.*, 1979; Pose *et al.*, 2015; Sadzawka *et al.*, 1995).

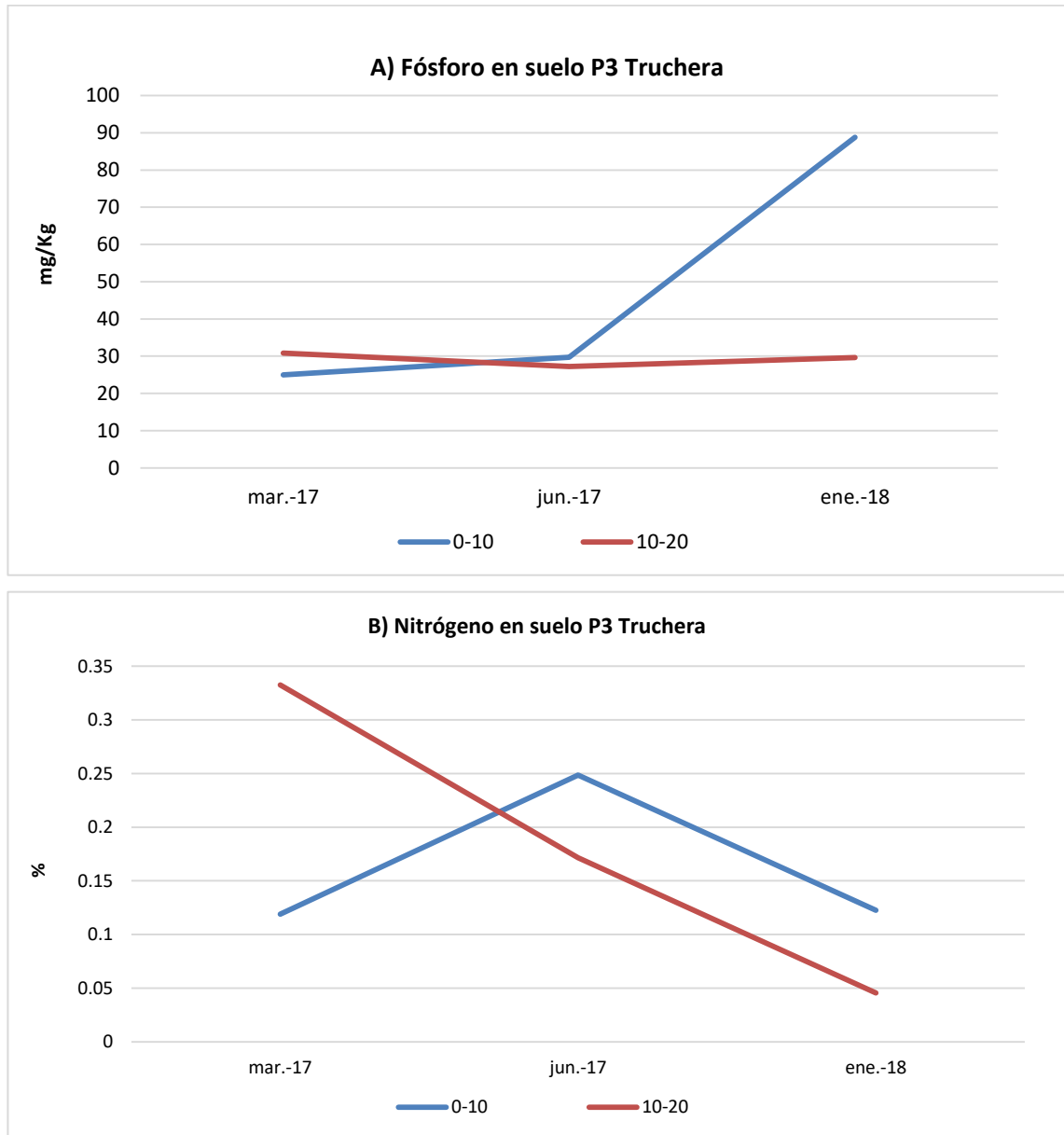


Figura 18. Contenido de Fósforo (A) y nitrógeno (B) en suelo de la P3 Truchera.

El intervalo de la CIC va de 3.5- 19.7 cmol/kg, de muy baja a media de acuerdo con la NOM-021. Estos valores se han registrado para algunos trabajos (Mahecha-Pulido *et al.*,

2015; Martini, 1969; Vivanco *et al.*, 2010), sin embargo se encuentran por debajo de los valores promedios para Andosoles (Acevedo-Sandoval *et al.*, 2010; INEGI, 2000; Mahecha-Pulido *et al.*, 2015; Ojeda y Quintero, 1980; Quantin y Geissert, 1988; Roqueme *et al.*, 2014; Sadzawka *et al.*, 1995).

El orden de la concentración de cationes sigue siendo $Ca > Mg > K > Na$ comportamiento común en los Andosoles (Tabla 12; Acevedo-Sandoval *et al.*, 2010; INEGI, 2000; Mahecha-Pulido *et al.*, 2015; Martini, 1969; NOM-021, 2002; Ojeda y Quintero, 1980; Quntin y Geissert, 1988; Sadzawka *et al.*, 1995; Urrego, 1997; Vivanco *et al.*, 2010). Los cuatro cationes muestran una disminución en el tercer muestreo, esto puede deberse a que se lixivien por la pendiente del perfil de 45° (Báez *et al.*, 2009; García, 2007; Ramírez *et al.*, 2010; Salve *et al.*, 2008; Teutli *et al.*, 2009).

Tabla 12. Concentraciones de bases intercambiables en suelo de P3 Truchera.

cmol/kg	Profundidad	Marzo 2017	Junio 2017	Enero 2018
Ca	0-10	5.65	16.55	0.25
	10-20	4.02	6.08	2.49
Mg	0-10	1.27	1.48	1.37
	10-20	0.92	1.31	0.87
K	0-10	0.22	0.29	0.16
	10-20	0.17	0.13	0.10
Na	0-10	0.20	0.14	0.21
	10-20	0.13	0.09	0.09

En cuanto a los micronutrientes, el orden sigue el patrón $Fe > Mn > Zn > Cu$ (Tabla 13; Baker, 1990). De igual manera que en los perfiles anteriores, las concentraciones de Mn, Zn y Cu se encuentran dentro de los rangos reportados para este tipo de suelos de acuerdo a sus materiales parentales (Alloway, 1990; Galán y Romero, 2008; Mahecha *et al.*, 2015; Roqueme *et al.*, 2014; Smith, 1990). Los valores de Fe_2O_3 son debido a las altas concentraciones de óxidos de Fe presentes en estos (Alcalá *et al.*, 2009; Alloway, 1990, Hernández y Bethencourt, 2017; Martini, 1969; Sadzawka *et al.*, 2006; Thiers *et al.*, 2014).

Tabla 13. Concentración de micronutrientes en suelo de P3 Truchera.

	Profundidad	Marzo 2017	Junio 2017	Enero 2018
Fe₂O₃ (%)	0-10	0.77	0.84	0.81
	10-20	0.86	0.84	0.77
Mn (mg/kg)	0-10	242.93	334.93	274.93
	10-20	236.93	272.93	265.93
Zn (mg/kg)	0-10	56.9	80.9	55.9
	10-20	52.9	54.9	53.9
Cu (mg/kg)	0-10	19.98	15.98	6.98
	10-20	14.98	10.98	7.98

No se registraron concentraciones de Pb y Cd en ningún muestreo. Los valores de Ni siguen siendo altos comparados con otros estudios Andosoles (Tabla 14; Cortes *et al.*, 2016; Galán y Romero, 2008; Machecha-Pulido *et al.*, 2015; McGrath y Smith, 1990; Roqueme *et al.*, 2014), de igual manera, los valores se asocian a los principales minerales presentes en los suelos (Alloway, 1990, Azcárate, 2009; Besoain, 1969; Cruz-Flores y Etchevers-Barra, 2011; García *et al.*, 2002; Martini, 1969, Thiers *et al.*, 2014). Las concentraciones de Cr siguen estando dentro de los valores reportados (McGrath y Smith, 1990).

Tabla 14. Concentraciones de metales en suelo de P3 Truchera.

	Profundidad	Marzo 2017	Junio 2017	Enero 2017
Al₂O₃ (%)	0-10	1.19	1.50	1.43
	10-20	1.39	1.28	1.12
Al inter (cmol/kg)	0-10	0.24	0.48	0.24
	10-20	0.32	0.4	0.4
Ni (mg/kg)	0-10	1358.47	1511.47	1448.47
	10-20	1643.47	1364.47	1473.47
Cr (mg/kg)	0-10	0.2	2.8	30.9
	10-20	3.5	2.9	30.9
C/N	0-10	25.89	10.36	7.64
	10-20	9.97	12.19	41.83

El porcentaje de Al_2O_3 se deben a la mineralogía de los suelos (Acevedo-Sandoval *et al.*, 2009; Alcalá *et al.*, 2009; Azcárate *et al.*, 2009; Beltrán, 2004; Campos *et al.*, 2001; Cardona *et al.*, 1996; Casierra-Posada y Niño-Medina, 2007; Espinosa, 1996; Fuentes, 1971; Hernández y Bethencourt, 2017; Krug y Frink, 1983; Martini, 1969; OPS, 2005; Ortiz *et al.*, 2004; Ortiz *et al.*, 2006; Quantin y Geissert, 1988; ; Sadzawka *et al.*, 2006; Urrego, 1997; Zapata 2004). El Al intercambiable se encuentra ligeramente abajo de los valores reportados para los Andosoles, (Fuentes, 1971; Martini, 1969; Meza-Pérez y Geissert-Kientz, 2006; Ojeda y Quintero, 1980; Ortiz *et al.*, 2004; Ortiz *et al.*, 2006), en este sitio se registra una disminución de la concentración de Al en el tercer muestreo pudiendo deberse ya sea a un proceso de lixiviación o precipitación de óxidos de aluminio al haber un aumento de pH en este tiempo de muestreo (Beltrán, 2004; Casierra-Posada y Niño-Medina, 2007; Fassbender, 1975; Gallart, 2017).

La relación C/N es más baja con respecto al punto 2 de la Truchera, probablemente debido a la pérdida de la cobertura vegetal y por ende de materia orgánica presente en la zona por efectos antrópicos. Sin embargo los rangos aún se encuentran dentro de los reportados para Andosoles arriba de lo reportado por Quantin y Geissert (1988), pero dentro del rango promedio (Hernández *et al.*, 2017; Martini, 1969; Miguel, 2002).

8.6 Punto 4 Centro Ecoturístico Apatlaco

8.6.1 Lluvia

El muestreo de lluvia en este sitio reportó 29% de incidencia de lluvia ácida con rangos de pH que van de 2.3 a 6.9 (Figura 19). El mes con la mayor acidez registrada fue Julio lo cual corresponde a un aumento en la cantidad de emisiones registradas con dirección Norte afectando este punto de muestreo.

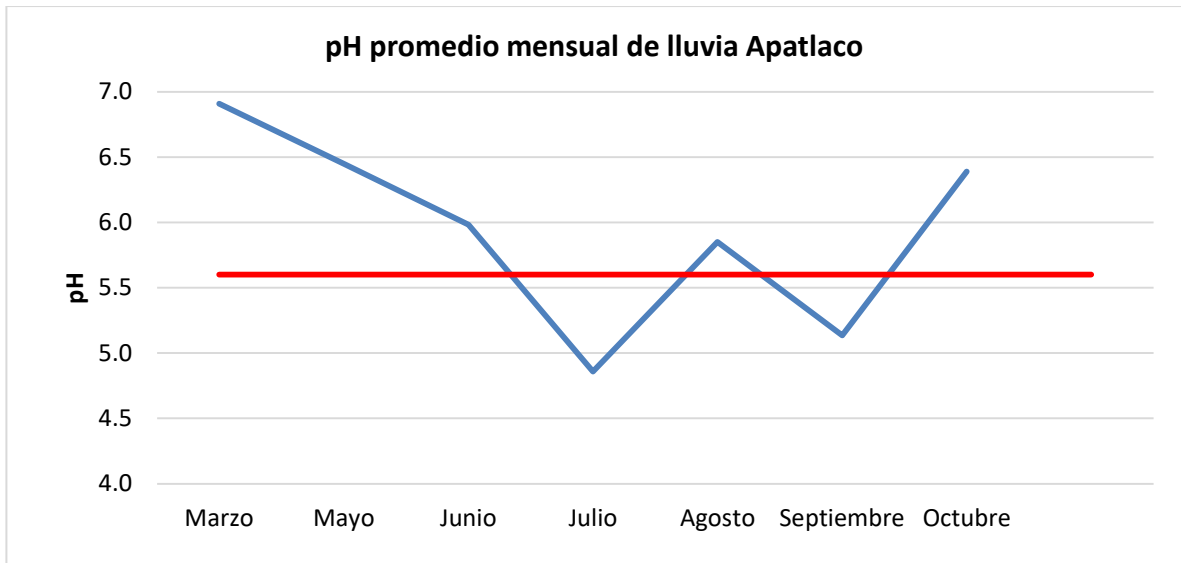


Figura 19. pH promedio mensual de lluvia registrada en Apatlaco durante el 2017.

En el mes de Agosto se ve un incremento en el pH que puede deberse a que la cantidad de iones fue mayor contribuyendo a neutralizar la acidez de la lluvia (Báez *et al.*, 2007; Báez *et al.*, 2009; García, 2007; Ramírez *et al.*, 2010; Singh *et al.*, 2016; Shen *et al.*, 2013; Teutli *et al.*, 2010). Posteriormente el mes de Septiembre hubo un mayor número de emisiones dirigidas hacia la zona de estudio lo que contribuyó nuevamente a la acidificación de la lluvia para nuevamente neutralizarse al final del periodo de lluvias.

8.6.2 Suelo

Como su nombre lo indica es un parque ecoturístico con vegetación pino-pastizal, cuya finalidad es proporcionar servicios a las personas dentro de un ambiente natural, sin embargo la zona tiene una moderada perturbación debido a las actividades que se realizan dentro del parque como fuera de éste, ejemplo de lo anterior es la extracción de madera.

El pH de los suelos se encuentra moderadamente ácido en ambas profundidades, con rangos que van de 4.8-6.05 en el horizonte superior y 5.18-6.64 en el horizonte inferior. En el horizonte superficial se observa una disminución de pH en el tercer muestreo, lo cual puede deberse a la contribución de la lluvia y la acidez que ésta presentó durante el 2017 (Figura 20). El horizonte inferior muestra mayor acidez en el segundo muestreo, sin embargo en el último parece regresar a su valor inicial lo cual puede deberse a la capacidad de amortiguamiento del propio suelo (Cardona, 2006; Kaupenjohann *et al.*, 1989; Mayer, 1991).

A pesar que en el horizonte superficial hubo una disminución de pH de moderadamente ácido a fuertemente ácido (NOM-021, 2000), el rango de ambas profundidades en los tres muestreos se encuentra dentro de los reportados para Andosoles (Alcalá *et al.*, 2009; Campos *et al.*, 2001; Cruz y Geissert, 2000; Mahecha-Pulido *et al.*, 2015; Meza-Pérez y Geissert-Kientz, 2006; Pose *et al.*, 1980; Quantin y Geissert, 1988; Sadzawka *et al.*, 2006; Vivanco *et al.*, 2010).

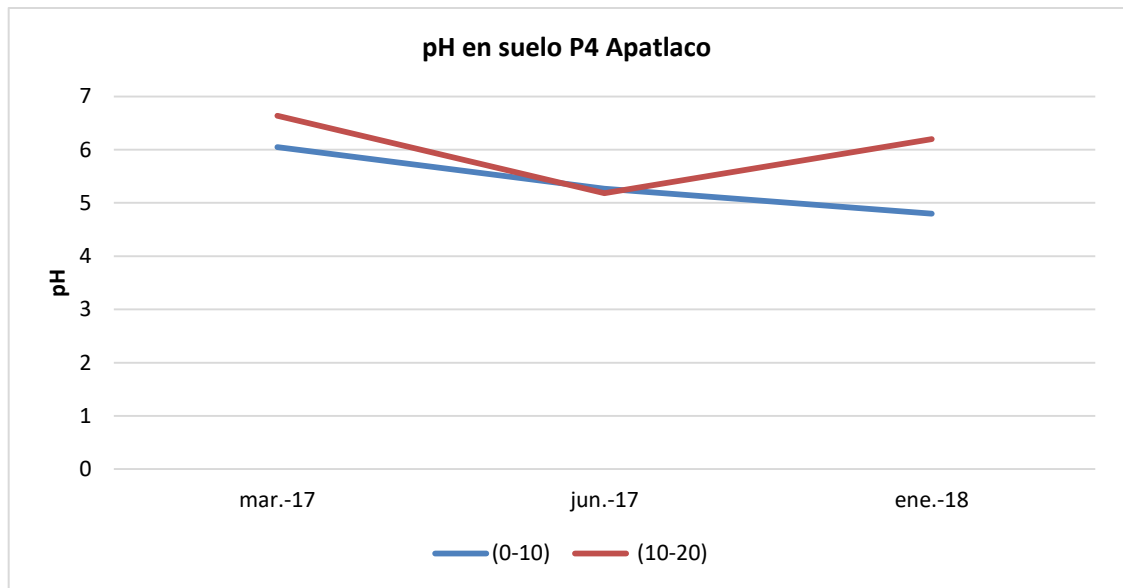


Figura 20. pH del suelo medido en agua en P4 Apatlaco.

Los valores de pH medidos en KCl tienen un rango de 3.8 a 4.6 en el horizonte superior y de 4.3 a 5.6 en el inferior, estos valores siguen dentro del rango normal para los Andosoles (Acevedo-Sandoval *et al.*, 2010; Fernández *et al.*, 1980; Giménez *et al.*, 2009; Meza-Pérez y Geissert-Kientz, 2006; Ortiz *et al.*, 2004; Quantin y Geissert, 1988; Sadzawka *et al.*, 1995).

Los valores de conductividad de este sitio registran intervalos de 0.2-2.25 dS/m, esto abarca la clasificación de muy bajo a medio según la NOM-021.

El porcentaje de MOS (0.83-1.54), disminuye durante los tres muestreos en ambas profundidades, sin embargo hay un aumento y posterior disminución en el horizonte superior en el segundo y tercer muestreo, lo cual pueda contribuir a la acidez antes registrada, los valores continúan estando en los rangos registrados (Acevedo-Sandoval *et al.*, 2009; Pérez *et al.*, 1979; Zapata, 2004). El contenido de nitrógeno es bajo en ambas profundidades (0.1-0.27%), aunque aumenta ligeramente en el segundo

muestreo pudiendo deberse a un acarreo de nitratos y amonio en lluvia (Figura 20; Báez *et al.*, 2007, Báez *et al.*, 2009; De Vries, 1994; García, 2007; Ramírez *et al.*, 2010; Salve *et al.*, 2008; Shen *et al.*, 2013; Teutli *et al.*, 2010; Yanna *et al.*, 2014). El contenido de fósforo es alto al igual que en los perfiles anteriores (32-79 mg/kg_{suelo}; Negrín, 2005; Pérez *et al.*, 1979; Pose *et al.*, 2015; Sadzawka *et al.*, 1995), de igual manera se observa un incremento en el último muestreo al igual que el nitrógeno (Báez *et al.*, 2007, Báez *et al.*, 2009; De Vries, 1994; García, 2007; Ramírez *et al.*, 2010; Teutli *et al.*, 2010; Salve *et al.*, 2008; Shen *et al.*, 2013; Yanna *et al.*, 2014).

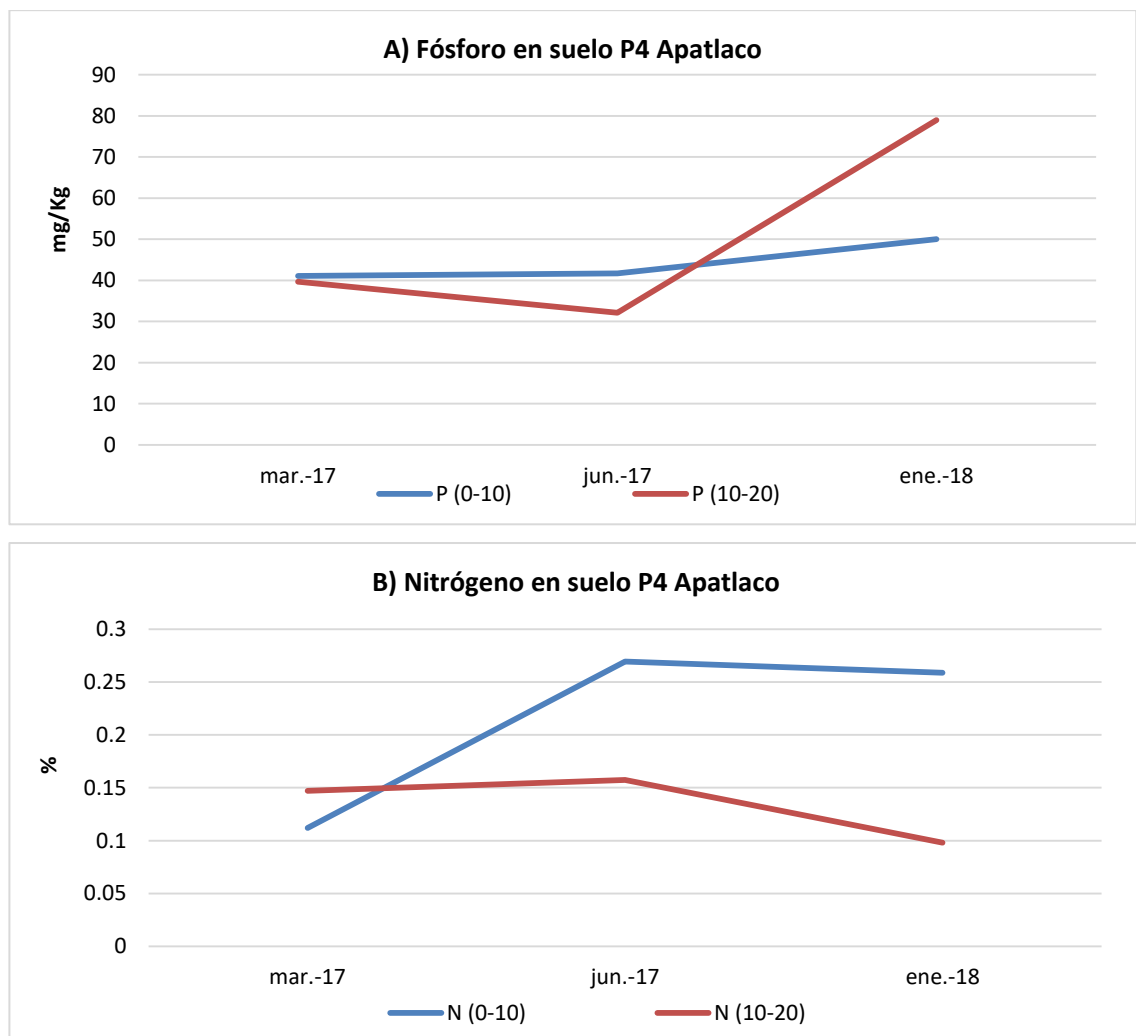


Figura 21. Concentraciones de A) Fósforo y B) Nitrógeno en suelo de P4 Apatlaco.

El rango de la Capacidad de intercambio catiónico va de 4-18.5 cmol/kg, entrando en las clasificaciones muy baja y media de la NOM-021. Al igual que el perfil anterior, los valores se encuentran abajo de los reportados para Andosoles (Acevedo-Sandoval *et al.*, 2010;

INEGI, 2000; Mahecha-Pulido *et al.*, 2015; Ojeda y Quintero, 1980; Quantin y Geissert, 1988; Roqueme *et al.*, 2014; Sadzawka *et al.*, 1995).

Los cationes más abundantes en estos suelos fueron el Ca y Mg respectivamente, sin embargo en comparación de los demás perfiles, el Na es ligeramente más abundante que el K (Tabla 15). El Ca, Mg y K muestra un aumento en el segundo muestreo en el horizonte superficial, lo cual puede indicar que se deba al acarreo de estos cationes en la lluvia, viéndose disminuido por lixiviación en el tercer muestreo en ambos horizontes (Báez *et al.*, 2007, Báez *et al.*, 2009; De Vries, 1994; García, 2007; Ramírez *et al.*, 2010; Teutli *et al.*, 2010; Salve *et al.*, 2008; Shen *et al.*, 2013; Yanna *et al.*, 2014). El Na presenta una disminución desde el primer hasta el último muestreo, lo cual puede indicar su lixiviación por la lluvia en este suelo. Las concentraciones de los cuatro cationes se encuentran dentro de los promedios (Acevedo-Sandoval *et al.*, 2010; INEGI, 2000; Mahecha-Pulido *et al.*, 2015; Martini, 1969; NOM-021, 2002; Ojeda y Quintero, 1980; Quntin y Geissert, 1988; Sadzawka *et al.*, 1995; Urrego, 1997; Vivanco *et al.*, 2010).

Tabla 15. Concentraciones de bases intercambiables en suelo de P4 Apatlaco.

cmol/kg	Profundidad	Marzo 2017	Junio 2017	Enero 2018
Ca	0-10	2.98	3.32	2.06
	10-20	2.71	1.35	0.79
Mg	0-10	0.49	0.66	0.44
	10-20	0.78	0.36	0.33
K	0-10	0.09	0.20	0.09
	10-20	0.10	0.08	0.03
Na	0-10	0.24	0.16	0.12
	10-20	0.27	0.12	0.09

Al igual que el perfil anterior, el orden de los micronutrientes continúa siendo Fe>Mn>Zn>Cu, siendo el Mn, y Zn probablemente proveniente de los minerales presentes en los suelos (Tabla 16; Alloway, 1990, Martini, 1969, Galán y Romero, 2008; Mahecha *et al.*, 2015; Roqueme *et al.*, 2014; Smith, 1990; Thiers *et al.*, 2014). Los valores de Fe₂O₃ son debido a las altas concentraciones de óxidos de Fe presentes en estos

(Alcalá *et al.*, 2009; Alloway, 1990, Hernández y Bethencourt, 2017; Martini, 1969; Sadzawka *et al.*, 2006; Thiers *et al.*, 2014).

Tabla 16. Concentración de micronutrientes en suelo de P4 Apatlaco.

	Profundidad	Marzo 2017	Junio 2017	Enero 2018
Fe₂O₃ (%)	0-10	0.96	0.86	0.83
	10-20	0.98	0.81	0.85
Mn (mg/kg)	0-10	254.93	241.93	276.93
	10-20	228.93	205.93	262.93
Zn (mg/kg)	0-10	125.9	59.9	55.9
	10-20	41.9	59.9	52.9
Cu (mg/kg)	0-10	15.98	10.98	4.98
	10-20	25.98	12.98	6.98

Las concentraciones de Pb, Cd y Cr no presentaron valores durante los tres muestreos, por otro lado las concentraciones de Ni siguen siendo altas (Tabla 17; Cortes *et al.*, 2016; Galán y Romero, 2008; Machecha-Pulido *et al.*, 2015; McGrath y Smith, 1990; Roqueme *et al.*, 2014), asociándose a los minerales del suelo Alloway, 1990, Azcárate, 2009; Besoain, 1969; Cruz-Flores y Etchevers-Barra, 2011; García *et al.*, 2002; Martini, 1969, Thiers *et al.*, 2014), mientras que las concentraciones de Cr continúan dentro de los valores promedio (McGrath y Smith, 1990).

Tabla 17. Concentraciones de metales en suelo de P4 Apatlaco.

	Profundidad	Marzo 2017	Junio 2017	Enero 2017
Al₂O₃ (%)	0-10	1.32	1.68	0.98
	10-20	2.00	0.90	1.45
Al int (cmol/kg)	0-10	0.36	0.56	0.4
	10-20	0.24	0.36	0.24
Ni (mg/kg)	0-10	1573.47	1509.47	1387.47
	10-20	1326.47	1476.47	1404.47
Cr (mg/kg)	0-10	0	0	23.9
	10-20	4.5	0	36.9

C/N	0-10	41.79	24.83	5.48
	10-20	13.27	8.22	4.93

El porcentaje de Al_2O_3 se asocia con el contenido mineralógico de los Andosoles (Acevedo-Sandoval *et al.*, 2009; Alcalá *et al.*, 2009; Azcárate *et al.*, 2009; Beltrán, 2004; Campos *et al.*, 2001; Cardona *et al.*, 1996; Casierra-Posada y Niño-Medina, 2007; Espinosa, 1996; Fuentes, 1971; Hernández y Bethencourt, 2017; Krug y Frink, 1983; Martini, 1969; OPS, 2005; Ortiz *et al.*, 2004; Ortiz *et al.*, 2006; Quantin y Geissert, 1988; Sadzawka *et al.*, 2006; Urrego, 1997; Zapata 2004). El Al intercambiable se encuentra ligeramente por debajo de los valores reportados para los Andosoles, (Fuentes, 1971; Martini, 1969; Meza-Pérez y Geissert-Kientz, 2006; Ojeda y Quintero, 1980; Ortiz *et al.*, 2004; Ortiz *et al.*, 2006). Se observa un aumento en el segundo muestreo en el horizonte superior, mientras que en el inferior se observa el aumento en el tercer muestreo, pudiendo deberse a una lixiviación del horizonte superior.

La relación C/N en este sitio registra valores dentro de los promedio para estos suelos promedio (Hernández *et al.*, 2017; Martini, 1969; Miguel, 2002).

8.7 Punto 5. Apatlaco (zona abierta).

8.7.1 Suelo

Este perfil se encuentra en la entrada del Centro Ecoturístico Apatlaco presentando la misma vegetación que el perfil anterior y probablemente la misma perturbación al ser camino principal hacia el centro, sin embargo, a diferencia del punto anterior, se encuentra en una zona con menor abundancia de pino.

El pH de los suelos va de 5.7–6.1 y de 5.9- 6.2 en los horizontes superior e inferior respectivamente (Figura 22), se clasifican como moderadamente ácido según a NOM-021 y se encuentran dentro del promedio para Andosoles (Alcalá *et al.*, 2009; Campos *et al.*, 2001; Cruz y Geissert, 2000; Mahecha-Pulido *et al.*, 2015; Meza-Pérez y Geissert-Kientz, 2006; Pose *et al.*, 1980; Quantin y Geissert, 1988; Sadzawka *et al.*, 2006; Vivanco *et al.*, 2010). Se observa un incremento del pH en los dos horizontes en el último muestreo, contrario de lo que ocurre en el perfil 5 de Apatlaco, pudiendo deberse al acarreo de iones presentes en la lluvia y al grado de la pendiente del perfil de 45° (Báez

et al., 2009; Ramírez *et al.*, 2010; Singh *et al.*, 2016; Shen *et al.*, 2013; Teutli y Peláez, 2010).

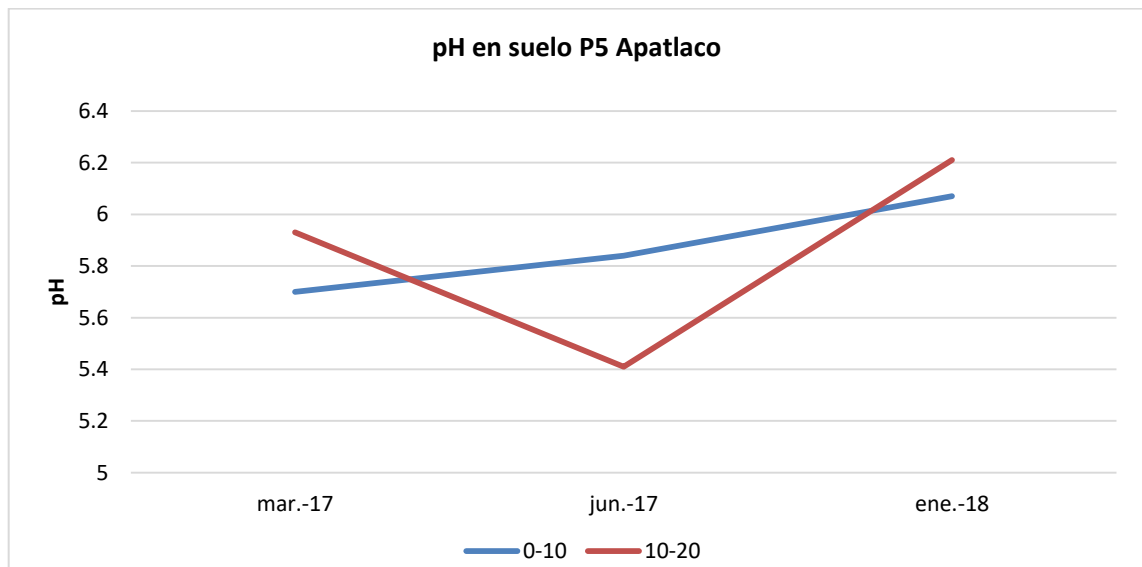


Figura 22. pH del suelo medido en agua en P5 Apatlaco.

El pH medido en KCl (4.2-4.7) se mantiene en dentro del rango promedio (Acevedo-Sandoval *et al.*, 2010; Fernández *et al.*, 1980; Giménez *et al.*, 2009; Meza-Pérez y Geissert-Kientz, 2006; Ortiz *et al.*, 2004; Quantin y Geissert, 1988; Sadzawka *et al.*, 1995).

La conductividad se encuentra en el intervalo 0.17-0.7 dS/m clasificándose como muy bajo con efecto despreciable de salinidad de acuerdo con la NOM-021 (2000).

El contenido de materia orgánica es de 1.16-5.31%, los valores más bajos con respecto al perfil 4 del mismo sitio se pueden deber a que en este punto la vegetación predominante es pastizal (Betancourt *et al.*, 1999; Vela *et al.*, 2012). El porcentaje de nitrógeno es bajo (0.1-0.26%; Figura 23) aumentando en el segundo muestreo al igual que en el perfil del punto 4 tomado en esta zona, del mismo modo ocurre con el fósforo cuyos rangos van de (21.93-72.32 mg/kg_{suelo}), este aumento puede deberse a un acarreo de cationes en la temporada de lluvias (Báez *et al.*, 2007; Báez *et al.*, 2009; García, 2007; Ramírez *et al.*, 2010; Singh *et al.*, 2016; Shen *et al.*, 2013; Teutli *et al.*, 2010).

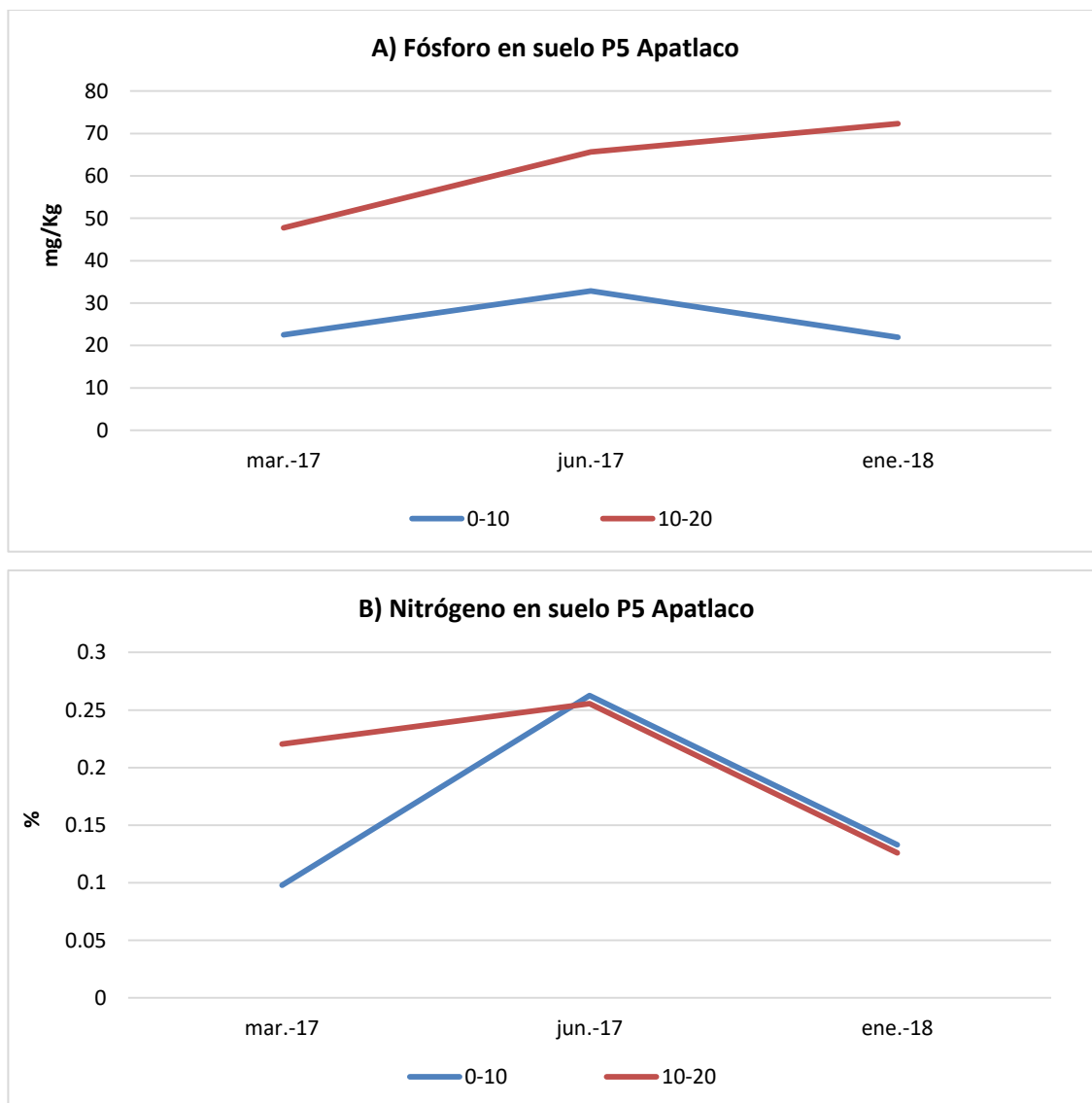


Figura 23. Concentraciones de A) Fósforo y B) Nitrógeno en suelo de P5 Apatlaco

De acuerdo con la NOM-021 las clasificaciones de CIC se encuentran de muy baja a media con un rango de 1.8-20.1 cmol/kg, al igual que el perfil 4 de Apatlaco, estos valores continúan siendo bajos para los registrados en suelos de origen volcánico (Acevedo-Sandoval *et al.*, 2010; INEGI, 2000; Mahecha-Pulido *et al.*, 2015; Ojeda y Quintero, 1980; Quantin y Geissert, 1988; Roqueme *et al.*, 2014; Sadzawka *et al.*, 1995).

La concentración de cationes en este sitio sigue el orden Ca>Mg>Na>K, al igual que el perfil del punto 4 de esta zona, el Na es ligeramente más abundante (Tabla 18). El comportamiento de estos cationes es similar entre los cuatro, teniendo una disminución

en el segundo muestreo pudiendo deberse a la lixiviación de estos durante el periodo de lluvias horizontes (Báez *et al.*, 2007, Báez *et al.*, 2009; De Vries, 1994; García, 2007; Ramírez *et al.*, 2010; Salve *et al.*, 2008; Shen *et al.*, 2013; Teutli *et al.*, 2010; Yanna *et al.*, 2014).

Tabla 18. Concentraciones de bases intercambiables en suelo de P5 Apatlaco

cmol/kg	Profundidad	Marzo 2017	Junio 2017	Enero 2018
Ca	0-10	2.91	1.73	2.97
	10-20	2.96	2.27	2.26
Mg	0-10	0.58	0.48	0.54
	10-20	0.54	0.41	0.38
K	0-10	0.13	0.10	0.12
	10-20	0.07	0.05	0.04
Na	0-10	0.13	0.12	0.07
	10-20	0.14	0.11	0.06

El orden de concentración de los micronutrientes es Fe>Mn>Zn>Cu. Los valores de Mn permanecen constantes con el perfil 4 de la zona de Apatlaco, mientras que los de Zn se encuentran en menores concentraciones, probablemente asociadas al material mineral propio de los suelos (Tabla 19; Alloway, 1990, Martini, 1969, Galán y Romero, 2008; Mahecha *et al.*, 2015; Roqueme *et al.*, 2014; Smith, 1990; Thiers *et al.*, 2014). Los valores de Fe₂O₃ son debido a las altas concentraciones de óxidos de Fe presentes en estos (Alcalá *et al.*, 2009; Alloway, 1990, Hernández y Bethencourt, 2017; Martini, 1969; Sadzawka *et al.*, 2006; Thiers *et al.*, 2014).

Tabla 19. Concentración de micronutrientes en suelo de P5 Apatlaco.

	Profundidad	Marzo 2017	Junio 2017	Enero 2018
Fe₂O₃ (%)	0-10	0.90	0.88	0.83
	10-20	0.83	0.87	0.87
Mn (mg/kg)	0-10	250.93	290.93	278.93
	10-20	239.93	257.93	282.93
Zn (mg/kg)	0-10	182.9	67.9	59.9

	10-20	259.9	59.9	62.9
Cu (mg/kg)	0-10	8.98	10.98	4.98
	10-20	10.98	13.98	5.98

El Pb y Cd no presentan concentraciones en este sitio al igual que en los demás perfiles analizados, mientras que los de Ni son altos comparados con otros estudios (Tabla 20; Cortes *et al.*, 2016; Galán y Romero, 2008; Machecha-Pulido *et al.*, 2015; McGrath y Smith, 1990; Roqueme *et al.*, 2014), los valores de Cr permanecen dentro de los promedios registrados para este tipo de suelos (McGrath y Smith, 1990).

Tabla 20. Concentraciones de metales en suelo de P4 Apatlaco.

	Profundidad	Marzo 2017	Junio 2017	Enero 2017
Al₂O₃ (%)	0-10	1.15	1.50	1.10
	10-20	1.21	1.43	1.00
Al int (cmol/kg)	0-10	0.36	0.36	0.4
	10-20	0.32	0.44	0.32
Ni (mg/kg)	0-10	1478.47	1522.47	1336.47
	10-20	1493.47	1576.47	1532.47
Cr (mg/kg)	0-10	0	0	26.9
	10-20	0	0	26.9
C/N	0-10	31.44	8.97	6.45
	10-20	13.27	2.63	25.75

El porcentaje de Al₂O₃ se asocia con el contenido mineralógico de los Andosoles (Acevedo-Sandoval *et al.*, 2009; Alcalá *et al.*, 2009; Azcárate *et al.*, 2009; Beltrán, 2004; Campos *et al.*, 2001; Cardona *et al.*, 1996; Casierra-Posada y Niño-Medina, 2007; Espinosa, 1996; Fuentes, 1971; Hernández y Bethencourt, 2017; Krug y Frink, 1983; Matini, 1969; OPS, 2005; Ortiz *et al.*, 2004; Ortiz *et al.*, 2006; Quantin y Geissert, 1988; Sadzawka *et al.*, 2006; Urrego, 1997; Zapata 2004). El Al intercambiable se encuentra dentro del rango de los Andosoles, (Fuentes, 1971; Martini, 1969; Meza-Pérez y Geissert-Kientz, 2006; Ojeda y Quintero, 1980; Ortiz *et al.*, 2004; Ortiz *et al.*, 2006). Los

valores se mantienen relativamente constantes en los tres muestreos y en ambas profundidades.

La relación C/N es más baja que en el sitio 4 de Apatlaco, esto se relaciona con la menor cantidad de materia orgánica reportada para este punto, y esto a su vez con el tipo de vegetación predominante (Betancourt *et al.*, 1999; Vela *et al.*, 2012).

8.8 Punto 6. Parque Nacional Iztaccíhuatl-Popocatépetl.

8.8.1 Lluvia

Del total de muestras de lluvia colectadas en este punto el 68% corresponden a lluvia ácida (Bluhm *et al.*, 2009; Garcés y Hernández, 2004; García-Guadalupe *et al.*, 2016; Granados, *et al.*, 2010). El rango de pH registrado para muestras individuales fue de 1.69 a 6.1, siendo el punto con el registro con mayor acidez en todo el estudio, esto se asocia a que es el punto más próximo a las emisiones del volcán. Este registro se obtuvo en el mes de Julio, al igual que el sitio Apatlaco, se pudo deber a su ubicación hacia el lado Norte del volcán a la cual fueron dirigidas mayormente las emisiones registradas. De igual manera, en el mes de Agosto se ve un incremento en el pH que puede deberse a que la cantidad de iones fue mayor contribuyendo a neutralizar la acidez de la lluvia (Báez *et al.*, 2007; Báez *et al.*, 2009; García, 2007; Ramírez *et al.*, 2010; Singh *et al.*, 2016; Shen *et al.*, 2013; Teutli *et al.*, 2010). La cantidad de emisiones dirigidas hacia el lado Norte se reflejó en una disminución en el pH del suelo para el mes de Septiembre disminuyendo para el mes de Octubre (Figura 24).

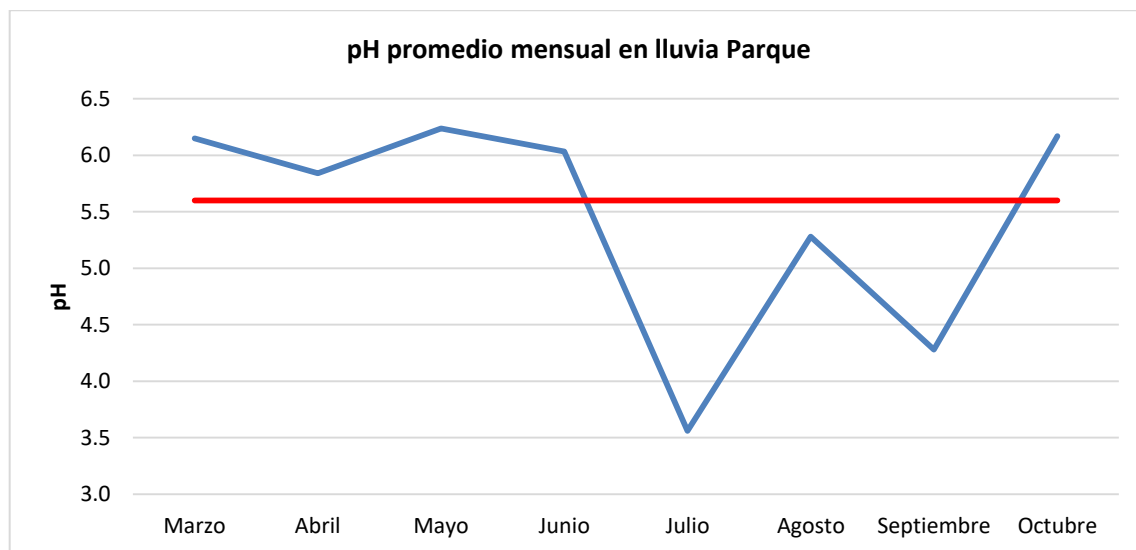


Figura 23. pH promedio mensual de la lluvia colectada en P6 Parque Izta-Popo durante el 2017.

8.8.2 Suelo

Este punto es un puerto montañoso ubicado en los límites del Estado de México y Puebla. La carretera paso de Cortés es una de las vías utilizadas por muchos para ir de un estado a otro, además de las actividades que se realizan en el parque la zona puede considerarse con una perturbación moderadamente alta ya que es la zona de convergencia de varios caminos.

El pH de los suelos se encuentra en el rango moderadamente ácido en los tres muestreos y en las dos profundidades (Figura 24), los valores siguen correspondiendo a los reportados para Andosoles (Alcalá *et al.*, 2009; Campos *et al.*, 2001; Cruz y Geissert, 2000; Mahecha-Pulido *et al.*, 2015; Meza-Pérez y Geissert-Kientz, 2006; Pose *et al.*, 1980; Quantin y Geissert, 1988; Sadzawka *et al.*, 2006; Vivanco *et al.*, 2010). El horizonte superficial presenta una ligera disminución de pH del primer al tercer muestreo, esto puede atribuirse a la lluvia y a la acidez que ésta presentó, así como la cantidad de emisiones a la cual está expuesta el sitio al ser el punto de muestreo más cercano al volcán así como la ubicación de ésta, pues al ser un puerto montañoso es el paso de corrientes de aire de un estado a otro. El horizonte inferior muestra un aumento en el tercer muestreo, pudiendo deberse a un aumento de cationes por lixiviación (Báez *et al.*, 2007, Báez *et al.*, 2009; De Vries, 1994; García, 2007; Ramírez *et al.*, 2010; Teutli *et al.*, 2010; Salve *et al.*, 2008; Shen *et al.*, 2013; Yanna *et al.*, 2014).

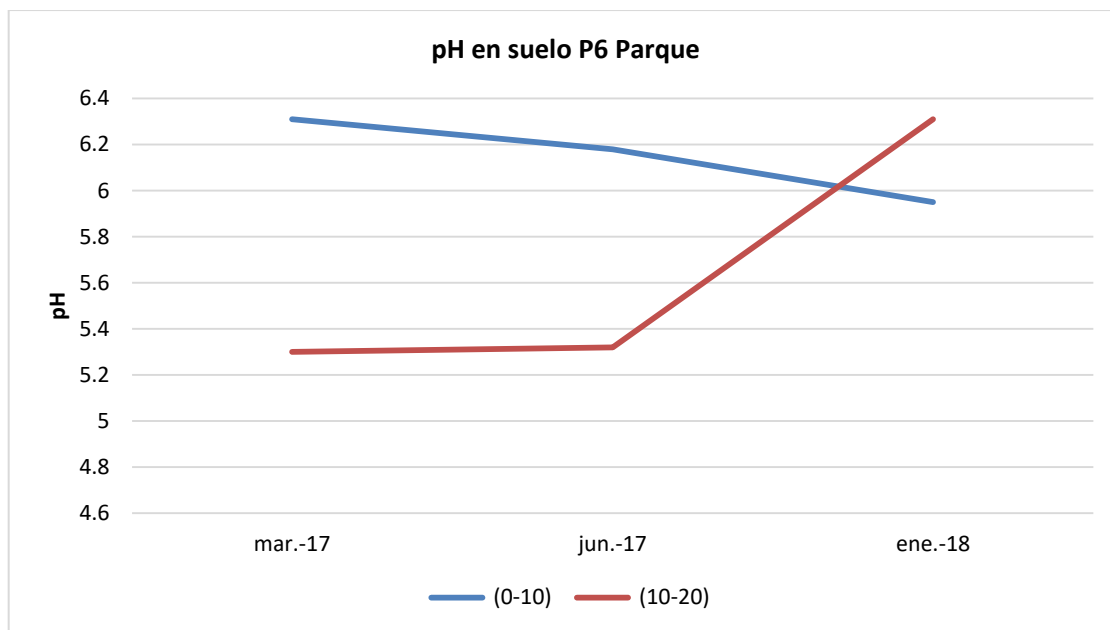


Figura 24. Valores de pH en suelo P6 Parque Izta-Popo.

El pH medido en KCl presenta rangos de 4.3-4.8 correspondiente a los medidos en suelos de origen volcánico (Acevedo-Sandoval *et al.*, 2010; Fernández *et al.*, 1980; Giménez *et al.*, 2009; Meza-Pérez y Geissert-Kientz, 2006; Ortiz *et al.*, 2004; Quantin y Geissert, 1988; Sadzawka *et al.*, 1995).

La conductividad tiene de 0.22-0.55 S/m corresponden a valores muy bajos de acuerdo con la NOM-021 (2000).

El contenido de MOS fue mayor en el horizonte superior con respecto al interior lo cual es típico en estos suelos (Acevedo-Sandoval *et al.*, 2009; Pérez *et al.*, 1979; Zapata, 2004). Aunque los valores reportados son muy bajos (1-4.8%), esto puede deberse al tipo de vegetación de la zona que corresponde a pastizal. Lo anterior se ve reflejado en las concentraciones de Nitrógeno con intervalos de (0.11-0.29%), mientras que las de Fósforo continúan siendo altas (41-62 mg/kg_{suelo}, Figura 26).

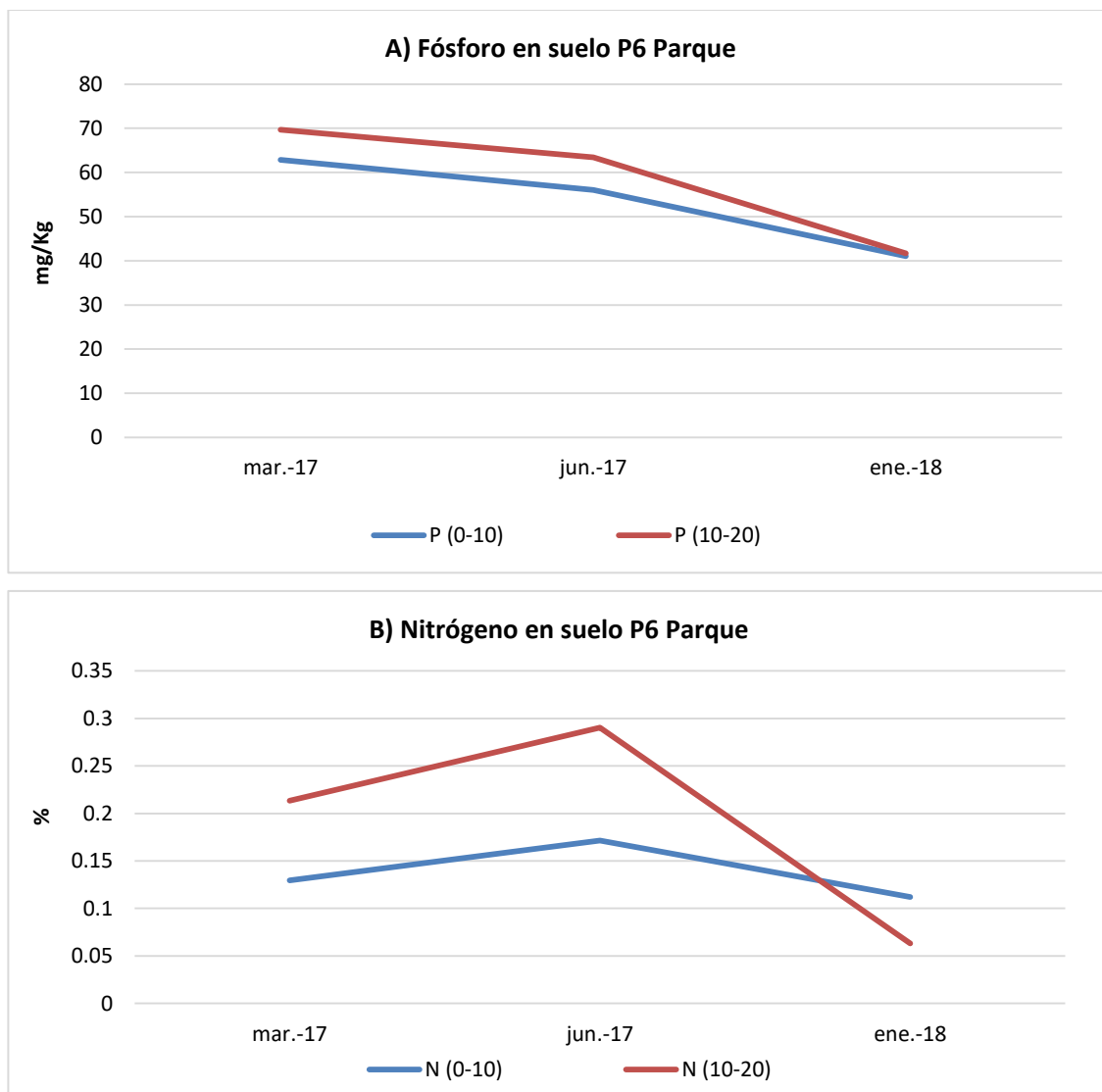


Figura 26. Concentración de A) Fósforo y B) Nitrógeno en perfil P6 Parque.

La clasificación de la capacidad de intercambio cationico son bajas y muy bajas (NOM-021, 2000), con un rango de 3.9-14.2 cmol/kg, siendo bajos para los registrados estos suelos (Acevedo-Sandoval *et al.*, 2010; INEGI, 2000; Mahecha-Pulido *et al.*, 2015; Ojeda y Quintero, 1980; Quantin y Geissert, 1988; Roqueme *et al.*, 2014; Sadzawka *et al.*, 1995).

La concentración de cationes sigue el patrón Ca>Mg>K>Na al igual que los otros perfiles analizados. El Ca presentó una disminución (en ambas profundidades) en el segundo muestreo, lo cuál pudo deberse a un proceso de lixiviación, y a su vez contrinuir a la acidez del suelo reportada anteriormente. El magnesio reportó valores estables en el horizonte superior, mientras que en el inferior se obtuvo un incremento en el tercer

muestreo. Por otro lado, el potasio y el sodio registraron un incremento en el segundo muestreo y una disminución en el tercero, contrario a lo que sucede en el suelo inferior, el cual disminuye en el segundo muestreo y aumenta en el tercero, este comportamiento pudiera explicar un proceso de lixiviación de las bases en el perfil (Tabla 21; Báez *et al.*, 2009; García, 2007; Ramírez *et al.* 2010; Salve *et al.*, 2008; Teutli *et al.*, 2009).

Tabla 21. Concentraciones de bases intercambiables en suelo de P6 Parque.

cmol/kg	Profundidad	Marzo 2017	Junio 2017	Enero 2018
Ca	0-10	2.68	1.44	2.73
	10-20	6.28	3.09	6.87
Mg	0-10	0.38	0.39	0.49
	10-20	0.43	0.42	0.42
K	0-10	0.12	0.16	0.03
	10-20	0.04	0.05	0.06
Na	0-10	0.09	0.07	0.08
	10-20	0.08	0.09	0.07

El comportamiento de los micronutrientes sigue el mismo patrón que los demás puntos analizados: Mn>Zn>Cu, de los cuales las concentraciones de Mn y Zn se atribuyen a los minerales presentes en los suelos (Tabla 22; Alloway, 1990; Galán y Romero, 2008; Mahecha *et al.*, 2015; Martini, 1969; Roqueme *et al.*, 2014; Smith, 1990; Thiers *et al.*, 2014).

Tabla 22. Concentración de micronutrientes en suelo de P6 Parque.

	Profundidad	Marzo 2017	Junio 2017	Enero 2018
Fe₂O₃ (%)	0-10	0.86	0.87	0.87
	10-20	0.90	0.93	0.86
Mn (mg/kg)	0-10	262.93	257.93	273.93
	10-20	267.93	276.93	272.93
Zn (mg/kg)	0-10	61.9	68.9	53.9
	10-20	65.9	63.9	62.9
Cu (mg/kg)	0-10	20.98	17.98	5.98

10-20	22.98	14.98	2.98
-------	-------	-------	------

Las concentraciones de Pb y Cd no presentaron valores durante los tres muestreos. Los valores altos de Ni pueden atribuirse al material de origen de los suelos (Tabla 23; Cortes *et al.*, 2016; Galán y Romero, 2008; Mahecha-Pulido *et al.*, 2015; McGrath y Smith, 1990; Roqueme *et al.*, 2014), mientras que los de Cr permanecen dentro de los promedios registrados para este tipo de suelos (McGrath y Smith, 1990).

Tabla 23. Concentraciones de metales en suelo de P6 Parque.

	Profundidad	Marzo 2017	Junio 2017	Enero 2017
Al₂O₃ (%)	0-10	1.23	1.37	0.96
	10-20	1.51	1.57	0.89
Al int (cmol/kg)	0-10	0.41	0.48	0.44
	10-20	0.38	0.4	0.52
Ni (mg/kg)	0-10	1473.47	1541.47	1441.47
	10-20	1462.47	1475.47	1456.47
Cr (mg/kg)	0-10	4	1.9	28.9
	10-20	5.1	0.1	28.9
C/N	0-10	10.39	8.82	15.32
	10-20	2.92	2.20	44.57

El porcentaje de Al₂O₃ se asocia con el contenido mineralógico de los Andosoles (Acevedo-Sandoval *et al.*, 2009; Alcalá *et al.*, 2009; Azcárate *et al.*, 2009; Beltrán, 2004; Campos *et al.*, 2001; Cardona *et al.*, 1996; Casierra-Posada y Niño-Medina, 2007; Espinosa, 1996; Fuentes, 1971; Hernández y Bethencourt, 2017; Krug y Frink, 1983; Martini, 1969; OPS, 2005; Ortiz *et al.*, 2004; Ortiz *et al.*, 2006; Quantin y Geissert, 1988; Sadzawka *et al.*, 2006; Urrego, 1997; Zapata 2004). El Al intercambiable se encuentra dentro del rango de estos suelos, (Fuentes, 1971; Martini, 1969; Meza-Pérez y Geissert-Kientz, 2006; Ojeda y Quintero, 1980; Ortiz *et al.*, 2004; Ortiz *et al.*, 2006).

La relación C/N está en el intervalo (2.2-44) esto se relaciona con el contenido de materia orgánica reportada para este punto, y esto a su vez con el tipo de vegetación predominante (Betancourt *et al.*, 1999; Vela *et al.*, 2012).

8.9 Estadística de suelo

Se realizó un análisis de varianza para evaluar la hipótesis nula (H_0) la cual nos dice que las medias de todos los sitios de muestreo son iguales, contra la hipótesis alternativa (H_A) que indica que al menos una de las medias grupales es distinta, para esto se estableció como nivel de significancia 0.05, para lo anterior se tiene que:

Si (p-valor) > 0.05 se acepta la $H_0 \rightarrow$ todas las medias grupales son iguales,

Si (p-valor) < 0.05 no se acepta la $H_0 \rightarrow$ alguna de las medias grupales es diferente.

Se comprobó que no existen diferencias significativas entre el pH de los sitios de muestreo con un valor de $p=0.108$ (>0.05), de igual manera sucedió al comparar las dos profundidades que se analizaron ($p=0.108$). Se realizó el análisis de las interacciones entre sitios y profundidades para determinar su influencia sobre el pH, se obtuvo un valor de $p=0.034$, lo cual corrobora que no hay diferencias entre los valores de pH durante el tiempo de muestreo.

Lo anterior indica que no existe una incidencia de la lluvia acida sobre la acidez del suelo durante el 2017, esto se ve reflejado en los valores de pH registrados así como las concentraciones de materia orgánica, micro y macronutrientes de los suelos, los cuales se presentan dentro de los rangos comunes registrados para otros suelos de su tipo (Alcalá *et al.*, 2009; Campos *et al.*, 2001; Cruz y Geissert, 2000; Mahecha-Pulido *et al.*, 2015; Meza-Pérez y Geissert-Kientz, 2006; Pose *et al.*, 1980; Quantin y Geissert, 1988; Sadzawka *et al.*, 2006; Vivanco *et al.*, 2010).

Lo anterior representa un primer acercamiento a las evaluaciones de este tipo, ya que es de gran importancia el monitoreo constante tanto de las concentraciones de iones en la atmósfera que provocan la acidez en la lluvia, como las afectaciones que esta pueda tener en los suelos a lo largo de los años (Campillo y Sadzawka. 2006; Zapata, 2004).

La región Popocatepetl es un área de vital importancia ambiental, es el parteaguas de una amplia zona de captación que alimenta y distribuye sus recursos hídricos tanto a la cuenca de México, como al oriente del estado de Puebla, en la vertiente oriental de la Sierra de Río Frío; pero también a la cuenca que alimenta los valles de Cuernavaca, Cuautla y Yauatepec en el estado de Morelos, por lo que la conservación de la cubierta

vegetal y el sustrato edáfico, es de importancia trascendental para regular la infiltración de agua al subsuelo y la intensidad de los escurrimientos (Hernández-García y Granados-Sánchez, 2006; Franco, 2014; Pérez *et al.*, 2007). Por lo cual es de gran importancia continuar con trabajos de este tipo que puedan detectar algún cambio importante con el tiempo suficiente para poder amortiguar o mitigar los efectos según sea el caso.

IX CONCLUSIONES

Se confirma la presencia de lluvia ácida durante el 2017 en la región noreste del Popocatepetl con un pH mínimo registrado de 1.69.

Los meses con mayor incidencia de lluvia ácida y emisiones volcánicas fueron de Julio a Octubre.

Hubo presencia de Zn, Pb, Cu, Cd, y Ni en el agua de lluvia atribuidas a las concentraciones de estos metales en las cenizas volcánicas emitidas por el Popocatepetl.

Se observa la tendencia a la disminución del valor de pH en la parte superficial del suelo, lo que pudiera ser atribuido a la temporada de lluvias. Sin embargo los rangos de pH se encuentran dentro de los registrados para Andosoles y no se encontró una diferencia significativa entre los sitios y profundidades evaluados.

La concentración de MOS es bajo en los puntos más perturbados como Xalitzintla (0.4%) y Parque (2.3%) y alto en los sitios mayormente conservados como la Truchera (8.4%) y Apatlaco (7.3%), sin embargo, no es atribuible a un efecto directo de la lluvia.

El orden de la concentración de cationes en suelo fue: $Ca > Mg > K > Na$. Las concentraciones variaron en cada sitio, siendo su aumento atribuido a un acarreo de cationes y su disminución a un proceso de lixiviación por la lluvia.

La capacidad de intercambio catiónico fue baja para todos los puntos de muestreo pudiendo deberse a la disminución del pH que influye dada la textura de los suelos y al contenido de materiales alofánicos presentes.

Por lo que se refiere a los micronutrientes, el orden fue $Fe > Mn > Zn > Cu$, comportamiento común en estos suelos.

Con respecto a la concentración Níquel es alta en los seis puntos analizados, lo cual puede deberse al material parental de los suelos. Las concentraciones de Cromo se mantienen dentro del rango de un Andosol. Mientras que el Aluminio intercambiable aumenta con la disminución de pH pero no excede los valores de toxicidad.

X. RECOMENDACIONES

Continuar de manera permanente con los el muestreo de lluvias para percibir cambios en la composición química de la atmósfera a lo largo de los años y poder evitar afectaciones futuras.

Evaluar el impacto directo de la lluvia ácida en los suelos y sobre la vegetación para evitar la pérdida de ecosistemas por efecto de la contaminación atmosférica.

XI. BIBLIOGRAFÍA

Acevedo-Sandoval, O., Prieto-García, F. y Gordillo-Martínez, A. (2009): Identificar las fracciones de aluminio en un Andosol del estado de Hidalgo, México. *Revista de la Sociedad Geológica de España*, 21 (3-4): 125-132.

Acevedo-Sandoval, O., Valera-Pérez, M., y Prieto-García, F. (2010). Propiedades físicas, químicas y mineralógicas de suelos forestales en Acaxochitlan, Hidalgo, México. *Universidad y Ciencia*. 26(2):137-150.

Aguilar, S., Bravo, H., Magaña, R., Saavedra, M. y Torres, R. (1981). Lluvia Ácida en la Cuenca del Valle de México. *Memorias de Resúmenes de la Reunión 1981 de la Unión Geofísica Mexicana*. Manzanillo, Colima. Mayo 6-9.

Aguilar, S., Bravo, H., Magaña, R., Saavedra, M. y Torres, R. (1984). Acid Precipitation in the Mexico City Basin. *Proceedings of the Applications with Special Regard to Tropical Areas*. World Meteorological Organization. Mexico City. November. pp. 3- 4.

Alarcón, J., Bravo, H., Sosa, E., Torres, B., Sánchez, A., Retama, H. y Rivera, O. (2011). Acid wet deposition in the Mexico City Metropolitan Zone. 104th Annual Conference & Exhibition of the Air & Waste Management Association. Orlando, Florida, USA. June.

Alcalá, M., Hidalgo, C., y Gutiérrez, M. (2009). Mineralogía y retención de fosfatos en andisoles. *Terra Latinoamericana*, 27 (4), 275-286.

Alfaro, R., Fernández, E., Barquero, J., Rodríguez, J. y Rodríguez, M. (1986). Lluvia ácida de origen volcánico. *Boletín de Vulcanología*. OVSICORI-UNA. 17: 15-22.

Alloway B. The origins of heavy metals in soils. En: Alloway, B. (1990). *Heavy metals in soils*. Blackie and Son Ltd., Glasgow. 29-37 pp.

Armienta., M, De la Cruz-Reyna, S., Morton, O., Cruz, O., Ceniceros, N. (2002). Chemical variations of tephra-fall deposit leachates for three eruptions from Popocatepetl volcano, *Journal of Volcanology and Geothermal Research*. 113:61–80 pp.

Azcárate, J., Escamilla, M. y Almeida L. (2009). Datos sobre la vegetación higrófila altimontana del Volcán Iztaccíhuatl (México). *LAZAROA* 30: 109-118.

Báez, A., Belmont, R. y Padilla, H. (1993). Variation of chemical composition of wet precipitation, using a sequential sampling: urban-rural areas comparison. *Atmósfera*, 6: 163-174.

- Báez, A., Belmont, R., Azpra, E., Torres, M. y Padilla, H. (1997). Cloudwater and precipitation chemistry at Popocatepetl Volcano Mexico: a high elevation sampling site. *Journal of Environmental Quality*, 26 (1), 253-258.
- Báez, A., Belmont, R., García, R., Padilla, H., y Torres, M. (2007). Chemical composition of rainwater collected at a southwest site of Mexico City, Mexico. *Atmospheric Research* 86(1):61-75.
- Báez, A., Belmont. R., García, R., Padilla, H., y Torres, M. (2009). Trends in Chemical Composition of Wet Precipitation in Mexico City, Mexico: 1992–2007. *The Open Atmospheric Science Journal*. 3:187-195.
- Báez, A., Padilla, H. y De González, O. (1986). Acid rain over México city valley and surrounding rural áreas. *Geofísica Internacional*. 25(2):315-346.
- Baker, D., B. Cobre. En: Alloway, B. (1990). *Heavy metals in soils*. Blackie and Son Ltd., Glasgow. 151-165.
- Beltrán, M. (2004). La solubilización de fosfatos como estrategia microbiana para promover el crecimiento vegetal. *Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria* 15(1) 101-113 pp.
- Besoain, E. (1969). Mineralogía de las arcillas de suelos derivados de cenizas volcánicas de Chile. En: *Panel sobre suelos derivados de cenizas volcánicas de América Latina*. Turrialba. IICA. Costa Rica. BI-1-BI-17 pp.
- Betancourt, P., González, J., Figueroa, B. y González, F. (1999). Materia orgánica y caracterización de suelos en proceso de recuperación con coberturas vegetativas en zonas templadas de México. *Terra* 17(2): 139-148.
- Bluhm, J., Núñez, E., Valle, S., Aguirre, C. y Magallanes, J. (2009). Aspectos de la medición del pH del agua de lluvia. Recuperado 10 de Octubre de 2017 de: https://www.researchgate.net/publication/291166684_Aspectos_de_la_medicion_del_pH_del_agua_de_lluvia
- Bravo, H., Saavedra, M., Torres, R., Sánchez, P. y Granada, L. (2000). Chemical composition of precipitation in a Mexican Maya Region. *Atmospheric Environment*. 34(8): 1197-1204.

Bravo, H., Sosa, E. y Torres, J. (1991). Ozono y lluvia ácida en la Ciudad de México. Ciencias. Revista de Difusión. Facultad de Ciencias. UNAM. No.22, pp. 3340.

Bravo, H., Sosa, E. y Torres, J. (1988). Preliminary study of the acid position in the Tijuana area (México). Paper 89-136.3 Published by APCA 81st. Annual Meeting of the Air Pollution Control Association. Dallas, Texas. June 19-24.

Bravo, H., Sosa, E. y Torres, J. (1989). El problema fotoquímico y la lluvia ácida en la Ciudad de México. Memorias de la Reunión sobre Salud y Ambiente en la Ciudad de México. Secretaría de la Defensa Nacional. Departamento del Distrito Federal. México, D.F. Abril 17-21. pp. 61-69.

Bravo, H., Sosa, E., Kahl, J., Sánchez, A., Alarcón, J. y Soto, A. (2006). Acid Deposition Events during the Autumn of 2003 in a Research Cruise over the Gulf of Mexico. 99th Annual Conference & Exhibition of the Air & Waste Management Association. New Orleans, Louisiana. June.

Bravo, H., Sosa, E., Sánchez, A., Soto, A. y Alarcón, J. (2005). Precipitación ácida en la costa del Golfo de México, p. 535-552. En: A.V. Botello, Rendón-von Osten, Gold-Bouchot y C. Agraz-Hernández (Eds.) Golfo de México Contaminación e Impacto Ambiental: Diagnóstico y Tendencias, 2da Edición. UAC, UNAM e INE., 695 p.

Bravo, H., Sosa, E., Torres, B., Alarcón J. y Sánchez A, Jaimes P., Retama H. y Granados H. (2015). Spatial and temporal variation of the acid rain in the Mexico City Metropolitan Zone. 9th International Conference on Acid Deposition, Rochester New York, USA. October

Bravo, H., Sosa, E., Torres, B., Alarcón J. y Sánchez A, Jaimes P., Retama H. y Granados H. (2016). Sulfur and nitrogen compounds in wet atmospheric deposition and in ambient air as indicators of emissions reduction strategies at Mexico City. Scientific Symposium Deposition, National Atmospheric Deposition Program. Santa Fe, NM, USA. October.

Bravo, H., Sosa, E., Torres, B., Alarcón J. y Sánchez A. (2013). Wet deposition in the Mexico City Metropolitan Zone. 2013 Annual Meeting and Scientific Symposium. National Atmospheric Deposition Program, Park City, Utah, USA. October 8-11.

Bravo, H., Torres, J., Harris, J., Saavedra, R., Sánchez, A., Camacho, C., Sosa, E. y Gamboa, M. (1996). Estudios de caso sobre química atmosférica y lluvia ácida, pp. 434-

457. En Vázquez-Botello, A., Rojas, G.J.L., Benítez, A.J., Zárate, L.D. (Eds.). Golfo de México, Contaminación e Impacto Ambiental: Diagnóstico y Tendencias. Universidad Autónoma de Campeche, EPOMEX Serie Científica 5. 666 p.

Campillo, R. y Sadzawka, A. La acidificación de los suelos. Origen y mecanismos involucrados, in: Campillo, R. (2006). Manejo de los recursos naturales en el Sistema de Incentivos para la Recuperación de Suelos Degradados de la Araucanía. Serie Actas. 38:44-60.

Campos, A., Oleschko K., Cruz, L., Etchevers, J. y Hidalgo C. (2001). Estimación de alofano y su relación con otros parámetros químicos en Andisoles de montaña del volcán Cofre de Perote. Terra 19(2):105-116. Capulín, J., Mohedano, L., y Razo, R. (2009). Cambios en el suelo y vegetación de un bosque de pino afectado por incendio. Terra Latinoamericana: 28: 79-87.

Capulín, J., Mohedano, L., y Razo, R. (2009). Cambios en el suelo y vegetación de un bosque de pino afectado por incendio. Terra Latinoamericana: 28: 79-87.

Cardona, A., Álvarez, A., Carral, P. y Jiménez, R. (1996) Capacidad de amortiguamiento potencial y actual de diversos suelos ácidos del Sistema Central. Boletín de la Sociedad Española de la Ciencia del Suelo. (3-1):99-107.

Casierra-Posada, F. y Niño-Medina R. 2007. Solubilidad y reacción del aluminio en el suelo. Ciencia y Agricultura Vol 5(2): 7-17 pp.

Castro, J., González, V. y Hernández, T. (1995). Metales pesados en los suelos del Desierto de los Leones, Distrito Federal. Revista Ciencia Forestal en México. 20(77):101-112.

Centro Nacional de Prevención de Desastres. (2010). Historia de la actividad del volcán Popocatepetl 17 años de historia. 1ª Ed. México, D.F. 65 pp.

Cerón, L., y Aristizábal, F. (2012). Dinámica del ciclo del nitrógeno y fósforo en suelos. Revista Colombiana de Biotecnología. 14(1):285-295.

Conti, M. (2002). Dinámica de liberación y fijación de Potasio en el suelo. Buenos Aires, Argentina, UBA. Facultad de Agronomía. Cátedra de Edafología. 14 p.

Cortes, E., Bravo, I., Martín, F. y Menjívar, J. (2016.). Extracción secuencial de metales pesados en dos suelos contaminados (Andisol y Vertisol) enmendados con ácidos húmicos. *Acta agronómica* 65 (3):232 – 238.

Cruz, L. y Geissert, D. (2000). Carga eléctrica de los Andosoles del Cofre de Perote, Veracruz, México. *TERRA*, vol. 18(2):115-124.

Cruz-Flores, G. y Etchevers-Barra, J. (2011). Contenidos de carbono orgánico de suelos someros en pinares y abetales de áreas protegidas de México. *Agrociencia*, 45(8): 849-862.

De Vries, W. (1994). Soil response to acid deposition at different regional scales; Field and laboratory data, critical loads and model predictions. PhD thesis, Wageningen University, Wageningen, 487 pp.

Delgado, L. y Serey, I. (2002). Distribución del cobre en ecosistemas forestales de tipo mediterráneo. *Revista Chilena de Historia Natural*. 75: 557-565.

Espinosa, J. (1996). Fijación de fósforo en suelos derivados de ceniza volcánica. *Informaciones Agronómicas*. 23:1-5.

Fassbender, H. (1975). Química de suelos con énfasis en suelos de América Latina. Turrialba. IICA. Costa Rica. 401 pp.

Fernández, E., González, A. y Hernández, M. (1980). Características electroquímicas de Andosoles. Punto cero de carga. Método potenciométrico. Madrid. *Anales de Edafología y Agrobiología*. Vol. 3(5-6):824-834.

Franco, Y. (2014). Distribución espacial e impacto de aeropolulantes en la salud del bosque de conservación del Distrito Federal. Tesis de Doctorado. Colegio de Postgraduados. México. 106 pp.

Fuentes, R. (1971). Comportamiento de la capacidad de intercambio catiónico en algunos suelos ácidos de origen volcánico. Tesis de Maestría. Instituto Interamericano de Ciencias Agrícolas de la OEA. Turrialba, Costa Rica. 107 pp.

Galán, E., y Romero, A. (2008). Contaminación de Suelos por Metales Pesados. *Macla* 10: 48-60.

Gallart, F. (2017). La conductividad eléctrica del suelo como indicador de la capacidad de uso de los suelos de la zona norte del Parque Natural de la Albufera de Valencia. Tesis de licenciatura. UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA. 34 pp.

Garcés, L. y Hernández, M. (2004). La lluvia ácida: un fenómeno fisicoquímico de ocurrencia local. Revista Lasallista de Investigación. 1(2): 67-72.

García, C., Moreno, J., Hernández, M. y Polo, A. (2002). Metales pesados y sus implicaciones en la calidad del suelo. Ciencia y Medio Ambiente. CCMA. CSIC. 125-138.

García, M., Ramírez, H., Meulenert, A., García F., Alcalá. J., Arellano, J., Espinosa, M y Odila de la Torre, V. (2006). Influencia de los contaminantes SO₂ y NO₂ en la formación de lluvia ácida en la zona metropolitana de Guadalajara, Jalisco, México. e-Gnosis (4)7:1-16.

García. R. (2007). Determinación de metales pesados en la precipitación pluvial de una zona urbana (Ciudad de México) y de una zona rural (Rancho Viejo, Edo. De México). Tesis de grado. Universidad Nacional Autónoma de México. México, D.F. 179 pp.

García-Guadalupe, E., Ramírez-Sánchez, U., Moulener-Peña, R., García-Concepción, O. y Espinosa-Martínez, L. (2016). La contaminación atmosférica precursor de lluvia ácida en la zona metropolitana de Guadalajara (ZMG), Jalisco, México. Instituto de Astronomía y Meteorología. Universidad de Guadalajara. 11 pp.

Giménez, J., Escamilla, M. y Almeida, L. (2009). Datos sobre la vegetación higrófila altimontana del Volcán Iztaccíhuatl (México). LAZAROA 30: 109-118.

Gómez, R. (2003). Efectos de la contaminación atmosférica en poblaciones de pequeños roedores silvestres (*Microtus mexicanus*, *Peromyscus melanotis* y *Peromyscus difficilis*) en México, D. F. Tesis doctoral. Departamento de Biología Animal. Facultad de Biología. Universidad de Barcelona. España. 409 pp.

Gómez, R. (2003). Efectos de la contaminación atmosférica en poblaciones de pequeños roedores silvestres (*Microtus mexicanus*, *Peromyscus melanotis* y *Peromyscus difficilis*) en México, D. F. Tesis doctoral. Departamento de Biología Animal. Facultad de Biología. Universidad de Barcelona. España. 409 pp.

González-Medina, R., Cibrián-Tovar, D., Cíntora-González, C. y Ramírez-Maldonado, H. (1998). Evaluación de la salud forestal en dos áreas de regeneración natural de *Pinus hartwegii*. Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente 4(2): 273-278.

Granados, D., López, G. y Hernández, M. (2010). La lluvia ácida y los ecosistemas forestales. Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente. 16(2): 187-206.

Hernández, L., Gutiérrez, M., Ortiz C., Sánchez, P. Guzmán y Ángeles, E. (2017). Calidad de Andosols en sistemas forestal, agroforestal y agrícola con diferentes manejos en Zacatlán, Puebla. Terra Latinoamericana 35: 179-189.

Hernández, M. y Bethencourt, F. (2017). Estimación de la fertilidad en suelos volcánicos (Tenerife, España) para el cultivo de trigo por medio de teledetección y SIG. Spanish Journal of Soil Science. 7(3):201-221.

Hernández, S., Mantilla, E., De la Rosa, J., Sanz, J. y Alastuey, A. (2007). Efectos en la vegetación en: Proyecto de Investigación para el diagnóstico y vigilancia del impacto por vía atmosférica de un complejo refinero en Extremadura. Informe final. Centro de Estudios Ambientales del Mediterráneo (CEAM). Capítulo 8: 8.1-8.40.

Hernández-García, M., y Granados-Sánchez, D. (2006). El Parque Nacional Iztaccíhuatl-Popocatepetl-Zoquiapan y el impacto ecológico-social de su deterioro. Revista Chapingo. Serie Ciencias Forestales y del Ambiente, 12 (2), 101-109.

INEGI. (2000). Suelos En: Síntesis geográfica del estado de Puebla. México. 67-69.

Krug, E. y Frink, C. (1983). Acid Rain on Acid Soil: A New Perspective. Science. 221(4610): 520-525.

Lobersli, E., Gjengedal, E., y Steinnes, E. (1991). Impact of soil acidification on the mobility of metals in the soil-plant system. En: Vernet, J. Heavy metals in the environmental. Ed. Elsevier. pp. 37-53.

López, V. y Herrera, G. (2011). Diagnóstico de lluvia ácida y condiciones meteorológicas asociadas en el barrio la Candelaria-Bogotá D.C. Revista Especializada en Ingeniería de Procesos en Alimentos y Biomateriales. 5:101-119.

Mahecha-Pulido, J., Trujillo-González, J. y Torres-Mora, M. (2015). Contenido de metales pesados en suelos agrícolas de la región del Ariari, Departamento del Meta. ORINOQUIA. 19(1):118-122.

Marín H.A., Bravo A.H., Alarcón J.A.L., Sosa E.R., Sánchez A.P. (2010). "Presencia de lluvia ácida en el Estado de Veracruz y el uso de modelos de trayectoria inversa para identificar regiones de emisión de precursores. Casos de estudio: El Tajín y La Mancha". Memorias del XIX Congreso Mexicano de Meteorología y IV Congreso Internacional de Meteorología. Saltillo, Coahuila, México. Octubre

Martini, J. (1969). Distribución geográfica y características de los suelos derivados de cenizas volcánicas de Centroamérica. En: Panel sobre suelos derivados de cenizas volcánicas de América Latina. Turrialba. IICA. Costa Rica. A5-1-A519 pp.

Márquez C, J. (1988). Probabilidad y estadística para ciencias Químicas-Biológicas. McGraw-Hill. México. 657 pp.

Mayer, R. (1991). The impact of atmospheric acid deposition on soil and vegetation. En: Vernet, J. Heavy metals in the enviromental. Ed. Elsevier. pp. 21-36.

McGrath, S. y Smith, S. Chromiun and nickel. En: Alloway, B. (1990). Heavy metals in soils. Blackie and Son Ltd., Glasgow. 125-141 pp.

Meza-Pérez, E., & Geissert-Kientz, D. (2006). Estabilidad de estructura en andisoles de uso forestal y cultivados. Terra Latinoamericana, 24 (2), 163-170.

Miguel. J. (2012). Cobertura vegetal, materia orgánica y pH en suelo y su relación con el índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI) en el Parque Nacional IztaccíhuatlPopocatépetl. Tesis de licenciatura. FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES ZARAGOZA. UNAM. México. D.F.104 pp.

Narvaez, O. y Cano, F. (2004). Cenizas volcánicas: contaminación ambiental. Revista del Instituto Nacional de Enfermedades Respiratorias. Vol.17(3): 232-238.

Navarro, R., Varo, M., Lanjeri, S. y Hernández R. (2007). Cartografía de defoliación en los pinares de pino silvestre (*Pinus sylvestris* L.) y pino salgareño (*Pinus nigra* Arnold.) en la Sierra de los Filabres. Ecosistemas 16 (3): 163-171.

Negrín, M. (2005). Especiación de fósforo en suelos ándicos de las Islas Canarias. Tesis doctoral. Universidad de la Laguna. España. 229 p.

Norma Oficial Mexicana, (2000). NOM-021-RECNAT-2000. Que establece las especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de suelos. Estudios muestreo y

análisis. Recuperado el 28 de Noviembre de 2016 de:
<http://biblioteca.semarnat.gob.mx/janium/Documentos/Ciga/libros2009/DO2280n.pdf>

Ojeda, F. y Quintero, J. (1980). Comportamiento del fósforo aplicado al suelo a partir de roca fosfórica y superfosfato triple en dos suelos Colombianos. *Revista colombiana de Química*. 10:21-32.

Organización Panamericana de la Salud. (2005). Contaminación atmosférica por erupciones volcánicas. En: *Salud Ambiental y el Riesgo volcánico*. BVSDE. Quito. 3:55-69.

Ortiz, E., Zapata, H., Sadeghian, K. y Franco, A. (2004). Aluminio intercambiable en suelos con propiedades andicas y su relación con la toxicidad. *Cenicafé* 55(2):101-110.

Ortiz-Escobar, M., Zapata-Hernández, R. y Sadeghian-Khalajabadi, S. (2006). Propiedades de la materia orgánica y capacidad complejante sobre el aluminio en algunos suelos ándicos en Colombia. *Cenicafé* 57(1):51-57.

Pardos, J. (2006). La contaminación atmosférica y los ecosistemas forestales. *Investigación Agraria: Sistemas y Recursos Forestales*. 15:55-70.

Parungo, F., Clarence, S., Hoyt, H. y Bravo, A. (1990). The Investigation of Air Quality and Acid Rain over the Gulf of Mexico. *Atmospheric Environment*. 24A (1): 109-123.

Pereira, G., Herrera J., Machuca, A., y Sánchez, M. (2007). Efecto del pH sobre el crecimiento in vitro de hongos ectomicorrícicos recolectados de plantaciones de *Pinus radiata*. *Bosque (Valdivia)*. 28(3): 215-219.

Pérez, J., Gutiérrez, F., Fernández, E. y Trujillo, I. (1979). Fósforo orgánico en Andosoles y su relación con otros parámetros del suelo. *Anales de Edafología y Agrobiología* 38(7-8): pp. 1199-1208.

Pérez, M., Fernández, C. y Sayer, J. (2007). Los servicios ambientales de los bosques. *Revista Ecosistemas*. 16(3): 81-90.

Pose, N., Baeza, M., Zamuner, E., Gerónimo, D. y Videla, C. (2015). Parámetros agronómicos y ambientales de fósforo en suelos molisoles con diferentes usos en la provincia de Buenos Aires, Argentina. *Acta Agronómica*. 65(4):375-382.

Quantin P. y D. Geissert. (1988). Características químicas y mineralógicas de un Andosol y de un suelo ferralítico de Xalapa, Veracruz, México. INIREB, Xalapa, Ver. 24 p.

Ramírez, E., Miranda, R., Gracia, Y., Balderas, I., Bravo, H., Sosa, R., Sánchez, P., Alarcón, A., Torres, M., y Kahl, J. (2010). Chemical composition of rainwater in northeastern México. *Atmósfera*, 23(3), 213-224.

Ramirez, F. (2002). Variación de la capacidad tampón en suelos derivados de cenizas volcánicas del sur de Chile. Tesis de Licenciatura. Universidad Austral de Chile. Facultad de Ciencias Agrarias. 92 pp.

Ramos, E. y Zúñiga, D. (2008). Efecto de la humedad, temperatura y pH del suelo en la actividad microbiana a nivel de laboratorio. *Ecología Aplicada*, 7(1,2): 123-130.

Reyes, P. (1990). Bioestadística aplicada: agronomía, biología, química. 2ª edición. Trillas. México. 216 pp.

Rojas, C. (2006). Interpretación de la disponibilidad de fósforo en los suelos de Chile. En: Campillo R. Manejo de los Recursos Naturales en el Sistema de Incentivos para la Recuperación de suelos degradados de la Araucanía. Instituto de Investigaciones agropecuarias, INIA. Centro Regional de Investigación Carillanca, Temuco, Chile. Serie Actas No. 38: 24-43 pp.

Roqueme J, Pinedo J, Marrugo J, Aparicio A. (2014). Metales pesados en suelos agrícolas del valle medio y bajo del río Sinú, departamento de Córdoba. (Memorias del II Seminario de Ciencias Ambientales Sue-Caribe & VII Seminario Internacional de Gestión Ambiental, 2014). Universidad de Córdoba, Montería. Colombia.

Sadzawka, A., Peralta, M., Ibarra, M., Peralta, J. y Fuentes, J. (1995). Características químicas de los suelos forestales chilenos. *BOSQUE* 16(1): 9-2.

Sadzawka, A.; Carrasco, M.; Grez, R. y Mora, M. (2006). Acidificación de los suelos volcánicos de Chile. IVth International Symposium on Deteriorated Volcanic Soils. Morelia, Tlaxcala, México. 8 p.

Salve, P., Maurya, A., Wate, S., Devotta, S. (2008). Chemical composition of major ions in rainwater. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*. 80(3): 242-246.

Santizo, O. (2016). Determinar el incremento en la atmósfera del contaminante denominado monóxido de carbono (CO) debido a las actividades antropogénicas en la

comarca lagunera de Durango. Tesis de licenciatura. Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro. Coahuila, México. 51 pp.

Schenkel, G. (1969). Problemas de la acidez en suelos chilenos derivados de cenizas volcánicas. En: Panel sobre suelos derivados de cenizas volcánicas de América Latina. Turrialba. IICA. Costa Rica. B9-1-B9-11 pp.

Shen, W., Ren, H., Jenerette, G., Hui, D. y Ren, H. (2013). Atmospheric deposition and canopy exchange of anions and cations in two plantation forests under acid rain influence. *Atmospheric Environment*. 64:242-250.

Singh, S., Pandian, S., Elumalai A. y Pal, K. (2016). Rain pH estimation based on the particulate matter pollutants and wet deposition study. *Science of the total Environment*. 563-564: 293-301.

Smith, K. Zinc. En: Alloway, B. (1990). *Heavy metals in soils*. Blackie and Son Ltd., Glasgow. 197-215 pp.

Sosa E., Bravo H., Sánchez A., Alarcón J., Herrera T. y Ch. A. (2008). Acid Wet Deposition Evaluation in the Coast of the Gulf of Mexico. 101st Annual Conference & Exhibition of the Air & Waste Management Association. Portland, Oregon. June.

Sosa, E., Alarcón, J., Torres, B., Sánchez, A. y Herrera, C. (2014). Evaluación de la deposición atmosférica ácida en la Costa del Golfo de México. P. 675-692 En: Botello, A.V., Rendón von Olsen J., Benítez, J.A., Gold-Bouchot, G. (eds.) *Golfo de México. Contaminación e impacto ambiental: diagnóstico y tendencias*. UAC, UNAM-ICMyL, CINVESTAV-Unidad Mérida. 1176p.

Sosa, E., Bravo, H., Alarcón, J., Sánchez, A., Jaimes, P. y Granados, H. (2015). Importance and evaluation of acid rain and settled particles on the coast of the Gulf of Mexico (2003-2013). 108th Annual Conference & Exhibition of the Air & Waste Management Association. Raleigh, North Caroline, USA. June.

Teutli, M. Jiménez, G. y Peláez, A. (2010). Composición química de agua de lluvia en Puebla, México. *Revista Enlace Químico*. 2(9):15-25.

Thiers, O., Reyes, J., Gerding, O. y Schlatter, J. (2014). Suelos en ecosistemas forestales. En: Donoso C, González, M., Lara. A. *Ecología forestal. Bases para el manejo*

sustentable y conservación de los bosques nativos de Chile. Valdivia, Chile. Ediciones UACH. 133-178 pp.

Urrego, B. (1997). La reforestación con coníferas y sus efectos sobre la acidificación, podsolización y pérdida de fertilidad de los suelos. *Informaciones Agronómicas*. 28: 6–12.

Vázquez-García A., Santiago-Martínez, G., y Estrada-Torres, A. (2002). Influencia del pH en el crecimiento de quince cepas de hongos ectomicorrizógenos. *Anales del Instituto de Biología, Universidad Nacional Autónoma de México. Serie Botánica* 73:1-15.

Vela, G., López, J. y Rodríguez, M. (2012). Niveles de carbono orgánico total en el Suelo de Conservación del Distrito Federal, centro de México. *Investigaciones Geográficas, Boletín del Instituto de Geografía, UNAM*. 77: 18-30.

Velasco, H., Segovia, E., Hidalgo, M., Ramírez, S., García, H., Romero, I., Maldonado, A., Ángeles, F., Retama, A., Campos, A., Montaña, J. y Wellens, A. (2002). Lluvia ácida en los bosques del poniente del Valle de México. En XXVII Congreso Interamericano de Ingeniería Sanitaria y Ambiental, llevado a cabo del 27 al 31 de Octubre de 2002. Cancún, México.

Vivanco, J., Bojórquez, J., Murray, R., Nájera, O., Hernández, A. y Flores, F. (2010). Características de los principales suelos de la cuenca del río Mololoa, Tepic, Nayarit, México. *Cultivos Tropicales*. 31(1): 32-40.

Yanna, L., Congyan, W., Yanyan, J., Wenwen, W., Xu, M., Jingjing, D., Gaozhong, P. y Xingjun, T. (2014). Effects of sulfuric, nitric, and mixed acid rain on litter decomposition, soil microbial biomass, and enzyme activities in subtropical forests of China. *Applied Soil Ecology*. 79: 1-9.

Zapata, R. (2004) *Química de la acidez del suelo*. Primera Edición. Cali, Colombia. Impresión Cargraphics Impresion Digital, 208 pp.