



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES ZARAZOZA

**Fosfatasa ácida y alcalina del suelo y su
efecto en la disponibilidad del P en suelos
de Bosques templados de México**

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

B I Ó L O G A

P R E S E N T A :

YANET ASTUDILLO BRAVO

DIRECTOR DE TESIS: DR. GERARDO CRUZ FLORES

PROYECTO FINANCIADO POR DGAPA PAPIIT IN-228403



MÉXICO, D. F.

NOVIEMBRE DEL 2006



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

DEDICATORIAS

A mis padres, Guilebalda Bravo y Gustavo Astudillo, por sus sabios consejos y por estar conmigo en los momentos más importantes de mi vida, porque sus abrazos siempre se abren cuando necesito un abrazo. Porque su fuerza y su amor me han dirigido por la vida y me han dado las alas que necesitaba para volar. Atribuyo todos mis éxitos en esta vida a la enseñanza moral, intelectual y física que recibí de ustedes.

A mis queridos hermanos Gustavo y Jorge que con su cariño y apoyo siempre saldré adelante y yo se perfectamente que siempre estarán conmigo cuando los necesite.

***MIRA TUS PENAS Y MIRA TU
ALEGRIA CON ESFUERZO Y
SABIDURIA,***

***TE DARAS CUENTAS QUE LA VIDA
ES ALEGRE Y A LA VEZ QUE TRISTE
Y QUE TU RECOMPENSA SERA
MAYOR A LA ALEGRIA,***

***NO MIRES ATRAS NUNCA, MIRA EN
EL FUTURO Y PIENSA QUE CADA
DIA SERA EL MEJOR DE TU VIDA,***

***VIVE A TOPE Y NO MIRES ATRAS
PARA ASI PODER LLEGAR A TODO
AQUELLO QUE SIEMPRE QUISISTE.***

(Anónimo)

AGRADECIMIENTOS

A Dios, por haberme dado la dicha de existir en este mundo. Por guiarme por un buen camino y por tener a la familia y amigos que me han acompañado en esta aventura que todavía no termina.

A la Universidad Nacional Autónoma de México que me abrió las puertas para empezar un hermoso sueño y tener el orgullo de ser universitaria.

A la Facultad de Estudios Superiores Zaragoza que me enseñó las bases principales de la investigación y por la oportunidad de ser parte de su comunidad.

A todos los compañeros que se encuentran en el Laboratorio de Edafología y Nutrición Vegetal.

A Dr. Gerardo Cruz Flores, gracias por ser mi maestro, mi **amigo** y muchas gracias por ser el pilar principal de este trabajo.

A Héctor M. León Maciel (gomo), gracias por tú amistad a lo largo de toda la carrera y porque parte de este trabajo es tuyo.

A ti Alejandra Ramos Corona, gracias por tu amistad y por tu buen humor, eres a todo dar y ya sabes seguir siempre para adelante y también eres parte de este trabajo.

A Rosario Granados Damián (Chayito), gracias por tus consejos ya que me enseñases cosas muy importantes que no podría acabar de enumerarlas y principalmente por tu amistad.

A mis abuelos Irais, Reberiano, Florinda y Cesareo, gracias por su cariño y sus cuidados.

A las familias Astudillo García, Lugo Bravo, Hernández Astudillo, Bravo Velásquez, Peralta Astudillo, Astudillo Duran, Verde Bravo, Flores Astudillo, Astudillo C y a mi tía Mayra, gracias a cada uno de los miembros que componen a estas familias por su cariño y apoyo.

A mis amigos incondicionales Diana, Alba, Azucena, Elía, Ulises, Lilia, Rodolfo, Rodrigo, Pedro, Oswaldo Bandín, Kike, E. Oswaldo S, Paulina, Noé, Carlos, Mavhi, Mónica, Elvira, Eloisa, Dulce María, Miriam, Estela, Max, Gabriel, David A, Francisco, Belem, Tania, Arturo, Nadia y Claudia, "perdón si omito a alguien", ya que para tener éxito hay que tener amigos; pero para mantener mucho éxito hay que tener muchos amigos y porque la verdadera amistad es como una planta de lento crecimiento que debe sufrir y vencer los embates del infortunio antes de que sus frutos lleguen a la completa madurez.

A los Maestros en Ciencias Efraín Ángeles Cervantes y María de Jesús Sánchez Colín y a los Biólogos Elvía García Santos y Rubén Zúbarán Rosales, gracias por sus comentarios para el enriquecimiento de este trabajo.

A todos los profesores que me dieron las bases para poder realizar este trabajo y por su amistad a largo de la carrera, por estas cosas y más **gracias**.

INDICE TEMÁTICO

	Páginas
1. Índice de figura	iv
2. Índice de cuadros	v
3. Resumen	1
4. Abstract	2
5. Introducción	3
6. Revisión bibliográfica	6
6.1. Concepto de suelo	6
6.2. Formación del suelo	7
6.3. Calidad de suelo	12
6.3.1. Indicadores de calidad de suelo	12
6.3.2. Índices de calidad de suelo	13
6.4. Propiedades físicas del suelo	14
6.4.1. Textura	14
6.4.2. Densidad aparente y densidad real	14
6.4.3. Espacio poroso	15
6.5. Propiedades químicas del suelo	15
6.5.1. Conductividad eléctrica	15
6.5.2. Potencial de Hidrogeno	15
6.5.3. Materia orgánica del suelo (MOS)	16
6.5.4. Elementos esenciales	17
6.6. El fósforo y su importancia	17
6.6.1. Importancia del fósforo en el crecimiento de las plantas	18
6.6.2. Funciones de fósforo en las plantas	19
6.6.3. El fósforo en el suelo	19
6.6.4. El fósforo en suelos agrícolas	20
6.6.5. El fósforo en suelos forestales	21
6.6.6. Ciclo del fósforo	21
6.6.7. Absorción de fósforo	24
6.6.8. Impactos de fósforo al suelo	25
6.6.9. Efectos de eutrofización	26
6.7. Actividad enzimática de la fosfatasa	27

6.8. Bosque de coníferas y encinos	30
6.9. Áreas Naturales Protegidas	32
6.10. Pruebas de hipótesis	34
6.10.1. Análisis de varianza	35
6.10.2. Método de Scheffé	35
6.10.3. Modelo lineal general (GLM)	35
7. Antecedentes	37
8. Justificación	37
9. Hipótesis	38
9.1. Objetivo general	38
9.2. Objetivos particulares	38
10. Zonas de Estudio	39
10.1. Características del Parque Nacional Iztaccíhuatl-Popocatepetl	39
10.2. Características del Parque Nacional Zoquiapan y Anexas	41
10.3. Características de la Reserva de la Biosfera El Cielo	44
11. Materiales y métodos	47
11.1. Delimitación de la zona	47
11.2. Toma de muestras	48
11.3. Pretratamiento de las muestras	48
11.4. Determinación en laboratorio	49
11.4.1. Análisis físicos	49
11.4.2. Análisis químicos	49
11.4.3. Análisis bioquímicos	50
11.5. Diagrama de flujo	51
12. Resultados y Discusión	54
12.1. Descripción fisiográfica de los sitios de muestreo	55
12.2. Caracterización del suelo y la vegetación	59
12.3. Parámetros físicos del suelo	65
12.4. Parámetros químicos del suelo	70
12.5. Actividad de las fosfatasas	80
12.6. Análisis de componentes principales	93
13. Conclusiones	94

14. Literatura citada	95
15. Anexos	102
16. Apéndice	106

Índice de Figuras

Figura		Páginas
1	Interacción entre factores físicos y procesos biológicos en y sobre el suelo.	3
2	Formación del suelo, tomado de SEMARNAT, 2002.	9
3	Perfil del suelo y sus horizontes.	10
4	Ciclo del Fósforo.	23
5	Adsorción de fósforo en el suelo.	25
6	Concentración de fósforo en relación al pH.	27
7	Distribución de los ecosistemas templados de México	32
8	Zona de estudio y puntos de muestreo de los Parques Nacionales Iztaccíhuatl-Popocatepetl y Zoquiapan y Anexas.	43
9	Zona de estudio y puntos de muestreo de la Reserva de la Biosfera El Cielo.	46
10	Toma de muestras	48
11	Bosque de Pino-Encino de la Reserva de la Biosfera El Cielo.	53
12	Vegetación y tipos de suelos en el Parque Nacional Iztaccíhuatl-Popocatepetel.	58
13	Suelos del Parque Nacional Iztaccíhuatl-Popocatepetel (Derecho) Andosol, (Izquierdo) Regosol.	59
14	Vegetación y tipos de suelos del Parque Nacional Zoquiapan y Anexas.	60
15	Andosol del Parque Nacional Zoquiapan y Anexas.	61
16	Vegetación y tipos de suelos de la Reserva de la Biosfera El Cielo.	62
17	Suelos de la Reserva de la Biosfera El Cielo (Derecho) Leptosol rendzico (Izquierdo) Luvisol.	63
18	MOS las ANP's.	76
19	Relación P-Disponible-MOS.	78
20a	Relación de P-disponible y MOS del PNIP.	78
20b	Relación de P-disponible y MOS deL PNZA.	79
20c	Relación de P-disponible y MOS de la RBC.	79
21	Actividad fosfatasa ácida del Parque Nacional Iztaccíhuatl-Popocatepetel.	81
22	Actividad fosfatasa alcalina del Parque Nacional Iztaccíhuatl-Popocatepetel.	82
23	Actividad fosfatasa ácida del Parque Nacional Zoquiapan y Anexas.	83
24	Actividad fosfatasa alcalina del Parque Nacional Zoquiapan y Anexas.	84
25	Actividad fosfatasa ácida de la Reserva de la Biosfera El Cielo.	85
26	Actividad fosfatasa alcalina de la Reserva de la Biosfera El Cielo.	86
27	Actividad enzimática de las ANP.	87
28	Actividad enzimática en suelos bajo distintos géneros.	89
29	Actividad enzimática bajo suelos donde predominan las especies estudiadas.	90
30	Actividad de las fosfatasas en relación al P-Disponible del suelo.	91

Índice de Cuadros

Cuadro		Páginas
1	Categorías de CE del suelo.	15
2	Categorías de pH del suelo.	16
3	Categorías de pendiente y relieve del suelo.	47
4	Descripción física de los sitios de estudio dentro del Parque Nacional Iztaccíhuti-Popocatepétel.	54
5	Descripción física de los sitios de estudio dentro del Parque Nacional Zoquiapan y Anexas.	55
6	Descripción física de los sitios de estudio dentro de la Reserva de la Biosfera El Cielo.	56
7	Propiedades físicas de los suelos del Parque Nacional Iztaccíhuti-Popocatepétel.	64
8	Propiedades físicas de los suelos del Parque Nacional Zoquiapan y Anexas.	65
9	Propiedades físicas de los suelos de la Reserva de la Biosfera El Cielo.	66
10	Propiedades físicas de los suelos de las ANP.	68
11	Propiedades químicas de los suelos del Parque Nacional Iztaccíhuti-Popocatepétel.	71
12	Propiedades químicas de los suelos del Parque Nacional Zoquiapan y Anexas.	72
13	Propiedades químicas de los suelos de la Reserva de la Biosfera El Cielo.	74
14	Propiedades químicas de los suelos de las ANP.	77
15	Componentes principales.	93

FOSFATASA ÁCIDA Y ALCALINA DEL SUELO Y SU EFECTO EN LA DISPONIBILIDAD DEL P EN SUELOS DE BOSQUES TEMPLADOS DE MÉXICO

RESUMEN

Con el objetivo de determinar la actividad de la fosfatasa ácida y alcalina del suelo en dos toposecuencias de bosques templados de *Pinus sp.* y *Abies religiosa*, se realizó de agosto del 2004 a marzo del 2006 esta investigación en tres Áreas Naturales Protegidas (ANP): Reserva de la Biosfera El Cielo (RBC), el Parque Nacional Iztaccíhuatl-Popocatepétl (PNIP) y el Parque Nacional Zoquiapan y Anexas (PNZA).

El trabajo fue realizado a lo largo del gradiente altitudinal entre los 1500 y 3900 m ubicando unidades ecológicas con vegetación de los géneros *Pinus* y *Abies* en las que fueron delimitadas zonas de muestreo de 50 x 20 m. Se colectaron muestras de suelo de 0 a 20 cm y 0 a 10 cm. En las primeras se determinaron propiedades físicas y químicas y en las segundas la actividad enzimática de la fosfatasa ácida y alcalina.

Se encontró que la actividad de las fosfatasas ácidas y alcalinas está influenciada por el origen del material parental del suelo. En suelos derivados de ceniza volcánica es mayor la ácida y en suelos calcáreos, la alcalina. Para los suelos de las ANP, las fosfatasas están relacionadas con el P-disponible del suelo ya que se encontró que a menor contenido de P-disponible hubo mayor actividad de las fosfatasas.

Con los resultados encontrados se deduce que la actividad de la fosfatasa ácida y alcalina en el suelo recibe influencia del tipo de cobertura vegetal (bajo *Pinus* o *Abies*) y fue mayor la actividad de las fosfatasas de suelos bajo *Pinus*.

Para la determinación del índice de calidad de suelo se tomaron en cuenta distintas variables originales de las cuales con base en el análisis de componentes principales (ACP) fueron seis los más importantes: pH potencial, P foliar, P-total:P-disponible, densidad real, conductividad eléctrica y actividad de la fosfatasa alcalina. De acuerdo al ANP, el P juega un papel importante ya que se presenta en tres de los seis componentes, por lo que con base en lo anterior se puede concluir que la actividad de la fosfatasa y el P-disponible se podría tomar como un parámetro para la determinación de la calidad de suelo para mejorar y conservar a los bosques templados de México.

Palabras clave: Fosfatasa ácida y alcalina, actividad enzimática, calidad de suelo, Áreas Naturales Protegidas.

ACID AND ALKALINE PHOSPHATASE AND THEIR EFFECT ON P AVAILABILITY OF TEMPERATE FORESTS SOILS OF MEXICO.

ABSTRACT

In order to determine the acid and alkaline phosphatase activity of soils were conducted this investigation, in two toposequences of temperate forests (*Pinus* sp and *Abies religiosa*), in three Protected Natural Areas (PNA): Biosphere Reserve El Cielo (BRC), the National Park Iztaccíhuatl-Popocatepétl (NPIP) and the National Park Zoquiapan and Anexas (NPZA). This investigation was made throughout the altitudinal gradient between 1500 and 3900 m having located ecological units with genus *Pinus* and *Abies* in which were delimited sampling zones of 20 × 50 m. Were collected soil samples of 0 to 20 cm and 0 to 10 cm. Were determined in first samples, physical and chemical properties and in the second samples, acid and alkaline phosphatase activity.

It was found that acid and alkaline phosphatase soil activity was influenced by parental material origin of soil. In soil derived from volcanic ash, the acid phosphatase is greater and alkaline phosphatase in calcareous soils. For soils of ANP, phosphatase activity they are related to P-available because it was found that to low contents of P-available, there was greater phosphatases activity.

With the found results it is deduced that soil phosphatases activity receives influence of type vegetal cover (under *Pinus* or *Abies*) and was greater in soils under *Pinus*. For the determination of soils quality index, different original variables were considered from which the principal components analysis (PCA) derived the more important: pH potential, P-total:P-available, real density, electrical conductivity and alkaline phosphatase activity. Considering the ANP, P it has an important paper since one appeared in three of principal components. With base in the mentioned thing, it is possible to be concluded that phosphatase activity and P-available could be taken as soil quality indicator from to improve and to conserve to Mexico's temperate forests.

Key Words: Acid and Alkaline Phosphatase, Activity enzymatic, Soil Quality, Naturals Protected Areas.

5. INTRODUCCIÓN

El suelo constituye un elemento fundamental, dado que cumple con importantes funciones, de las cuales se derivan servicios ambientales indispensables para el sostenimiento tanto del ecosistema como de la vida humana. La función más conocida es la de soporte y suministro de nutrientes a las plantas.

El desarrollo de las plantas, en cada una de sus formas de vida, depende de condiciones climáticas (temperatura y humedad atmosférica, precipitación, exposición a la luz, etc.), edáficas (textura, contenido de materia orgánica del suelo (MOS), pH, disponibilidad de nutrimentos, salinidad, etc.) y fisiológicas como respiración y fotosíntesis que determinan la adquisición y utilización o asimilación de elementos esenciales para su crecimiento y desarrollo (Cruz-Flores, 2006) (Figura 1).

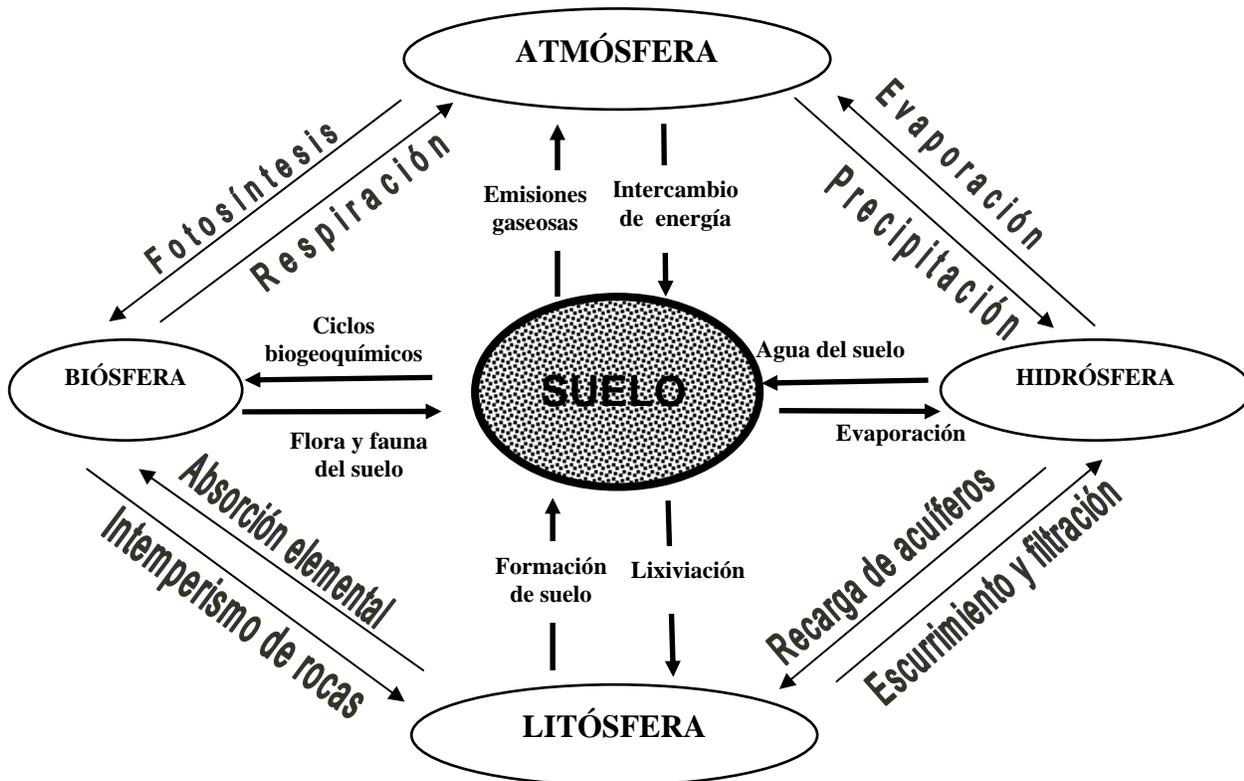


Figura 1 Interacción entre factores físicos y procesos biológicos en y sobre el suelo. Tomado de Cruz-Flores, 2006

Asimismo, constituye el medio donde se realizan ciclos biogeoquímicos necesarios para la reincorporación de los compuestos orgánicos.

Uno de los ciclos que se llevan a cabo es el del P que es un elemento químico esencial para la vida. Por tal razón la disponibilidad de fósforo es esencial para el crecimiento de las plantas y es un factor limitante en los ecosistemas forestales (Críquet *et al.*, 2004).

El P de los suelos forestales es proporcionado principalmente por la MOS, ya que es la fuente principal de fósforo para los árboles, y algunos fosfatos orgánicos solubles como lo son los fosfatos de los ácidos nucleicos y la fitina, pueden ser absorbidos por la planta.

Un papel importante en el ciclo biogeoquímico de este elemento y en la nutrición de las plantas es el que llevan a cabo las fosfatasas detectadas en el suelo, que son un grupo de enzimas que catalizan la hidrólisis de los ésteres y anhídros contenido en la MOS (Tabatabai, 1994).

La relevancia de este hecho se constata si se considera que aproximadamente el 90% del fósforo presente en suelo se encuentra en forma orgánica que deberá hidrolizarlos a fosfatos inorgánicos primarios ($\text{H}_2\text{PO}_4^{1-}$) y secundarios (HPO_4^{2-}) para que la planta los tengan disponibles.

Los bosques templados de montaña en México abarcan una superficie de 32, 751,060 ha (Velázquez *et al.* 2001) y se distribuyen principalmente a lo largo de las cadenas montañosas. De esta manera surge la necesidad de un manejo adecuado de los ecosistemas de bosques templados si consideramos que, del total de la superficie de bosques templados, sólo el 5.23% se encuentra bajo protección en alguna categoría de área natural protegida (CONABIO y de Velázquez *et a.*, 2001). Los estados donde estos ecosistemas se encuentran más protegidos, oficialmente, son el Distrito Federal, Chiapas, Querétaro, Hidalgo y Michoacán (INE, 2006).

Para conocer la calidad de los suelos de los bosques templados de México se necesitan indicadores de calidad, ya que para el suelo no hay un índice como los hay para el agua y el aire, los indicadores de la calidad del suelo constituyen un valor económico básico para el conocimiento de la calidad de la tierra. La calidad se entiende como la “condición o salud de la tierra relativa a los requisitos humanos, incluyendo la producción agrícola, forestal, la conservación y el manejo ambiental y, específicamente su capacidad para un uso sustentable” (Pieri *et al.* 1995), por lo que el mantenimiento del potencial productivo de la tierra y la prevención de su degradación, constituyen elementos fundamentales de uso sustentable.

La actividad fosfatasa es un importante indicador de calidad de suelo ya que cumple con las funciones de un indicador de suelo que son: describir los procesos que ocurren en el ecosistema, integrar propiedades y procesos físicos, químicos y biológicos, ser accesibles a muchos usuarios y aplicable a condiciones de campo, reflejar los atributos de sustentabilidad que se requieren medir, ser sensibles a las variaciones de clima y del manejo del suelo y que su medición pueda ser reproducible.

Con base a lo anterior, este trabajo pretende contribuir a que la actividad de la enzima fosfatasa entre como parámetro en un índice de calidad de suelo que influya en el suministro de nutrientes esenciales para los bosques templados, y así conocer las deficiencias de estos para su mejor crecimiento y poder evitar el deterioro de los ecosistemas y la degradación del suelo que se relaciona con los procesos inducidos por el hombre.

6. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

6.1 CONCEPTO DE SUELO

El suelo es un cuerpo viviente, natural, dinámico y vital para el funcionamiento de los ecosistemas terrestres, que se forma a una tasa de 1 cm por cada 100 – 400 años, por interacción del clima, topografía, biota y material parental. Por el tiempo que toma su formación se puede considerar al suelo como un recurso no renovable en la escala humana de tiempo (Doran y Parkin, 1994 citado por Granados-Damián, 2003). Pero para un ecólogo un concepto de suelo es el material no consolidado, mineral u orgánico sobre la superficie de la tierra que ha sido sometido a factores genéticos y ambientales: material parental, clima (incluyendo efectos causados por el agua y la temperatura), macro y microorganismos y topografía, todos actuando durante el tiempo cuyo producto – el suelo – difiere, del material del cual se derivó, en sus propiedades físicas, químicas biológicas y morfológicas (Van der Zee *et al.*, 1987), al saber la importancia que tiene el concepto suelo para el hombre, (Etchevers *et al.*, 2000) considera a este recurso como un sistema vivo y dinámico, cuyas funciones primordiales son mantener la productividad de las especies vegetales que en él se establecen, la biodiversidad, la calidad del aire y del agua, así como la salud humana y el hábitat.

Un suelo forestal es una parte de la superficie terrestre que sirve como medio para el sostenimiento de la vegetación forestal, consta de materia mineral y materia orgánica impregnada por diversas cantidades de agua y aire y está habitada por organismos. Manifiesta características peculiares adquiridas bajo la influencia de tres factores que son poco comunes en otros suelos; Hojarasca o humus forestal, raíces de árboles y organismos específicos, cuya existencia depende de la presencia de vegetación forestal (Bockheim, 1991).

Los suelos forestales, son importantes porque:

- ofrecen soporte mecánico

- retienen y transmiten el agua y los gases
- como hábitat para los macro y microorganismos
- retienen, intercambian y fijan sustancias nutritivas.

6.2. FORMACIÓN DEL SUELO

Dokuchaev estableció de manera sólida que los suelos se desarrollan como resultado de la interacción de cinco factores: material madre, clima, organismos, topografía y tiempo. A continuación se presentan las características más importantes de esos factores en relación a la formación del suelo (Figura 2).

a) Material materno

Los materiales maternos están formados por material mineral o materia orgánica o bien una mezcla de ambos. Por lo general, la materia orgánica esta compuestas en forma predominante por restos de plantas, no consolidados, muertos y en descomposición, mientras que el material mineral que es el tipo de material materno más diseminado contienen un gran número de minerales formadores de rocas y pueden estar consolidados e incluyen rocas como granito, basalto y conglomerados, mientras que el material no consolidado comprende una amplia gama de depósitos superficiales, de los cuales los acarreo glaciales y los loess son dos representantes de importancia. Los materiales maternos también contribuyen a la formación del suelo debido a la permeabilidad y área superficial específica.

b) Clima

Es el principal factor que determina la tasa y tipo de formación de suelos, así como el principal agente que determina la distribución de vegetación y el tipo de procesos geomorfológicos, forma la base de muchas clasificaciones de fenómenos naturales, incluyendo los suelos. El clima del suelo tiene los mismos dos componentes principales que el clima atmosférico: temperatura y humedad.

c) Organismos

Los organismos que influyen en el desarrollo de los suelos abarcan desde bacterias microscópicas hasta mamíferos grandes, incluyendo al hombre. De hecho cada organismo que vive sobre la superficie de la Tierra o en el suelo afecta el desarrollo del mismo en una u otra forma. La variación es tan amplia que en realidad cualquier agrupación que se haga conforme a su taxonomía tiene poco significado desde el punto de vista pedológico. A continuación se presenta una clasificación de los organismos más importantes del suelo: plantas superiores, mamíferos, microorganismos, y la mesofauna.

d) Topografía

La topografía se refiere al aspecto de la superficie terrestre y es sinónimo de relieve. Incluye las imponentes cordilleras y a las planicies monótonas, que dan ambas la impresión de una estabilidad considerable y apariencia de ser eternas. Sin embargo, no es ese el caso, ya que se sabe de numerosas investigaciones de todas las superficies terrestres que aun las zonas formadas por rocas muy duras como granito están cambiando considerablemente por intemperización y erosión. Sin embargo, existen unas cuantas estructuras topográficas como las dunas arenosas y los volcanes que pueden cambiar o desarrollarse con bastante rapidez. Por tanto, la topografía no es estática, sino forma un sistema dinámico, cuyo estudio se conoce como geomorfología.

e) Tiempo

La formación de suelo es un proceso muy lento que requiere de miles y hasta millones de años y como eso supera con mucho a la vida de cualquier humano, resulta imposible hacer afirmaciones categóricas acerca de las diversas etapas del desarrollo de los suelos. Los cambios periódicos en el clima y la vegetación introducen otra complicación, que a menudo desvía las rutas de la formación del suelo en una u otra dirección. Por tanto, todo lo que se dice acerca del tiempo como factor de formación del suelo es en parte suposición y en parte deducción, usando muchas pruebas indirectas basadas en datos botánicos, zoológicos, geológicos y geomorfológicos. No

todos los suelos se han estado desarrollando durante la misma longitud de tiempo. La mayoría de ellos iniciaron su desarrollo en varios puntos de los últimos 100 años, (FitPatrick, 1978).

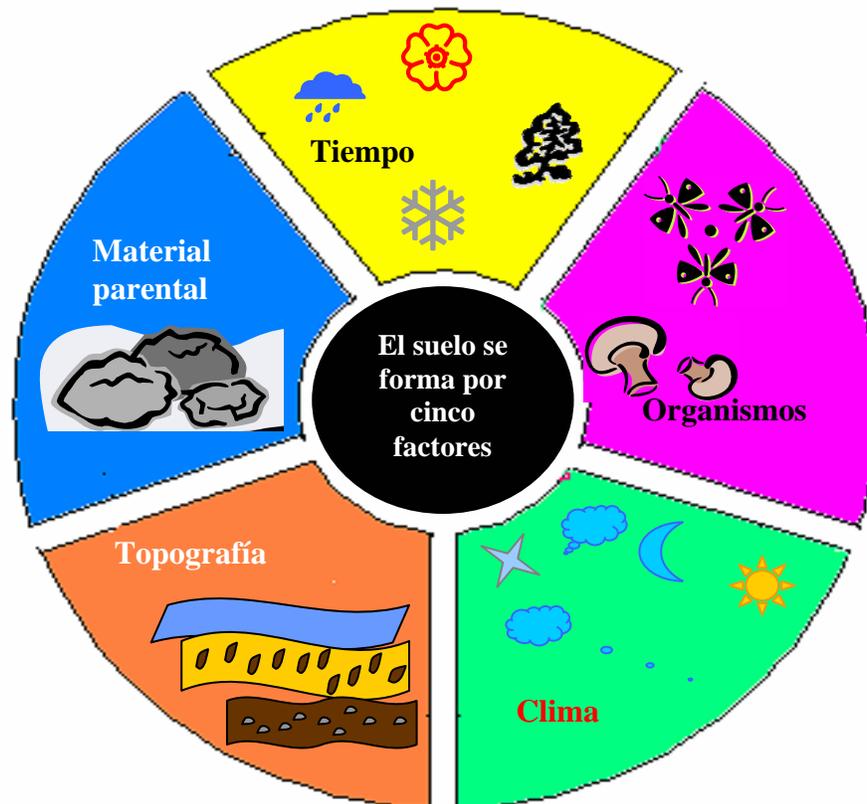


Figura2. Formación del suelo, tomado de SEMARNAT, 2002

La morfología del suelos estudia el suelo a través de un perfil, un perfil de suelos completo es la exposición vertical de una porción superficial de la corteza terrestre que incluye todas las capas (horizontes) que han sido alteradas edafogénicamente durante el periodo de formación del suelo y también las capas más profundas que influyeron en la edafogénesis (Buol *et al.*, 1991; FAO, 1998). Los horizontes del suelo son consecuencia de los procesos de formación del suelo. Son capas aproximadamente paralelas a la superficie cuyas características han sido impartidas por los procesos edafogénicos (Figura 3).

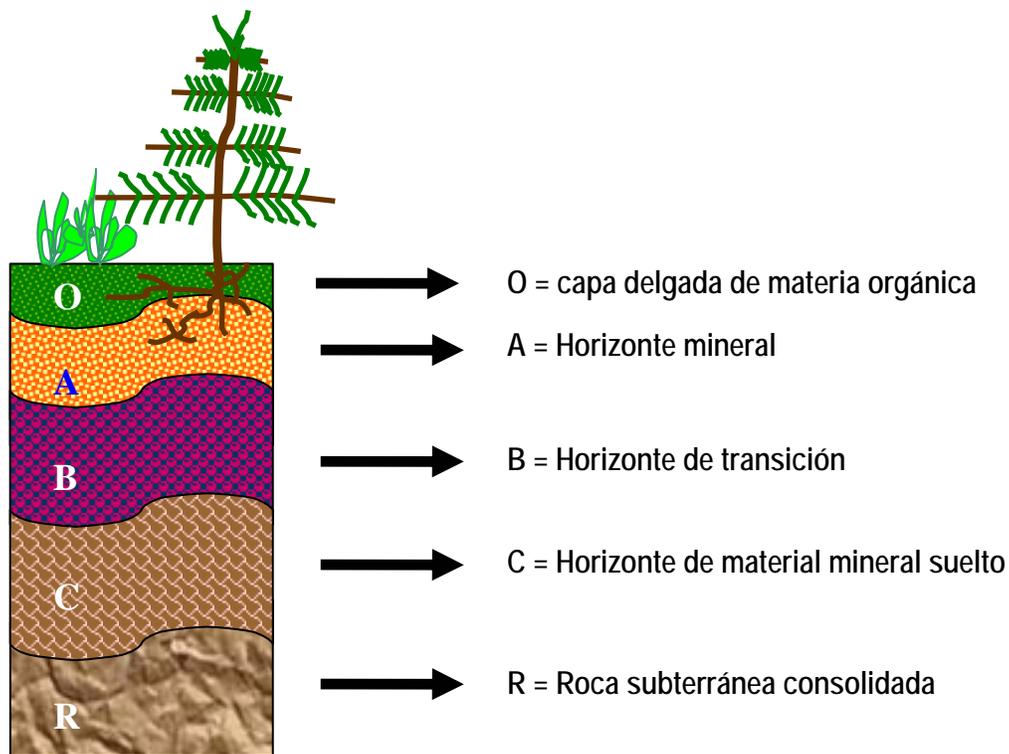


Figura 3. Perfil de un suelo y sus horizontes

Los principales horizontes y sus características se enlistan a continuación:

Horizonte **CARACTERISTICAS**

O	O1	Horizonte orgánico (>20 a 30 % de M. O.). Generalmente el material orgánico puede ser identificado con facilidad.
	O2	Horizonte orgánico. Los restos orgánicos están suficientemente descompuestos (ya no se identifica su procedencia).
A	A1	Horizonte mineral superior (En suelos cultivados, es llamado Ap). Color oscuro más fuerte que los horizontes subyacentes por su alto contenido de materia orgánica, pero % de M.O debe ser menor a 20.
	A2	Horizonte mineral de color más claro que A1. (Sólo se presenta en regiones de alta precipitación).
	A3	Horizonte de transición más parecido a A que a B2.
B	B1	Horizonte de transición más parecido al B2 que a A1 o A2.
	B2	Horizonte mineral más profundo* debajo del A1 o A2. (Tiene acumulación de pequeñas partículas lavadas del A1 o A2 por filtración o fijadas por falta de agua que las mueve más abajo. Alto contenido de arcilla, a veces mayor que A1 y siempre que A2). * 15 a 46 cm de profundidad.
	B3	Horizonte de transición al horizonte C o al R.
C	C	Horizonte de material mineral suelto (parental).
R	R	Roca subterránea consolidada.

La disposición de los horizontes genéticos (**A, B, C**) y sus características físicas, químicas, mineralógicas, bioquímicas, etc., se describen con ayuda de la Morfología de suelos la cual es la rama que estudia la forma y naturaleza del perfil del suelo y sus horizontes (Cruz-Flores, 2006).

6.3. CALIDAD DE SUELO

Doran y Parkin (1994) definen a la calidad de suelo como “su capacidad para funcionar dentro de un ecosistema determinado para sostener la productividad biológica, mantener la calidad del ambiente, la vegetación y la fauna”, así mismos Franzluebbbers (2002) complementa este concepto tomando como base la premisa de manejo, estabilización y mejoramiento de las funciones del suelo en los ecosistemas.

6.3.1. Indicadores de calidad de suelo

Los indicadores de calidad de suelo son propiedades físicas, químicas y biológicas, procesos y características que pueden ser utilizadas para monitorear al suelo (USDA-NRCS, 1996, Seybold *et al.*, 1997). Se pueden dividir en cuatro grupos: visuales, físicos, químicos y biológicos (USDA, 1997).

La evaluación de la calidad del suelo resulta un proceso complicado por la intrincada red de interacciones entre los factores bióticos y abióticos que controlan los procesos físicos, químicos, biológicos y bioquímicos que se realizan en el suelo.

Contar con un conjunto de indicadores que sirvan para evaluar el grado de calidad de un suelo resulta sumamente importante. Esto por su parte es complicado dado el conjunto de factores físicos, químicos y biológicos implicados, así como, las interacciones en el tiempo y espacio que se realizan en el suelo, además del enfoque que cada estudio tenga, con lo que cambiarán los indicadores utilizados y el peso de cada uno de estos en el dictamen final.

En general un indicador de la calidad de suelo debe cumplir con algunos de los siguientes criterios.

- *
** Describir los procesos que ocurren en el ecosistema.
- *
** Integrar propiedades y procesos físicos, químicos y biológicos.
- *
** Ser accesibles a muchos usuarios y aplicable a condiciones de campo.
- *
** Reflejar los atributos de sustentabilidad que se requieren medir.

- ** Ser sensibles a las variaciones de clima y del manejo del suelo.
- ** Su medición pueda ser reproducible.

Bajo el marco de Evaluación de Sistemas de Manejo de Recursos Naturales incorporado Indicadores de Sustentabilidad (MESMIS), un buen indicador además deberá:

- * Ser preferentemente aplicable en un amplio rango de sistemas y condiciones socioeconómicas y culturales.
- ** Ser sencillo de entender.
- ** Centrarse en aspectos prácticos.

Para integrar y sintetizar adecuadamente la información obtenida con el monitoreo de indicadores, se recomienda; determinar umbrales o valores de referencias para cada indicador, construir índices, presentar los resultados de manera conjunta y examinar las relaciones entre indicadores (Masera *et al.*, 2000).

6.3.2. Índices de calidad de suelo

La importancia de la construcción de índices radica en el hecho de que facilita la comparación entre indicadores con unidades disímiles. Con los índices se puede tener a todos los indicadores en su formato común, sin por ello perder la información original. En general, las relaciones entre indicadores pueden ser bastante complejas, ya sean sinérgicas, de competencia o mixtas.

La construcción del índice debe servir para proporcionar un dictamen de calidad, pero además debe servir para depurar los indicadores utilizados, dejando aquellos que presenten mayor robustez, en el sentido de que sean sensibles a la condición que se desea medir y que influyan de manera crítica en la evaluación de calidad (Masera *et al.*, 2000).

6.4. PROPIEDADES FÍSICAS DEL SUELO

Las propiedades físicas del suelo, son factores dominantes que afectan su uso, algunas veces son alteradas con facilidad por el manejo forestal.

6.4.1. Textura

Los suelos naturales están constituidos por partículas de varios tamaños. Los tamaños de las partículas son las arenas (las más grandes), limos y arcillas (los más pequeños). Las proporciones relativas de los separados del suelo en un suelo en particular determinan su textura.

La textura es una importante característica del suelo ya que determina la capacidad de absorción y del almacenamiento del agua, la facilidad de cultivarlo, la cantidad de aire, (vital para el crecimiento radicular), e influenciará la fertilidad (Donahue, *et al.*, 1981).

6.4.2. Densidad aparente y real

La densidad aparente (DA), es el volumen del suelo tal como es, incluyendo espacios de aire y materiales orgánicos en el volumen. Con la DA se puede calcular la capacidad de almacenamiento de agua por volumen de suelo y para evaluar las capas de suelo si están muy compactadas a fin de permitir la penetración de la raíz o los problemas de aireación. La densidad aparente para un bosque forestal es de 0.2 g cm^{-3} en algunas capas orgánicas hasta casi 1.9 g cm^{-3} en la arenas gruesas y en suelos agrícolas es de 1.1 a 1.4 g cm^{-3} y para un buen desarrollo de plantas debe ser menor en arcillas 1.4 g cm^{-3} y para arenas 1.6 g cm^{-3} .

La densidad real (DR) o de partícula, es la densidad solamente de la partícula del suelo; la medida no incluye el peso del agua o el espacio (aire) poroso, la mayoría de los suelos minerales varía entre los estrechos de 2.60 a 2.75 g cm^{-3} (Donahue, *et al.*, 1981).

6.4.3. Espacio poroso

El espacio poroso (EP) en un suelo es la porción de volumen que no está ocupado por sólidos, orgánicos o minerales. La porosidad de la mayor partes de los suelo de los bosques forestales varía de 30 al 65% (Donahue, *et al.*, 1981).

6.5. PROPIEDADES QUÍMICAS DEL SUELO

Las propiedades químicas del suelo son importantes ya que sirven para mejorar la disponibilidad de los nutrimentos para las plantas, evitar toxicidades de elementos, utilizar la población microbiana y para mejorar la condición física del suelo.

6.5.1. Conductividad Eléctrica

La conductividad eléctrica (CE), de una disolución podría definirse como la aptitud de ésta para transmitir la corriente eléctrica, y dependerá, además del voltaje aplicado, del tipo, número, carga y movilidad de los iones presentes de la viscosidad del medio en el que éstos han de moverse (Alarcón, 2006).

Cuadro 1. Categorías de CE en el suelo

CE dS m ⁻¹ a 25 °C	Efectos
< 1.0	Efectos despreciables de la salinidad
1.1 – 2.0	Muy ligeramente salino
2.1 – 4.0	Moderadamente salino
4.1 – 8.0	Suelo salino
8.1 – 16.0	Fuertemente salino
> 16.0	Muy fuertemente salino

Norma Oficial Mexicana, 1996.

6.5.2. Potencial de Hidrógeno

La acidez del suelo se mide por lo general en una solución del suelo y agua; se mide solamente la acidez activa en tal sistema, pero cabe señalar que en los suelos también existe una reserva de acidez intercambiable (o potencial). La suma de acidez activa o potencial da la acidez total de un suelo. Puede obtenerse el cálculo de la acidez potencial haciendo la medición del pH por medio de una solución salina en vez de

agua. La lectura del pH es por lo general menor cuando se hace en una solución acuosa que en una solución salina y disminuye a medida que la concentración de sal aumenta, debido al mayor desplazamiento de los iones de hidrógeno y de aluminio a partir del complejo del intercambio. La mayor parte de los suelos forestales están en una escala de pH entre los 3.5 a 6.5 aproximadamente.

Cuadro 2. Categorías de pH en el suelo

Clases	Intervalo	Clases	Intervalo
Extremadamente ácido	3.5 – 4.4	Fuertemente ácido	< 5.0
Muy fuertemente ácido	4.5 – 5.0		
Fuertemente ácido	5.1 – 5.5	Moderadamente ácido	5.1 – 6.5
Moderadamente ácido	5.6 – 6.0		
Ligeramente ácido	6.1 – 6.5	Neutro	6.6 – 7.3
Neutro	6.6 – 7.3		
Ligeramente alcalino	7.4 – 7.8	Medianamente alcalino	7.4 – 8.5
Moderadamente alcalino	7.9 – 8.4		
Fuertemente alcalino	8.5 – 9.0	Fuertemente alcalino	> 8.5

(USDA-NRCS, 1998) Norma Oficial Mexicana, 1996.

6.5.3. Materia orgánica del suelo (MOS)

Es una acumulación de materia de plantas muertas, parcialmente descompuestas y residuos de animales y plantas resintetizados parcialmente. La hojarasca y las raíces secas se descomponen rápidamente y sus residuos forman parte del humus. Algunas porciones permanecen en los suelos durante mucho tiempo. Los residuos de cultivo, maleza, hierba, hojas de árboles, gusanos, bacterias, hongos y actinomicetes también forman parte de la mezcla compleja denominada MOS. Esta porción de materia orgánica es la fracción químicamente más activa del suelo. Dicha porción almacena varios elementos esenciales, estimula la estructura adecuada del suelo, es una fuente con capacidad de intercambio de cationes (CIC) y regula los cambios de pH, propicia también las relaciones convenientes entre el aire y el agua en los suelos y es un enorme depósito geoquímica de carbono (Bohn, 1991).

6.5.4. Elementos esenciales

Existen 16 elementos esenciales para el desarrollo de las plantas. Las plantas superiores obtienen la mayor parte del carbono y oxígeno directamente del aire, por fotosíntesis. El hidrógeno se deriva directamente, del agua del suelo. Todos los demás elementos esenciales (13 elementos) son obtenidos de los sólidos del suelo.

De los trece elementos esenciales obtenidos del suelo por las plantas, seis son usados relativamente en grandes cantidades, y, por consiguiente, merecen nuestra atención primordial. Son: N, **P**, K, Ca, Mg, y S. Se designan con el nombre de macronutrientes porque las plantas los utilizan en grandes cantidades. El crecimiento de las plantas puede ser retardado por varias causas: porque haya escasez de ellos en el suelo, porque resulten asimilables demasiado lentamente, o porque no estén adecuadamente equilibrados por los otros elementos nutritivos. A veces pueden existir las tres limitaciones juntas.

El N, **P** y K se proporcionan al suelo, comúnmente en forma de estiércol y de abonos del comercio. Por esto se llaman elementos fertilizantes. Asimismo, el calcio y el magnesio se dan, casi siempre, en forma de caliza, por lo que se llaman elementos calcáreos. El azufre, además de existir en el agua de lluvia, va corrientemente al suelo en forma de ingrediente incidental en algunos fertilizantes, como estiércol, superfosfato y sulfato amónico. En casos especiales, el azufre se aplica solo, como flor de azufre, para corregir diferencias nutritivas o ajustar la reacción del suelo.

6.6. EL FÓSFORO Y SU IMPORTANCIA

El fósforo es un elemento químico esencial para la vida. Por tal razón la disponibilidad de fósforo es esencial para el crecimiento de las plantas y es un factor limitante en los ecosistemas forestales (Críquet *et al.*, 2004). Es parte del adenosin difosfato (ADP) y adenosin trifosfato (ATP), los dos compuestos presentan energía para la planta. El ATP sintetiza al ADP que contribuyen en la respiración y fotosíntesis, que contienen alta energía por los grupos fosfatos que los procesos bioquímicos requieren energía.

El fósforo es importante el ciclo de vida de la planta. Es esencial componente para el ácido desoxirribonucleico (ADN), para la herencia genética de plantas y animales, para el ácido ribonucleico (ARN) para la síntesis de proteínas. El fósforo es un elemento esencial para numerosos procesos metabólicos.

El fósforo participa de manera importante en la planta en las siguientes formas:

- **Transferencias de energía:** Los iones fosfóricos son capaces de recibir energía luminosa captada por la clorofila y transportarla a través de la planta en forma de ADP (adenosin difosfatos) y ATP (adenosin trifosfatos).
- **Factor de crecimiento:** El fósforo es muy importante porque influye fuertemente en el desarrollo de las raíces de la planta.
- **Factor de precocidad:** El fósforo activa el desarrollo inicial y tiende a acortar el ciclo vegetativo, favoreciendo la maduración de los frutos, mejorando su calidad.
- **Factor de resistencia:** Este elemento aumenta la resistencia a las condiciones meteorológicas adversas, al encamado (cereales) y en general, a las enfermedades, función que comparte con la potasa. Este factor es de suma importancia para la rentabilidad de los cultivos.
- **Factor de nodulación:** El fósforo favorece la nodulación y la actividad de la bacterias nitro fijadoras, por ejemplo en la soja, especialmente cuando no existe un exceso de calcio en el terreno (MIRAT, 2006).

6.6.1. Importancia del fósforo en el crecimiento de la plantas

El P se encuentra en todos los tejidos de las planta, en una proporción cuyo valor medio puede situarse entre el 0.5 y el 1% de la materia seca. Participa ampliamente en la construcción de compuestos encargados del transporte y almacenamiento de la energía precisa para realizar procesos vitales.

Las plantas absorben la mayor parte del P bajo la forma de $\text{H}_2\text{PO}_4^{1-}$ y en menor proporción, bajo la forma de HPO_4^{2-} .

Dado que el P interviene en los procesos de crecimiento y síntesis de los componentes de las plantas, su deficiencia ocasiona un desarrollo débil, tanto del sistema radical como de la parte aérea. Las hojas son de menor tamaño que en estado normal, con las nervaduras poco pronunciadas y coloración anormal: tonalidad azul-verdosa oscura con tintes bronceados o púrpuras. Las hojas más viejas son las que presentan mayores síntomas de deficiencia, debido a que este elemento se mueve con rapidez dentro de la planta y emigra desde las hojas más viejas a las más jóvenes. La madurez del fruto se retrasa y disminuye el rendimiento de la cosecha. Aquellas cosechas que se recolectan por su semilla reducen su rendimiento drásticamente (Fuentes, 1999).

6.6.2. Funciones en las plantas

El P contribuye en la planta favorablemente en los siguientes aspectos:

- División celular y crecimiento, así como formación de albúminas.
- Floración y fructificación, así como de la formación de semillas.
- Maduración de las cosechas, atemperando así los efectos de aplicaciones excesivas de nitrógeno.
- Desarrollo de las raíces, particularmente de las raicillas laterales y fibrosas.
- Robustecimiento de la paja en los cultivos de cereales ayudando así a prevenir el encamado.
- Sobre la calidad de la cosecha, sobre todo forraje y hortalizas.
- Resistencia a ciertas enfermedades.

6.6.3. Fósforo en el suelo

Un nutrimento cuya deficiencia en el suelo es limitante importante para el crecimiento y desarrollo de las plantas es el P (Whitelaw, 2000) y existe en el suelo en gran variedad de formas orgánicas e inorgánicas pero primariamente en insolubles o muy poco solubles formas inorgánicas. La concentración de $\text{H}_2\text{PO}_4^{1-}$ y HPO_4^{2-} en la

solución del suelo esta usualmente en el intervalo de 0.1 a 10 $\mu\text{mol l}^{-1}$, aunque el P en el suelo puede ser inmovilizado por adsorción o llevado a formas poco solubles o también por precipitación química (Van der Zee *et al.*, 1987; Frossard *et al.*, 2000). Tal inmovilización involucra la transformación de los fosfatos solubles, a fosfatos de hierro, aluminio, calcio y magnesio ($\text{Fe}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2$, $\text{Al}(\text{H}_2\text{PO}_4)_3$, $\text{Mg}_2(\text{HPO}_4)_3$, entre otros) que son poco solubles. La rápida reposición de P en la solución del suelo es particularmente importante en las áreas del suelo donde las raíces están absorbiendo activamente al P. La concentración requerida de P en la solución del suelo depende primariamente de las especies vegetales, además de las diferentes fuentes del elemento y de la capacidad de fijación de éste elemento en el suelo (Jungk, 1993). La descripción de la del P en el suelo puede ser reducida, dentro de estados simples, a la siguientes relaciones: solubilización de sales y minerales insolubles; intercambio electrostático de aniones y descomposición biológica de la materia orgánica (Sanyal DE Datta, 1991), citados por Cruz-Flores, 2003 y 2006).

6.6.4. El fósforo en suelos agrícolas

Aunque, en general, los suelos agrícolas contienen buenas reservas de P como consecuencia de la aplicación regular de fertilizantes, su disponibilidad para la planta es escasa debido a los procesos químicos que "fijan" el P soluble de los fertilizantes en formas insolubles no aptas para la nutrición.

Se calcula que en el 40% de los suelos del planeta la producción agrícola se ve limitada por la escasa disponibilidad de P asimilable. Además, dado que los yacimientos de roca fosfórica –materia prima empleada en la producción de fertilizantes fosfóricos– son finitos, se vislumbra un encarecimiento de este tipo de abonos sintéticos en un futuro no muy lejano. Por tanto, las estrategias que faciliten la adquisición por la planta de este nutriente cobrarán día a día mayor interés.

6.6.5. El fósforo en suelos forestales

El fósforo de los suelos forestales es proporcionado principalmente por la materia orgánica del suelo, ya que la fuente principal de fósforo para los árboles, y algunos fosfatos orgánicos solubles como lo son los fosfatos de los ácidos nucleicos y la fitina, pueden ser absorbidos por la planta.

Las raíces de los árboles de los bosques tienen asociaciones micorrizicas que aumenta la capacidad de los árboles para absorber las formas menos disponibles de fosfatos en los suelos.

Hay menos P en los suelos que sostienen cultivos de coníferas que en los que se hallan bajo los árboles de maderas duras (cedros, robles y encinos), probablemente reflejando la capacidad de las coníferas para sobrevivir y competir sobre suelos que contienen un nivel relativamente bajo de fósforo (Pritchett, 1991).

6.6.6. Ciclo del Fósforo

Los ciclos biogeoquímicos representan los cambios que experimentan los elementos químicos que constituyen los seres vivos en su recorrido cíclico por la biosfera. En ellos participan todos los organismos presentes en los distintos niveles tróficos.

La reserva fundamental del P se encuentra en la corteza terrestre. Por meteorización de las rocas o por las erupciones volcánicas, queda disponible para que lo puedan tomar las plantas. Con facilidad es arrastrado por las aguas y llega al mar. Parte del que es arrastrado sedimenta al fondo del mar y forma rocas que tardarán millones de años en volver a emerger y liberar de nuevo las sales de fósforo.

Otra parte es absorbido por el plancton que, a su vez, es comido por organismos filtradores de plancton, como algunas especies de peces. Cuando estos peces son comidos por aves que tienen sus nidos en tierra, devuelven parte del P en las heces (guano) a tierra.

Es el principal factor limitante en los ecosistemas acuáticos y en los lugares en los que las corrientes marinas suben del fondo, arrastrando P del que se ha ido

sedimentando, el plancton prolifera en la superficie. Al haber tanto alimento se multiplican los bancos de peces.

Con los compuestos de P que se recogen directamente de los grandes depósitos acumulados en algunos lugares de la tierra se abonan los terrenos de cultivo, a veces en cantidades desmesuradas, originándose problemas de eutrofización (Figura 4).

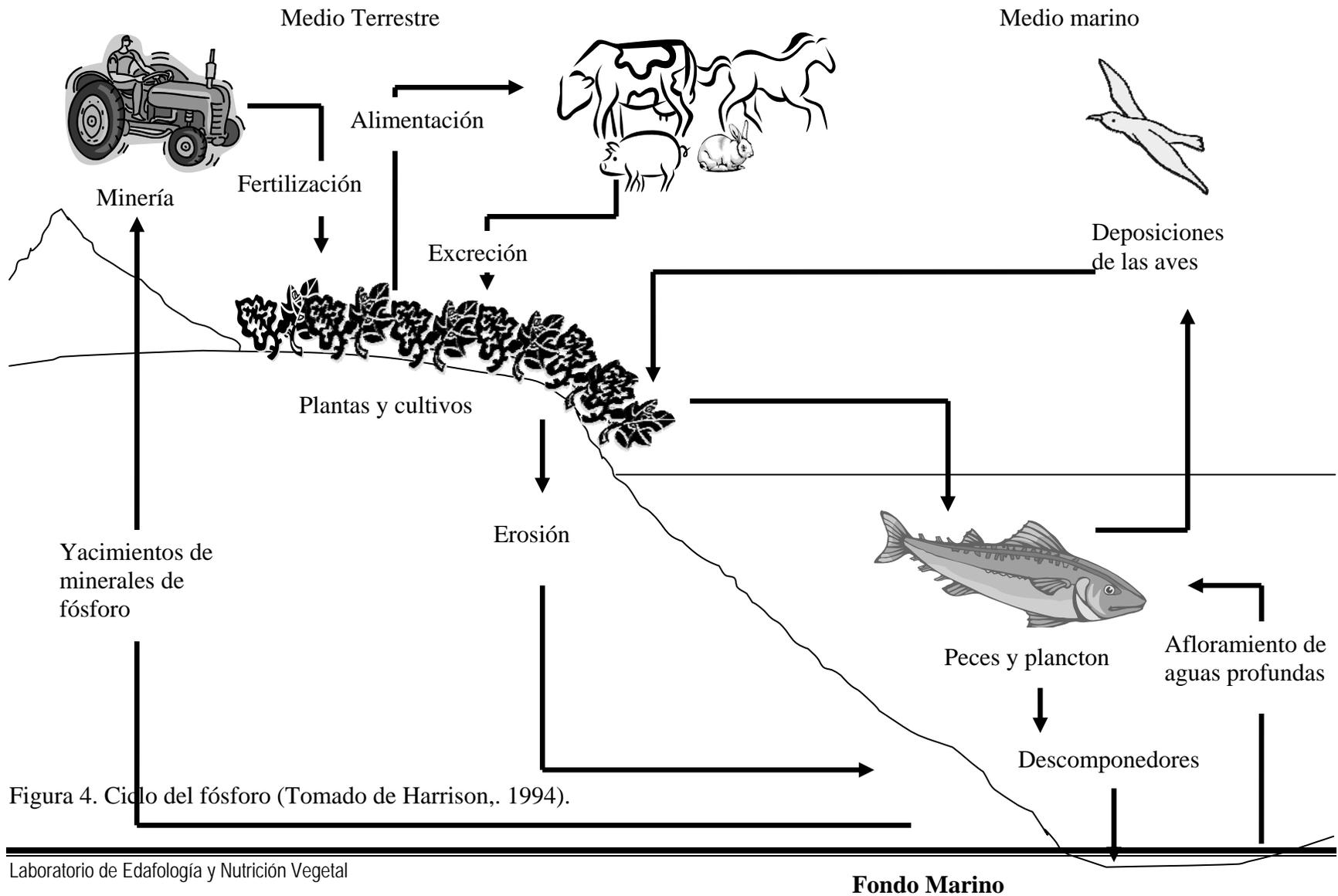


Figura 4. Ciclo del fósforo (Tomado de Harrison, 1994).

6.6.7. Absorción de fósforo

Las raíces de las plantas absorben al P en forma inorgánica y en menor proporción de los compuestos orgánicos (fitina y ácido fítico principalmente) que después de ser absorbido son enviados a otras partes de la planta. El P de las planta regresa al suelo en forma de residuos de cosechas y en forma de desechos de animales. Los microorganismos descomponen los residuos y temporalmente el P se encuentra en mínimas cantidades en las partes aéreas de la plantas, en ocasiones llega a estar asociado con la materia orgánica del suelo para liberarse posteriormente. Lentamente se convierte en formas solubles que son absorbidos por la raíz de la planta, y así, comenzar el ciclo nuevamente (Brady, 1990).

En la mayoría de los suelos, todas las formas de P disponible en cualquier momento es muy baja, en pocas ocasiones exceden el 0.01% del fósforo total del suelo. Los niveles de P disponible se incrementan por adición de fertilizantes químicos. Desafortunadamente mucho del P agregado como fertilizante se inmoviliza en formas minerales secundarias lo cual también se realiza de manera lenta y no disponible solo en periodos anuales. El problema de mantener el fósforo en forma disponible puede radicar en una atención temprana (Brady, 1990). (Figura 5).

En algún tiempo el 98 – 99% del P se encuentra asociado con minerales primarios (Apatitas) y secundarios (Arcillas de tipo 1:1 como caolonita o minerales amorfos como el halofano) y materia orgánica del suelo. El 1 – 2% del tejido microbial, existe solo el 0.01% de P soluble. A tomar en cuenta que en el ciclo se puede mostrar una interacción entre plantas, microbios y P soluble, lo cual significa que la planta presenta altos contenidos de fósforo soluble. Los fertilizantes químicos aumenta de manera importante el origen del fósforo soluble (Brady, 1990).

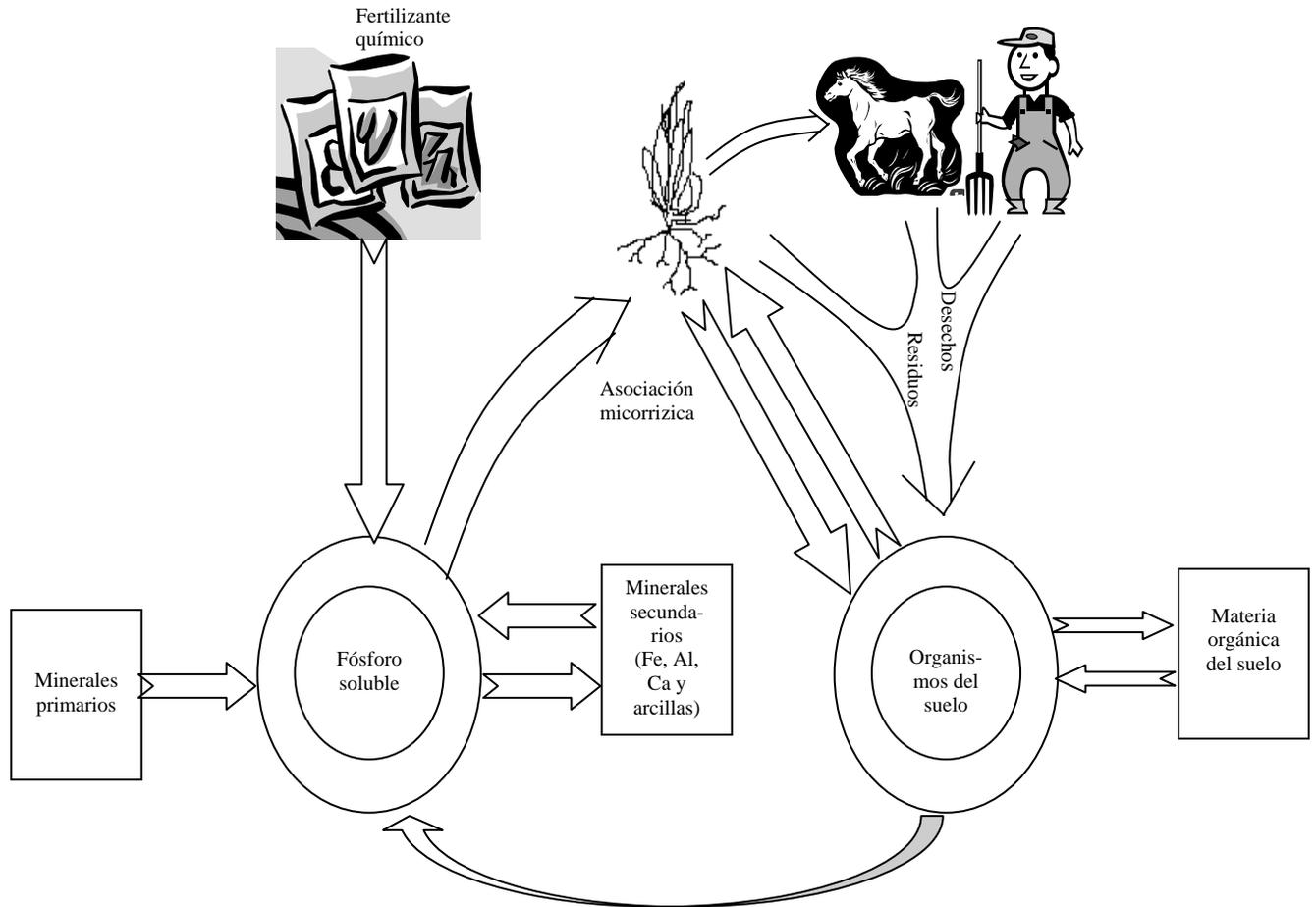


Figura 5. Adsorción del fósforo en el suelo (Brady, 1990).

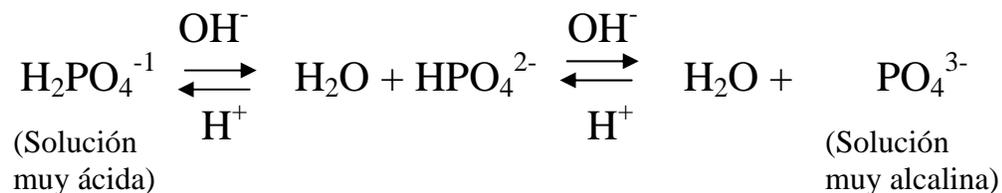
6.6.8. Impactos del fósforo al ambiente

Las ventajas del P en la producción agrícola son evidentes, este elemento puede ser un agente contaminador si se mueve desde el sitio. La preocupación principal es el transporte de P de suelos a las corrientes, ríos, lagos y eventualmente a los océanos. El P transportado de suelos agrícolas puede promover la eutrofización.

6.6.9.Efectos de eutrofización

- El agotamiento del oxígeno disuelto promueve, las condiciones que convierten muchos compuestos disueltos a las formas potencialmente tóxicas (nitritos y amonio) lo cual puede dañar la flora y fauna.
- Incrementan el costo y dificultad para purificar el agua potable.
- Aumenta la sedimentación y deteriora el uso navegacional y recreacional; se reducen las profundidades del lago; el crecimiento vegetativo bloquea a los canales navegables.
- Las algas al morir producen las espumas superficiales y olores indeseables (Akhatar, 2004).

El aprovechamiento del P en las plantas esta determinado en alto grado por la forma iónica de este elemento. La forma iónica, a su vez, viene determinada por el pH de la solución en la que dicho elemento se encuentra (Figura 6). Así, en soluciones muy ácidas, se encuentra solamente el $\text{H}_2\text{PO}_4^{-1}$. Si el pH aumenta, predomina primero el ión HPO_4^{2-} y finalmente, el PO_4^{3-} . Este estado de cosas lo muestran las siguientes reacciones:



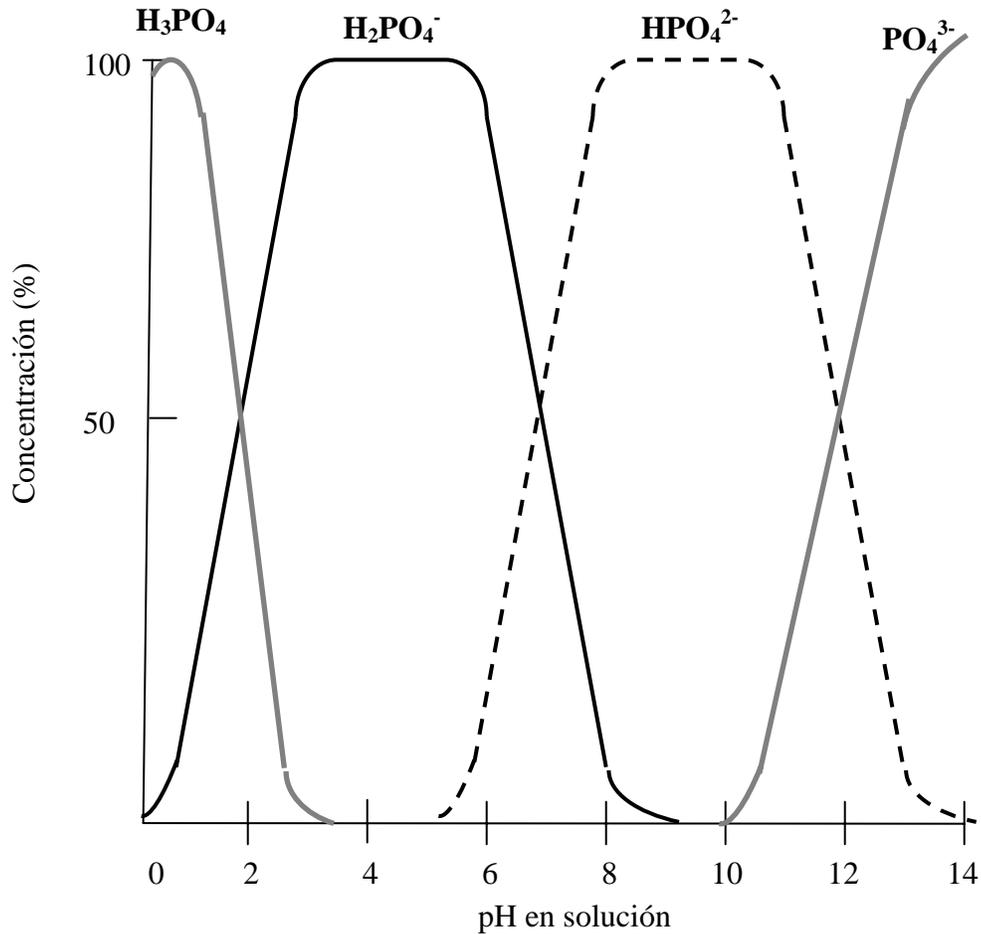


Figura 6. Concentración de P en relación al pH (Brady, 1990).

6.7. ACTIVIDAD ENZIMÁTICA DE LA FOSFATASA

Las enzimas son catalizadores biológicos de innumerables reacciones en el suelo, las enzimas del suelo son similares a las de los otros sistemas y las reacciones que catalizan son dependientes de multitud de factores tales como pH, T°, presencia o ausencia de inhibidores, etc.

El nombre de fosfatasa, detectadas en el suelo, describe a un grupo de enzimas que catalizan la hidrólisis de los ésteres y anhídros contenido en la MOS, (Tabatabai,

1994). Donde juegan un papel importante en el ciclo biogeoquímico de este elemento y en la nutrición de las plantas.

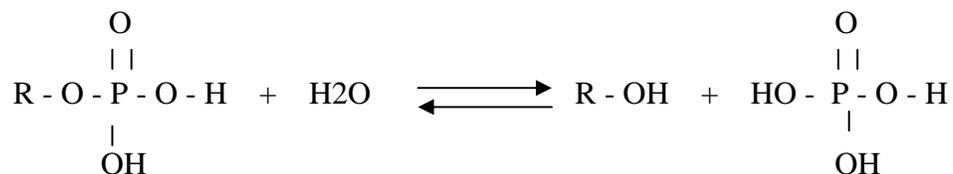
La relevancia de este hecho se constata si se considera que aproximadamente el 90% del fósforo presente en suelo se encuentra en forma orgánica que deberá hidrolizarse a fosfatos inorgánicos primarios ($\text{H}_2\text{PO}_4^{1-}$) y secundarios (HPO_4^{2-}) para que la planta los tenga disponibles.

Las fosfatasas fueron clasificadas de acuerdo al pH óptimo para su actividad, en fosfatasas ácidas o fosfomonoesteras, y fosfatasas alcalinas. La relación inversa hallada entre el pH del suelo y la actividad de la fosfatasa ácida, sugirió que su estabilidad varía con relación al pH del suelo (Eivazi y Tabatabai, 1977).

Las fosfatasas del suelo, pueden originarse, como respuesta adaptativa al estrés por deficiencia de P, por raíces de plantas superiores, microorganismos del suelo de vida libre como *Aspergillus sp* y por bacterias como *Bacillus megaterium* y *Pseudomonas sp* que se han reconocido por su efecto positivo por la producción de sustancias de crecimiento que estimulan el metabolismo de las plantas, que funcionan en forma antagónica ante organismos parásitos además de producir hormonas del tipo de las giberelinas (Pierre, 2004) y hongos ectomicorrízicos como *Pisolithus tinctorius* que contribuyen a la mineralización del P (Naseby *et al.*, 1998). La asociación de dos microorganismos resultan muy estimulante para la absorción de P para las plantas. Su actividad es mayor sobre la superficie de la raíz que en el volumen del suelo, estas enzimas permanecen en el suelo ya sea asociadas con células no vivas o restos de estas, o bien, inmovilizadas en la matriz del suelo, conservando su capacidad hidrolítica (Marschner, 1995).

La disponibilidad de P está asociado a la actividad de enzimas fosfatasas, las cuales rompen enlaces éster-fosfatos de compuestos orgánicos que permiten la formación de moléculas de carácter inorgánico asimilables por las plantas. En algunos casos la actividad de las fosfatasas ha utilizado como índice de la disponibilidad de fósforo, además de que aumentan la eficiencia de fertilizantes fosfatados y en ocasiones se han correlacionado positivamente con los estados de oxidación-reducción (Dick y Tabatabai, 1984; citados por Reyes, 2002).

La ecuación general de la reacción catalizada por las fosfatasas ácida y alcalina es:



Scheider *et al.*, (2000), mencionaron que las fosfatasas son producidas cuando el P es el elemento que limita el crecimiento. Por su parte, Seeling y Jungk (1996), encontraron, correspondencia a un incremento en actividad fosfatasa en la vecindad de las raíces, una disminución del P-orgánico y aumento en la concentración $\text{H}_2\text{PO}_4^{1-}$ y HPO_4^{2-} .

El mantenimiento de actividad fosfatasa en suelos, se debe a su estabilización en coloides minerales (arcillas) y en complejos húmicos sin perder su capacidad hidrolítica por lo que contribuyen al aumento en disponibilidad de P en la demanda continua que realizan las plantas (Marschner, 1995). Una sola molécula de fosfatasa basta para catalizar la reacción de varios millones de moléculas del sustrato por minuto y puede actuar sobre diversos sustratos y así, una enzima puede catalizar la hidrólisis de fosfatos de etilo, de fenilo y glicerofosfato, mientras las moléculas con dos grupos R-O-P (diésteres) pueden requerir de diferentes isoenzimas para su hidrólisis. (Clarholm 1993, citado en Scheider *et al.*, 2000). La enzima acelera la reacción combinándose con el sustrato y disminuyendo la barrera de energía (energía de activación) que las moléculas de dicho sustrato deben superar para transformarse en el producto de la reacción. Respecto a la matriz del suelo, el nivel más alto de actividad de fosfatasas se encuentra en la rizosfera y en la proximidad del sistema suelo-planta, se distribuye y localiza en niveles altos en zonas cercanas a la raíz. También se acumula principalmente en la capa superior del suelo, ya que es la zona de máxima actividad biológica y química.

Actualmente y por las características que ésta presenta, la actividad enzimática puede utilizarse como un indicador potencial bioquímico y biológico de la calidad del suelo.

Las fosfatasa del suelo son importantes en la nutrición de P para las plantas porque interviene en la liberación de P inorgánico ya que son producidas por bacterias, hongos y la fauna que se encuentra en el suelo.

Entre 30 y 70% del P del suelo, se encuentra en la MOS en complejos ésterfosfato cuya principal fracción aparece en derivados del ácido fítico que para ser utilizado, debe ser hidrolizado por enzimas fosfatasa para liberar H_2PO_4^- y HPO_4^{2-} (Kang y Freeman, 1999, Citado por Cruz-Flores, 2003).

Puede señalarse que en diversas condiciones climáticas y edáficas el P puede limitar el crecimiento y desarrollo de las plantas (Suelos de zonas lluviosas o de clima templado pero de origen ácido como Acrisol, Kastoñozem, Nitosol y Andosol). Bajo estas características, la actividad fosfatásica de la raíz, los exudados radicales principalmente ácidos orgánicos y las micorrizas arbusculares juegan un papel determinante para la adquisición de este nutrimento esencial (Cruz-Flores, 2003).

La actividad enzimática es una importante propiedad bioquímica para la evaluación de la fertilidad del suelo ya que las enzimas del suelo participan en los ciclos biogeoquímicos y en la disponibilidad de nutrimentos para las cosechas.

6.8. BOSQUES DE CONÍFERAS Y ENCINOS DE MÉXICO

Después de los matorrales desérticos de las amplias zonas áridas del país, son los bosques de coníferas y encinos los que mayor extensión del territorio nacional ocupan, con una distribución potencial original de poco más de 20% (Challenger 1998). Los bosques puros de pino (*Pinus* spp.), de encino (*Quercus* spp.) y de pino y encino juntos, son los ecosistemas que predominan. Ejemplos de bosques de coníferas y encinos: los bosques de oyamel o abeto (*Abies* spp.), de pinabete (*Picea* spp. y *Pseudotsuga* spp.), de cedro (*Cupressus* spp.), de sabino (*Juniperus* spp.), de aile (*Alnus* spp.) así como de táscate (*Juniperus* spp.), también se incluyen en esta categoría general. La Figura 7

muestra su posible distribución potencial original, antes de las transformaciones de origen humano.

A diferencia de los bosques de coníferas y encinos de mayores latitudes, los de México se caracterizan por una biodiversidad impresionante. De hecho, en su conjunto estos ecosistemas son los que más especies de flora y fauna albergan (aun cuando el número de especies por hectárea sea relativamente bajo) (Flores [Villela](#) y Gerez 1994). Esto se debe, por un lado, al gran número de especies de plantas del sotobosque, que incluyen especies tropicales y de áreas templadas, y por el otro, a la gran heterogeneidad de la composición florística entre los bosques de diferentes regiones dentro de esta zona ecológica.

Aunque la diversidad biológica del dosel de un típico bosque de pino o de encino es algo reducida, la diversidad de los árboles del dosel de los bosques mesófilos es bastante más alta de lo que se podría suponer. Esto se debe a la compleja historia biogeográfica de esta zona ecológica, y a la evolución *in situ* de sus elementos, confinados en sus respectivas “islas” montañosas. La diversificación de especies que esto ha ocasionado resulta extraordinaria, lo que a su vez explica otra faceta de la importancia mundial de estos ecosistemas: son el centro primario mundial de diversidad de pinos, con más de 50% de todas las especies de pino del mundo; y son el centro primario de diversidad del hemisferio occidental de los encinos, con 33% de las especies del mundo (Styles 1993, Nixon 1993, Challenger 1998).

La importancia de estos ecosistemas no se deriva únicamente de esta asombrosa diversidad, sino también del hecho de que los pinos y los encinos son los árboles más representativos y económicamente importantes de los ecosistemas templados de México y del mundo; de hecho, son la base misma de la mayor parte de la industria forestal del país. Esto, junto con la fertilidad del suelo, su aptitud para la agricultura y el clima benigno, han propiciado los asentamientos humanos, lo que explica la deforestación y degradación de estos ecosistemas a lo largo y ancho del país (Challenger *op. cit.*).



Figura 7. Distribución de los ecosistemas templados de México

México no es solamente origen del 50% de las especies de pino existentes en el mundo, sino que contiene la extraordinaria cantidad de 135 especies de encino (comparado con las 87 especies encontradas en los Estados Unidos y Canadá juntos). Muchas plantas domesticadas y de importancia comercial, incluyendo el maíz, se originaron en estos bosques.

De igual modo, los bosques de pino encino, a pesar de ser uno de los tipos de vegetación más ampliamente distribuidos en México, han sido fuertemente impactados por actividades humanas durante siglos debido a la fertilidad de sus suelos y a su agradable clima. (CONAFOR, 2006)

6.9. ÁREAS NATURALES PROTEGIDAS

¿Qué son las Áreas Naturales Protegidas (ANP)?

Son porciones terrestres o acuáticas del territorio nacional representativas de los diversos ecosistemas, en donde el ambiente original no ha sido esencialmente alterado y

que producen beneficios ecológicos cada vez más reconocidos y valorados (LGEEyPA, 2004).

Se consideran Áreas Naturales Protegidas:

- * **Reservas de la Biosfera**
- * **Parques Nacionales**
- * Monumentos naturales
- * Áreas de protección de recursos naturales
- * Áreas de protección de flora y fauna
- * Santuarios
- * Parques y reservas estatales
- * Zonas de preservación ecológica de los centros de población

La Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas administra actualmente 154 áreas naturales de carácter federal que representan más de 18.7 millones de hectáreas (CONANP, 2005).

El establecimiento de las ANP tiene como objeto:

- Preservar los ambientes naturales
- Salvaguardar la diversidad genética de las especies silvestres
- Asegurar el aprovechamiento sustentable de los ecosistemas
- Proporcionar un campo propicio para la investigación científica
- Generar, rescatar y divulgar conocimientos que permitan la preservación y aprovechamiento sustentable de la biodiversidad del territorio nacional.

6.10. PRUEBAS DE HIPÓTESIS

La estadística en general y la bioestadística en particular concede una gran importancia a las pruebas de hipótesis.

Con los valores estadísticos obtenidos de los resultados experimentales, la teoría estadística ha desarrollado métodos o técnicas para probar dichas hipótesis relativas a parámetros de poblaciones. Tales métodos se conocen como pruebas de significancia estadística.

Las pruebas de hipótesis están basadas en la nulidad de la diferencias; es decir, la diferencia de promedios de muestras es cero o estima a cero (o la diferencia entre lo experimental observado y lo teórico esperado es cero, o situaciones similares). Dicha diferencia de promedios de poblaciones se simboliza H_0 y se conoce como hipótesis de nulidad. La hipótesis contraria se conoce como alternativa, se expresa como H_A y está basada en la no nulidad de las diferencias. Varias situaciones o juegos de hipótesis no posibles, y el investigador puede recurrir a las que le convengan a sus necesidades. Un juego de hipótesis puede ser:

$$H_0: \mu_1 = \mu_2 \text{ o } \mu_1 - \mu_2 = 0;$$

$$H_A: \mu_1 \neq \mu_2 \text{ o } \mu_1 - \mu_2 \neq 0.$$

H_A excluye a H_0 , o viceversa. También se dice que se acepta H_A y se rechaza H_0 , o viceversa.

Al probar hipótesis, pueden ocurrir los cuatro casos siguientes:

1. Que H_0 sea cierta y que la prueba estadística la acepte (rechace a H_A).
2. Que H_0 sea cierta, pero que la prueba estadística la rechace (acepte a H_A).
3. Que H_0 sea falsa, pero que la prueba estadística la acepte (rechace a H_A).
4. Que H_0 sea falsa y que la prueba estadística la rechace (acepte a H_A) (Reyes, 1995).

6.10.1. Análisis de varianza

La estadística a desarrollado la técnica de Fisher conocida como análisis de varianza para la prueba de hipótesis de varias poblaciones con datos de muestras. Esta técnica es una herramienta muy útil en muchas disciplinas del ser humano y en investigaciones en las cuales se aplican la observación y la experimentación (Reyes, 1995).

6.10.2. Método de Scheffé

Se basa en la distribución de F. El método es más riguroso que el método de Tukey, para detectar diferencias significativas, de aquí que en la práctica sea más frecuente usar el método de Scheffé al 10% de significancia.

Como una regla, en los experimentos de mejoramiento de plantas, donde se realizan comparaciones entre variedades, es común examinar los $t(t-1)/2$ contrastes simples con el método de Tukey. Cuando el investigador se interesa en la prueba de contrastes más complicados, como ocurre con frecuencia en los experimentos de fertilización, se aplica con más ventajas el método de Scheffé (Martínez, 1988).

6.10.3. Modelo lineal general (GLM)

Las variables aleatorias observables y_i , donde $i=1,2,\dots,n$, cuyos valores esperados pueden expresarse como combinaciones lineales conocidas de los parámetros desconocidos $\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_p$; es decir:

$$E(y_i) = \sum_{j=1}^p X_{ij}\beta_j, \quad i=1, 2, \dots, n; n>p$$

si podemos escribir, como sigue, las y_i :

$$y_i = E(y_i) + e_i = \sum_{j=1}^p X_{ij}\beta_j + e_i, \quad i=1, 2, \dots, n$$

donde las e_i son variables aleatorias no correlacionadas, con media 0 y varianza desconocida σ^2 , entonces, la expresión anterior se conoce como el modelo general de las hipótesis lineales o, simplemente, como el *modelo lineal general*.

Las n relaciones pueden expresarse de forma compacta, empleado notación matricial. Si escribimos:

$$\begin{matrix}
 \left(\begin{array}{c} y_1 \\ y_2 \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ y_n \end{array} \right) , &
 \mathbf{X} = \left(\begin{array}{cccc} x_{11} & x_{12} & \dots & x_{1p} \\ x_{21} & x_{22} & \dots & x_{2p} \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ x_{n1} & x_{n2} & \dots & x_{np} \end{array} \right) , &
 \boldsymbol{\beta} = \left(\begin{array}{c} \beta_1 \\ \beta_2 \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ \beta_n \end{array} \right) , &
 \text{y } \mathbf{e} = \left(\begin{array}{c} e_1 \\ e_2 \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ e_n \end{array} \right)
 \end{matrix}$$

El modelo general de las hipótesis lineales puede expresarse como:

$$\mathbf{Y} = \mathbf{X}\boldsymbol{\beta} + \mathbf{e}, \quad E(\mathbf{e}) = \boldsymbol{\Phi}_n, \quad E(\mathbf{e}\mathbf{e}') = \mathbf{I}_n\sigma^2$$

Donde $\boldsymbol{\Phi}_n$ es un vector columna $n \times 1$, cuyos elementos son ceros, e \mathbf{I}_n es la matriz unitaria $n \times n$. En el caso general, el rango de la matriz \mathbf{X} , $n \times p$, que denotaremos simplemente $r(\mathbf{X})$, es igual o menor que p (Martínez, 1988).

7. ANTECEDENTES

Con la importancia que tienen los bosques templados por cumplir funciones como recarga de mantos freáticos, intercambio de gases, etc., se han hecho pocos trabajos para México donde indiquen la calidad de suelo de los bosques, trabajos recientes sobre el tema son los que realizaron Granados-Damián (2003) Calidad del Suelo y estado nutrimental del género *Pinus* en la vertiente occidental del Iztaccíhuatl y Popocatepetl, García (2003) Indicadores de calidad del suelo y estado nutrimental de *Abies religiosa* (H.B.K.) Schl., et Cham, en la exposición occidente de los volcanes Iztaccíhuatl y Popocatepetl y Valderrábano (2006) Calidad del suelo y estado nutrimental de la vegetación forestal del Parque Nacional Zoquiapan y Anexas.

8. JUSTIFICACIÓN

El suelo de los bosques tiene funciones importantes, una de ellas aportar nutrimentos para el crecimiento adecuado del arbolado que los toma de la materia orgánica del suelo. La concentración de elementos esenciales para los suelos es un factor de gran importancia para conocer la calidad del suelo.

Este trabajo que se realizó en tres zonas de estudio que corresponden a áreas naturales protegidas (ANP) localizadas en dos vertientes geológicas diferentes Eje Neovolcánico (Parque Nacional Izta-Popo y Parque Nacional Zoquiapan y anexas) y Sierra Madre Oriental (Reserva de la Biosfera El Cielo) que presentan diferente origen geológico, la primera de origen ígneo extrusivo y la segunda de origen sedimentario caliza por ese motivo presentan una gran variedad en tipos de suelo por tal motivo presentarán diferencias en la disponibilidad de P.

La disponibilidad del P es fundamental para el crecimiento de las especies forestales y tienen su base en el P-orgánico; el cual es liberado por acción microbiana o por hidrólisis enzimática, por tal motivo dar a conocer la actividad enzimática de la fosfatasa que es de vital importancia para el elemento P y para el crecimiento de las plantas y su aprovechamiento sustentable para los bosques forestales.

9.1. OBJETIVO GENERAL

Determinar la actividad de la fosfatasa ácida y alcalina del suelo en dos toposecuencias de bosques templados de *Pinus sp.* y *Abies religiosa*.

9.2. OBJETIVO PARTICULAR.

- Determinar la relación de las fosfatasas con en P-total y el P-disponible.
- Identificar a la actividad de las fosfatasas como indicador de la calidad de suelos.
- Determinar las concentraciones de C, y P-total del suelo y su relación con la actividad de las fosfatasas.

9. HIPOTESIS

Partiendo del supuesto de que una mayor actividad de la enzima fosfatasa es función del estrés de la planta por carencia de P, se plantea la hipótesis de que con mayor de P disponible la actividad de las fosfatasas es menor y el aumento de altitud incide en una menor disponibilidad del P y por lo tanto en una mayor actividad fosfatasa.

10. ZONAS DE ESTUDIO

10.1. Características del Parque Nacional Iztaccíhuatl-Popocatepetl

Ubicación geográfica

El Parque Nacional Iztaccíhuatl-Popocatepetl, (PNIP) decretado como tal en 1935 y cuyo decreto se modificó en 1948 (Vargas, 1997), se encuentra ubicado dentro de la provincia fisiográfica conocida como Eje Neovolcánico transversal donde se encuentran los sitios más altos del país. Se localiza geográficamente entre los meridianos de coordenadas $98^{\circ} 35'$ y $98^{\circ} 42'40''$ de Longitud W y entre los paralelos y entre los paralelos de $18^{\circ} 59'$ y $19^{\circ} 15' 30''$ de Longitud N (Vargas, 1984), la topografía comprende a los volcanes Iztaccíhuatl (5,283 m) y Popocatepetl (5,451 m). El Izta-Popo se encuentra en el Sistema Orográfico Sierra Nevada, originado durante el Terciario por actividad volcánica (Figura 8).

Superficie

El parque ocupa una extensión aproximadamente de 25, 679 hectáreas. Colinda al Norte y Oeste con los municipios de Tlamanalco, Amecameca, Atlautla y Ecatzingo (Estado de México), al Este con San Salvador el Verde, Domingo Arenas, San Nicolás de los Ranchos y Tochimilco (Estado de Puebla) y al Sur con Tetela del Volcán (Estado de Morelos) (Granados-Damián, 2003).

Clima

Clima templado subhúmedo, con lluvias de verano, cuya temperatura media anual es de 15.6°C ; en el mes más frío con 13.2°C y el más cálido con 18°C .

Precipitación

La precipitación media anual es de 1351.5 mm; el mes más seco con una precipitación de 4.2 mm y el más húmedo, con una precipitación de 277 mm.

Suelos

Los suelos que abundan en el Estado de México son los Andosoles, Arenosoles, Phaeozems, Regosoles y Vertisoles, para el Estado de Morelos Andosoles, Arenosoles, Phaeozems y Leptosoles y para el Estado de Puebla son los Vertisoles, Phaeozoms, Regosol, Litosol, Andosol, Alisoles, Arenosoles, Leptosoles y Cambisoles (SEMARNAT, 2002).

Vegetación

Bosques de pino, oyamel, páramo de altura y zacatonal. La vegetación que se encuentra en el Estado de Morelos es: *Pinus hartwegii*, *P. ayacahuite*, *P. michoacana corneta*, *P. pseudostrobus*, *P. macrocarpa*, *Abies religiosa*, *Cupressus lindleyi*; en sitios de mayor altitud se localiza el *P. oocarpa*, en altitudes entre 2700 y 3200 m snm; en altitudes de 3000 a 3500 metros se localiza la siguiente vegetación: *P. lawsoni*, *P. leiophylla*, *P. oocarpa*, *P. pringley* y *P. teocote*; así como las especies de encino: *Quercus mexicana*, *Q. crassipes*, *Q. rugosa* y *Q. macrophylla*; otras especies de árboles forestales: *Clethra mexicana*, *Arbutus xalapensis*, *A. gladiosa*, *Arctostaphylos*, *Buddleia cordata*, *B. Americana* y *Dodonea viscosa*.

En altitudes de 3,200 a 4,250 metros se encuentra la vegetación herbácea como son: las gramíneas *Muhlenbergia*, *Sporobolus*, *Festuca*, y *Stipa*; también son frecuentes las dicotiledóneas como: *Lupinus* y *Penstemon*, a partir de los 4,250 m de altitud se inicia la vegetación de pastizal alpino y las nieves perpetuas.

Del Estado de México: *Abies religiosa*, *Pinus hartwegii*, *P. pseudostrobus*, *P. rudis*, *P. teocote*, *P. leiophylla*, *Quercus laurina*; otras especies son: *Cornus disciflora*, *Garrya laurifolia*, *Ilex toluhana*, *Meliosia dentata*, *Oreopanax xalapensis*, y *Prunus brachybotrya*. Vegetación de zacotal: *Festuca toluensis*, *F. livida*, *F. amplissima*, *Calamagrostis tokucensis*, *Muhlenbergia quadridentata*, *Trisetum spicatum*, *Agrostis toluensis* y *Poa orizabensis*.

Del Estado de Puebla: solo se menciona que existe *P. ayacahuite*, *Agnus mexicana*, *Abies religiosa*, bosque de pino, bosque de pino-encino y zacatal (SARH, 1993).

10.2. Características del Parque Nacional Zoquiapan y Anexas (PNZA)

Ubicación geográfica

El Parque Nacional Zoquiapan y Anexas (PNZA) se decretó en marzo de 1937 y se encuentra ubicado dentro de la provincia fisiográfica conocida como Eje Neovolcánico transversal. Se localiza geográficamente entre los meridianos de coordenadas 19°15' y 19°26' Latitud N y 99°49' y 99°56' Longitud W. Presenta importantes elevaciones como el Tlalóc (4,120 m), el Yoloxóchitl (3,900 m), el Telapón (4,060 m) y el Papayo (3,600 m). La formación geológica inicia a mediados de la era Terciaria a partir de emisiones de lava (Figura 8).

Superficie

El parque ocupa una extensión de 19,418 ha. Las poblaciones aledañas a este parque son las de Tlamanalco, Ixtapaluca y Chalco en el Estado de México y Tlahuapan en Puebla (Vargas, 1997).

Clima

Clima templado, subhúmedo, con lluvias en verano, con temperatura media anual de 12 a 18°C, una temperatura del mes más frío de 11.2 °C pero superior a -3°C; donde el mes más cálido presenta temperaturas de 18.4 °C.

Precipitación

La precipitación media anual es de 659.3 mm; el mes más seco con una precipitación de 40mm.

Suelos

Los suelos que abundan en el Estado de México son los Andosoles, Arenosotes, Phaeozems, Regosoles y Vertisoles, para el Estado de Puebla son los Vertisoles, Phaeozems, Regosoles, Litosoles, Andosoles, Alisoles, Arenosoles, Leptosoles y Cambisoles y para el Estado de Tlaxacala Cambisoles, Leptosoles, Arenosoles y Phaeozems (SEMARNAT, 2002).

Vegetación

Los bosques responden principalmente a gradiente altitudinales y de topografía, como es el caso entre cañadas húmedas y secas, lo que hace posible encontrar una gran diversidad de hábitat, como en las partes bajas donde se presenta el bosque de pino, bosque de pino-encino, bosque de oyamel y pastizales amacollados; así como también, zonas donde se encuentran el bosque mesófilo de montaña (CONANP, 2003).

Entre los 2,200 y 4,100 m se desarrollan diferentes tipos de vegetación como gran diversidad de familias: *Dicoyiledonae* (*Compositae*, *Cruciferae*, *Cactaceae*, *leguminosae*, *Onagraceae*, *Rosaceae*, *Oleaceae*, etc.) y *Monocotyledonae* (*Bromiliaceae*, *Agavaceae*, *Gramineae*, etc.).

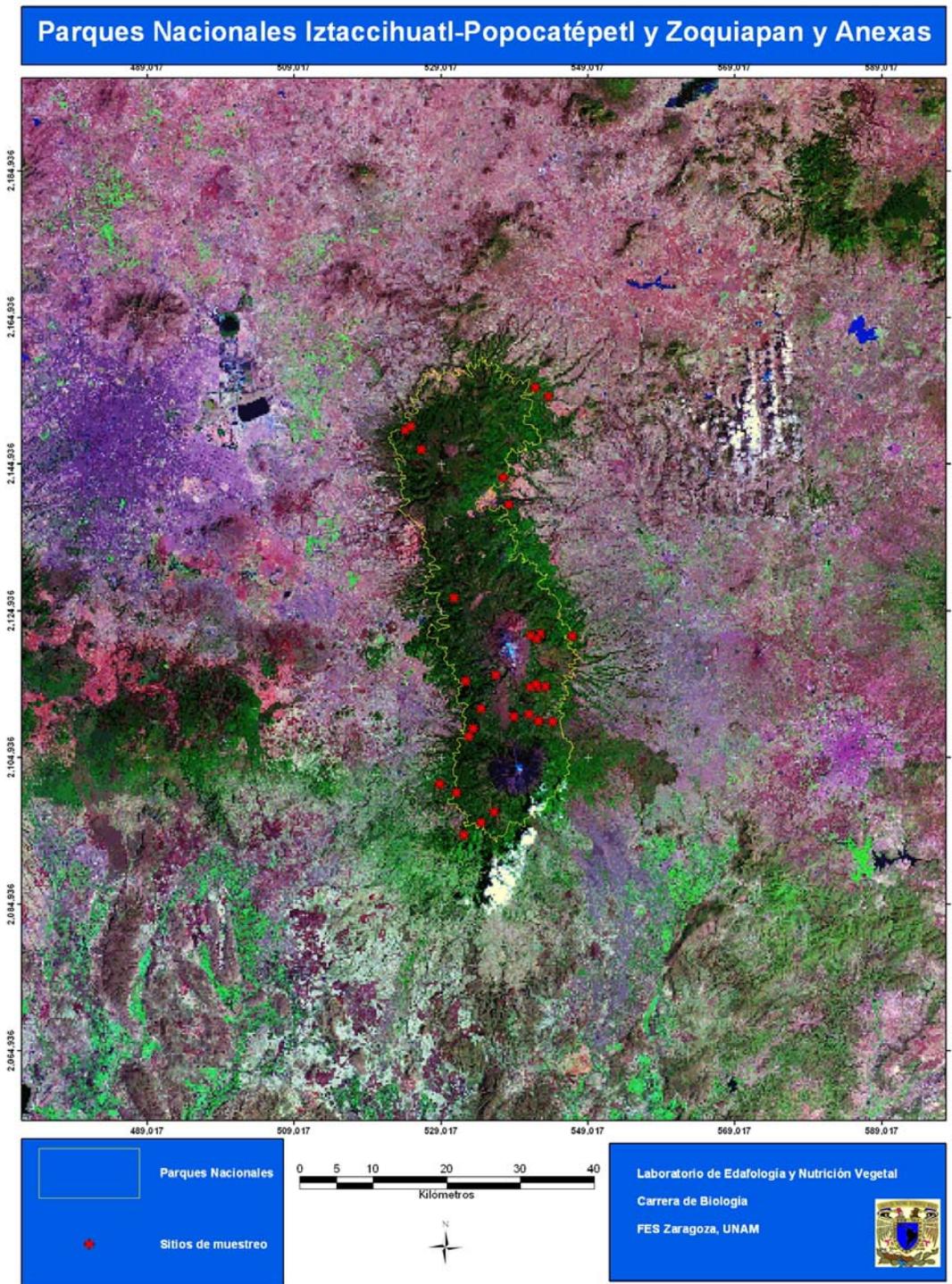


Figura 8. Zona de estudio y puntos de muestreo

10.3. Características de la Reserva de la Biosfera “El Cielo” .

Ubicación geográfica

La Reserva de la Biosfera “El Cielo” (RBC) se localiza al suroeste del estado de Tamaulipas, en las estribaciones de la Sierra Madre Oriental conocidas como Sierra de Cucharas y Sierra Chiquita que se formaron durante el Cretácico Inferior y que pertenecen a la formación Tamaulipas. Sus coordenadas extremas son: 22° 55' -23° 25' latitud norte 99° 05' -99° 26' longitud oeste. Las altitudes varían desde 300 hasta los 2,200 m (Figura 9).

Superficie

Cuenta con una superficie de 144,530 ha, de los cuales el 56% pertenece al municipio de Jaumave (80,935 ha), el 16% al municipio de Ocampo (23,124 ha), el 16% al de Gómez Farías (23,124 ha) y el 12% al de Llera de Canales (17,343 ha), Estado de Tamaulipas (Gómez-Pompa y Dirzo, 1995).

Clima y Precipitación

Las condiciones geográficas de la Reserva, su orografía y su cercanía con el Golfo de México, conforman una barrera natural para los vientos húmedos del este y del suroeste; de esta manera se descargan grandes cantidades de humedad en forma de lluvia o niebla.

Los climas de la Reserva se pueden agrupar en cuatro tipos principales, de acuerdo a la altitud: el calido subhúmedo se presenta entre los 300 y 800 m, con precipitaciones anuales entre los 1,500 a 2,400 mm.

El clima semicálido subhúmedo, donde se encuentra la mayor parte del bosque mesófilo, y se presentan precipitaciones mayores a 2,000 mm anuales, a una altura de 700 a 1,400 m; en el clima templado subhúmedo, que prevalece entre los 1,400 y 2,400 metros, ocurre una precipitación de 500 a 800 mm anuales; finalmente a una altura de 1,600 metros y ubicado hacia las laderas del noreste de la reserva, se presenta el clima más seco, donde llueve menos de 200 mm al año (Sánchez-Ramos *et al.*, 2005).

Suelos

En general en todas las zonas de la sierra predominan suelos derivados de la disolución de calizas, los tipos de suelos encontrados en la reserva son: Phaeozem calcarico, háplico y luvico, Litosol (suelos dominantes), Luvisol cromico, Regosol calcarico, Rendzinas y Xerosol calcarico y háplico (INEGI, 2000), relacionados principalmente con la topografía, geomorfología y litografía.

Vegetación

Los tipos de vegetación están asociados a las condiciones climatológicas y topográficas. Los principales tipos de comunidades vegetales son las siguientes: Bosque tropical subcaducifolio, Bosque mesófilo de montaña, Bosque de *Quercus*, Bosque de coníferas (Puig, 1976; Sosa, 1987 y Rzedowski, 1978, citados en Challenger, 1998) y matorral xerófilo.

En la parte más baja (200 a 800 m de altitud), domina el bosque tropical subcaducifolio, con vegetación que alcanza alturas de 20 m de promedio. El Bosque de *Quercus* (o Encinar) se desarrolla de 700 a 1,000 m, con las siguientes especies *Quercus crisophylla*, *Q. germana* y *Q. xalapensis*. El Bosque mesófilo de montaña predominan árboles de 25 a 30 metros, y se ubica de los 700 a los 1,400 m donde se encuentran las epifitas y lianas (*Antigonum*, *Dioscorea*, *Serjania* y *Smilax*).

Bosque de coníferas. Desarrollados por arriba de los 1,400 m *Pinus patula*, *P. teocote*, *P. pseudostrobus*, además algunos encinos (*Quercus crassifolia* y *Q. afines*), arbustos como *Eupatorium sp.*, *Gaultheria sp.*, *Myrica*, *Staphylea* y *Vaccinium*. Finalmente, el matorral xerófilo, se localiza en las laderas de sotavento de noreste a una altitud de 1600 metros, y presenta una vegetación de altura promedio de uno a ocho metros.

La vegetación incluye combinaciones hasta cierto punto extravagante ya que algunas palmas típicas del oriente mexicano crecen junto a los nogales que son más característicos de Norteamérica. Es posible observar orquídeas tropicales creciendo sobre ramas de roble, así como la convivencia armónica de acacias, cactus, begonias y cientos de especies de los diferentes tipos de vegetación presentes en este relativamente pequeño, pero fascinante territorio.

Destacan especies como la magnolia y especies de distribución restringida en el país como el oyamel, el haya y el cedrillo (Sánchez-Ramos *et al.*, 2005).

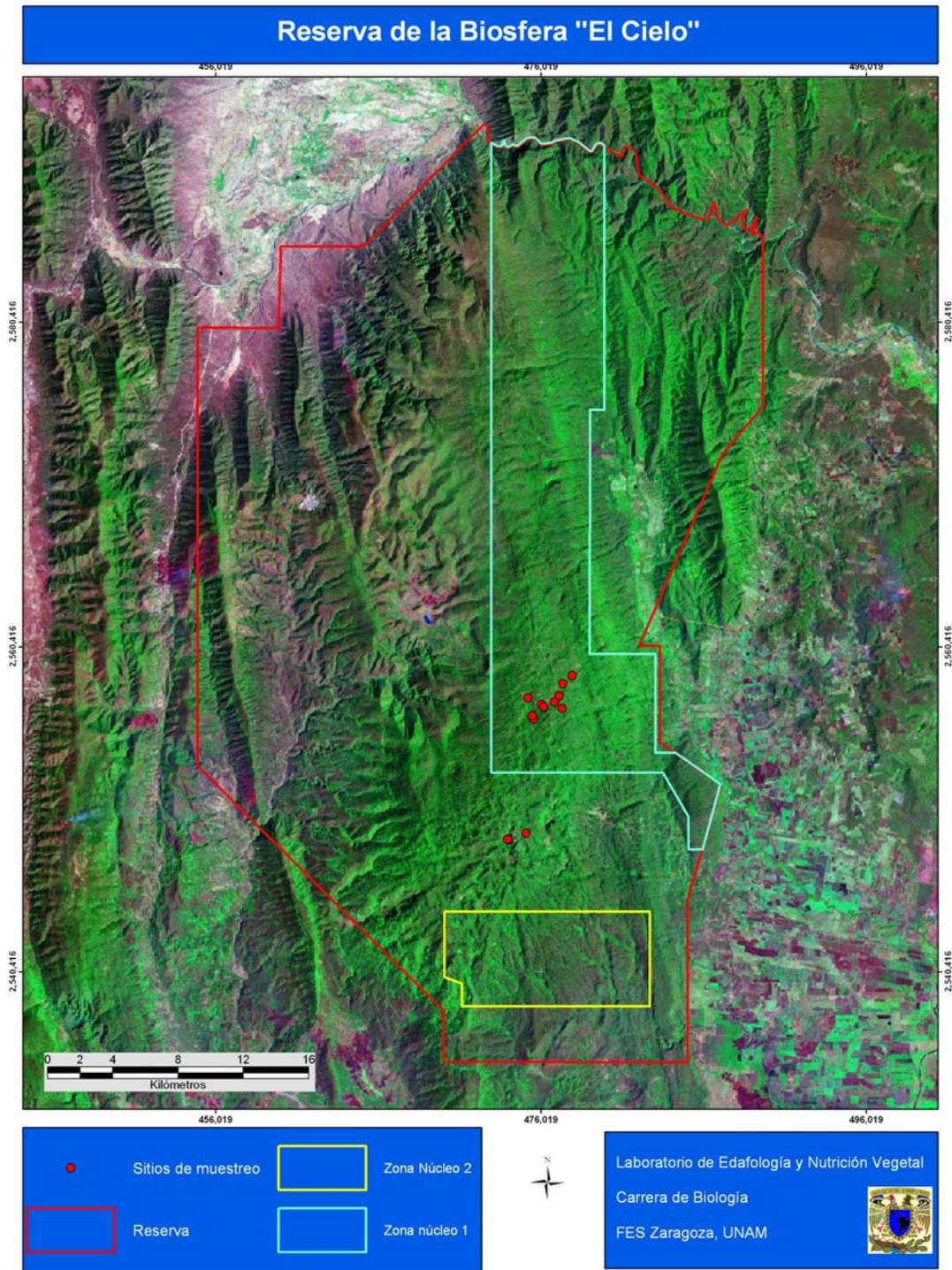


Figura 9. Zona de estudio y puntos de muestreo.

11. MATERIALES Y MÉTODOS

11.1. Delimitación de la zona

La delimitación de la zona se hizo por medio de mapas topográficos, tomando en cuenta la topografía, vegetación que se encontraba y un gradiente altitudinal, la unidad ambiental tenía que ser homogénea para delimitar un cuadrante de 20 x 50 metros y en cada sitio se tomaron los siguientes datos de campo:

- Fecha de colecta
- Lugar de colecta
- Altitud
- Exposición
- Pendiente
- Vegetación

La Altitud y coordenadas geográficas en UTM, se determinaron con un GPS Garmín, la exposición y pendiente se determinó con una brújula-clicómetro y con base en el nivel de pendiente mostrado en el cuadro 2, se determinó la clase de relieve en cada uno de los sitios de estudio en las tres ANP.

Cuadro 3. Tipos de pendientes y relieve

Pendiente		Relieve	
%	Grados	Pendiente sencilla	Pendiente compleja
0-2	0-0.5	Plana o casi plana	Casi plano
2-4	0.5-2	Ligeramente inclinada	Ligeramente ondulado
4-9	2-5	Moderadamente inclinada	Moderadamente ondulado
9-18	5-10	Inclinada	Fuertemente ondulado
18-27	10-15	Muy inclinada	Muy inclinada
27-36	15-20	Fuertemente inclinada	Fuertemente inclinada
Más de 36	Más de 20	Extremadamente inclinada	Extremadamente inclinada

Las pendientes sencillas son aquellas en que la inclinación del terreno va en un solo sentido; las complejas son en las que la inclinación del terreno va en varios sentidos.

Tomado de Valencia y Hernández, 2002.

El tipo de vegetación se registró con base en la fisonomía de la vegetación arbórea y los géneros dominantes y el tipo de suelo de acuerdo a los mapas cartográficos y edafológicos de INEGI con una escala de 1:50,000.

11.2. Toma de la muestras

Para los análisis químicos y físicos se colectaron cuatro submuestras de aproximadamente un 1kg de 0 a 20cm de profundidad con una pala, las cuales después se homogenizaron para tener una mezcla compuesta de 2kg, se colocaron en bolsas de plástico etiquetadas con la fecha y el lugar de colecta, fueron trasportadas al laboratorio para su análisis.

El fundamento sobre el cual se sustentó la colecta de muestras radica en que no se efectuaría una clasificación del suelo, sino su análisis químico y físico de áreas específicas (Jackson, 1982).

Para la determinación de la actividad enzimática (fosfatasa ácida y alcalina) se tomo de los 0 a 10 cm de profundidad, se tomaron seis submuestras con un tubo de acero de aproximadamente 10cm de altura para realizar una muestra compuesta de aproximadamente 1kg, se colocaron en bolsas herméticas (ziploc) para conservarlo y fueron etiquetadas para su transporte hasta su procesamiento (Atlas y Bartha, 1987).



Figura 10. Toma de muestras: A) Muestras de 0 a 10 cm y B) Muestras de 0 a 20 cm.

11.3. Pretratamiento de la muestras

Antes de la determinación de los análisis químicos y físicos las muestras se secaron a temperatura ambiente y después se pasaron por una malla de 20mm para posteriormente ser envasados en frascos de polietileno.

Para la determinación de la actividad enzimática las muestras se mantuvieron en refrigeración (3-4°C) para mantener la actividad microbiana se secaron a temperatura ambiente y se tamizaron por un tamiz de malla 40mm.

11.4. Determinación en laboratorio

11.4.1. Análisis Físicos

- Textura por el método de Bouyocus (Bouyocus, 1963, citado por Palmer y Truoch, 1989).
- Densidad real por la técnica del picnometro y la aparente por la técnica de la probeta (Domínguez y Aguilera, 1982).

11.4.2. Análisis Químicos

- Conductividad de la solución del suelo relación 1:5, con un conductímetro (Richards, 1990).
- pH activo suelo:agua 1:2 por el método potenciométrico (Jackson, 1964).
- pH potencial en solución salina de KCl IN en relación 1:2 por el mismo método que el activo.
- Materia orgánica por el método de Walkley y Black (Walkley y Black, 1934, citados por Jackson, 1964).
- Fósforo Disponible por el método de Bray y Kurtz (Bray y Kurtz, 1945).
- Fósforo Total (Digestión de HClO₄ y determinado con base en el desarrollo del complejo vanadomolibdofosfórico), Jackson, 1964.
- N-total por el método semimicro-Kjeldhal (Bremmer, 1965).
- Relaciones C:N, C/P, y N/P (Himes, 1998).

11.4.3. Análisis Bioquímicos

- Actividad de la enzimas fosfatasa ácida y alcalina por el método del p-Nitrofenilfosfato (Tabatabai, 1994), el cual consiste en lo siguiente:

Colocar 1 g de suelo en Mortero.

Adicionar 0.2 mL de tolueno y 2 mL de MUB pH 5.5 para la actividad de la fosfatasa ácida y a pH 11 para la alcalina.

Agregar unos granos de arena de cuarzo y macerar hasta homogenización.

Tomar alícuota de 0.3 mL de homogenizado y colocarla en tubos o frascos para incubación.

Adicionar 4 mL de MUB pH 5.5 u 11.

Agregar 1 mL de p-Nitrofenilfosfato 3 mM.

Tapar e incubar en Baño María a 37°C durante 1h.

Remover el tapón y agregar 1 mL de $\text{CaCl}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ 0.5 M.

Adicionar 4 mL de NaOH 0.5 M.

Agitar y filtrar la suspensión con papel Whatman No. 2,

Leer a 400 nm y comparar la actividad enzimática con base en una curva de calibración que contenga 0, 10, 20, 30, 40 y 50 mg de p-Nitrofenol.

El calculo de resultados, se realiza con referencia a una curva de calibración con estándares de p-Nitrofenol.

Curva de calibración

Se coloca 1 mL de la solución estándar de p-Nitrofenol en matraz volumétrico de 100 mL y después de aforar con agua, mezcle fuertemente.

De ésta ultima solución de p-Nitrofenol, pipetear alícuotas de 0, 1, 2, 3, 4, y 5 mL.

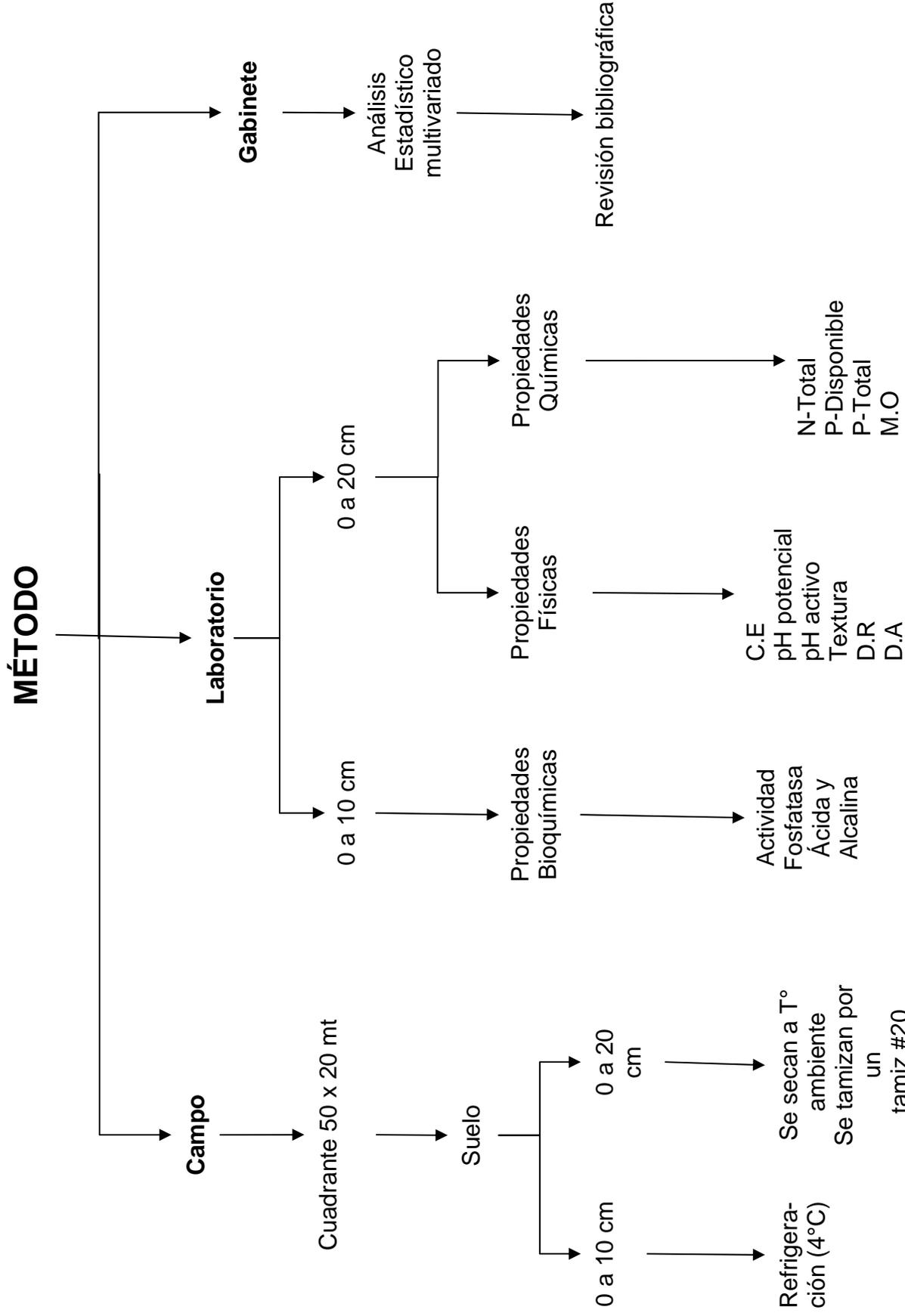
Ajustar el volumen a 5 mL con adición de agua y proceder a incubar como cualquier otra muestra.

(Agregar 1 mL de $\text{CaCl}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ 0.5 M y 4 mL de NaOH 0.5 M)

Aforar a 50 mL, mezclar y filtrar la suspensión resultante.

Si la intensidad del color del filtrado en las muestras excede la de los 50 mg de p-Nitrofenol; una alícuota del filtrado puede ser diluida con agua hasta que el colorímetro pueda leer dentro de los límites de la curva de calibración.

11.5. Diagrama de flujo



12. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

México es un país con diferente origen geológico que al formarse en diferentes eras (Precámbrica, Paleozoica, Mesozoica y Cenozoica) propició que la superficie del país presente gran variedad de rocas que pueden agruparse en tres grandes clases de acuerdo a su génesis: ígneas (solidificación del magma), sedimentarias (consolidación de los sedimentos, derivados de procesos erosivos) y metamórficas (transformación de rocas de las clases anteriores, que ocurre en condiciones de presión y temperatura altas).

De las seis unidades geológicas (roca metamórfica, roca sedimentaria, roca volcano-sedimentaria, roca ígnea extrusiva, roca ígnea intrusiva y suelo) comprendidas para la República Mexicana (INEGI, 2006), la RBC posee principalmente roca sedimentaria y en menor proporción roca ígnea extrusiva mientras que para PNIP y PNZA se presenta roca ígnea extrusiva y en menor extensión la roca volcano-sedimentaria.

Dada la diversidad del material geológico descrita, que es uno de los factores que intervienen en la formación del suelo, existen en México 28 de las 30 unidades de suelo reconocidas por la WRB (2003) y de las que Leptosoles, Regosoles, Calcisoles, Phaeozems y Vertisoles cubren aproximadamente cuatro quintas partes del territorio del país (con 8.3, 24, 18.5, 18.2 y 9.7 % de extensión respectivamente), otros grupos de suelos, como los Cambisoles (4.7%), Andosoles (1.2%), Luvisoles (2.4%), Solonchaks (1.1%), Alisoles (1.5%); entre otros, cubren el resto del territorio nacional (WRB, 2003; SEMARNAT, 2002).

Además de la gran variedad de suelos que existen en el país, también existe una gran variedad en la vegetación del estrato arbóreo, en este caso el de los bosques de coníferas tan frecuentes en las zonas de clima templado y frío del hemisferio boreal, también caracterizan muchos sectores del territorio de México. Se les encuentra prácticamente desde el nivel del mar hasta el límite de la vegetación arborea; prosperan en regiones de clima semiárido, semihúmedo y húmedo y varios existen solo en condiciones edáficas especiales.

Según Flores *et al.* (1971) el conjunto de los bosques de coníferas ocupan cerca de 15% del territorio del país.

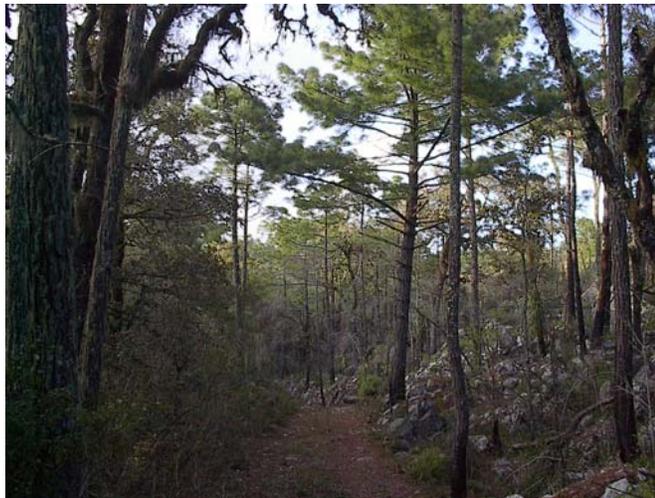


Figura 11. Bosque de Pino-Encino de la Reserva de la Biosfera El Cielo.

12.1. DESCRIPCIÓN FISIAGRÁFICA DE LOS SITIOS DE ESTUDIO

A) Parque Nacional Iztaccíhuatl-Popocatépetl

En el ANP del PN Izta-Popo estudiada en el gradiente altitudinal de 2,650 a 3,828 m, se encontraron terrenos, con pendiente entre 8 y 61% cuyo relieve corresponden a pendientes de moderada a extremadamente inclinada, con suelos poco desarrollados entre los que se observaron Andosoles, Regosoles, Litosoles y Phaeozems que dan soporte, entre la vegetación arbórea, al género *Pinus* con 6 especies: *P. hartwegii*, *P. teocote*, *P. montezumae*, *P. pseudostrobus*, *P. patula* y *P. ayacahuite*; al género *Abies* con una especie *A. religiosa* y al género *Cupressus sp.*, (Cuadro 4).

Cuadro 4. Descripción física de los sitios de estudio dentro del Parque Nacional Iztaccíhuatl-Popocatepetl.

Sitio	Fecha	Latitud		Longitud		Altitud m snm	Pendiente _% _	Exposición	Vegetación	Grupo de suelo
		_____UTM_____	_____UTM_____	_____UTM_____	_____UTM_____					
¹ W-D14	18/06/2004	2 101 465	528 925	2650	.	N	<i>P. pseudostrobus</i>	Andosol		
² Barranca Apapaxo	13/12/2004	2 094 455	532 177	2834	60	NW	<i>P. montezumae</i> y <i>A. religiosa</i>	Regosol eutrigo+ Litosol+Andosol humico		
³ La Papa Acatzi	19/02/2005	2 121 540	546 875	2964	.	.	<i>P. montezumae</i> y <i>P. patula</i>	Litosol+Regosol districo+Andosol humico		
⁴ S de el salto	14/12/2004	2 096 137	534 478	3099	8	NW	<i>P. patula</i> y <i>A. religiosa</i>	Regosol eutrigo+ Litosol+Andosol humico		
⁵ La ventana	19/11/2004	2 109 851	544 221	3127	16	E	<i>P. pseudostrobus</i> y <i>P. ayacahuite</i>	Regosol eutrigo		
⁶ O16	18/06/2004	2 100 270	531 169	3225	55	.	<i>A. religiosa</i>	Phaeozem		
⁷ SE barranca Tlalquecotchcottl	20/01/2005	2 114 683	543 181	3281	45	SE	<i>P. ayacahuite</i> , <i>A. religiosa</i> y <i>Cupressus sp.</i>	Regosol eutrico+Fluvisol eutrico		
⁸ Valle	21/08/2004	2 126 706	530 838	3301	24	NW	<i>P. leocote</i> y <i>A. religiosa</i>	Andosol		
⁹ El Americano	13/12/2004	2 097 553	536 262	3312	20	S	<i>P. hartwegii</i> y <i>A. religiosa</i>	Regosol eutrigo+ Litosol+Andosol humico		
¹⁰ Agua escondida	19/11/2004	2 110 002	542 286	3333	60	E	<i>P. leocote</i> y <i>P. montezumae</i>	Regosol		
¹¹ La venta	18/11/2004	2 110 845	541 056	3418	20	E	<i>P. leocote</i> y <i>P. hartwegii</i>	Regosol		
¹² S barranca Tlalquecotchcottl	20/01/2005	2 114 526	542 103	3425	40	S	<i>P. hartwegii</i> y <i>A. religiosa</i>	Regosol eutrigo		
¹³ Tlalcomajada E de Tetorre	18/02/2005	2 121 800	542 529	3512	61	N	<i>P. hartwegii</i> , <i>P.</i> <i>sp</i> y <i>A. religiosa</i> .	Litosol+Regosol districo+Andosol humico		
¹⁴ SW barranca Tlalquecotchcottl	21/01/2005	2 114 562	541 221	3540	35	S	<i>P. hartwegii</i> y <i>A. religiosa</i>	Regosol eutrigo		
¹⁵ F1	18/06/2004	2 111 637	534 534	3553	20	W	<i>P. hartwegii</i>	Phaeozem		
¹⁶ Pela gallina	18/11/2004	2 110 546	538 910	3615	8	NE	<i>P. leocote</i>	Regosol districo+ Cambisol eutrigo		
¹⁷ S barranca Tlalquecotchcottl	20/01/2005	2 115 007	541 942	3667	60	N	<i>P. hartwegii</i>	Regosol eutrigo		
¹⁸ Chalchoapa NE de Tetorre	18/02/2005	2 121 193	542 010	3696	21	N	<i>P. hartwegii</i>	Litosol+Regosol districo+Andosol humico		
¹⁹ La Laguna Xahuehualco	19/02/2005	2 121 616	541 183	3828	24	N	<i>P. hartwegii</i>	Litosol+Regosol districo+Andosol humico		
²⁰ La joya	20/08/004	2 116 230	536 507	3892	51	N	<i>P. hartwegii</i>	Regosol eutrigo + Litosol		

Nota. Los sitios aparecen enumerados para la descripción de la figura 11. P= *Pinus*, A= *Abies*.

B) Parque Nacional Zoquiapan y Anexas

En el ANP del PNZA, se encontraron 4 géneros *Pinus*, *Abies*, *Quercus* y *Cupressus*. El más abundante de estos fue *Abies religiosa* que se presentó en 7 de 10 sitios, a éste le siguió el *Pinus* en 5, y *Quercus* y *Cupressus* en 2 de los 10 sitios estudiados en este Parque. La pendiente de estos terrenos se encontró entre 28 y 80% con relieve desde sencillo hasta fuertemente o extremadamente inclinado, en un gradiente altitudinal entre 2,864 a 3,537 m encontrando suelos como Andosoles, Cambisoles, Litosoles y Phaeozems (Cuadro 5).

Cuadro 5. Descripción física de los sitios de estudio dentro del Parque Nacional Zoquiapan y Anexas.

Sitio	Fecha	Latitud	Longitud	Altitud	Pendiente	Exposición	Vegetación	Grupo de suelo
		UTM		m snm	%			
¹ S de Los Colgados	24/09/2004	2 154 106	543 584	2864	-	-	<i>P. sp.</i>	Andosol humico+Cambisol humico+Litosol
² NW de Texola	25/09/2004	2 139 414	538 309	2876	33	N	<i>P. sp.</i>	Cambisol humico+Cambisol eútrico
³ S de La Vaquería	24/09/2004	2 155 277	541 879	2950	-	NE	<i>P. sp.</i> y <i>A. religiosa</i>	Andosol humico+Cambisol humico+Litosol
⁴ D11 Cañada La Coquia	02/04/2004	2 107 890	532 792	2965	25	SW	<i>A. religiosa</i> y <i>Cupressus sp.</i>	Phaeozem
⁵ Cañada Atlapulco	08/05/2004	2 149 554	524 251	3003	35	NE	<i>A. religiosa</i> y <i>Q. sp.</i>	Andosol
⁶ S de la Barranca del paso del muerto	25/09/2004	2 143 075	537 553	3036	80	-	<i>P. sp.</i> y <i>A. religiosa</i>	Cambisol humico+Cambisol eútrico
⁷ Sn Miguel Tlaxpan	08/05/2004	2 150 047	524 968	3066	55	E	<i>Q. sp.</i>	Andosol+Cambisol
⁸ Pto. 8	01/04/2004	2 115 364	532 419	3231	65	NE	<i>A. religiosa</i> y <i>Cupressus sp.</i>	Andosol
⁹ O1 Sn.Pedro	31/01/2004	2 108 985	533 405	3286	60	SW	<i>A. religiosa</i>	Phaeozem
¹⁰ Puerto Mancilla	08/05/2004	2 146 877	526 376	3537	28	SE	<i>P. sp.</i> y <i>A. religiosa</i>	Cambisol

Nota. Los sitios aparecen enumerados para la descripción de la figura 12. P= *Pinus*, A= *Abies* y Q=*Quercus*.

C) Reserva de la Biosfera El Cielo

Para la ANP que corresponde a la Reserva de la Biosfera “El Cielo”, a lo largo del gradiente altitudinal de 1,316 a 2,054 m, se describieron 14 sitios de muestreo en los que se encontraron tres géneros *Pinus*, *Abies* y *Quercus* del estrato arbóreo presentándose en 12 de ellos el *Pinus* con cuatro especies *P. pseudostrobus*, *P. patula*, *P. montezumae* y *P. sp.*, encontrando como más abundante a la primera de ellas, se encontró también *Abies vejarii* y *Quercus crasifolia* y *Q. sp.* que se desarrollan sobre tres tipos de suelos como: Litosoles, Luvisoles y Rendzinas. Con referencia a la inclinación del terreno, se observaron pendientes que van entre 6 y 70% cuyo relieve corresponden a terrenos de moderadamente a extremadamente inclinados (Cuadro 6).

Cuadro 6. Descripción física de los sitios de estudio dentro de la Reserva de la Biosfera El Cielo

Sitio	Fecha	Latitud	Longitud	Altitud	Pendiente	Exposición	Vegetación	Grupo de suelo
		UTM		m snm	%			
¹ Valle del Ovni				1316	27	N	.	Litosol+Rendzina
² S de Julilo	21/03/2005	2 558 656	477 924	1563	10	NE	<i>P. patula</i>	Luvisol cromico+Litosol+Rendzina
³ NE de la Gloria	14/10/2004	2 548 992	475 073	1566	45	NE	<i>P. pseudostrobus</i> y <i>A. vejarii</i>	Rendzina+Litosol cromico
⁴ S de la Gloria	14/10/2004	2 548 642	474 050	1645	50	NW	<i>P. pseudostrobus</i> y <i>A. vejarii</i>	Rendzina+Litosol cromico
⁵ SW de la Gloria	14/10/2004	2 548 632	473 969	1653	45	NW	<i>A. vejarii</i>	Rendzina+Litosol cromico
⁶ SW de Julilo	21/03/2005	2 558 172	477 349	1672	9	NE	<i>P. pseudostrobus</i> y <i>A. vejarii</i>	Litosol+Rendzina
⁷ W de la Gloria	14/10/2004	2 548 588	474 067	1709	90	N	<i>P. sp.</i> , <i>Q. crassifolia</i> y <i>Q. sp.</i>	Rendzina+Litosol cromico
⁸ El Porvenir	15/10/2004	2 557 411	477 127	1746	27	N	<i>P. patula</i> y <i>A. vejarii</i>	Litosol+Rendzina
⁹ NE del Porvenir	21/03/2005	2 557 042	476 839	1774	6	NE	<i>P. pseudostrobus</i>	Litosol+Rendzina
¹⁰ NE del Porvenir	15/10/2004	2 556 640	477 293	1865	35	N	<i>P. patula</i> y <i>A. vejarii</i>	Luvisol cromico
¹¹ N del Porvenir	21/03/2005	2 556 761	476 188	1873	31	SE	<i>P. pseudostrobus</i>	Luvisol cromico
¹² NE del Porvenir	15/10/2004	2 556 901	476 024	1935	70	NE	<i>A. vejarii</i>	Luvisol cromico
¹³ NW del Porvenir	21/03/2005	2 556 013	475 547	1960	12	W	<i>P. pseudostrobus</i>	Litosol+Rendzina
¹⁴ W del Porvenir	21/03/2005	2 556 203	475 492	1972	8	W	<i>P. patula</i> , <i>P. pseudostrobus</i> y <i>A. vejarii</i>	Litosol+Rendzina
¹⁵ NW del Porvenir	20/03/2005	2 557 302	475 198	2054	9	NE	<i>P. montezumae</i> , <i>P. patula</i> y <i>P. pseudostrobus</i>	Litosol+Rendzina

Nota. Los sitios aparecen enumerados para la descripción de la figura 13. P= *Pinus*, A= *Abies* y Q= *Quercus*.

12.2. CARACTERIZACIÓN DEL SUELO Y LA VEGETACIÓN

A) Parque Nacional Iztaccíhuatl-Popocatepetl

Para el PNIP a lo largo del gradiente altitudinal (2,650-3,828 m) se encontraron a los siguientes suelos: Andosoles, Regosoles y Litosoles, estos últimos ahora llamados Leptosoles, o asociaciones de ellos; también se encontraron Phaeozems en los sitios O16 y F1, Fluvisoles SE barranca Tlalquecotchcotl y Cambisoles en Pela gallina.

Con referencia al estrato arbóreo entre los 2650 a 3100m snm se encontró *P. pseudostrobus*, 2,800 a 3,300m *P. montezumae*, 2900-3000m snm *P. patula*, 3000 a 3200m snm *P. ayacahuite*, 3,300 a 3,600m *P. teocote*, 3,300 a 3,828m *P. hartwegii*, Escamilla (1996) encontró a esta especie como la dominante en la vegetación subalpina, a partir de los 3,400 m, y *Abies religiosa* se encontró de los 2800 a los 3,500m (Figura 12).

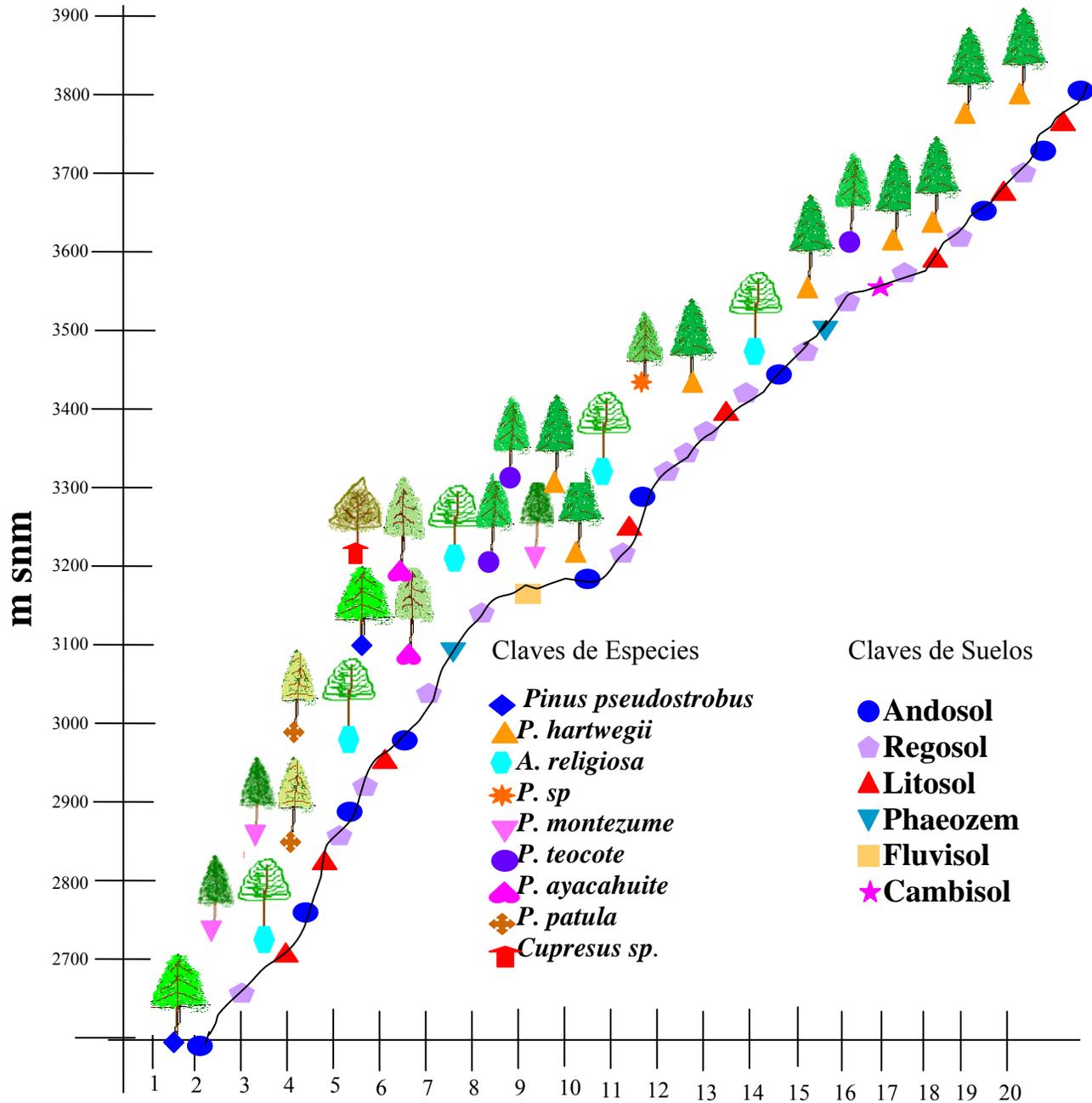


Figura 12. Vegetación y tipos de Suelos en el Parque Nacional Iztaccíhuatl-Popocatepetl

Nota. Los sitios aparecen enumerados con base a los que aparecen en el Cuadros 3.

Uno de los tipos de suelos más representativos encontrados tanto en PNIP y PNZA fue el Regosol (ahora llamados Leptosoles). En el PNIP se hizo una descripción morfológica de uno de ellos en el que se observó la secuencia de horizontes AS se comprobó que son suelos delgados sobre material no consolidado. Suelos pobres en materia orgánica y con una

amplia gama de texturas. Frecuentes sobre rocas blandas, Cretas (Roca caliza de color blanco), materiales sedimentarios arcillosos y loess. Proceden de material no consolidado, excluyendo materiales aluviales recientes. No tienen horizonte de diagnóstico. Etapa inicial de formación de un gran número de suelos (Podzol, Luvisol, Cambisol, Chernozem, Castañozem.

Gran susceptibilidad a la erosión por pendiente, alta pedregosidad y poca profundidad efectiva (Figura 13).



Figura 13. Suelos del Parque Nacional Iztaccíhuatl-Popocápetl (derecho) Andosol (izquierdo) Regosol.

B) Parque Nacional Zoquiapan y Anexas

En el PNZA a lo largo del gradiente altitudinal (2,864-3,537 m) se presentan los siguientes suelos Andosoles y Cambisoles con vegetación de *P. sp* al igual que *A. religiosa* y de manera mas detallada los Litosolos estaban presente en el S de Los Colgados y el S de la Vaqueria y los Phaeozems en D11 Cañada La coquia y O1 Sn. Pedro, los *Cupressus* se encontraron a una altitud de 2,900 a 3,200 m al igual que los *Quercus sp*. (Figura 14).

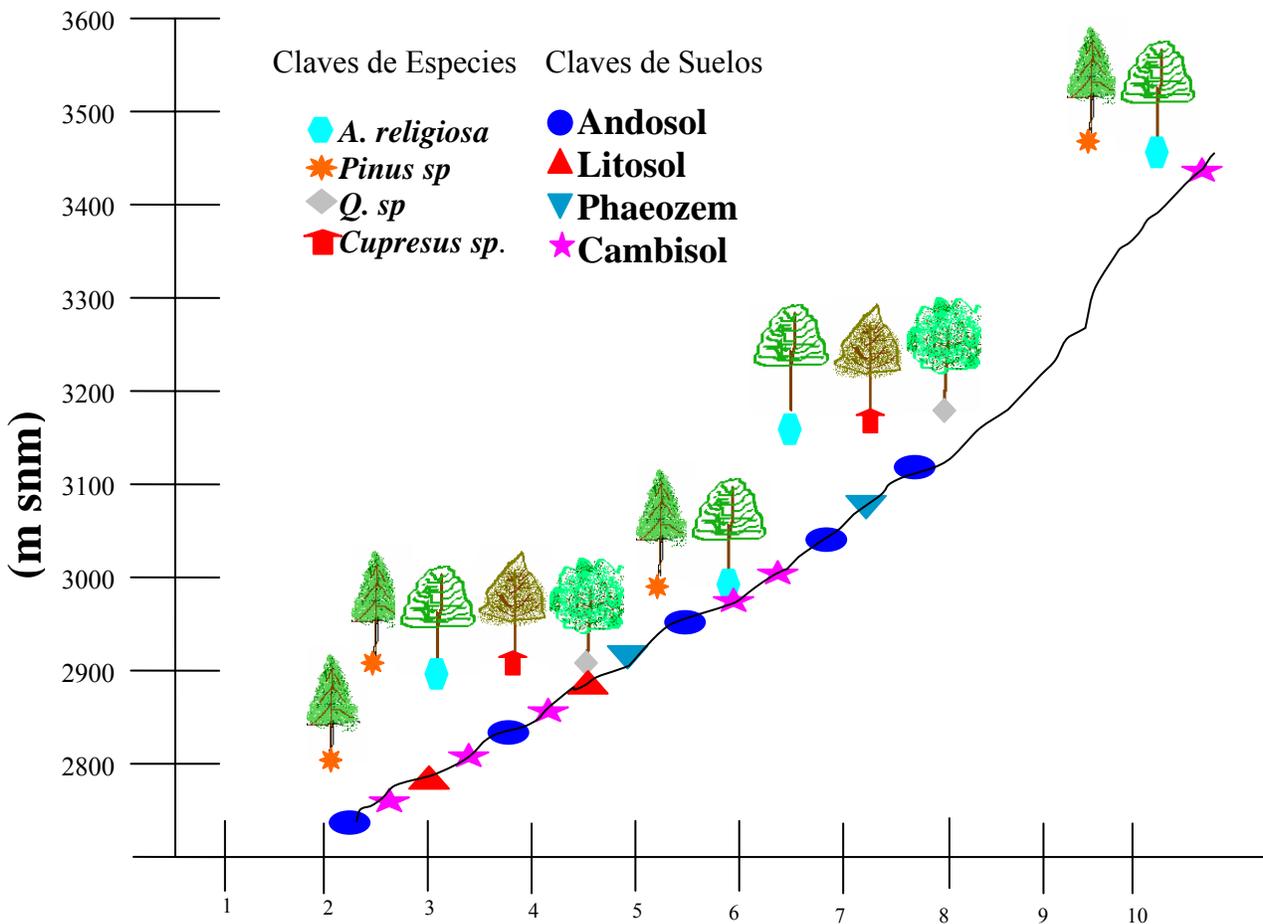


Figura 14. Vegetación y tipos de Suelos en el Parque Nacional Zoquiapan y Anexas.

Nota. Los sitios aparecen enumerados con base a los que aparecen en los Cuadros 4

Se describió un perfil de un Andosol, con perfil tipo **AC**, sobre roca consolidada. Su principal limitante es la baja disponibilidad de P para las plantas y el alto punto de marchitamiento.

Por su distribución e importancia en el país a lo largo del eje Neovolcánico, y en otros lugares, es necesario mencionar estos suelos en los que se pueden desarrollar asociaciones forestales (*Pinus*, *Abies* y *Quercus*) que se distribuyen en piso subalpino y alpino en estas latitudes (aproximadamente paralelo 19°). Estos son suelos jóvenes derivados de ceniza volcánica, de mediana fertilidad y que comparten con los suelos descritos, la acidez que va de moderada a fuerte. Los Andosoles son suelos con presencia significativa de materiales amorfos (alófano, imogolita, ferrihidrita y compuestos aluminico-húmicos), derivados de ceniza volcánica, ricos en materia orgánica (M. O.) pero con contenido de C-Orgánico menor

de 25 % en peso y con 2 % o más de Al+Fe (extractados en oxalato de amonio), densidad aparente (medida a 33 kPa de retención de agua) de 0.9 g cm^{-3} o menos y una retención de fosfatos de 85 % o más (USDA, 1998). En estos suelos la elevada cantidad de M. O., el porcentaje de Al+Fe extractable en oxalato de amonio (que propician suelos desde ligera hasta fuertemente ácidos) y el alto porcentaje de retención de fosfatos influyen, con regular frecuencia, negativamente en el crecimiento y desarrollo de plantas cultivadas (Cruz-Flores, 2006) (Figura 15).



Figura 15. Andosol del Parque Nacional Zoquiapan y Anexas.

C) Reserva de la Biosfera El Cielo

En la RBC debido a su origen geológico es de roca sedimentaria y forma parte de la Sierra Madre Oriental se encuentran otros tipos de suelos como los Litosoles y Rendzinas, los primeros son suelos que están limitados en profundidad por roca continua dura coherente dentro de los 10 cm de profundidad de la superficie y los segundos son suelos que están de inmediato sobre material calcáreo con un equivalente de carbonato de calcio de más del 40% (FitzPatrick, 1985), presenta variaciones en la vegetación y en su gradiente altitudinal que es menor comparado a las otras dos zonas (1,316-2,054m) presentando a lo largo del gradiente las especies *P. pseudostrobus* y *P. patula*, en las zonas más bajas (1,200 m) se

encontró vegetaciones de *Q. crasifolia*, *Q. sp.* y *P. sp.* y de los suelos ausentes en las otras ANP se encuentra los Luvisoles soportando a la especie *A. vejarii* de los 1,500 a 1,900 m, y en la parte más alta (2,054 m) se encontró al *P. montezumae* (Figura 16).

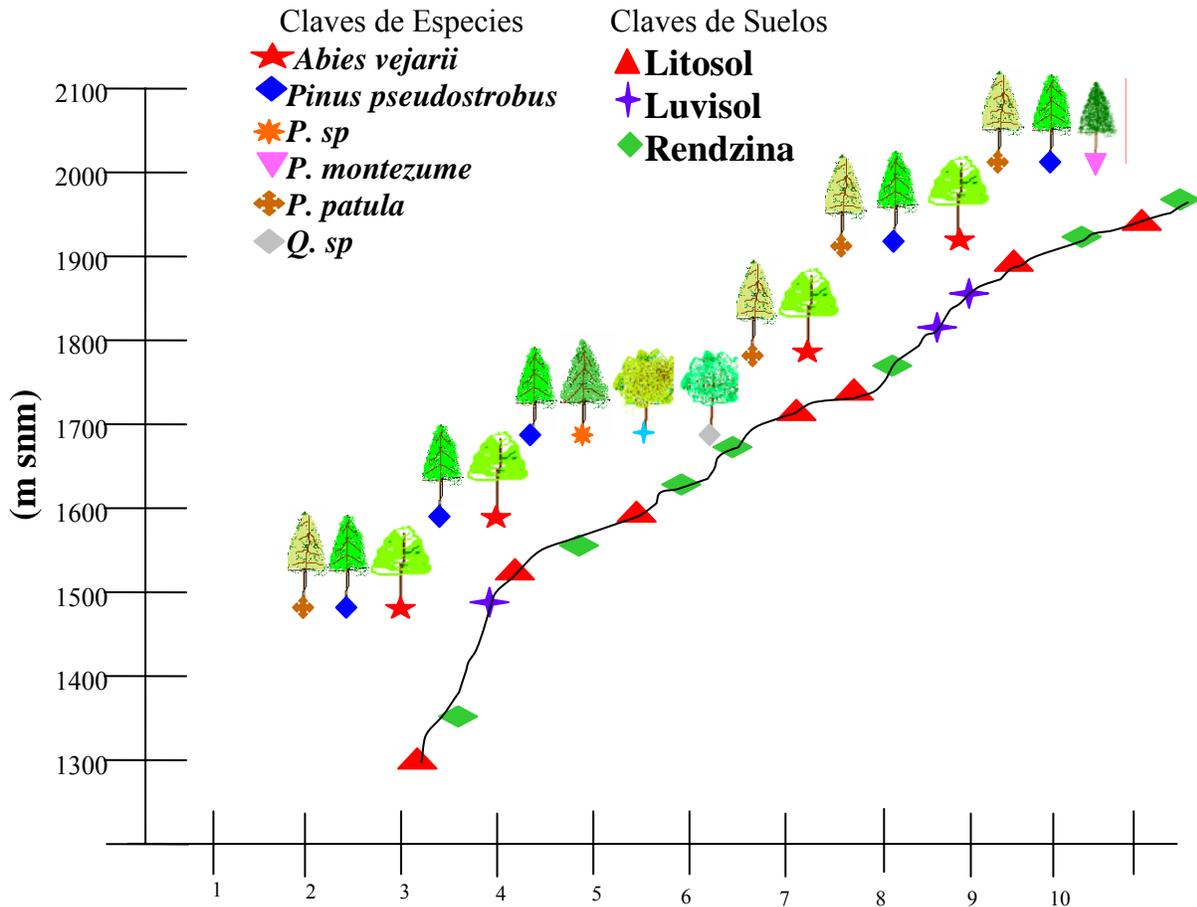


Figura 16. Vegetación y tipos de Suelos en la Reserva de la Biosfera El Cielo

Nota: Los sitios aparecen enumerados con base a los que aparecen en los Cuadros 5.

Se describieron para la RBC dos perfiles de dos suelos que son los que abundan para esta parte el primero es un Leptosol: Suelos con roca dura a poca profundidad. Suelos poco evolucionados sobre material rocoso. Secuencia de horizontes AR Profundidad ≤ 10 cm.

El segundo tipo de suelo fue un Luvisol que se ubica cerca del valle del ovni el cual presenta una calase textural migajon arenoso, con el valor de DR más alto (1.08) comparado con el de los otros sitios teniendo el valor más pequeño de MOS (16.8 y 33.6) son suelos lavados y que se ubican en zonas templadas (Figura 17).



Figura 17. Suelos de la Reserva de la Biosfera El Cielo (Izquierdo) Leptosol Rendzico (Derecho) Luvisol.

12.3. PARÁMETROS FÍSICOS DEL SUELO

A) Parque Nacional Iztacíhualt-Popocatépetl

La DA de los suelos se encontró entre 0.8 hasta 1.34 g cm⁻³, las cuales se consideran de ligeras a bajas; y para la DR los valores encontrados estuvieron de 1.5 a 3.60 g cm⁻³, valores que también corresponden a los que encontró Granados-Damián (2003) para este parque. En relación al EP se registraron valores de 20.04 a 73.84%; estos resultados tan variados son debidos al alto contenido de MOS. Todos los suelos son arenosos, la arena es la principal fracción representada en ellos particularmente en La Venta con el porcentaje más alto de arena y aún en La Joya donde se tiene el menor porcentaje de arena, ésta se presento hasta en 47% (Cuadro 7).

Cuadro 7. Propiedades físicas de los suelos del Parque Nacional Iztaccíhuatl-Popocatepetl

Sitios	DA	DR	EP	Arcilla	Limo	Arena	Clase textural
	g cm ⁻³			%			
W-D14	1.34	2.34	42.67	8	18	74	Migajon Arenoso
Barranca Apapaxo	1.02	2.16	52.29	8	20	72	Migajon Arenoso
La Papa Acatzi	1.04	2.49	58.21	7	18	75	Migajon Arenoso
S de el salto	1.13	1.50	24.76	7	22	71	Migajon Arenoso
La ventana	1.29	2.13	36.88	7	14	79	Arena migajonosa
O16	1.21	2.16	43.67	9	26	65	Migajon Arenoso
SE barranca Tlalquecotchcottl	0.81	1.90	45.66	9	20	71	Migajon Arenoso
Valle	0.75	2.97	73.84	18	32	50	Migajon
El Americano	1.13	2.09	45.09	6	20	74	Arena migajonosa
Agua escondida	1.08	1.59	32.07	6	16	78	Arena migajonosa
La venta	1.08	1.35	20.04	5	18	77	Arena migajonosa
S Barranca Tlalquecotchcottl	1.12	1.50	54.89	8	16	76	Migajon arenoso
Tlalcomajada E de Tectorre	0.91	2.63	65.20	7	24	69	Migajon arenoso
SW barranca Tlalquecotchcottl	0.84	2.27	61.93	7	26	67	Migajon arenoso
F1	1.29	2.34	44.67	4	20	76	Arena migajonosa
Pela gallina	1.07	1.94	44.94	6	14	80	Arena migajonosa
S Barranca Tlalquecotchcottl	1.26	2.32	61.02	4	26	70	Arena migajonosa
Chalchoapa NE de Tectorre	1.07	3.60	70.35	4	22	74	Migajon arenoso
La Laguna Xahuehahuatlalco	0.84	2.45	65.69	5	22	73	Migajon arenoso
La Joya	0.76	2.59	70.67	9	44	47	Migajon

B) Parque Nacional Zoquiapan y Anexas

La DA presento valores de 0.7 en NW de Texola y de 1.20 g cm⁻³ en D11 Cañada La Coquia en relación a la DR el valor más bajo fue de 1.39 g cm⁻³ para el sitio O1 Sn. Pedro y el más alto es de a 3.55 g cm⁻³ para S de la Barranca del paso del muerto, valores que similares se reportaron por Valderrábano (2005).

En valores de EP el más alto se presento en S de la Barranca del paso del muerto (73.50%) y el menor se presento en D11 Cañada La Coquia (30.96%) la variación del EP es por la cantidad de MOS y por la actividad de la flora y fauna del suelo.

Son suelos en su mayoría arenosos, porque presentan entre 43 y 70% de ella, lo que quiere decir que presentan una textura gruesa (Cuadro 8).

Cuadro 8. Propiedades físicas de los suelos del Parque Nacional Zoquiapan y Anexas.

Sitio	DA DR		EP	Arcilla Limo Arena			Clase textural
	—g cm ⁻³ —			%			
S de Los Colgados	0.82	2.37	65.26	25	32	43	Migajon
NW de Texola	0.70	2.55	69.37	13	38	49	Migajon
S de La Vaquería	0.85	2.69	67.39	17	32	51	Migajon
D11 Cañada La Coquia	1.20	1.74	30.96	8	22	70	Migajon arenoso
Cañada Atlapulco	0.92	1.97	52.90	21	32	47	Arena migajonosa
S de la Barranca del paso del muerto	0.87	3.55	73.50	14	40	46	Migajon arenoso
Sn Miguel Tlaixpan	0.88	1.83	52.22	17	38	45	Migajon
Pto. 8	1.09	1.72	36.40	6	26	68	Migajon arenoso
O1 Sn.Pedro	0.87	1.39	37.41	8	26	66	Migajon arenoso
Puerto Mancilla	1.04	1.97	46.55	16	26	58	Migajon arenoso

C) Reserva de la Biosfera El Cielo, Tamaulipas

En cuanto a la DA se presentan valores de 0.32 a 1.15 g cm⁻³ y DR 0.68 a 2.58 g cm⁻³, estos valores se presentaron ya que en la RBC se encuentra una gran cantidad de mantillo que es el sustrato que usa la vegetación arbórea como soporte, porque su roca se encuentra en pleno afloramiento y por lo tanto el suelo esta en formación; motivo que provoca que los valores de EP superen el 53.48 % y alcanzando datos de hasta 85.80% que es un suelo muy permeable y permite la entrada de aire entre los poros. Su textura en la mayoría es migajon-arenosa, presentando en su mayoría altos porcentajes de arena (Cuadro 9).

El sitio del Valle del ovni no se presenta como sitio de muestreo ya que corresponde a un perfil al que se le realizaron todos los parámetros físicos.

Cuadro 9. Propiedades físicas de los suelos de la Reserva de la Biosfera El Cielo.

Sitio	g cm ⁻³		%				Clase textural
	DA	DR	EP	Arcilla	Limo	Arena	
S de Julilo	0.95	3.27	71.00	26	22	52	Migajon arcilloso arenoso
NE de la Gloria	0.35	2.48	85.80	18	20	62	Migajon arenoso
S de la Gloria	0.66	2.41	72.35	15	38	47	Migajon
SW de la Gloria	0.68	1.88	63.96	12	32	56	Migajon arenoso
SW de Julilo	0.79	2.72	70.58	26	30	44	Migajon
W de la Gloria	0.32	0.68	53.48	ND	ND	ND	ND
El Porvenir	0.85	1.98	56.65	34	20	46	Migajon arcilloso
NE del Porvenir	0.71	2.44	70.54	20	28	52	Migajon
NE del Porvenir	0.67	1.79	62.17	20	14	66	Migajon arcillo-arenoso
N del Porvenir	0.84	2.67	68.53	2	22	76	Arena migajonosa
NE del Porvenir	0.70	1.64	57.45	18	20	62	Migajon arenoso
NW del Porvenir	0.79	2.03	59.98	18	22	60	Migajon arenoso
W del Porvenir	0.68	1.76	60.80	22	22	26	Migajon arcilloso arenoso
NW del Porvenir	0.64	1.86	60.90	24	32	44	Migajon

Con los resultados de DA, el valor promedio es de 2.02 g cm⁻³, presentando el más bajo la RBC (0.67 g cm⁻³) y el más alto PNIP (1.03 g cm⁻³), teniendo presente que los suelos que presentan densidades bajas es a consecuencia del alto contenido de materia orgánica que se encuentra en el suelo, como es el caso de la RBC, y los suelos que presenta densidades altas es por que presentan grandes cantidades de arena, el PNIP es el que presenta el mayor valor de arena (Cuadro 9).

Los altos valores de DA, no siempre permiten que la raíces penetre bien pero Smith y Woollard; 1969 Citados por Prichett, 1991 informaron que la raíces de plántulas de *Pinus contorta* de dos años penetraron suelos compactados a densidades de 1.32, 1.45 y 1.59 g cm⁻³. Para los géneros aquí estudiados los que se desarrollaron con DA en el suelo más baja fue *Quercus* (0.8225 g cm⁻³) y en la más alta *Cupressus* (1.1275g cm⁻³) y en las especies la más alta es para *P. hartwegii* (1.03 g cm⁻³) y la más baja *Q. crasifolia* (0.31 g cm⁻³).

Para la DR o densidad de partícula el valor promedio es de 2.02 g cm⁻³ para las ANPs, el resultado es menor a los que presentan la mayoría de los suelos (2.60 a 2.75 g cm⁻³) ya que estos presentan cuarzo, feldespato, y silicatos coloides que constituyen por lo regular la mayor porción de los suelos minerales, el bajo valor que se presenta en los suelos de las ANPs, es debido a la cantidad de materia orgánica que se presenta ya que pesa menos que un

volumen de sólidos minerales, lo que da como consecuencia que la DR se vea afectada. (Cuadro 9. Para la DR los valores más altos en género y especies los presentan *Quercus* (2.2 g cm⁻³) y *Q. crasifolia* (0.7 g cm⁻³) y los bajos fueron para *Pinus* (1.6 g cm⁻³) y *P. hartwegii* (2.3 g cm⁻³) respectivamente. Con resultados estadísticos teniendo diferencias significativas entre ANP (F=3.04; P≤0.05), pendiente (F=1.58; P≤0.05), exposición (F=2.06; P≤0.05) y altitud (F=1.48; P≤0.05).

El EP también está en función de la MO y por la actividad de la flora y fauna, pero para el caso de los suelos de la ANP presentaron alta porosidad y aireación y por lo tanto la infiltración de agua, el valor promedio de EP para las ANP es 53.21%, lo que es un valor adecuado para suelos de bosques de coníferas. En cuanto a géneros el valor más alto lo presentan suelos bajo *Abies* (56.26%) y el menor suelos bajo *Cupressus* (38.15%) y en especies el mayor estuvo en suelos bajo *A. vejarii* (66.09%) y el menor en suelos bajo *P. teocote* (42.66%).

Con base al análisis estadístico, la DA presentó diferencias significativas respecto a las ANP, ya que son suelos con características diferentes entre ellas y por lo tanto también con la pendiente y exposición del terreno, y en relación a la vegetación que es diferente por el gradiente de altitud.

La DR y EP presentan efectos significativos con las mismas variables que son ANP, pendiente, exposición y altitud del terreno (Apéndice I).

Los nombres de las clases de texturas se da con base a la cantidad de arena, limo y arcilla, para los suelos de los bosques de las ANP contienen más del 50% de arena, y los suelos en donde predominan éstos, presentan buen drenaje y aireación, por tal motivo se les considera suelos arenosos y tomando el triángulo de texturas (FitzPatrick, 1984), para el PNIP se presentaron tres tipos de textura migajón, migajón arenoso y arena migajonosa, las mismas para el PNZA y para la RBC se encontraron cinco: migajón, migajón arcilloso, migajón arenoso, migajón arcillo-arenoso y arena migajonosa. Los porcentajes de arcilla, limo y arena para las tres ANP se puede ver en el cuadro 10.

La arcilla tiene diferencias significativas con ANP, pendiente, exposición y altitud. El limo y la arena presentan diferencias significativas con ANP, pendiente, exposición, género, especie y altitud (Apéndice I).

Cuadro 10. Propiedades físicas de los suelos de las ANP

ANP	DA	DR	EP	Arcilla	Limo	Arena	Clase textural
	g cm ⁻³			%			
PNIP	1.03 _a	2.2 _a	50 _b	6 _c	24 _c	70 _a	Arena migajonosa
PNZA	0.99 _b	2 _b	46 _c	12 _b	31 _a	57 _b	Migajon arenoso
RBC	0.67 _c	1.9 _b	64 _a	21 _a	29 _b	50 _c	Migajon

Dentro de columna, letras diferentes representan diferencias significativas $P \leq 0.05$.

12.4. PARÁMETROS QUÍMICOS DEL SUELO

A) Parque Nacional Iztaccíhuatl-Popocatepetl

Para el PNIP se encontró que los suelos presentan un pH activo de 4.6 a 6.7 unidades, con fuerte acidez (4.5-5) en los sitios La papa, La laguna, Tlalcomajada y la Joya, los fuertemente ácidos (5.1-5.5) en los sitios W-D14, Valle, El Americano, Agua escondida y Chalchoapa NE de Tetorre, suelos con moderada acidez (5.6-6.0) en Barranca Apapaxo, La ventana, SE de la Barranca Tlalquecotchtotl y SW de la Barranca Tlalquecotchtotl, y suelo de ligera acidez (6.1-6.5) en Pela gallina, La venta y SE de la Barranca Tlalquecotchtotl y suelos neutros (6.6-7.3) al S de el Salto.

En todos los suelos de los sitios de muestreo se presentó población de *Pinus* los cuales presentan tolerancia y eficiencia para desarrollarse en suelos muy ácidos (Pritchett, 1991). Para el pH potencial se encontraron valores de 3.8 a 6.6, la acidez que presentó en general el PNIP, se podría atribuir al material parental (andesitas) y a la descomposición del mantillo que puede ser muy lento, con una tasa de renovación que varía de uno a tres años en los climas templados y fríos. En la cubierta forestal se almacenan cantidades relativamente grandes de nutrientes.

El comportamiento del pH potencial es similar al que se observó para el pH activo con la diferencia de que los valores de pH, como se esperaba, fueron más bajos (Cuadro 6).

Los valores de conductividad eléctrica (CE) del suelo fueron de 0.02 a 0.07 dS m⁻¹, lo que para la Norma Oficial Mexicana, 1996 son suelos libres de sales, y los datos obtenidos

de CE son similares con los que reportaron para este parque Granados-Damián (2003) y García (2003).

Para el PNIP se encontró que los suelos presentan un pH activo de 4.6 a 6.7 unidades, con fuerte acidez (4.5-5) en los sitios La papa, La laguna, Tlalcomajada y la Joya, los fuertemente ácidos (5.1-5.5) en los sitios W-D14, Valle, El Americano, Agua escondida y Chalchoapa NE de Tettere, suelos con moderada acidez (5.6-6.0) en Barranca Apapaxo, La ventana, SE de la Barranca Tlalquecotchtotl y SW de la Barranca Tlalquecotchtotl, y suelo de ligera acidez (6.1-6.5) en Pela gallina, La venta y SE de la Barranca Tlalquecotchtotl y suelos neutros (6.6-7.3) al S de el Salto.

En todos los suelos de los sitios de muestreo se presentó población de *Pinus* los cuales presentan tolerancia y eficiencia para desarrollarse en suelos muy ácidos (Pritchett, 1991). Para el pH potencial se encontraron valores de 3.8 a 6.6, la acidez que presentó en general el PNIP, se podría atribuir al material parental (andesitas) y a la descomposición del mantillo que puede ser muy rápido, con una tasa de renovación que varía de uno a tres años en los climas templados y fríos. En la cubierta forestal se almacenan cantidades relativamente grandes de nutrientes.

El comportamiento del pH potencial es similar al que se observó para el pH activo con la diferencia de que los valores de pH, como se esperaba, fueron más bajos (Cuadro 6).

Los valores de conductividad eléctrica (CE) del suelo fueron de 0.02 a 0.07 dS m⁻¹. Los datos obtenidos de CE son similares con los que reportaron para este parque Granados-Damián (2003) y García Hernández (2003).

La cantidad promedio de MOS para el PNIP fue de 123.146 Mg ha⁻¹ presentando el valor más alto Valle (209.29 Mg ha⁻¹) y el menor en La Papa Acatzi (9.71 Mg ha⁻¹) y sabiendo que el aproximadamente el 58% de la MOS corresponde a COS, se presentó de la misma manera el mayor y el menor valor en los mismos sitios (Cuadro 10) teniendo un promedio de 71.424 Mg ha⁻¹.

Para el caso de los nutrimentos del suelo se presentan dos de los más importantes para el crecimiento de la planta, P y N, del primero se obtuvo el P-disponible y el P-total y para el segundo el N-total, para el P-disponible se encontraron los valores de 0.002 a 0.392 Mg ha⁻¹ en La Ventana y el Valle respectivamente (Cuadro 10) y el total 1.38 y 3.43 Mg ha⁻¹ en La Ventana y La Laguna Xahuehahuatlaco, superando el valor más alto de P-disponible en más de tres veces con el menor valor de P-total.

La MOS es la que aporta mayor contenido de P al suelo el valor promedio de P-disponible es de 0.0818 Mg ha⁻¹ y para P-total es 1.968 Mg ha⁻¹. Mg ha⁻¹, son valores muy altos para la Norma Oficial Mexicana (1996).

Para el N, que es el macronutrimento que se encuentra en el suelo más importante para las plantas, presentó valores de 0.55 y 5.68 Mg ha⁻¹, en el S de el salto y Agua escondida, para el COS son de 5.63 y 121.39 Mg ha⁻¹.

Las relaciones C:N son parámetros utilizados en la caracterización del nitrógeno y la materia orgánica del suelo y afectan la actividad de los microorganismos.

La relación C:N presento valores de 2.9 a 88.5, lo que indica que en 8 de 20 sitios en el intervalo de relación C:N (2.9 a 18.3), el N no es elemento limitante para esos sitios y en los 12 restantes el N se encuentra en menor concentración ya que los valores de la relación superan la relación 31 alcanzando hasta la relación de 88 (Cuadro 11).

Para C:P las relaciones se presentan de 1.8 a 47.7, los valores de 1.8 y 7.8 son las relaciones más pequeñas y son los sitios donde le P no es el elemento limitante y los sitios restantes el P se encuentra en pequeñas concentraciones.

Las relaciones de N:P son las que presentan los valores mas pequeños de 0.3 a 2.5 y con las relaciones de C:N y C:P se puede saber que el P y N son elementos limitantes para el PNIP.

La relación de P-total y P-disponibles se presenta de 26 y 263 lo que representa para las plantas que en unos sitios se presenta una buena disponibilidad del elemento.

Cuadro 11. Propiedades químicas de los suelos del Parque Nacional Iztaccíhuatl-Popocatepetl

Sitio	pH _{Activo}	pH _{Potencial}	CE	MOS	N _{Total}	COS	P _{Disp}	P _{Total}	C:N	C:P	N:P	PT:PD
	1:2		dS m ⁻¹	Mg ha ⁻¹								
W-D14	5.4	4.9	0.03	23.6	1.9	13.7	0.315	-	7.2	-	-	-
Barranca Apapaxo	5.9	5.1	0.05	167.4	2.5	97.1	0.034	2.1	38.8	46.2	1.2	61.8
La Papa Acatzi	5.0	3.6	0.07	9.7	1.9	5.6	0.059	3.2	2.9	1.8	0.6	54.2
S de el salto	6.7	5.3	0.04	91.6	0.6	53.1	0.054	2.1	88.5	25.3	0.3	38.9
La ventana	5.6	4.7	0.03	18.7	0.8	10.9	0.002	1.4	13.6	7.8	0.6	700
O16	6.0	5.3	0.06	29.5	1.4	17.1	0.073	-	12.2	-	-	-
SE barranca Tlalquecotchcottl	6.3	5.4	0.04	47.4	1.1	27.5	0.077	2	25	13.8	0.6	26
Valle	5.1	4.4	0.05	209.3	1.7	121.4	0.392	-	71.4	-	-	-
El Americano	5.4	4.4	0.04	164.3	1.9	95.3	0.027	2	50.1	47.7	1	74.1
Agua escondida	5.2	5.1	0.06	147.1	5.7	85.3	0.011	2.7	15	31.6	2.1	245.5
La venta	6.2	4.5	0.06	112.3	4.2	65.2	0.008	1.7	13.8	38.4	2.5	213
S Barranca Tlalquecotchcottl	5.7	4.6	0.02	157.9	5	91.6	0.020	2	18.3	45.8	2.5	100
Tlalcomajada E de Tetorre	4.9	3.8	0.04	135.9	2.2	78.8	0.017	3.2	35.8	24.6	0.7	188.3
SW barranca Tlalquecotchcottl	5.6	4.4	0.03	199	3.7	115.4	0.021	2.1	31.2	55	1.8	100
F1	5.7	4.8	0.04	35.4	1.6	20.5	0.378	-	12.8	-	-	-
Pela gallina	6.1	6.6	0.05	101.6	3.7	59	0.008	2.1	15.9	28.1	1.8	263
S Barranca Tlalquecotchcottl	5.8	4.5	0.03	167.4	3.9	97.1	0.025	3.2	24.9	30.3	1.2	128
Chalchoapa NE de Tetorre	5.2	4.2	0.03	97.1	1	56.3	0.021	2.1	56.3	26.8	0.5	100
La Laguna	4.6	3.8	0.04	145.6	2.8	84.5	0.015	3.4	30.2	24.9	0.8	226.7
Xahuehualco	4.8	4.1	0.07	156.2	2.5	90.6	0.079	-	36.2	-	-	-
La Joya	4.8	4.1	0.07	156.2	2.5	90.6	0.079	-	36.2	-	-	-

B) Parque Nacional Zoquiapan y Anexas

En el PNZA los pH activos tienen valores de 4.9 a 5.9 unidades, el sitio que presenta muy fuerte acidez en el suelo es el S de la Vaquería, fuerte acidez son los sitios de S de los colgados, Pto. 8, 01 Sn. Pedro y el puerto Mancilla y los que presentan moderada acidez en el suelos son NW de Texola, D11, Cañada Atlapulco, S de la Barranca y Sn. Miguel, para el pH potencial los valores son de 4.7 a 5.3 que corresponden a lo reportado por Valderrábano (2005) para este parque.

En relación a la CE se encontraron valores entre 0.024 a 0.133 dS m⁻¹, los valores pequeños que se presentan de CE es a consecuencia de que los suelos son ácidos y por lo

tanto bajo en concentraciones de sales, estas datos corresponden a los que reporto Valderrábano (2005) para este parque.

Para el PNZA el promedio de MOS fue de 110.558 Mg ha⁻¹ teniendo el valor más alto D11 Cañada La Coquia (173.43 Mg ha⁻¹) y el menor en el S de Los colgados (62.32 Mg ha⁻¹), para el P-disponible se encontraron los valores de 0.02 a 0.79 Mg ha⁻¹ y el total 2.96 Mg ha⁻¹, triplicando el mayor valor de P-disponible, conociendo que la disponibilidad de P en los suelos está regulada por procesos geoquímicos y biológicos y preferentemente los procesos biológicos, ya que el P asimilable por la planta deriva de la materia orgánica. Y los valores coinciden que al disminuir la MOS también disminuye el P.

y para el N los valores fueron de 0.25 y 2.55 Mg ha⁻¹, siendo elementos que se encuentran en la MOS en forma orgánica que son también a menudo llamados nutrientes vegetales primarios porque la planta los consume en cantidades relativamente grandes y son los que más a menudo están deficientes en el suelo (Cuadro 12).

La relación C:N presentan datos de 22.7 y 178.3 para la relación C:P los valores fueron de 12.2 a 68.6, para N:P son de 0.1 a 0.5 y para P-total y P-disponible son de 3.8 a 4.7.

Cuadro 12. Propiedades químicas de los suelos del Parque Nacional Zoquiapan y Anexas.

Sitio	pHActivo	pHPotencial	CE	MOS	N _{Total}	Mg ha ⁻¹			C:N	C:P	N:P	PT:PD
						COS	P _{Disp}	P _{Total}				
S de Los Colgados	5.2	4.7	0.02	62.3	1.5	36.2	0.63	2.96	24.1	12.2	0.5	4.7
NW de Texola	5.7	5.3	0.07	81.3	1.3	47.2	0.65	2.96	36.3	15.9	0.4	4.6
S de La Vaquería	4.9	4.9	0.05	92.1	0.3	53.5	0.78	2.96	178.3	68.6	0.1	3.8
D11 Cañada La Coquia	5.7	5.2	0.05	173.4	2.6	100.6	0.04	-	38.7	-	-	-
Cañada Atlapulco	5.7	5.1	0.07	108.4	2.1	62.9	0.02	-	30	-	-	-
S de la Barranca del paso del muerto	5.5	5.1	0.04	73.2	1.1	42.5	0.71	2.96	38.6	59.9	0.4	4.2
Sn Miguel Tlaixpan	5.9	4.8	0.09	135.5	1.3	78.6	0.02	-	60.5	-	-	-
Pto. 8	5.5	5.1	0.04	70.5	1.8	40.9	0.09	-	22.7	-	-	-
O1 Sn.Pedro	5.5	5.1	0.13	127.4	2.1	73.9	0.05	-	35.2	-	-	-
Puerto Mancilla	5.5	4.9	0.05	181.6	2.1	105.3	0.03	-	50.1	-	-	-

C) Reserva de la Biosfera El Cielo

En la RBC los suelos presentaron su pH activo que va de 4.4 a 6.9 unidades a comparación de las otras dos ANPs en esta zona se presenta extrema acidez en el N del Porvenir, fuerte acidez: El Porvenir, S de la Gloria, SW de Julilo, W de la Gloria, NE de el Porvenir, y NW de el Porvenir, los que presenta moderada acidez S de Julilo, NE de la Gloria, SW de la Gloria, NE de el Porvenir, NW del Porvenir y W del Porvenir y por ultimo los neutros al NE del Porvenir; para el pH potencial hay valores de 3.78 a 5.23 lo que hace su relación entre ambos pHs.

Los suelos llegan a ser ácidos aún desarrollados sobre materiales parentales alcalinos, como los de la RBC, por el lavado del agua de lluvia de los cationes básicos (Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ , Na^+) y el reemplazo de muchos de ellos por H^+ del ácido carbónico (H_2CO_3) formado de carbonatos o dióxidos de carbono disueltos y también por cationes de hidróxidos de aluminio disuelto (Donahue *et al.*, 1981).

Para la CE se presenta valores de 0.03 y 0.56 dS m^{-1} en unos sitios se presentan bajos y en otros lugares se presentan valores más altos, es por la cantidad de sales que se presentan en el suelo, ya que son suelos muy lavados.

En la RBC el promedio de MOS fue de $228.258 \text{Mg ha}^{-1}$ teniendo el valor más alto al NE de la Gloria (571.7Mg ha^{-1}) y el menor en Valle del Ovni (16.78Mg ha^{-1}), para el P-disponible se encontraron los valores de 0.002 a 0.138Mg ha^{-1} Valle del Ovni y NE de la Gloria respectivamente y el P-total de 0.76Mg ha^{-1} y 1.90Mg ha^{-1} . Para el N los valores fueron de 1.16 y 9.66Mg ha^{-1} (Cuadro 13).

Para las relaciones de C:N, C:P, N:P y P_T:P_D se encontraron valores de 19 y 72.2, 12.8 y 195.6, 0.6 y 10.8 y finalmente 11.6 y 316.7 respectivamente.

Cuadro 13. Propiedades químicas de los suelos de la Reserva de la Biosfera El Cielo

Sitio	pHActivo	pHPotencial	CE dS m ⁻¹	MOS	Mg ha ⁻¹				C:N	C:P	N:P	PT:PD
					N _{Total}	COS	P _{Disp}	P _{Total}				
S de Julilo	6	4.7	0.03	111.7	2.2	64.8	0.011	0.94	29.5	68.9	2.3	85.5
NE de la Gloria	5.7	5.2	0.16	571.7	6.2	331.6	0.138	1.90	53.5	174.5	3.3	13.8
S de la Gloria	5.4	5.1	0.08	207.5	3.7	120.4	0.045	1.90	32.5	63.4	1.9	42.2
SW de la Gloria	5.7	5.2	0.12	430.5	3.7	249.7	0.123	1.90	67.5	131.4	1.9	15.4
SW de Julilo	5.1	4	0.06	159.9	2.3	92.7	0.012	1.40	40.3	66.2	1.6	116.7
W de la Gloria	5.4	-	0.28	465.8	9.7	270.2	0.012	1.90	27.9	142.2	10.8	158.3
El Porvenir	4.5	4.2	0.24	143.8	1.2	83.4	0.006	1.90	70	43.9	0.6	316.7
NE del Porvenir	5.8	5.3	0.12	217.7	1.9	126.3	0.006	0.90	66.5	140.3	2.1	150
NE del Porvenir	5.2	5	0.17	159.9	4.1	92.8	0.026	1.49	22.6	62.3	2.8	57.3
N del Porvenir	4.4	3.8	0.04	149.4	1.2	86.6	0.024	0.91	72.2	95.2	1.3	37.9
NE del Porvenir	6.9	5	0.56	202.4	5.2	117.4	0.128	1.49	22.6	78.8	3.5	11.6
NW del Porvenir	5.8	4.9	0.25	216.8	6.8	125.8	0.005	1.08	19	116.5	6.3	216
W del Porvenir	5.9	5.2	0.09	364.2	4	211.2	0.007	1.08	53	195.6	3.7	154.3
NW del Porvenir	5.2	4	0.05	200.5	3.1	116.3	0.013	1.02	38	114	3	78.5

En los suelos de las ANP el valor promedio de pH activo fue de 5.5 registrándose en PNIP el más alto (5.5) y el más bajo en la RBC (5.4), clasificando estos suelos como moderadamente ácidos (Norma Oficial Mexicana, 2006) cual está en correspondencia con la mayoría de los suelos forestales de coníferas que son de moderada a extremadamente ácidos, como resultado de la liberación de ácidos orgánicos durante la descomposición de mantillo. Por lo general los suelos que sostienen a las coníferas tienden a ser más ácidos que aquellos que sostienen a especies de madera dura (roble, cedro y encino) ya que especies como los *Pinus* y los *Abies* crecen mejor en suelos muy ácidos (Pritchett, 1991).

Uno de los géneros más tolerantes a la acidez del suelo es el *Abies* pero puede desarrollarse también en sustratos calizos como los que se localizan en la RBC, que con el

importante aporte de MO, origina suelos ácidos, ya que en los resultados se encontró que los suelos más ácidos (con valor promedio de 5.23) son los que soportan al género *Pinus*.

Y la especie que tolera a los suelos más ácidos es *Pinus hatwegii* cuyas hojas aportan altas cantidades de ligninas y otras sustancias de tendencia ácida y los suelos menos ácidos son aquellos en donde se encuentran individuos del género *Cupressus* y con el análisis estadístico se encontraron, para el pH del suelo, se presentó un efecto significativo entre la altitud, la pendiente y exposición del terreno; y en cuanto a la vegetación presente en el suelo (Apéndice I).

Para el valor de pH potencial, determinado en KCl 1N, el valor promedio fue de 4.70 para las tres zonas comportándose de la misma manera que el pH activo y presentado un efecto significativo entre las ANP, también como el pH activo, con la exposición y pendiente del terreno, como con la vegetación presente en el suelo y la interacción ANP*especie (Apéndice I).

La CE presenta valores similares para el PNIP y PNZA 0.04 y 0.06 dS m⁻¹ respectivamente y duplicando el dato para la RBC 0.14 dS m⁻¹, recordando que la CE se mide en base a la concentración de sales disueltas en el suelo, se podría decir que la RBC se encuentran en mayor concentración las sales por ser suelos lixiviados, presentando efectos significativos entre las ANP y la exposición y pendiente del terreno (Apéndice I) se debe principalmente a que las ANP entre ellas son muy diferentes.

La MOS interviene en procesos químicos de gran importancia como en el suministro de elementos nutritivos por la mineralización en particular por la liberación de N, P, S y micronutrientes disponibles para las plantas, la estabilización de la acidez del suelo (por su poder amortiguador), la capacidad de intercambio aniónico, donde se acumulan nitratos, fosfatos y sulfatos.

El valor promedio de MOS fue de 167.61 Mg ha⁻¹, el menor lo presentó el PNZA y el mayor la RBC, teniendo doble cantidad (Figura 18).

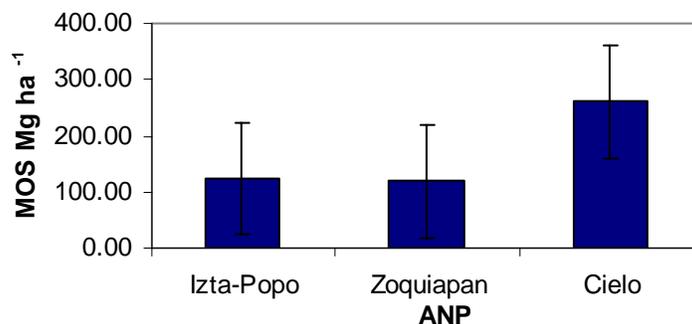


Figura 18. MOS de la ANP

La acumulación de la cantidad de MOS se debe principalmente al tipo de vegetación que se presenta. En cuanto a géneros, el suelo donde predomina el género *Quercus* fue donde se encontró la mayor cantidad (178.36 Mg ha⁻¹) de MOS y el suelo donde se encuentra el *Cupressus* donde se encontró la menor cantidad (53.32 Mg ha⁻¹), debido a las hojas latifoliadas que presenta el género *Quercus* y las hojas escamiformes que presentan los *Cupressus*. Las especies bajo las que se encontró la mayor cantidad de MOS fue *Quercus crasofolia* y en donde se encontró la menor cantidad de MOS fue *P. ayacabnute*.

La cantidad de N y MOS en el suelo en un momento determinado, depende de muchos factores climáticos y edáficos así como de las perturbaciones naturales y humanas que influyen en relación entre las adiciones vegetales y animales (entrada) y la tasa de descomposición (salida). El N-total de los suelos se encuentra sobre todo en la capa de humus de la cubierta forestal (Pritchett, 1991).

La cantidad de N depende de la cantidad de MOS ya que es la unidad que proporciona más nutrientes a este, los valores mayores se presentaron en la RBC y los menores en PNZA (Cuadro 14).

La cantidad de N determina la de C orgánico presente cuando existe la estabilidad. Así aumentando la cantidad de N presente en los residuos originarios, mayor será la posibilidad de acumulación de C combinado orgánicamente (Buckman y Brady, 1991). Los valores de COS se presentan de la misma manera que los de N para las ANP.

Las variables de MOS, N-total y C orgánico presentan de una manera muy ligada presentan efectos significativos con las mismas variables que son ANP, pendiente, exposición y altitud (Apéndice I).

Cuadro 14. Propiedades químicas de los suelos de las ANP.

ANP	pH _{Activo}	pH _{Potencial}	CE	MOS	N _{Total}	COS	P _{Disp}	P _{Total}	C:N	C:P	N:P	PT:PD
			dS m ⁻¹	Mg ha ⁻¹								
PNIP	5.4 _b	4.7 _c	0.04 _c	123.2 _b	2.7 _b	71.4 _b	0.27 _b	2.32 _a	26.4 _b	30.8 _b	0.8 _b	8.6 _a
PNZA	5.5 _a	4.9 _a	0.06 _b	119.1 _c	1.9 _c	69.1 _c	0.30 _a	2.96 _a	38.4 _b	23.3 _b	0.6 _b	9.9 _c
RBC	5.4 _b	4.6 _b	0.14 _a	260.6 _a	4.8 _a	151.1 _a	0.23 _c	1.43 _b	31.5 _a	105.7 _a	3.4 _a	6.2 _b

Dentro de columna, letras diferentes representan diferencias significativas $P \leq 0.05$.

La materia orgánica es la fuente principal de P para los árboles en muchos suelos. Hay menos P en el suelos que sostienen a los cultivos de coníferas que en los que se hallan bajo los árboles de maderas duras, probablemente reflejando la capacidad de las coníferas para sobrevivir y competir sobre suelos que contengan un nivel relativamente bajo de P.

Una gran proporción de P del suelo es aportado en combinaciones orgánicas; por el ataque de microorganismos, los compuestos orgánicos del P se mineralizan y así se cambian en combinaciones inorgánicas.

La cantidad promedio de P-total que se encontró en el suelo para la ANP fue de 6.71 Mg ha⁻¹ y de P-disponible para la planta es de 0.266 Mg ha⁻¹. Los valores mas altos se presentan en el PNZA y los más bajo en la RBC, esto se podría deber a que se encuentran en grandes cantidades el hierro, aluminio y magnesio para que ocurran reacciones con los iones fosfato, dando como resultado los hidroxifosfatos, provocando que el fósforo se vuelva insoluble y no disponible para las plantas.

Conociendo que la MOS es la que proporciona el mayor contenido de P al suelo en la figura 19 se puede ver la relación que existe entre ellos a lo largo del gradiente altitudinal para el PNIP no se cumple en relación a lo de la hipótesis, sino que con la línea de tendencia al aumentar la altitud disminuye la cantidad de MOS.

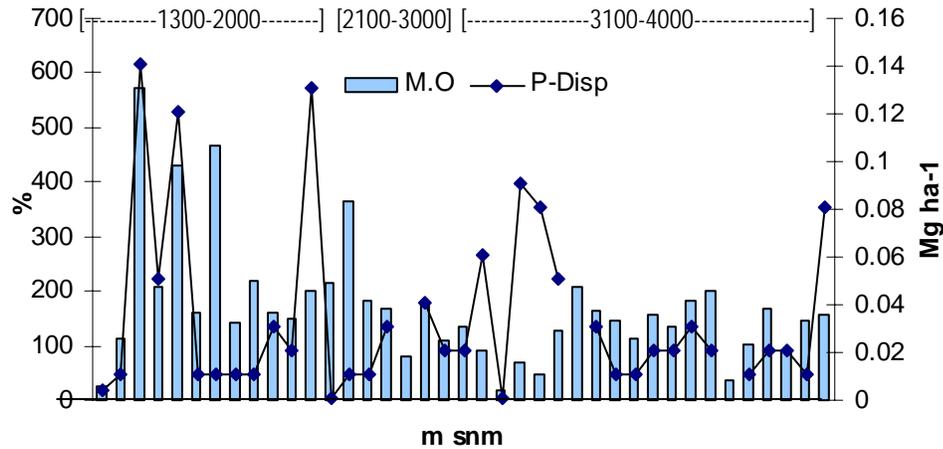


Figura 19. Relación P-Disponible-MOS

Como se observa en la figura 20 a, b y c que conforme aumenta la altitud disminuye la concentración de P-disponible y MOS, coincide a lo que reporta Campo (2003), que existen muchos factores que afectan la disponibilidad de nutrientes en relación a la altitud como la actividad microbiana, la geoquímica y la mineralogía.

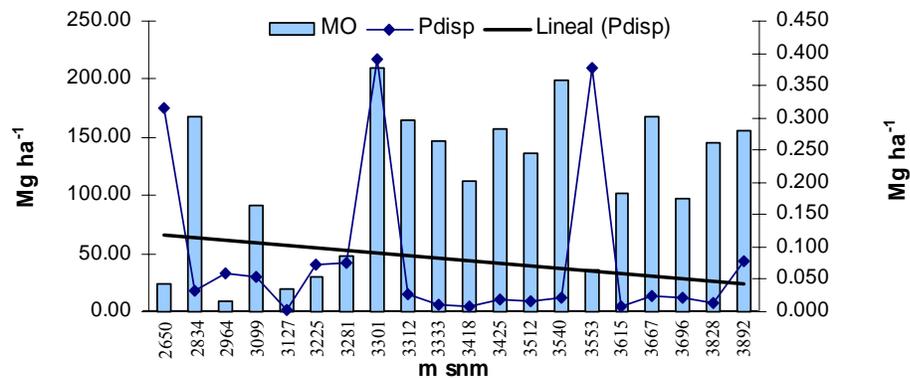


Figura 20 Relación de P-disponible y MOS del PNIP.

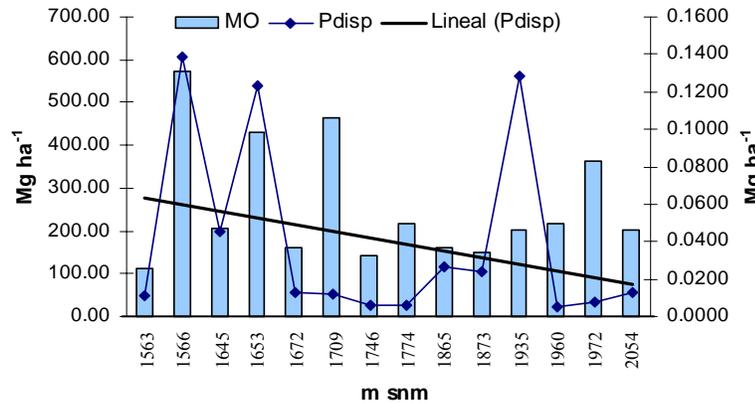


Figura 12b. Relación de P-disponible y MOS del PNZA.

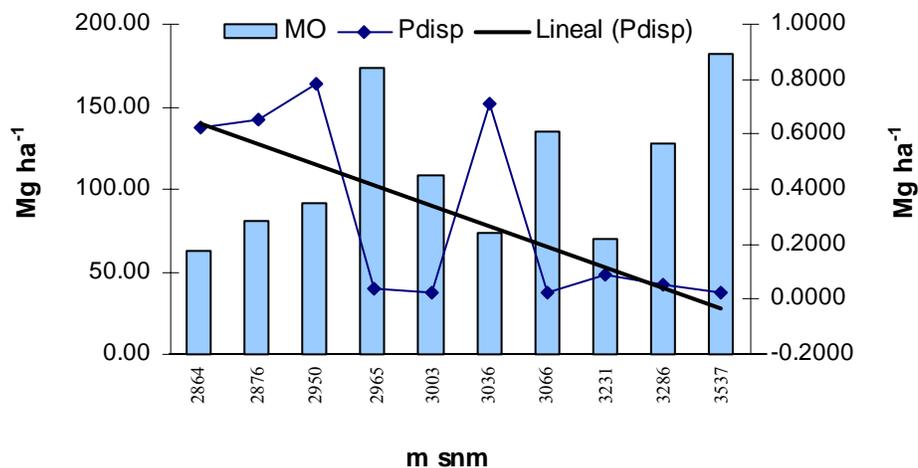


Figura 20c. Relación de P-disponible y MOS de la RBC.

El P-disponibles presentó diferencias significativas entre ANP ($F=544.08$; $P\leq 0.05$), pendiente ($F=805.02$; $P\leq 0.05$), exposición ($F=690.94$; $P\leq 0.05$), especies ($F=35.26$; $P\leq 0.05$) y altitud ($F=853.44$; $P\leq 0.05$). A diferencia, el P-total presentó diferencias con ANP ($F=30.31$; $P\leq 0.05$) y pendiente ($F=3.08$; $P\leq 0.05$).

La relación C:N fue variable en el sustrato a mineralizarse, según las especies y la edad de las mismas presentes en el mismo. La relación C:N en suelos templados-húmedos se estabiliza en las cercanías de 10 a 12:1. Pero para los suelos de climas fríos estas relaciones tienden a ser mayores que para los suelos de climas calientes. Los valores que presentaron las ANP van de los 26 hasta los 38 comparados con los que presentan las plantas jóvenes y

gramíneas que tienden a ser relaciones alrededor de 20, los valores son altos, pero al madurar su tejido se reduce el contenido de proteínas y minerales y aumenta el de lignina, incrementándose la relación C:N hasta valores mayores de 30 (Fassbender y Bornemisza, 1987).

Los valores de la relación C:P presentan mucha variabilidad, el valor promedio es de 53.3 para las ANP, y el menor se presenta en PNZA (23.3) y superando en casi cuatro veces la RBC (105.7). La relación C:P predice la competencia que hay entre los microorganismos y plantas por el P, en la práctica para el mejoramiento de suelos con altos contenidos de celulosa y ligninas no ocurre la competencia (Pierre, 2004). Stevenson y Cole (1999) dice que en valores menores de 200 ocurre una mineralización neta pero si en dado caso los valores llegaran a ser mayores de 300 se presentara inmovilización neta o en valores intermedios de la relación determina un balance entre mineralización-inmovilización (Cuadro 13).

Las relaciones C:N y C:P presentan efectos significativos entre ANP, pendiente, exposición y altitud (Apéndice II).

12.5. Actividad de las fosfatasa

A) Parque Nacional Iztaccíhuatl-Popocatepetl

Para este parque en el que se estudiaron 20 sitios en el gradiente altitudinal de 2,650 a 3,892 m snm, la actividad de la fosfatasa ácida en los suelos en promedio fue de $0.0224 \mu\text{g p-NP g}^{-1} \text{ h}^{-1}$ presentando el menor valor ($0.040 \mu\text{g p-NP g}^{-1} \text{ h}^{-1}$) los sitios denominados S barranca Tlalquecotchtotl que tienen una altitud de 3,425 y 3,667 m snm y la mayor actividad ($0.0520 \mu\text{g p-NP g}^{-1} \text{ h}^{-1}$) la presentaron los suelos de los tres sitios Valle (3,301 m snm), Tlalcomajada E de Tetorre (3,512 m snm) y La Laguna Xahuehahuatlalco (3,828 m snm). Del análisis de correlación se encontró que la actividad de la fosfatasa ácida tiene una correlación positiva con la altitud y aunque el valor de correlación es bajo es significativo

($r=0.24$; $p\leq 0.0016$). Aunque los valores reales no parezcan mostrar que el incremento en altitud tenga alguna influencia definida sobre la actividad de la fosfatasa ácida, la línea de tendencia en la figura 20, muestra que al incrementar la altitud, la enzima también aumenta su actividad.

En la figura 21 se puede observar que con respecto a la relación entre actividad de la fosfatasa ácida en el suelo y el P-disponibles, se observó que en 15 de 17 sitios el P-disponible disminuyó al aumentar la actividad de la fosfatasa ácida lo cual fue confirmado con la alta significancia mostrada en la correlación entre estas dos variables ($r=0.41$; $p\leq 0.0001$). El P-disponible tuvo con la altitud una muy baja correlación con signo negativo ($r=-0.16$; $p\leq 0.032$) que indica que con el aumento en la altitud disminuye.

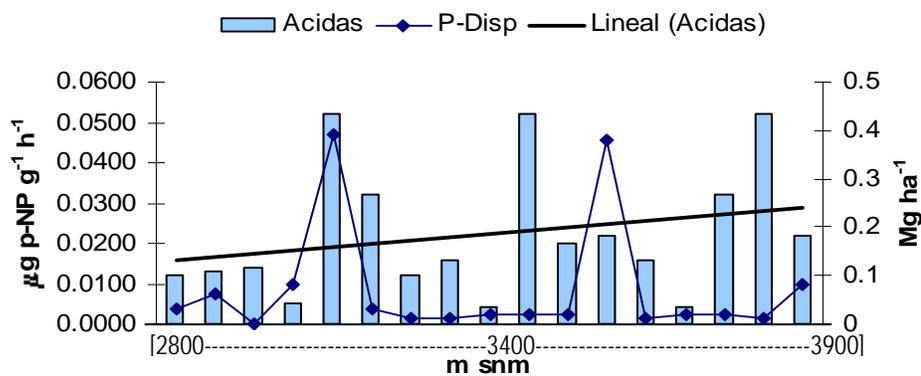


Figura 21. Actividad fosfatasa ácida en el PNIP

En relación a la actividad de fosfatasa ácida de los suelos bajo las especies estudiadas se encontró la menor concentración es suelos bajo la especie *Cupressus sp.* con el valor promedio $0.0045 \mu\text{g p-NP g}^{-1} \text{h}^{-1}$ mostrada del análisis estadístico y la mayor concentración fue $0.0424 \mu\text{g p-NP g}^{-1} \text{h}^{-1}$ en suelos bajo las especies *Pinus sp.*

Con el análisis de correlación la actividad de la fosfatasa ácida además de presentar correlación la altitud también presenta con: pendiente, N, pH acuoso y potencial, COS, MOS, C mantillo, Fosfatasa alcalina, P-disponible, DA, DR, EP, Arcilla, arena, P-total, N:P y P_T:P_D.

Para la actividad de la fosfatasa alcalina el valor promedio fue de $0.0205 \mu\text{g p-NP g}^{-1} \text{h}^{-1}$ presentando el menor valor el sitio La Ventana a una altitud de 3,127 m con una actividad de $0.0113 \mu\text{g p-NP g}^{-1} \text{h}^{-1}$ y la mayor actividad la presenta el S barranca Tlalquecotchtli (3,425 m) con un valor de $0.0533 \mu\text{g p-NP g}^{-1} \text{h}^{-1}$. Presenta correlación con altitud ($r=0.031$; $p \leq 0.0001$), pero los resultados no muestran lo antes dicho pero se muestra que con la línea de tendencia en la figura 22. Al aumentar la altitud también aumenta la actividad de la enzima. En los 15 de 17 sitios, al igual que para la ácida, se muestra que a mayor cantidad de P-disponible menor la actividad de la fosfatasa alcalina.

Para el P-disponible y la actividad de la fosfatasa alcalina no presentaron una correlación entre ellos.

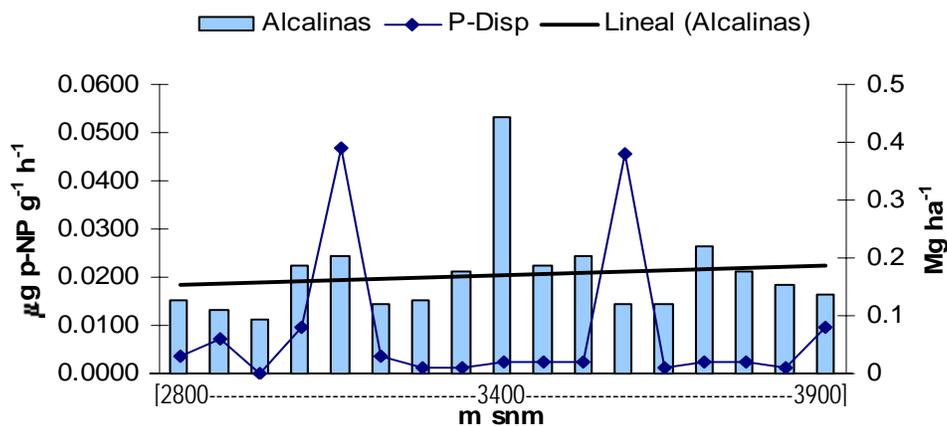


Figura 22. Actividad fosfatasa alcalina en el PNIP

Con base al ANOVA, la mayor actividad de la fosfatasa alcalina la presentaron los suelos bajo *Pinus hartwegii* con un valor medio de $0.024 \mu\text{g p-NP g}^{-1} \text{h}^{-1}$ y la menor concentración fueron los suelos bajo *Pinus pseudostrobus* con $0.010 \mu\text{g p-NP g}^{-1} \text{h}^{-1}$.

Además de la correlación con la altitud también se tuvo con la exposición, N, COS, MOS, C en mantillo, Fosfatasa ácida, C:P, EP, CE, arena y la relación N:P (Apéndice III).

B) Parque Nacional Zoquiapan y Anexas

Para la actividad de la fosfatasa ácida en promedio fue de $0.1118 \mu\text{g p-NP g}^{-1} \text{ h}^{-1}$ presentando la menor actividad la NW de Texola a una altitud de 2,876 m con una actividad de $0.0210 \mu\text{g p-NP g}^{-1} \text{ h}^{-1}$ y la mayor actividad la presenta Sn Miguel Tlaixpan a una altitud de 3,066 m con un valor de $0.3520 \mu\text{g p-NP g}^{-1} \text{ h}^{-1}$ (Figura 23). En relación a la actividad de la enzima y la altitud no presenta una correlación entre ellos.

En la figura 23 se puede observar que la fosfatasa tiende a aumentar con la altitud y esto se puede verificar con la línea de tendencia.

En la correlación con el P-disponible y la fosfatasa ácida se presentó de manera negativa ($r=-0.822$ y $P \leq 0.0001$) lo que indica que al aumentar una la otra disminuye.

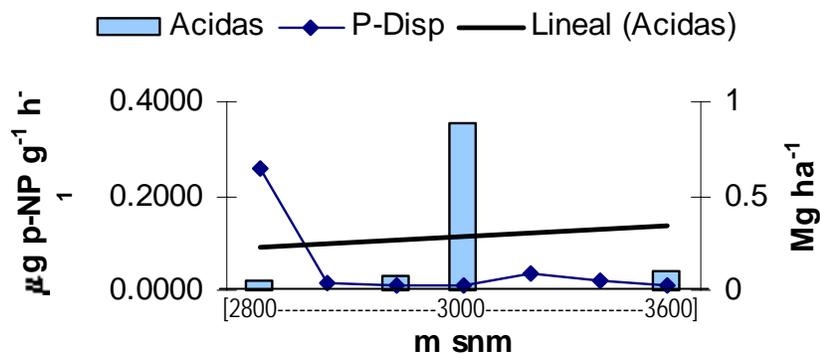


Figura 23. Actividad fosfatasa ácida en el PNZA

La mayor actividad de la fosfatasa ácida ($0.221 \mu\text{g p-NP g}^{-1} \text{ h}^{-1}$) la presentaron suelos bajo *Pinus sp.* al igual que el PNIP y la menor concentración ($0.029 \mu\text{g p-NP g}^{-1} \text{ h}^{-1}$) los suelos donde predominaba el *Quercus sp.*

La fosfatasa ácida de este parque tuvo correlación con género, especie, N, pH acuoso, COS, MOS, C mantillo, C:P, P-disponible, DA, DR, EP, CE, limo, arena, P-total, N:P y $P_T:P_D$.

Para la fosfatasa alcalina el valor promedio fue de $0.0226 \mu\text{g p-NP g}^{-1} \text{h}^{-1}$ presentando la menor actividad el sitio Puerto Mancilla a una altitud de 3637 m snm con una actividad de $0.0173 \mu\text{g p-NP g}^{-1} \text{h}^{-1}$ y la mayor actividad la presenta el NW de Texola (2,876 m) con un valor de $0.0323 \mu\text{g p-NP g}^{-1} \text{h}^{-1}$ (Figura 24). La fosfatasa alcalina al igual que la ácida no presenta correlación con la altitud.

En la figura 24 se observa que la fosfatasa alcalina al aumentar la altitud tiende a disminuir y esto se observa mejor con la línea de tendencia. Y con relación al P-disponible y altitud presenta una correlación mínima positiva ($r=0.32$; $P \leq 0.05$).

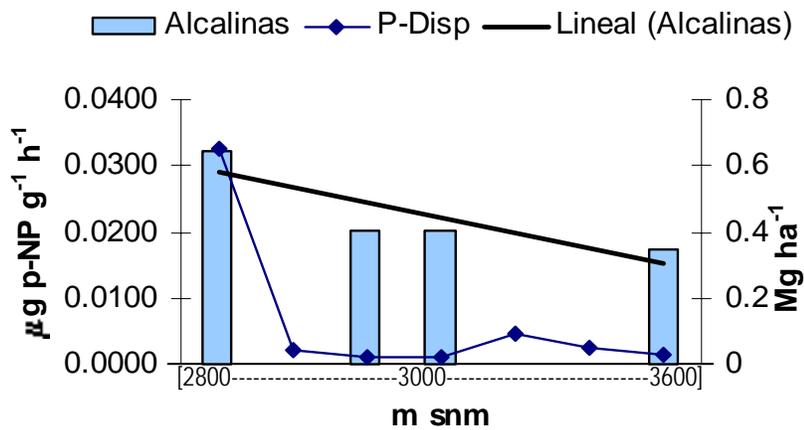


Figura 24. Actividad fosfatasa alcalina en el PNZA

La mayor actividad de la fosfatasa alcalina ($0.024 \mu\text{g p-NP g}^{-1} \text{h}^{-1}$) la presentaron suelos bajo *Pinus sp.* y la menor concentración ($0.017 \mu\text{g p-NP g}^{-1} \text{h}^{-1}$) los suelos donde predominaba el *Abies religiosa*. Coincidiendo la especie para las dos fosfatasas (ácida y alcalina) donde se presenta la mayor actividad.

La fosfatasa alcalina de este parque tuvo correlación con MOS, C en mantillo, C:P, P-disponible, DA, DR, EP, CE, arcilla, limo, arena y $P_T:P_D$.

Tomando en cuenta que el unico parque que la fosfatasa no presentan correlación entre ellas como se observo en el PNIP y como se vera más adelante para la RBC.

C) Reserva de la Biosfera El Cielo

Para la actividad de la fosfatasa ácida el valor promedio fue de $0.0500 \mu\text{g p-NP g}^{-1} \text{h}^{-1}$ presentando la menor actividad el sitio NE del Porvenir a una altitud de 1,935 m con una actividad de $0.0050 \mu\text{g p-NP g}^{-1} \text{h}^{-1}$ y la mayor actividad la presenta NE de la Gloria (1,566 m) con un valor de $0.1120 \mu\text{g p-NP g}^{-1} \text{h}^{-1}$ presentando una correlación negativa la fosfatasa ácida y la altitud ($r=-0.823$; $P\leq 0.0001$) y esto se puede explicar con la línea de tendencia que se observa en la figura 25 que al aumentar la altitud disminuye la actividad de la fosfatasa ácida.

Para la correlación entre P-disponible y fosfatasa ácida se presenta de manera positiva ($r=0.99$; $P\leq 0.0001$) que en 8 de 14 sitios al disminuir la cantidad de p-disponible aumenta la actividad de la fosfatasa ácida (Figura 25).

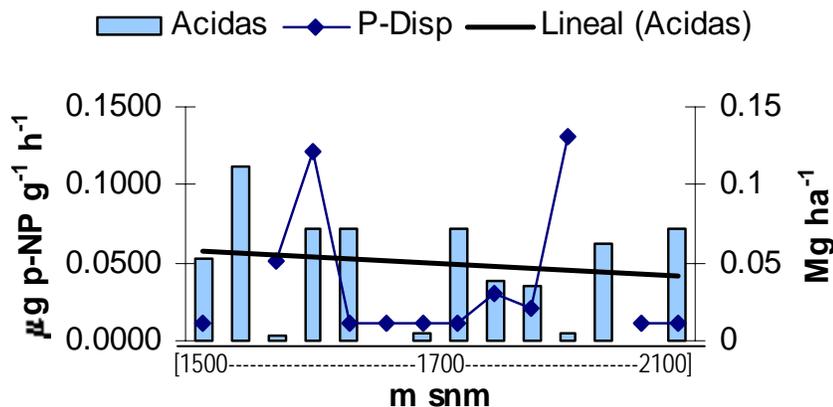


Figura 25. Actividad fosfatasa ácida en la RBC.

La mayor actividad de la fosfatasa ácida ($0.082 \mu\text{g p-NP g}^{-1} \text{h}^{-1}$) la presentaron suelos bajo *Pinus pseudostrubus* y la menor concentración ($0.0026 \mu\text{g p-NP g}^{-1} \text{h}^{-1}$) los suelos donde predominan las especies *Pinus sp.*, *Quercus sp.* y *Quercus crasifolia*.

La fosfatasa ácida tuvo correlación con pendiente, exposición, especie, N, pH acuoso y potencial, COS, MOS, Fosfatasa alcalina, P-disponible, DA, DR, EP, CE, arcilla, limo, arena y P foliar.

Para la fosfatasa alcalina el valor promedio fue de $0.0577 \mu\text{g p-NP g}^{-1} \text{ h}^{-1}$ presentando la menor actividad el sitio S de Julilo a una altitud de 1,563 m con una actividad de $0.0363 \mu\text{g p-NP g}^{-1} \text{ h}^{-1}$ y la mayor actividad la presenta el NE del Porvenir (1,865 m) con un valor de $0.1020 \mu\text{g p-NP g}^{-1} \text{ h}^{-1}$. Presentando correlación negativa la fosfatasa alcalina con altitud ($r=-0.84$, $P\leq 0.0001$) como se observa en la figura 26. Pero los datos reales no disponen de esta manera ya que la línea de tendencia muestra que al aumentar la altitud aumenta la actividad de la fosfatasa.

En la correlación de P-disponible y la fosfatasa alcalina ($r=0.99$; $P\leq 0.0001$) se presenta de la misma manera que para la fosfatasa ácida; pero el P-disponible se muestra que en el 50% de los sitios que a mayor actividad de la fosfatasa alcalina menor la concentración de este.

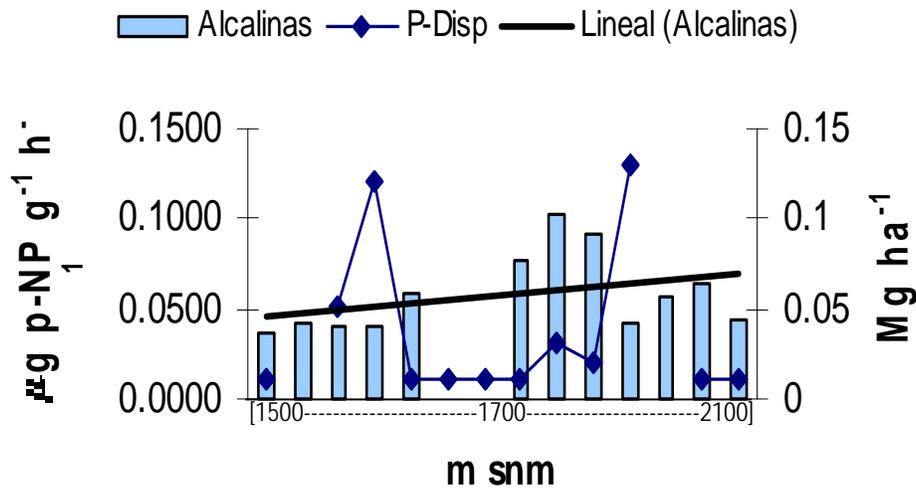


Figura 26. Actividad fosfatasa alcalina en la RBC.

La mayor actividad de la fosfatasa alcalina ($0.173 \mu\text{g p-NP g}^{-1} \text{ h}^{-1}$) la presentaron suelos donde predominan las especies *Pinus sp.*, *Quercus sp.* y *Quercus crasifolia* y la menor concentración ($0.029 \mu\text{g p-NP g}^{-1} \text{ h}^{-1}$) los suelos bajo *Pinus montezumae*.

La fosfatasa alcalina tuvo correlación con exposición, N, pH acuoso y potencial, COS, MOS, **Fosfatas ácida**, P-disponible, DA, DR, EP, CE, arcilla, limo, arena y P-foliar.

Con el análisis de correlación para esta reserva se verifica que es la única que tiene correlación con el P foliar el cual no se presenta en la ANP anteriores.

Para las ANP se presentó una mayor actividad de la fosfatasa ácida en los PNIP y PNZA con valores de 0.02224 y 0.1118 $\mu\text{g p-NP g}^{-1} \text{h}^{-1}$ respectivamente con diferencia significativa ($F=21.40$; $P\leq 0.05$), y una menor actividad de la fosfatasa alcalina con valores de 0.0205 y 0.0226 $\mu\text{g p-NP g}^{-1} \text{h}^{-1}$ y para la RBC fue el caso contrario, la fosfatasa alcalina presento su mayor actividad con valor de 0.0577 $\mu\text{g p-NP g}^{-1} \text{h}^{-1}$ y el valor de la fosfatasa ácida fue de 0.0500 $\mu\text{g p-NP g}^{-1} \text{h}^{-1}$ (Figura 27).

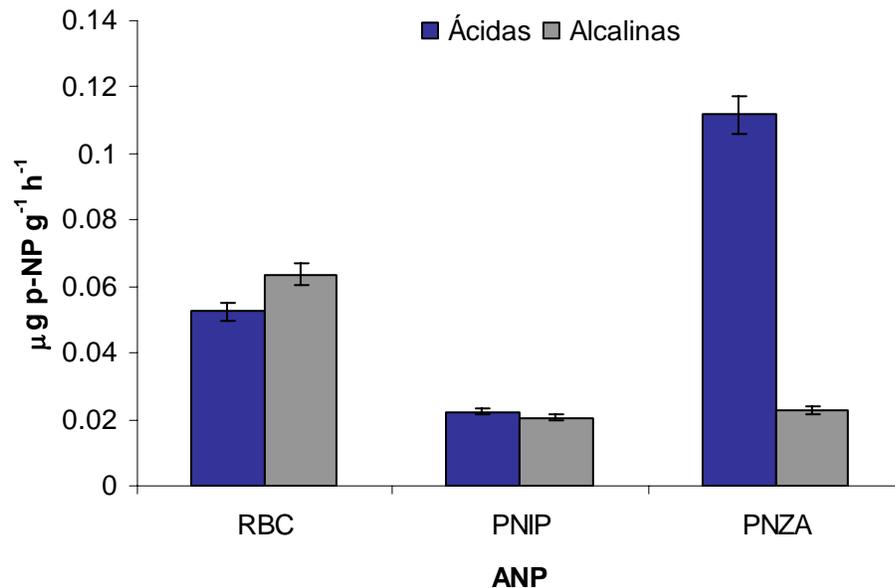


Figura 27. Actividad enzimática en las ANP.

Con los datos obtenidos para las ANP's se tienen elementos para confirmar que con deficiencia de P disponible en los suelos forestales, la actividad de la fosfatasa es mayor y puede ser indicador de la fertilidad y la calidad del suelo.

La actividad de la enzima se ve afectada por el pH y por el origen parental del suelo, para el PNIP que es de origen ígneo que se formó por emisiones de lava, las andesitas forman al Iztaccíhuatl y Popocatepetl, presenta su mayor actividad la enzima fosfatasa ácida con un valor de 0.0231 $\mu\text{g p-NP g}^{-1} \text{h}^{-1}$ y la fosfatasa alcalina con un valor menor de 0.0176

$\mu\text{g p-NP g}^{-1} \text{ h}^{-1}$, los datos corresponden a lo reportado por Granados-Damián (2003) y García-Hernández (2003).

Para el PNZA la menor actividad la presentó la fosfatasa alcalina ($0.021\mu\text{g p-NP g}^{-1} \text{ h}^{-1}$) y superándola en casi cuatro veces la fosfatasa ácida ($0.0889 \mu\text{g p-NP g}^{-1} \text{ h}^{-1}$) esto se debe al origen del suelo que se inicio a mediados de la era Terciaria a partir de emisiones de lava que emergieron a través de calizas plegadas que afloran trechos en la parte baja al sur del Popocatepetl; las emisiones fueron sucesivas de dacitas que forman los picos de la parte central de la Sierra: Tlaloc y Telapón y grandes cantidades de basaltos arrojados por pequeños conos de formación reciente (Valderrábano, 2005).

Para la RBC la menor actividad la presentó la fosfatasa ácida ($0.0595\mu\text{g p-NP g}^{-1} \text{ h}^{-1}$) y la mayor fue de la fosfatasa alcalina ($0.0631\mu\text{g p-NP g}^{-1} \text{ h}^{-1}$), lo que puede atribuirse al origen geológico del suelo, debido a que la RBC se formó en el Cretácico Inferior cuando las rocas calizas sedimentarias emergieron del mar.

Comparada la actividad de la enzima fosfatasa ácida de suelos de bosques templados con otros suelos de bosques tropicales donde los valores están de 28 a $335\mu\text{g p-NP g}^{-1} \text{ h}^{-1}$ y para la alcalina 26 a $433 \mu\text{g p-NP g}^{-1} \text{ h}^{-1}$ para suelos con una profundidad de 0 a 20 cm de profundidad y para suelos de 20 a 40 cm de profundidad la actividad de la fosfatasa ácida se presentaron valores de 14 a $243 \mu\text{g p-NP g}^{-1} \text{ h}^{-1}$ y para la fosfatasa alcalina de 12 a $293\mu\text{g p-NP g}^{-1} \text{ h}^{-1}$ corresponde con lo que presenta Juma y Tabatabai, (1978) y Chen *et al.*, (2000) Citados por Wang, *et al* (2006) que a mayor profundidad del suelo menor la actividad de la fosfatasa.

Las fosfatasas del suelo pueden ser liberadas por las raíces de las plantas, por los microorganismos degradadores y por las micorrizas, ya que estas últimas se cree que un 80% de P que presentan las micorrizas de las plantas lo proporcionan los hongos (Marschner y Dell, 1994).

Conociendo que las micorrizas afectan la liberación de la enzima y que existen en una gran variedad para las plantas, puede plantear la hipótesis de que la actividad de las fosfatasas no se presentará de la misma manera para los géneros y por lo tanto para las especies, hipótesis que podrá ser investigada con otras investigaciones para contrastarlas.

La actividad de las fosfatasas para el caso de los suelos bajo los géneros estudiados se presentaron los mayores valores en suelos donde se encontraba al género *Quercus* para ambas, es decir, para las ácidas y alcalinas con valores de $0.1592 \mu\text{g p-NP g}^{-1} \text{h}^{-1}$ y $0.0638 \mu\text{g p-NP g}^{-1} \text{h}^{-1}$ respectivamente y los menores fueron en suelos donde predominaba el *Cupressus* con valores de $0.0052 \mu\text{g p-NP g}^{-1} \text{h}^{-1}$ para la ácida y $0.0218 \mu\text{g p-NP g}^{-1} \text{h}^{-1}$ para la alcalina.

Para los suelos bajo el género *Pinus* la fosfatasa ácida presentó valor de $0.0392 \mu\text{g p-NP g}^{-1} \text{h}^{-1}$ y la fosfatasa alcalina fue de $0.0388 \mu\text{g p-NP g}^{-1} \text{h}^{-1}$ y el para el género *Abies* presento la mayor actividad la fosfatasa ácida $0.0342 \mu\text{g p-NP g}^{-1} \text{h}^{-1}$ y la alcalina la menor $0.0318 \mu\text{g p-NP g}^{-1} \text{h}^{-1}$ (Figura 28).

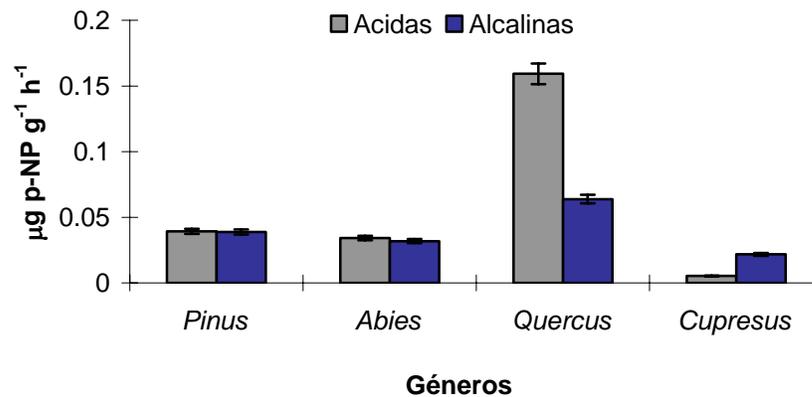


Figura 28. Actividad enzimática en suelos de diferentes géneros.

Una de las causas por la que la actividad de las enzimas es mayor en suelos en donde predomina el género *Quercus* es por la gran cantidad de materia orgánica que hay, abundando las hojas de *Quercus*, ya que se descomponen más rápido que las de pino, lo que provoca una acidificación del suelo.

En relación a los suelos bajo las especies se presentó la mayor actividad de las fosfatasas ácidas en suelos bajo *Pinus montezumae*, *P. teocote*, *P. pseudostrobus*, *P. patula*, *Abies vejarii* y *Quercus sp.* y para la fosfatasa alcalina fueron los suelos bajo las especies de *P. hartwegii*, *P. ayacahuite*, *P. sp.*, *A. religiosa* y *Cupressus* (Figura 29).

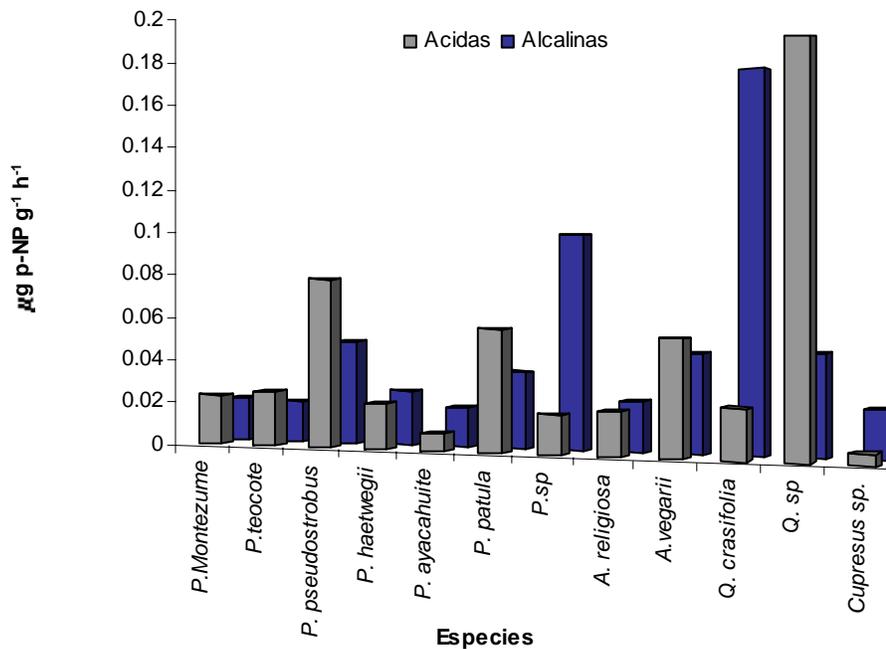


Figura 29. Actividad fosfatasa ácida y alcalina en suelos donde predominan las especies estudiadas.

La actividad de la enzima se promueve ante una carencia del elemento P en la planta como se puede observar en la figura 30 se ve la relación antes mencionada.

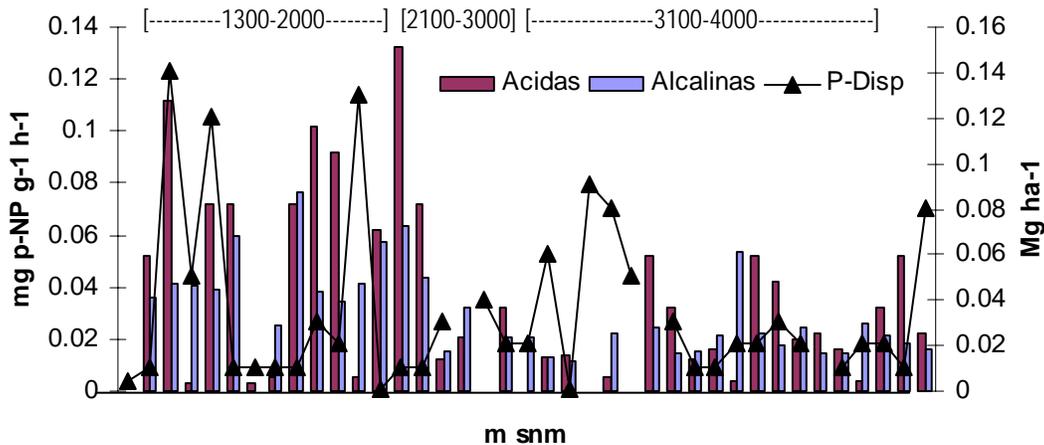


Figura 30. Actividad enzimática de las fosfatasas en relación al P-disponible del suelo de las ANP.

La actividad de la fosfatasa ácida presentó diferencias significativas entre suelos de ANP ($F=21.40$; $P\leq 0.05$) y con la pendiente ($F=5.20$; $P\leq 0.05$) y para la fosfatasa alcalina tuvo diferencia entre ANP ($F=3777.05$; $P\leq 0.05$), pendiente ($F=675.40$; $P\leq 0.05$), exposición ($F=39.17$, $P\leq 0.05$), especie ($F=10.96$; $P\leq 0.05$), altitud ($F=49.46$, $P\leq 0.05$) y la interacción ANP*Esp ($F=6.01$; $P\leq 0.05$) (Apéndice I).

Conociendo que la actividad de la enzima fosfatasa que es un parámetro bioquímico se podría considerar como una herramienta para conocer la calidad de suelo, presentándola como un indicador (como el pH, MOS, CIC, etc) para proponerla para que sea considerada dentro de un índice de calidad de suelo.

La actividad de la enzima fosfatasa y ureasa se pueden utilizar como herramientas de evaluación del cómo los metales pesados, deterioran al suelo (Wang *et al.*, 2006).

Del estudio de las correlaciones entre fosfatasas con otras propiedades físicas y químicas del suelo se observó que para las correlaciones de la actividad fosfatasa ácida y alcalina no se presentan las mismas variables de correlación, ya que para la fosfatasa ácida hubo 19 correlaciones significativas de las cuales, 11 son correlación positiva (altitud, COS; MOS, C en mantillo, P-disponible, DR, EP, arcilla, limo, P-total y P_T:P_D) y 8 son negativa (pendiente, N, pH acuoso y potencial, **Fosfatasa alcalina**, DA, arena y N:P), para las fosfatasas alcalinas fueron 13, de las cuales tiene 9 positivas (pendiente, altitud, N, COS, MOS, C:P, EP, arena, P-total, N:P y P_T:P_D) y 4 son correlaciones negativas (exposición, C en mantillo, **Fosfatasa ácida** y CE) (Apéndice III).

La actividad enzimática del suelo se ha descrito para establecer índices de la fertilidad de suelo, para conocer el potencial de producción del suelo y de la calidad del mismo (Chen, 2002).

La actividad de la enzima del suelo es un indicador útil para conocer la calidad de suelo y saber como se encuentra el ecosistema (Wang *et al.*, 2006).

12.6 Análisis de componentes principales.

Se realizó un análisis de componentes principales (ACP) para reconocer las variables del suelo que tienen mayor “peso” para determinar la calidad de los suelos del estudio (Valderrábano, 2005).

Cuadro 15. Componentes principales.

	Componente principal No. 1	Componente principal No. 2	Componente principal No. 3	Componente principal No. 4	Componente principal No. 6
N	0.180	0.298	0.062	-.173	0.426
pHH₂O	0.086	0.281	0.315	0.391	-.082
pHKCl	0.070	0.147	0.488	0.358	-.062
COS	0.303	0.120	0.136	-.195	-.232
MO	0.303	0.120	0.136	-.195	-.232
Ácidas	0.278	-.013	-.193	-.178	-.354
Alcalinas	0.314	0.080	-.109	-.021	-.000
C:P	0.255	0.116	-.306	0.311	-.033
P-disponible	-0.047	-.351	0.329	0.101	0.175
DA	-0.296	0.184	-.120	0.207	0.065
DR	0.049	-.383	-.209	0.061	0.220
EP	0.213	-.310	-.168	-.076	0.220
CE	0.167	0.121	0.182	-.163	0.546
Arcilla	0.285	-.156	0.043	0.271	-.033
Limo	0.158	-.374	0.161	0.128	0.024
Arena	-0.266	0.298	-.113	-.240	0.008
P Foliar	-0.061	0.092	0.036	-.073	0.038
P-Total	-0.292	-.077	0.257	-.158	0.062
N:P	0.309	0.209	-.007	-.052	0.317
P_T:P_D	-.047	0.181	-.373	0.459	0.181

De este ACP que se muestra en el Apéndice I en el que puede observarse que son 20 las propiedades del suelo evaluadas (variables originales), en el cuadro 18, se presentan las variables del suelo (variables robustas): la Fosfatasa alcalina, densidad real, pH potencial, P_T/P_D y conductividad eléctrica que determinan la calidad del suelo. Con base en lo que se expresa, la actividad enzimática de las fosfatasa de puede considerar como un índice para determinar la calidad de suelo.

13. CONCLUSIONES

El P-disponible disminuyó con el aumento de la actividad fosfatasa ácida, dado que en el PNIP en 15 de 17 y en la RBC en 8 de 14 sitios. Con estos resultados, se tienen resultados que contribuyen para no rechazar la hipótesis de que a mayor cantidad de P-disponible la actividad de la fosfatasa será menor.

La altitud, no parece influir en la actividad fosfatasa al considerar que la actividad de las fosfatasas puede estar influida, además de la altitud, por la naturaleza ígnea o caliza del material parental.

Por su origen geológico la actividad de las fosfatasas ácidas del suelo tuvieron mayor actividad para el PNIP y PNZA (material ígneo de origen volcánico) y en la RBC fue la fosfatasa alcalina (material sedimentario de origen calizo).

La actividad de las fosfatasas fue mayor en suelos bajo Pinus respecto a los suelos bajo Abies.

La determinación de la actividad de las fosfatasas es una herramienta útil para ser utilizada como indicador de calidad del suelo por su correlación significativa con la razón “P-total:P-disponible” y fosforo total con fosfatasas ácidas (Apéndice III).

El P-total no presenta correlación con la altitud a diferencia del C que la presenta de manera significativa.

14. LITERATURA CITADA

- ❖ Akhatar, M. 2004. Asociación *Lupinus silvestres*- Trigo y disponibilidad de fósforo en calcisoles. Tesis de Doctorado. Colegio de Posgraduados.
- ❖ Atlas, R. M. and Bartha, R. 1987. Microbial ecology fundamentals and application Benjamin Icumings. Publishing Company .inc.
- ❖ Bockheim, J. G. 1991. Suelos forestales. Pp. 119 – 139. In. Young R. A. (ed). Noriega Editores. México.
- ❖ Bohn, H.L, McNeal, B.L. y O'Connor, G.A. 1993. Química del suelo. Limusa. México.
- ❖ Brady, N.C. 1990. The nature and properties of soils. MacMillan. Canadá.
- ❖ Birkeland, W. P. 1984. Soils and Geomorphology . Oxford University Press, 372p.
- ❖ Buckman, H.O. y Brady, N.C. 1991. Naturaleza y propiedades de los suelos. UTEHA. México.
- ❖ Buol S., Hole, F. y McKraken. 1991. Génesis y clasificación de suelos. 2ª Ed. Editorial Trillas. México, D. F.
- ❖ Campo, A. J. 2003. Disponibilidad de nutrientes en una toposecuencia con Bosque Tropical Seco en México. Agrociencia 37:210-219.
- ❖ Challenger, A. 1998. Utilización y Conservación de los Ecosistema Terrestres de México. Pasado, presente y futuro. CONABIO, Instituto de Biología de la UNAM, Agrupación Sierra Madre.
- ❖ Chen, H. (2003). Phosphatase activity and P fractions in soils of an 18-year-old Chinese fir (*Cunninghamia lanceolata*) plantation. Forest Ecology and Management 178:301–310.
- ❖ CONAFOR. 2006. Comisión Nacional Forestal. <http://conafor.gob.mx> (05 de Abril, 2006).
- ❖ CONANP. 2006. Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas. <http://www.conanp.gob.mx> (30 de Marzo del 2006).

- ❖ Críquet, S. 2004. Annual dynamics of phosphatase activities in an evergreen oak litter influence of biotic and abiotic factors. *Soil Biology & Biochemistry*.
- ❖ Cruz-Flores G. 2003. Mecanismos de adaptación de la raíz de cereales ante estrés nutrimental en suelos ácidos. Tesis de Doctorado en Ciencias (Biología). Facultad de Ciencias, UNAM. México, D.F.
- ❖ Cruz-Flores G. 2006. Ecología del suelo. Un enfoque hacia la nutrición mineral de plantas superiores. Universidad Nacional Autónoma de México. México, D.F.
- ❖ Donahue, R.L., Miller, R.W y Shickluna, J.C. 1981. Introducción a los suelos y al crecimiento de las plantas. Prentice/Hall. Nueva Zelanda.
- ❖ Doran, J. W. and Parkin, T. B. 1994. defining and assessing soil quality. In Doran, J. W., Coleman, D. C., Bezdicek D. F., and Stewart B. A. (Eds). 1994. *Defining Soil Quality for a Sustainable Environment*. SSSA Special Publication Number 35.
- ❖ Etchevers, J. D., M. A. Bautista y M. A. Vergara. 2000. Calidad del suelo, indicadores de calidad y captura de carbono. Pp. 507-520. In: R. Quintero-Lizaola, T. Reyna – Trujillo, L. Corlay Chee. A. Ibáñez – Huerta y N. E. García – Calderón. (ed). *La edafología y sus perspectivas al siglo XXI*. Tomo II. Colegio de Posgraduados, UNAM, UACH. México.
- ❖ Eivazi, F. and M. A. Tabatabai. 1977. Phosphatases in soils. *Soil Biol. Biochem.* 9:167-172.
- ❖ Escamilla, M. E. 1996. La vegetación alpina y subalpina del declive occidental del volcán Popocatepetl, México. Tesis de Licenciatura. Facultad de Ciencias, UNAM. México.
- ❖ Fassbende, H. W, y Bornemiza, E. 1987. Química de suelos con énfasis en suelos de América Latina. Ilca. Costa Rica. .
- ❖ FAO–ISRIC–Isss. 1998. *World Reference Base*. Rome, Italy.

- ❖ FitzPatrick, E. A. 1984. Suelos. Su formación, clasificación y distribución. Continental. México.
- ❖ Flores M., Jiménez, G. J., Madrigal, L. X., Moncayo R. S. F. y Takaki T. F. 1971. Memoria del mapa de tipos de vegetación de la Republica Mexicana. Secretaria de recursos hidráulicos. México.
- ❖ Foth, H. D. y Turk, L. M. 1980. Fundamentos de la Ciencia del Suelo. Continental. México.
- ❖ Franzluebber, A. J. 2002. Soil organic matter stratification ratio as an indicator of soil quality. Soil and Tillage Res. 66: 95-106.
- ❖ Frossard E., L M. Condrón, A. Oberson, S Simaj and J. Fardeau. 2000. Processes governing phosphorus availability in temperate soils. J. Enviroment. Qual. 29: 12-53.
- ❖ Fuentes, Y. J. L, 1999. El suelo y los fertilizantes. 5ta edición. Ed. Mundi-prensa. Madrid, España.
- ❖ García, H. M. S. 2003. Indicadores de calidad del suelo y estado nutrimental de *Abies religiosa* (H.B.K.) Schlt, et Cham, en la exposición occidente de los volcanes Iztaccíhuatl y Popocatépetl. Tesis de Licenciatura. FES Zaragoza. UNAM.
- ❖ Gómez-Pompa, A. y R. Dirzo. 1995. Reservas de la biosfera y otras áreas naturales protegidas de México. INE y CONABIO.
- ❖ Granados-Damián, M. R. 2003. Calidad del Suelo y estado nutrimental del género *Pinus* en la vertiente occidental del Iztaccíhuatl y Popocatépetl. Tesis de Licenciatura. FES Zaragoza. UNAM.
- ❖ Harrison, L. 1994. Environmental, health, and safety auditing handbook. Mcgraw-Hill de España, S.A. New York.
- ❖ INE, 2006. Instituto Nacional de Ecología. <http://www.ine.gob.mx> (29 de Junio del 2006).
- ❖ INEGI. 1984. Mapa topográfico 1:50000. E14B31. Chalco.
- ❖ INEGI. 1984. Mapa topográfico 1:50000. E14B32. San Martín Texmelucan (Mariano Arista).

- ❖ INEGI. 1984. Mapa topográfico 1:50000. E14B41. Amecameca.
- ❖ INEGI. 1984. Mapa topográfico 1:50000. E14B42. Huejotzingo.
- ❖ INEGI. 1984. Mapa topográfico 1:50000. E14B51. Cuautla.
- ❖ INEGI. 1984. Mapa topográfico 1:50000. E14B52. Atlixco.
- ❖ INEGI. 1984. Mapa edafológico 1:250000. E14-2. Ciudad de México.
- ❖ INEGI. 1984. Mapa topográfico 1:50000. F14A49. Gómez Farías.
- ❖ INEGI. 1984. Mapa edafológico 1:50000. F14A49. Gómez Farías.
- ❖ Jackson, M.L. 1964. Análisis químico de suelos. Traducción al español de J. Beltrán. Omega. Barcelona, España.
- ❖ Jungk, A. 1993. Mobilization of different phosphate fractions in the rhizosphere. *Plant and Soil*. 155/56: 91-94.
- ❖ LGEEyPA. 2004. Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente. Sista. México.
- ❖ Marschner, H. 1995. Mineral Nutrition of Higher Plants. Academic Press. Londres.
- ❖ Marschner, H., y Dell, B. 1994. Nutrient uptake in mycorrhizal symbiosis. *Plant Soil* 159, 89-102.
- ❖ Martínez, G. A. 1988. Diseños experimentales. Métodos y elementos de teoría. Trillas. México.
- ❖ Maser, O., Astier, M. y López, S. 2000. Sustentabilidad y manejo de recursos naturales. El marco de evaluación MESMI. Mundi Prensa. México.
- ❖ MIRAT. <http://www.mirat.net/fertilizantes/nutricion/macronutrientes/fosforo.htm>
- ❖ Narváez, N. 2001. Determinación de la sintomatología visual y producción de biomasa ante carencia de N, P, K, Ca, Mg y S en el cultivo de maíz. Tesis de Licenciatura. UNAM.
- ❖ Naseby, D. C., y Moëenne-Lochoz and J. Powell, 1998. Soil enzyme activities in the rhizosphere of fieldgrown sugarbeet inoculated with the biocontrol agent *Pseudomonas fluorescens* F. *Biol. Fertil. Soil* 27: 39-43.
- ❖ Norma Oficial Mexicana. NOM-001-ECOL-1996.

- ❖ Oldeman, L. R. 1988. Guidelines for general assessment of the status of human-induced soil degradation . Working paper 88/4. International Soil Reference and Information Centre (ISRIC), Wageningen, 151p.
- ❖ Pieri, C. J., A. Dumanski, A. Hamblin y A. Young 1995. *Land Quality Indicators* . World Bank Discussion Paper 315, 80p.
- ❖ Pierre, D. 2004. Microbial Ecology of the soil and plant. Science publishers, Inc. USA.
- ❖ Pritchett, W.L. 1991. Suelos forestales, propiedades, conservación y mejoramiento. Limusa. México.
- ❖ Reyes, O. A. L., 2002. Calidad del suelo: Indicadores microbiológicos, propiedades bioquímicas y actividad enzimática. XX curso diplomado Internacional de edafología “Nicolás Aguilera”. Facultad de Ciencias UNAM, México.
- ❖ Rzedowski, J. 1978. Vegetación de México. Limusa. México.
- ❖ Sánchez, O., Vega, E., Peters E. y Monroy V. O. (eds). 2005. Conservación de ecosistemas templados de montaña en México. Diplomado en conservación, manejo y aprovechamiento de vida silvestre. Impreso en México. 315 pp.
- ❖ Sánchez-Ramos, G; P. Reyes-Castillo y R. Dirzo (eds). 2005. Historia Natural de la Reserva de la Biosfera El Cielo, Tamaulipas, México. México. Universidad Autónoma de Tamaulipas. Impreso en Hong Kong. 732 pp.
- ❖ SARH. 1993. Diagnostico del Parque Nacional Iztaccihuatl Popocatepetl, México, Puebla, Morelos, Subsecretaría Forestal y de Fauna Silvestre. Consultores de Ecología y Medio ambiente. 52 páginas.
- ❖ Scneider K., M-B. Turrion and J-F. Gallardo.2000. Modified method for measuring acid phosphatase activities in forest soils with organic matter content. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* 31:3077-3088.

- ❖ Seeling B. And Jungk A. 1996. Utilization of organic phosphorus chloride extracts of soil by barley plants and hydrolysis by acid and alkaline phosphatases. *Plant and Soil*. 178: 179-184.
- ❖ SEMARNAT. Secretaria del Medio Ambiente y Recursos Naturales. 2006. <http://www.semarnat.gob.mx>. (05 de Abril del 2006).
- ❖ SEMARNAP, 2000. Secretaria de Medio Ambiente, Recursos Naturales y Pesca. *Semarnap Quincenal*. Año 3. No. 62. 2 de Junio 2000. <http://www.semarnap.gob.mx/quincenal762/cifras.htm>.
- ❖ SEMARNAT, 2000. _Indicadores para la evaluación del desempeño ambiental. Secretaría de medio ambiente y recursos naturales. Reporte 2000. México, D. F.
- ❖ Seybold, C. A., Mausbach, D. J., Karlen D. L. y Rogers, H. H. 1997. Quantification of soil quality. Pp 387-404, In: Rattan, L., Kimble, J. M., Follet R. F. y Stewart, B. A. (ed). *Soil processes and the carbon cycle*. CRC. U.S.A.
- ❖ Smith, C. E. y Woolard, R. F. 1969. Effects of high soil density on seedling root growth of seven northwestern tree species. *USDA For. Serv. Res. Nota PNW-122*. 6 p.
- ❖ Stevenson, F. J. y Cole, M .A. 1999. *Cycles of soil* New York (USA): John Wiley and Ssns.
- ❖ Tabatabai, M. 1994. Soil enzymes. In : Weavwe R. W., J. S. Angle and P. S. Bottomley, d. Besdizek, S. Smith, A. Tabatabai, A. Wollum (ed). Pp 775-834. *Methods of soil analysis. Part 2. Microbial and Biochemical propierties*. Soil Sci of Am. USA.
- ❖ USDA – NRCS. 1998. Soil. Quality indicators: pH. Soil quality information sheet. <http://soil.usda.gov/sqi/files/indicate.pdf>.
- ❖ Valderrábano, G. J. M. 2005. Calidad del suelo y estado nutrimental de la vegetación forestal del Parque Nacional Zoquiapan y Anexas. Tesis de Licenciatura. FES Zaragoza, UNAM.
- ❖ Valencia, I.C. y Hernández, B.A. 2002. Muestreo de suelos preparación de muestras y guía de campo, FES Cuautitlán, UNAM. México.

-
- ❖ Van der Zee, S. E. A. T. M., Fokkink, L. G. J., and Riemsdijk, W. H. 1987. A new technique for assessment of reversible adsorbed phosphate. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 51: 599-604.
 - ❖ Vargas, M. F. 1997. Parques Nacionales de México. Textos Instituto Nacional de Ecología. SEMARNAP. México.
 - ❖ Velázquez A., J.F. Mas, J.L. Palacio 2001. Análisis del cambio de uso del suelo Instituto Nacional de Ecología- Instituto de Geografía, UNAM (Informe Técnico) (www.ine.gob.mx).
 - ❖ Wang, F., Lin, X., Yin, R. y Wu, L. 2006. Effects of arbuscular mycorrhizal on the growth of *Elsholtzia splend*s and *Zea mays* and activities of phosphatase and ureasw in a multi-metal-contaminated soil under unsterilized conditions. *Applied Soil Ecology* 31, 110-119.
 - ❖ Whitelaw, M. A. 2000. Growth promotion of plants inoculated with phosphate-solubilizing fungi. *Adv. In Agron.* 69: 99-151. Academic Press.
 - ❖ WRB, 2003. <http://www.fao.org/ag/agl/agll/wrb/soilres.stm> (4 de Aril del 2006).

15. ANEXOS

FÓSFORO EXTRACTABLE (BRAY – 1, BRAY Y KURTZ). (ANEXO I)

Método ampliamente usado como índice de fósforo disponible en suelos ácidos, su extractante usa NH_4F que remueve el fósforo fácilmente soluble (fosfato de aluminio, hierro y fuertemente ligado a calcio). Este extractante disuelve a estos fosfatos por formación de complejos con esos metales en soluciones ácidas. Este método no es apropiado para suelos con alto contenido de CaCO_3 por el carbonato en alto contenido neutraliza el efecto de la acidez del extractante y se subestima la cantidad real de P-disponible. El método original utiliza SnCl_2 como agente reductor.

Material y equipo

- Tubo con tapa
- Agitador mecánico oscilatorio
- Embudos de talle corto
- Bureta
- Micropipeta
- Algodón
- Película de plástico
- Espectrofotómetro (Colorímetro)

Reactivos

- Solución extractora Bray-1 (Floruro de amonio 0.03 M). Disolver 1.11 g de NH_4F en 900 mL de agua destilada, se adicionan 2.08 mL de HCl concentrado y se afora a 1 L.
- Reactivo A. Disolver 6 g de Molibdato de amonio $[(\text{NH}_4)_6\text{Mo}_7\text{O}_{24} \cdot 4\text{H}_2\text{O}]$ en 125 mL de agua destilada. Disolver 0.1454 g de tartrato de antimonio y potasio $[\text{K}(\text{SbO})\text{C}_4\text{H}_4\text{O}_6]$ en 50 mL de agua destilada. Tomar 70 mL de ácido sulfúrico (H_2SO_4) y aforar a 500 mL (H_2SO_4 2.5 M). Mezclar fuertemente estas tres soluciones aforar a 1000 mL con agua destilada y almacenar en frasco ámbar en un lugar frío.
- Reactivo B. Disolver 1.056 g de ácido ascórbico ($\text{C}_6\text{H}_8\text{O}_6$) en 200 mL de reactivo A y mezclar fuertemente. Preparar esta solución en el momento y en las cantidades requeridas.
- Estándar de fósforo de 200 ppm. Se disuelve 0.08787 g de fosfato de dihidrógeno de potasio (KH_2PO_4 , secado a 105°C durante 2 horas) en agua destilada y se afora a 100 mL. Guarde en refrigeración en frascos de plástico.
- Solución de fósforo 4 ppm. Tomar 1.0 mL del estándar (200 ppm) y aforar a 50 mL con agua destilada.

Procedimiento

Extracción

1. Pesaron 0.5 g de suelo seco al aire y tamizado en malla de 2 mm y colocarlo en un tubo con tapa.
2. Adicionar 10 mL de la solución extractora, sellar con película plástica y tapar el tubo.
3. Agitar a 148 r. p. m. En posición horizontal por 6 minutos.
4. Empacar embudos con algodón y filtrar antes de 10 minutos en Tubos de ensaye 25 x 200 mm.

Desarrollo de color:

1. Tomar 0.5 mL del extracto y agregar
2. 10.5 mL de agua destilada.
3. 4 mL de ácido ascórbico (reactivo B).
4. 10 mL de agua destilada (volumen final 25 mL). Después de 10 minutos, leer a 882 nm en el espectrofotómetro.

Bajo los mismos tiempos de las muestras, preparar curva de calibración como se indica:

Solución de P (4ppm)	Agua	Solución Extractante	Reactivo B	[P ppm]
0	6.0	2	2	0.0
0.5	5.0	2	2	0.2
1.0	4.0	2	2	0.4
2.0	3.0	2	2	0.8
4.0	2.0	2	2	1.6
5.0	1.0	2	2	2.0

Cálculos

$$P(\text{mg/kg}) = (\text{ppm en C.C.})(D_m)(D_v)$$

Donde

ppm en C.C. = partes por millón en la curva de calibración.

D_v = dilución de volumen (aforo/alícuota).

D_m = dilución de masa (volumen del extractante/ g de muestra).

ACTIVIDAD FOSFATÁSICA EN SUELO (ANEXO 2)

Reactivos:

1. Tolueno (reactivo certificado)
2. Buffer Universal Modificado MUB Solución Stock:

Disolver 12.1 g de TRIS (hidroximetil) aminometano (THAM), 11.6 g de Ácido maléico, 14 g de Ácido cítrico y 6.3 g de Ácido bórico en 448 mL de NaOH 1N y diluir la solución a 1L con agua desionizada. Guardar en refrigeración.
3. Buffer Universal Modificado MUB, pH 5.5 (Fosfatasa ácida) y pH 11 (Fosfatasa alcalina).

Tomar y colocar 200 mL de MUB (solución STOCK) en un matraz aforado 1000 mL. Introducir una barra magnética y colocar en un agitador magnético. Llevar la solución a pH 5.5 o a 11 con HCl 0.1 No NaOH 0.1 N para los ensayos de fosfatasa ácida o alcalina respectivamente. Guardar en refrigeración.
4. Solución de p-Nitrofenol fosfato 3mM.

Para 50 mL de solución: Disolver, la cantidad apropiada de sal disódica de p-Nitrofenol fosfato tetrahidratada en 40 mL de MUB, pH 5.5 u 11 para ensayos de fosfatasa ácida o alcalina respectivamente, aforar la solución con MUB del mismo pH. Guardar en refrigeración.
5. Cloruro de Calcio 0.5M.

Disolver 73.5 g de $\text{CaCl}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ en cerca de 700 mL de agua y diluir a un volumen de 1L con agua. Guardar en refrigeración.
6. Hidróxido de Sodio 0.5 M.

Disolver 20 g de NaOH en cerca de 200 mL de agua y diluir la solución a 1 L de agua. Guardar en refrigerador.
7. Solución ESTANDAR de p-Nitrofenol.

Disolver 1 g de p-Nitrofenol en cerca de 70 mL de agua y diluir la solución a 1L de agua. Guardar en refrigerador.

Procedimiento

Colocar 1 g de suelo en Mortero.

Adicionar 0.2 mL de tolueno y 2 mL de MUB pH 5.5 u 11.

Agregar unos granos de arena de cuarzo y macerar hasta homogenización.

Tomar alícuota de 0.3 mL de homogenizado y colocarla en tubos o frascos para incubación.

Adicionar 4 mL de MUB pH 5.5 u 11.

Agregar 1 mL de p-Nitrofenilfosfato 3 mM.

Tapar e incubar en Baño María a 37°C durante 1h.

Remover el tapón y agregar 1 mL de $\text{CaCl}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ 0.5 M.

Adicionar 4 mL de NaOH 0.5 M.

Agitar y filtrar la suspensión con papel Whatman No. 2,

Leer a 400 nm y comparar la actividad enzimática con base en una curva de calibración que contenga 0, 10, 20, 30, 40 y 50 mg de p-Nitrofenol.

Curva de calibración

Para preparar esta curva:

Coloque 1 mL de la solución estándar de p-Nitrofenol en matraz volumétrico de 100 mL y después de aforar con agua, mezcle fuertemente.

De ésta ultima solución de p-Nitrofenol, pipetear alícuotas de 0, 1, 2, 3, 4, y 5 mL.

Ajustar el volumen a 5 mL con adición de agua y proceder a incubar como cualquier otra muestra.

(Agregar 1 mL de $\text{CaCl}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ 0.5 M y 4 mL de NaOH 0.5 M)

Aforar a 50 mL, mezclar y filtrar la suspensión resultante.

Si la intensidad del color del filtrado en las muestras excede la de los 50 mg de p-Nitrofenol; una alícuota del filtrado puede ser diluida con agua hasta que el colorímetro pueda leer dentro de los límites de la curva de calibración.

16. APÉNDICE

(Apéndice I)

Variables	GL modelo	SC	CME	F _{Calc}	Pr>F
N_{Total}	53	916.132	17.285	80.11	<.0001
ANP	2	159.233	79.616	369.00	<.0001
Pendiente	24	653.041	27.210	126.11	<.0001
Exposición	7	99.880	14.268	66.13	<.0001
Género	3	0.050	0.016	0.08	0.9719
Especie	8	0.633	0.079	0.37	0.9366
Altitud	4	2.802	0.700	3.25	0.0137
ANP*Esp	5	0.490	0.098	0.45	0.8094
ANP*Gen	0	0.000	.	.	.
Gen*Esp	0	0.000	.	.	.
ANP*Gen*Esp	0	0.000	.	.	.
MO	53	2662527.560	50236.369	58.29	<.0001
ANP	2	928172.415	464086.207	538.45	<.0001
Pendiente	24	1242717.467	51779.894	60.08	<.0001
Exposición	7	417698.322	59671.189	69.23	<.0001
Género	3	1007.232	335.744	0.39	0.7607
Especie	8	10934.665	1366.833	1.59	0.1331
Altitud	4	61556.220	15389.055	17.85	<.0001
ANP*Esp	5	441.238	88.248	0.10	0.9915
ANP*Gen	0	0.000	.	.	.
Gen*Esp	0	0.000	.	.	.
ANP*Gen*Esp	0	0.000	.	.	.
C:N	53	97027.3465	1830.7047	13.22	<.0001
ANP	2	2080.392	1040.196	7.50	0.0008
Pendiente	24	63994.375	2666.432	19.23	<.0001
Exposición	7	25292.887	3613269	26.05	<.0001
Género	3	17.707	5.902	0.04	0.9883
Especie	8	422.158	52.769	0.38	0.9297
Altitud	4	5152.300	1288.075	9.29	<.0001
ANP*Esp	5	67.525	13.505	0.10	0.9925
ANP*Gen	0	0.000	.	.	.
Gen*Esp	0	0.000	.	.	.
ANP*Gen*Esp	0	0.000	.	.	.

Continuación

Variables	GL modelo	SC	CME	F _{Calc}	Pr>F
C:P	53	16293723692	307428749	10.08	<.0001
ANP	2	4866725498	2433362749	79.77	<.0001
Pendiente	24	7303324068	304305169	9.98	<.0001
Exposición	7	3401597575	485942511	15.93	<.0001
Género	3	3508517	1169506	0.04	0.9899
Especie	8	123638586	15454823	0.51	0.8500
Altitud	4	581984859	145496215	4.77	0.0012
ANP*Esp	5	12944590	2588918	0.08	0.9945
ANP*Gen	0	0	.	.	.
Gen*Esp	0	0	.	.	.
ANP*Gen*Esp	0	0	.	.	.
pH_{Potencial}	52	53.90871499	1.03670606	317.90	<.0001
ANP	2	1.148	0.574	20.10	<.0001
Pendiente	24	59.745	2.489	87.09	<.0001
Exposición	7	1.856	0.265	9.29	<.0001
Género	3	0.189	0.063	2.20	0.0884
Especie	8	0.996	0.124	4.36	<.0001
Altitud	4	2.996	0.749	26.21	<.0001
ANP*Esp	5	0.188	0.037	1.32	0.2556
ANP*Gen	0	0.000	.	.	.
Gen*Esp	0	0.000	.	.	.
ANP*Gen*Esp	0	0.000	.	.	.
pH_{activo}	53	67.12444815	1.26649902	44.31	<.0001
ANP	2	4.097	2.048	628.21	<.0001
Pendiente	24	44.016	1.834	562.39	<.0001
Exposición	7	4.038	0.576	176.93	<.0001
Género	3	0.012	0.004	1.32	0.2708
Especie	7	0.340	0.048	14.92	<.0001
Altitud	4	1.309	0.327	100.35	<.0001
ANP*Esp	5	0.093	0.018	5.73	<.0001
ANP*Gen	0	0.000	.	.	.
Gen*Esp	0	0.000	.	.	.
ANP*Gen*Esp	0	0.000	.	.	.

Continuación

	Variables	GL modelo	SC	CME	F _{Calc}	Pr>F
COS		53	895673.7105	16899.5040	58.29	<.0001
	ANP	2	312236.460	156118.230	538.44	<.0001
	Pendiente	24	418051.603	17418.816	60.08	<.0001
	Exposición	7	140512.611	20073.230	69.23	<.0001
	Género	3	338.831	112.943	0.39	0.7607
	Especie	8	3678.395	459.799	1.59	0.1331
	Altitud	4	20707.374	5176.843	17.85	<.0001
	ANP*Esp	5	148.433	29.686	0.10	0.9915
	ANP*Gen	0	0.000	.	.	.
	Gen*Esp	0	0.000	.	.	.
	ANP*Gen*Esp	0	0.000	.	.	.
	Arcilla		50	6366.500534	127.330011	156.15
ANP		2	3323.925	1661.962	2038.14	<.0001
Pendiente		23	2499.252	108.663	133.26	<.0001
Exposición		7	417.190	59.598	73.09	<.0001
Género		3	2.378	0.795	0.98	0.4117
Especie		7	11.166	1.595	1.96	0.0806
Altitud		4	100.691	25.172	30.87	<.0001
ANP*Esp		4	11.887	2.971	3.64	0.0112
ANP*Gen		0	0.000	.	.	.
Gen*Esp		0	0.000	.	.	.
ANP*Gen*Esp		0	0.000	.	.	.
Limo			50	4299	85.980	Infty
	ANP	2	821.898	410.949	Infty	<.0001
	Pendiente	23	2661.265	115.707	Infty	<.0001
	Exposición	7	521.648	74.521	Infty	<.0001
	Género	3	5.073	1.691	Infty	<.0001
	Especie	7	30.881	4.411	Infty	<.0001
	Altitud	4	258.233	64.558	Infty	<.0001
	ANP*Esp	4	0.000	0.000	.	.
	ANP*Gen	0	0.000	.	.	.
	Gen*Esp	0	0.000	.	.	.
	ANP*Gen*Esp	0	0.000	.	.	.

Continuación

	Variables	GL modelo	SC	CME	F _{Calc}	Pr>F
Arena		50	14296.29893	285.92598	350.64	<.0001
	ANP	2	6318.041	3159.020	3874.04	<.0001
	Pendiente	23	6560.382	285.234	349.79	<.0001
	Exposición	7	746.224	106.603	130.73	<.0001
	Género	3	14.421	4.807	5.90	0.0016
	Especie	7	52.313	7.473	9.16	<.0001
	Altitud	4	593.028	148.257	181.81	<.0001
	ANP*Esp	4	11.887	2.971	3.64	0.0112
	ANP*Gen	0	0.000	.	.	.
	Gen*Esp	0	0.000	.	.	.
	ANP*Gen*Esp	0	0.000	.	.	.
Ácidas		49	1.23634205	0.02523147	3.24	<.0001
	ANP	2	0.33305606	0.16652803	21.40	<.0001
	Pendiente	22	0.89007503	0.04045796	5.20	<.0001
	Exposición	6	0.00870147	0.00145024	0.19	0.9805
	Género	3	0.00000499	0.00000166	0.00	1.0000
	Especie	8	0.00216709	0.00027089	0.03	1.0000
	Altitud	4	0.00132770	0.00033192	0.04	0.9965
	ANP*Esp	4	0.00100973	0.00025243	0.03	0.9980
	ANP*Gen	0	0.00000000	.	.	.
	Gen*Esp	0	0.00000000	.	.	.
	ANP*Gen*Esp	0	0.00000000	.	.	.
Alcalinas		49	0.36579658	0.00746524	468.59	<.0001
	ANP	2	0.12035630	0.06017315	3777.05	<.0001
	Pendiente	22	0.023671852	0.01075993	675.40	<.0001
	Exposición	6	0.00374384	0.00062397	39.17	<.0001
	Género	3	0.00005635	0.00001878	1.18	0.3182
	Especie	8	0.00139640	0.00017455	10.96	<.0001
	Altitud	4	0.00315205	0.00078801	49.46	<.0001
	ANP*Esp	4	0.00038312	0.00009578	6.01	0.0001
	ANP*Gen	0	0.00000000	.	.	.
	Gen*Esp	0	0.00000000	.	.	.
	ANP*Gen*Esp	0	0.00000000	.	.	.

Continuación

Variables	GL modelo	SC	CME	F _{Calc}	Pr>F
P_{Disponible}	53	3.18184542	0.06003482	546.11	<.0001
ANP	2	0.11962251	0.05981125	544.08	<.0001
Pendiente	24	2.12392525	0.08849689	805.02	<.0001
Exposición	7	0.53168839	0.07595548	690.94	<.0001
Género	3	0.00031424	0.00010475	0.95	0.4157
Especie	8	0.03100880	0.00387510	35.26	<.0001
Altitud	4	0.37527596	0.09381899	853.44	<.0001
ANP*Esp	5	0.00001028	0.00000206	0.02	0.9999
ANP*Gen	0	0.00000000	.	.	.
Gen*Esp	0	0.00000000	.	.	.
ANP*Gen*Esp	0	0.00000000	.	.	.
DA	53	12.43772439	0.23467405	118.92	<.0001
ANP	2	6.410	3.2050	1624.13	<.0001
Pendiente	24	5.152	0.2146	108.80	<.0001
Exposición	7	0.629	0.0899	45.58	<.0001
Género	3	0.004	0.0015	0.80	0.4947
Especie	8	0.059	0.0074	3.77	0.0004
Altitud	4	0.178	0.0446	22.60	<.0001
ANP*Esp	5	0.002	0.0005	0.28	0.9250
ANP*Gen	0	0.000	.	.	.
Gen*Esp	0	0.000	.	.	.
ANP*Gen*Esp	0	0.000	.	.	.
DR	53	67.17059895	1.26736979	15.11	<.0001
ANP	2	1.734	0.867	10.34	<.0001
Pendiente	24	53.243	2.218	26.45	<.0001
Exposición	7	7.919	1.131	13.49	<.0001
Género	3	0.210	0.070	0.83	0.4764
Especie	8	0.789	0.098	1.18	0.3157
Altitud	4	3.265	0.816	9.73	<.0001
ANP*Esp	5	0.008	0.001	0.02	0.9999
ANP*Gen	0	0.000	.	.	.
ANP*Gen*Esp	0	0.000	.	.	.

Continuación

	Variables	GL modelo	SC	CME	F _{Calc}	Pr>F
EP		53	47236.30212	891.25098	18.65	<.0001
	ANP	2	11073.001	5536.50082	115.88	<.0001
	Pendiente	24	24401.030	1016.70960	21.28	<.0001
	Exposición	7	9951.857	1421.69388	29.76	<.0001
	Género	3	22.891	7.63051	0.16	0.9233
	Especie	8	381.279	47.65995	1.00	0.4398
	Altitud	4	1346.131	336.53282	7.04	<.0001
	ANP*Esp	5	60.110	12.02209	0.25	0.9385
	ANP*Gen	0	0.000	.	.	.
	Gen*Esp	0	0.000	.	.	.
	ANP*Gen*Esp	0	0.000	.	.	.
	CE		53	2.46229340	0.04645837	21.86
ANP		2	0.63475548	0.31737774	149.32	<.0001
Pendiente		24	1.78539942	0.07439164	35.00	<.0001
Exposición		7	0.03357119	0.00479588	2.26	0.0310
Género		3	0.00045234	0.00015078	0.07	0.9754
Especie		8	0.00174521	0.00021815	0.10	0.9991
Altitud		4	0.00630359	0.00157590	0.74	0.5647
ANP*Esp		5	0.00006617	0.00001323	0.01	1.0000
ANP*Gen		0	0.00000000	.	.	.
Gen*Esp		0	0.00000000	.	.	.
ANP*Gen*Esp		0	0.00000000	.	.	.
PTotal			41	75.0232146	1.8298345	3.16
	ANP	2	35.1134	17.556	30.31	<.0001
	Pendiente	18	32.1587	1.786	3.08	0.0001
	Exposición	6	7.1910	1.198	2.07	0.0613
	Género	3	0.0570	0.019	0.03	0.9920
	Especie	8	0.1066	0.013	0.02	1.0000
	Altitud	2	0.3964	0.198	0.34	0.7109
	ANP*Esp	2	0.0000	0.000	0.00	1.0000
	ANP*Gen	0	0.0000	.	.	.
	Gen*Esp	0	0.0000	.	.	.
	ANP*Gen*Esp	0	0.0000	.	.	.

Continuación

	Variables	GL modelo	SC	CME	F _{Calc}	Pr>F
N:P		41	366.7068512	8.9440695	14.26	<.0001
	ANP	2	128.363	64.181	102.36	<.0001
	Pendiente	18	211.064	11.725	18.70	<.0001
	Exposición	6	24.154	4.025	6.42	<.0001
	Género	3	0.199	0.066	0.11	0.9563
	Especie	8	0.522	0.065	0.10	0.9990
	Altitud	2	1.884	0.942	1.50	0.2265
	ANP*Esp	2	0.517	0.258	0.41	0.6627
	ANP*Gen	0	0.000	.	.	.
	Gen*Esp	0	0.000	.	.	.
	ANP*Gen*Esp	0	0.000	.	.	.
PDis/PTot		41	2051328.307	50032.398	20.93	<.0001
	ANP	2	76297.381	38148.690	15.96	<.0001
	Pendiente	18	1644714.056	91373.003	38.22	<.0001
	Exposición	6	270873.510	45145.585	18.88	<.0001
	Género	3	281.580	93.860	0.04	0.9896
	Especie	8	25066.636	3129.250	1.31	0.2448
	Altitud	2	31972.420	15986.210	6.69	0.0017
	ANP*Esp	2	2155.723	1077.862	0.45	0.6381
	ANP*Gen	0	0.000	.	.	.
	Gen*Esp	0	0.000	.	.	.
	ANP*Gen*Esp	0	0.000	.	.	.

APÉNDICE II

Análisis de Componentes principales del SAS

```

The PRINCOMP Procedure

Observations      83
Variables         20

Simple Statistics

      NMgha      pHH2O      pHKCl      MghaCOS      MghaMO
Mean      2.786867470      5.469277108      4.600722892      90.76686747      156.4939759
Std      1.620198669      0.591836297      0.539217552      57.98756595      99.9782376

Simple Statistics

      acidas      alcalinas      CP      PMgha      DA
Mean      0.0347349398      0.0299397590      6208.460458      0.0858554217      0.9197590361
Std      0.0339159953      0.0173003238      5809.898042      0.1967446118      0.1953481314

Simple Statistics

      DR      EP      CE      Arci      Lim
Mean      2.236072289      56.57950602      0.0646987952      11.58130120      23.61445783
Std      0.667194559      17.01023452      0.0674462270      7.79426474      6.53290233

Simple Statistics

      Are      PFoliar      PtMgha      NP      PtPd
Mean      64.80424096      0.1340722892      1.903903614      1.817060241      110.8939277
Std      12.26717814      0.0398554654      0.758634631      1.394535383      118.8628606

Correlation Matrix

      NMgha      pHH2O      pHKCl      Mgha
      COS      MghaMO      acidas      alcalinas      CP      PMgha      DA
NMgha      1.0000      0.2770      0.1924      0.5144      0.5144      0.1133      0.4529      0.3448      -.3216      -.1775
pHH2O      0.2770      1.0000      0.7198      0.3461      0.3461      -.0548      0.1306      0.2077      -.1441      0.0299
pHKCl      0.1924      0.7198      1.0000      0.3025      0.3025      -.1219      0.0538      -.0124      0.2228      -.1027
MghaCOS      0.5144      0.3461      0.3025      1.0000      1.0000      0.5830      0.5866      0.3954      -.1861      -.5873
MghaMO      0.5144      0.3461      0.3025      1.0000      1.0000      0.5830      0.5866      0.3954      -.1862      -.5873
acidas      0.1133      -.0548      -.1219      0.5830      0.5830      1.0000      0.6282      0.5715      -.2048      -.6517
alcalinas      0.4529      0.1306      0.0538      0.5866      0.5866      0.6282      1.0000      0.7011      -.2818      -.5293
CP      0.3448      0.2077      -.0124      0.3954      0.3954      0.5715      0.7011      1.0000      -.3920      -.2250
PMgha      -.3216      -.1441      0.2228      -.1861      -.1862      -.2048      -.2818      -.3920      1.0000      -.1688
DA      -.1775      0.0299      -.1027      -.5873      -.5873      -.6517      -.5293      -.2250      -.1688      1.0000
DR      -.3078      -.3707      -.3393      -.0943      -.0943      0.1093      -.0371      0.0855      0.3485      -.2520
EP      0.0065      -.2953      -.2509      0.3048      0.3048      0.4061      0.3874      0.3198      0.2397      -.5626

The SAS System      12:32 Tuesday, July 4, 2000      2

The PRINCOMP Procedure

Correlation Matrix

```

	Mgha									
	NMgha	pHH2O	pHKCl	COS	MghaMO	acidas	alcalinas	CP	PMgha	DA
CE	0.4244	0.2601	0.2252	0.2945	0.2945	0.1839	0.3503	0.0853	-0.0196	-0.3787
Arci	0.1015	0.1299	0.1826	0.3554	0.3554	0.5265	0.6150	0.5066	0.1502	-0.6706
Lim	-0.1390	-0.1264	0.0916	0.2494	0.2494	0.0710	0.1653	0.0707	0.5142	-0.5196
Are	0.0095	-0.0152	-0.1648	-0.3587	-0.3587	-0.3724	-0.4788	-0.3595	-0.3693	0.7028
PFoliar	0.0377	0.1237	0.0956	0.0275	0.0275	-0.1756	-0.0492	-0.0927	-0.0575	0.2029
PtMgha	-0.2558	-0.1855	0.0148	-0.5413	-0.5413	-0.6469	-0.6418	-0.7149	0.4237	0.4426
NP	0.8240	0.3096	0.2030	0.6550	0.6550	0.4946	0.7100	0.6185	-0.3139	-0.4673
PtPd	0.0691	0.0788	-0.0995	-0.1995	-0.1995	-0.0985	-0.0471	0.3895	-0.3301	0.4295

Correlation Matrix

	DR	EP	CE	Arci	Lim	Are	PFoliar	PtMgha	NP	PtPd
NMgha	-0.3078	0.0065	0.4244	0.1015	-0.1390	0.0095	0.0377	-0.2558	0.8240	0.0691
pHH2O	-0.3707	-0.2953	0.2601	0.1299	-0.1264	-0.0152	0.1237	-0.1855	0.3096	0.0788
pHKCl	-0.3393	-0.2509	0.2252	0.1826	0.0916	-0.1648	0.0956	0.0148	0.2030	-0.0995
MghaCOS	-0.0943	0.3048	0.2945	0.3554	0.2494	-0.3587	0.0275	-0.5413	0.6550	-0.1995
MghaMO	-0.0943	0.3048	0.2945	0.3554	0.2494	-0.3587	0.0275	-0.5413	0.6550	-0.1995
acidas	0.1093	0.4061	0.1839	0.5265	0.0710	-0.3724	-0.1756	-0.6469	0.4946	-0.0985
alcalinas	-0.0371	0.3874	0.3503	0.6150	0.1653	-0.4788	-0.0492	-0.6418	0.7100	-0.0471
CP	0.0855	0.3198	0.0853	0.5066	0.0707	-0.3595	-0.0927	-0.7149	0.6185	0.3895
PMgha	0.3485	0.2397	-0.0196	0.1502	0.5142	-0.3693	-0.0575	0.4237	-0.3139	-0.3301
DA	-0.2520	-0.5626	-0.3787	-0.6706	-0.5196	0.7028	0.2029	0.4426	-0.4673	0.4295
DR	1.0000	0.7451	-0.1316	0.1645	0.5132	-0.3778	-0.0331	-0.1278	-0.1479	0.0299
EP	0.7451	1.0000	0.1148	0.4431	0.5872	-0.5942	0.0352	-0.4351	0.2668	-0.1079
CE	-0.1316	0.1148	1.0000	0.2702	-0.0442	-0.1482	-0.0869	-0.2731	0.5786	-0.1568
Arci	0.1645	0.4431	0.2702	1.0000	0.4620	-0.8814	-0.3198	-0.5003	0.4542	-0.1296
Lim	0.5132	0.5872	-0.0442	0.4620	1.0000	-0.8261	-0.1034	-0.1800	0.0782	-0.3447
Are	-0.3778	-0.5942	-0.1482	-0.8814	-0.8261	1.0000	0.2583	0.4137	-0.3302	0.2659
PFoliar	-0.0331	0.0352	-0.0869	-0.3198	-0.1034	0.2583	1.0000	0.1083	-0.1102	0.0637
PtMgha	-0.1278	-0.4351	-0.2731	-0.5003	-0.1800	0.4137	0.1083	1.0000	-0.6435	-0.2850
NP	-0.1479	0.2668	0.5786	0.4542	0.0782	-0.3302	-0.1102	-0.6435	1.0000	0.0530
PtPd	0.0299	-0.1079	-0.1568	-0.1296	-0.3447	0.2659	0.0637	-0.2850	0.0530	1.0000

Eigenvalues of the Correlation Matrix

	Eigenvalue	Difference	Proportion	Cumulative
1	6.90835158	3.22181323	0.3454	0.3454
2	3.68653835	1.31936592	0.1843	0.5297
3	2.36717243	0.96214842	0.1184	0.6481
4	1.40502401	0.11859823	0.0703	0.7184
5	1.28642578	0.22766039	0.0643	0.7827
6	1.05876539	0.33369206	0.0529	0.8356

The SAS System 12:32 Tuesday, July 4, 2000 3

The PRINCOMP Procedure

Eigenvalues of the Correlation Matrix

	Eigenvalue	Difference	Proportion	Cumulative
7	0.72507333	0.06560661	0.0363	0.8719
8	0.65946672	0.20473931	0.0330	0.9048
9	0.45472741	0.10536519	0.0227	0.9276
10	0.34936222	0.08911026	0.0175	0.9450
11	0.26025195	0.05206617	0.0130	0.9581
12	0.20818578	0.01198786	0.0104	0.9685
13	0.19619792	0.04844386	0.0098	0.9783
14	0.14775406	0.02280625	0.0074	0.9857
15	0.12494781	0.03054335	0.0062	0.9919
16	0.09440446	0.04301661	0.0047	0.9966
17	0.05138785	0.03542489	0.0026	0.9992
18	0.01596296	0.01596296	0.0008	1.0000
19	0.00000000	0.00000000	0.0000	1.0000
20	0.00000000		0.0000	1.0000

Eigenvectors

	Prin1	Prin2	Prin3	Prin4	Prin5	Prin6	Prin7
NMgha	0.180231	0.298021	0.062490	-.173323	0.052156	0.426272	-.434234
pHH2O	0.086199	0.281651	0.315832	0.391613	0.122066	-.082665	0.156163
pHKCl	0.070288	0.147349	0.488716	0.358773	0.093303	-.062201	0.074998
MghaCOS	0.303258	0.120889	0.136958	-.195158	0.231900	-.232390	-.195598
MghaMO	0.303258	0.120893	0.136956	-.195155	0.231905	-.232378	-.195602
acidas	0.278753	-.013610	-.193181	-.178580	-.115886	-.354380	0.287561
alcalinas	0.314294	0.080508	-.109468	-.021256	-.054222	-.000588	0.097952
CP	0.255348	0.116190	-.306752	0.311308	0.016935	-.033619	-.053249
PMgha	-.047028	-.351845	0.329754	0.101667	0.026013	0.175034	0.007433
DA	-.296571	0.184978	-.120915	0.207199	0.099254	0.065454	-.153750
DR	0.048737	-.383120	-.209340	0.061199	0.269601	0.220944	0.023677
EP	0.213268	-.310691	-.168151	-.0706230	0.286397	0.220666	0.069302
CE	0.167294	0.121695	0.182054	-.163781	-.216837	0.546948	0.483278
Arci	0.285329	-.156084	0.043504	0.271253	-.280145	-.033599	0.136204
Lim	0.158202	-.374000	0.161652	0.128517	0.164710	0.024606	-.315137
Are	-.265542	0.298347	-.113729	-.240789	0.090281	0.008244	0.081286
PFoliar	-.060630	0.092773	0.036638	-.073082	0.709895	0.038108	0.420497
PtMgha	-.291637	-.077030	0.257866	-.158325	-.042380	0.062014	-.137165
NP	0.309234	0.209144	-.007634	-.052221	-.048654	0.317926	-.149850
PtPd	-.047003	0.181896	-.373009	0.459996	0.123821	0.181962	-.067950

Eigenvectors

	Prin8	Prin9	Prin10	Prin11	Prin12	Prin13	Prin14
NMgha	-.161205	0.161196	0.055491	-.306332	-.061028	0.048041	-.052958
pHH2O	0.201801	-.190505	0.432401	-.130874	0.130537	0.315190	-.045656

The SAS System 12:32 Tuesday, July 4, 2000 4

The PRINCOMP Procedure

Eigenvectors

	Prin8	Prin9	Prin10	Prin11	Prin12	Prin13	Prin14
pHKCl	0.089117	0.185083	-.018375	-.040385	-.325285	-.564553	-.039235
MghaCOS	0.214567	0.047280	-.078890	0.132043	0.292379	0.034265	0.037766
MghaMO	0.214561	0.047260	-.078914	0.132056	0.292385	0.034262	0.037772
acidas	0.116525	0.394994	0.022900	-.020305	-.286572	0.210807	0.044144
alcalinas	-.428594	0.039033	0.183112	0.368949	0.223150	-.500696	0.077533
CP	-.179199	0.152727	0.308434	0.218454	-.198052	0.203495	0.304286
PMgha	0.034950	0.594038	-.090881	0.328366	-.034129	0.245629	-.150171
DA	-.078824	-.037642	0.175954	0.492448	0.117610	0.172918	-.335434
DR	0.343525	0.019903	0.419629	-.181781	0.031392	-.152832	0.293095
EP	0.090632	0.026190	0.174465	-.016975	0.089671	-.149478	-.549600
CE	0.221165	-.167146	-.103006	0.286423	0.136568	0.084468	0.228609
Arci	-.261278	0.053233	-.062626	-.324983	0.374371	0.122476	-.190520
Lim	-.077938	-.355091	-.190349	0.233833	-.239913	0.102085	0.276763
Are	0.207516	0.155281	0.141162	0.081958	-.110100	-.132183	-.026339
PFoliar	-.442390	0.003715	-.193707	-.125676	-.045837	0.163931	0.077878
PtMgha	-.228086	0.329810	0.285907	-.112044	0.310980	0.021270	0.385962
NP	-.038574	0.044161	0.003603	-.053913	-.330942	0.141001	-.107637
PtPd	0.233865	0.266528	-.481934	-.065618	0.265456	-.086954	0.186192

Eigenvectors

	Prin15	Prin16	Prin17	Prin18	Prin19	Prin20
NMgha	-.072945	0.104565	-.210402	0.503504	-.000026	0.000000
pHH2O	-.421225	-.077703	0.152312	0.088093	-.000016	0.000000
pHKCl	0.334083	0.015288	0.023695	0.070319	0.000003	-.000000
MghaCOS	0.127137	0.023464	-.067467	-.096129	0.707113	-.000000
MghaMO	0.127172	0.023454	-.067438	-.096182	-.707100	0.000000
acidas	0.036018	0.179298	0.372294	0.400126	-.000021	0.000000
alcalinas	-.416534	0.158646	0.096310	0.021203	-.000006	0.000000
CP	0.263193	-.396234	-.349402	-.078516	0.000001	0.000000
PMgha	-.306784	0.062281	-.248063	-.098913	-.000014	0.000000

DA	0.366285	0.382892	0.190664	0.167435	0.000007	-.000000
DR	0.065499	0.473431	-.098833	-.072337	-.000008	0.000000
EP	0.088926	-.499879	0.215212	0.110495	0.000002	-.000000
CE	0.212770	-.058523	-.013272	0.145216	0.000010	-.000000
Arci	0.252498	0.185426	-.085097	-.062193	0.000003	0.489139
Lim	-.071855	-.045997	0.263092	0.230584	0.000006	0.409981
Are	-.122165	-.093320	-.086041	-.083282	-.000005	0.769843
PFoliar	0.050300	0.094787	-.035517	-.044250	0.000007	-.000000
PtMgha	0.194847	-.234017	0.444111	-.042547	0.000010	-.000000
NP	-.002505	0.150849	0.399676	-.634113	0.000031	-.000000
PtPd	-.138340	-.087972	0.238039	0.048816	0.000009	-.000000

APÉNDICE III

Variables	Ácidas	Alcalinas
PEN	-0.19 *	0.20 *
EXP	-0.06 NS	-0.26 *
GEN	-0.11 NS	0.10 NS
ESP	-0.07 NS	0.14 NS
ALT	0.23 *	0.31 **
N	-0.26 *	0.54 **
PHH	-0.69 **	0.06 NS
PHK	-0.53 **	-0.08 NS
COS	0.26 *	0.30 *
MO	0.26 *	0.30 *
CMAN	0.31 *	-0.33 *
ACI	-	-0.23 *
ALC	-0.23 *	-
CP	-0.11 NS	0.20 *
P	0.41 **	-0.06 NS
DA	-0.49 **	-0.05 NS
DR	0.49 **	-0.13 NS
EP	0.43 **	0.33 *
CE	-0.01 NS	-0.33 **
ARCI	0.29 *	0.07 NS
LIM	0.10 *	0.07 NS
ARE	-0.29 *	0.27 *
PFOL	-0.01 NS	-0.10 NS
PMAN	0.03 NS	-0.01 NS
PT	0.28 *	0.07 NS
NP	-0.32 *	0.50 **
PTPD	0.23 *	0.007 NS

NS= No significativo, * = valor bajo significativo, **= valor alto significativo