



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES ZARAGOZA

**“Levantamiento nutricional en *Abies religiosa*
a lo largo de un ciclo anual en el
Parque Nacional Izta-Popo”**

T É S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

B I Ó L O G A

P R E S E N T A:

Beyibet Domínguez Bernal

DIRECTOR DE TESIS:

Dr. Gerardo Cruz Flores



México, D. F. 2011



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.



UNIVERSIDAD NACIONAL
AVENIDA DE
MEXICO

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES

“ZARAGOZA”

DIRECCIÓN

**JEFE DE LA UNIDAD DE ADMINISTRACIÓN ESCOLAR
P R E S E N T E.**

Comunico a usted que la alumna **DOMÍNGUEZ BERNAL BEYIBET**, con número de cuenta **405044014** de la carrera de Biología se le ha fijado el día **22** del mes de **MARZO** de 2011 a las **10:00 hrs.** para presentar examen profesional, el cual tendrá lugar en esta Facultad con el siguiente jurado:

PRESIDENTE BIÓL. J. RUBÉN ZULBARÁN ROSALES

VOCAL DR. GERARDO CRUZ FLORES

SECRETARIO M. en C. RAMIRO RÍOS GÓMEZ

SUPLENTE BIÓL. ELVIA GARCÍA SANTOS

SUPLENTE BIÓL. JUAN MANUEL VALDERRÁBANO GÓMEZ

El título de la tesis que presenta es: **Levantamiento nutricional en *Abies religiosa* a lo largo de un ciclo anual en el Parque Nacional Izta-Popo.**

Agradeceré por anticipado su aceptación y hago propia la ocasión para saludarle.

DE ESTUDIOS SUPERIORES
ATENTAMENTE
“POR MI RAZA HABLARÁ EL ESPÍRITU”
México, D. F., a 10 de febrero de 2011
FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES
ZARAGOZA
DIRECCION
DR. VÍCTOR MANUEL MENDOZA NÚÑEZ
DIRECTOR

RECIBÍ
OFICINA DE EXÁMENES
PROFESIONALES Y DE GRADO

VO. BO.
DR. CARLOS CASTILLEJOS CRUZ
JEFE DE CARRERA



DEDICATORIAS

A Dios por haberme dado la vida, por estar presente en cada paso de mi vida, por cuidar de mi familia y de todos mis seres queridos, por permitirme concluir una etapa más en mi vida que es la licenciatura...

A ti madrecita linda por ser la fuente de mi vida y fuente de mi inspiración a seguir.

Gracias mamita por tu paciencia, por brindarnos todo tu amor y cuidados sin medida, por darnos tus fuerzas y el brillo de tus ojos. Gracias por tu incomparable calor de madre...

A ti papá por todo tu apoyo, siento una enorme satisfacción de que hayas cambiado, de que no seas el mismo de antes, de que ahora no tengamos miedo de acercarnos a ti y de poder contar contigo. Quiero que sepas que nadie nace sabiendo como ser padre o esposo, todos cometemos errores y me dá gusto que tú hayas aprendido de ellos. Te quiero mucho papá.

A todos ustedes hermanos Edgar, Omar, Mahy, Doris por brindarme todo su apoyo día a día, por compartir todas las aventuras de la infancia que nunca olvidaré. Emelia, Mayra y José los quiero mucho y sé que la vida no es fácil de elegir, siempre va a existir lo bueno y lo malo, de nosotros depende que queramos elegir; sólo hechenle ganas...

A mis abuelitos queridos por brindarme todo su apoyo y amor.

A mi tío por todo su apoyo, consejos y ayuda a la familia.

A mis sobrinitos Lesly, Edgarín y Mahysito por ser un regalo de Dios...

Con mucho cariño a mi amor Gerbando Sánchez Hernández por ser una persona muy linda y especial en mi vida. Agradezco a Dios por haberme dado el regalo tan preciado y anhelado de haberte encontrado. Gracias amor por todo tu apoyo, quiero que sepas que siempre cuentas conmigo para todo. Te amo...

Gracias a todos...

Lámpara es a mis pies tu palabra, y lumbre en mi camino. Salmos 119:105

¡Cuán dulces son a mi paladar tus palabras!, más que la miel a mi boca. Salmos 119:103



AGRADECIMIENTOS

Je agradezco Dios por tu infinito amor y bondad, por tus bendiciones de todos los días, por haberme puesto en esta carrera tan hermosa y maravillosa, la carrera de "Biología", ciencia que estudia la vida...

At la Universidad Nacional Autónoma de México por ser la "Máxima casa de estudios", de la cual me siento muy orgullosa de pertenecer.

At la Facultad de Estudios Superiores Zaragoza por dejarme ser parte de ella, a quien le debo respeto y lealtad. At todos los maestros que de alguna manera influyeron en mi formación.

Con mucho cariño y respeto a mi director de tesis, al Dr. Gerardo Cruz Flores, quien comparte sus conocimientos y apoya a todo aquel que lo necesita. Admiro mucho su trabajo, lealtad y esfuerzo que hace por los alumnos; pero sobre todo el gran ser humano que es, del cual he aprendido que para alcanzar lo que uno quiere, siempre se debe de trabajar con mucho esfuerzo, humildad y honradez. Agradecerle, no es suficiente por todo el apoyo que me ha brindado... Je agradezco a Dios por haberme dado la dicha de conocerlo. Dios bendiga hoy, mañana y siempre a usted y a toda su familia, lo quiero y estimo demasiado... Gracias maestro por haberme permitido ser su alumna.

At profesor Juan Manuel Valderrábano Gómez "Al muchachito del SIG" por compartir todas esas aventuras en campo, esas risas que nunca olvidaré... Gracias por su apoyo en la excavación de perfiles de suelo; pero más le agradezco el compartir sus conocimientos que han sido muy valiosos para mí. Lo aprecio y estimo demasiado...

At Dr. Frain Angeles, gracias por sus valiosos conocimientos y consejos en todo momento.

At mis Sinodales Biól. Juan Manuel Valderrábano Gómez, Biól. Flvia García Santos, M. en C. Ramiro Ríos Gómez y Biól. Rubén Sulbarán Rosales, gracias por todas sus valiosas observaciones, críticas y correcciones que contribuyeron al mejoramiento del trabajo.

At la prof. Lourdes Castillo, gracias por sus valiosos conocimientos, paciencia y tiempo invertido en la lectura de muestras.

At mis amigas de licenciatura Blanquita, Jania y Carmen por todo su apoyo, consejos y experiencias. Claudia, Cinthia y Marlene por compartir momentos inolvidables en la carrera.

At mis amigos del Laboratorio Almita, Maguito, Cohetero, Quique, Cinthia, Mario, Paquito, Nancy, Queta, Evelyn y Miguel, gracias por compartir su amistad, gracias por todo su apoyo en el laboratorio, gracias por vivir juntos todas esas aventuras en campo y en las salidas que nunca olvidaremos...

At todos mis compañeros del laboratorio Diana, Itzel, Jania, Balam, Mike, Monce, Ariana, Laura, Fly, Lis, Ernesto y a todos aquellos que de alguna manera me han brindado su amistad..



ÍNDICE TEMÁTICO

	Pág.
Índice de figuras	i
Índice de cuadros	iv
Resumen	v
Abstract	vi
1 Introducción	1
2 Marco teórico	
2.1 Descripción general del suelo	2
2.2 El suelo como ecosistema	7
2.3 Calidad del suelo e indicadores de medición	8
2.4 Enzimas del suelo	11
2.5 Suelos forestales	13
2.6 Funciones de los nutrimentos en las plantas	15
2.6.1 Nitrógeno	18
2.6.2 Fósforo	18
2.6.3 Potasio	19
2.6.4 Calcio	20
2.7 Interacciones de los nutrimentos en las plantas	21
2.8 Levantamiento nutricional	21
2.9 Bosque de <i>Abies</i> en México	23
2.10 Funciones de los Parques Nacionales	26
3 Justificación de la investigación	29
4 Objetivos	
4.1 Objetivo general	30
4.2 Objetivos particulares	30
5 Hipótesis	30
6 Diagrama de flujo	31
7 Materiales y métodos	
7.1 Descripción del área de estudio	32
7.2 Selección de sitios de muestreo	33
7.2.1 Colecta de muestras foliares	35
7.2.2 Colecta de muestras de suelo para análisis físico y químico	35



7.2.3	Colecta de muestras de suelo para análisis bioquímico	36
7.2.4	Procesamiento de muestras foliares	36
7.2.5	Procesamiento de muestras de suelo	37
7.2.6	Análisis químico de muestras foliares	37
7.2.7	Análisis físico de muestras de suelo	38
7.2.8	Análisis químico de muestras de suelo	38
7.2.9	Análisis bioquímico de muestras de suelo	39
7.2.9.1	Actividad de la enzima Arilsulfatasa, método p-Nitrofenil sulfato (Tabatabai, 1994).	39
7.2.9.2	Actividad de la enzima Ureasa, método propuesto por Tabatabai, 1994.	39
7.2.9.3	Actividad de la enzima Fosfatasa ácida y alcalina, método p-Nitrofenilfosfato (Tabatabai, 1994).	40
8	Análisis estadístico	40
9	Análisis de resultados	
9.1	Descripción del sitio de estudio	41
9.2	Muestras foliares	43
9.1.1	Nitrógeno foliar	48
9.1.2	Fósforo foliar	52
9.1.3	Potasio foliar	55
9.1.4	Calcio foliar	57
9.1.5	N, P, K y Ca en la planta	61
9.2	Muestras de suelo	62
9.2.1	Propiedades físicas del suelo	62
9.2.2	Propiedades químicas del suelo	66
9.2.3	Propiedades bioquímicas del suelo	72
9.2.3.1	Actividad de la ureasa en el suelo	72
9.2.3.2	Actividad de la arilsulfatasa en el suelo	76
9.2.3.1	Actividad de la fosfatasa ácida y alcalina en el suelo	78
9.4	Relación entre nutrimentos del suelo y muestras foliares	80
9.5	Análisis de Componentes Principales (ACP)	83
10	Conclusiones	85
12	Cita bibliográfica	87
11	Anexos	93



ÍNDICE DE FIGURAS		Pag.
Figura 1	Evolución del suelo. Imagen tomada de http://www.fortunecity.es/expertos/profesor/171/suelos.html	2
Figura 2	Componentes principales del suelo. Imagen tomada y modificada de http://primerosbiologia.blogspot.com/2010/05/componentes-del-biotopo.html	3
Figura 3	Fotografía de un perfil de suelo en la zona del Parque Nacional Izta-Popo.	3
Figura 4	Formación del suelo (Fitz Patrick, 1985).	5
Figura 5	Interacción entre factores físicos y procesos biológicos en y sobre el suelo (Cruz, 2006).	8
Figura 6	Principios de calidad de suelos (Adaptado de Parr <i>et al.</i> , 1992).	9
Figura 7	Localización de enzimas del suelo (Burns, 1982; Nannipieri, 1994).	12
Figura 8	Los ciclos de los nutrimentos comprenden reservorios, procesos de transformación y flujos (Binkley, 2000).	14
Figura 9	Representación esquemática del ciclaje de N, P, K y Ca en la planta (Chapin <i>et al.</i> , 2002).	20
Figura 10	Relación entre abastecimiento nutrimental y crecimiento de los vegetales (Urbano y Hernández, 1992).	22
Figura 11	Fotografía de bosque de <i>Abies</i> en el Parque Nacional Izta-Popo.	24
Figura 12	Bosque de <i>Abies</i> confinados a laderas o cañadas en el Parque Nacional Izta-Popo.	24
Figura 13	A) <i>Abies religiosa</i> en el Parque Nacional Izta-Popo, B) Hojas simples y alternas en <i>Abies religiosa</i> y C) Yemas vegetativas en <i>Abies religiosa</i> .	25
Figura 14	Panorama del Parque Nacional Izta-Popo, con su marcado gradiente altitudinal, constituye una combinación que da origen a una gran diversidad y desarrollo de diferentes estratos de vegetación.	27
Figura 15	Área y sitios de estudio de <i>Abies religiosa</i> en el Parque Nacional Izta-Popo.	32
Figura 16	Promedios generales de N, P, K y Ca en tejido foliar de <i>Abies religiosa</i> y clasificación nutrimental por sitio de estudio en las tres etapas de desarrollo durante los ocho meses de estudio.	48
Figura 17	Comportamiento del N foliar en individuos brinzales, juveniles y maduros en <i>Abies religiosa</i> y la asignación de su estado nutrimental.	50
Figura 18	Fotografía de yemas vegetativas en <i>Abies religiosa</i> en el Parque Nacional Izta-Popo.	51



Figura 19	Fotografía del crecimiento de yemas vegetativas en <i>Abies religiosa</i> en el Parque Nacional Izta-Popo.	51
Figura 20	Comportamiento del N foliar de acuerdo a la etapa de desarrollo, mes y altitud en <i>Abies religiosa</i> y la asignación de su estado nutrimental.	52
Figura 21	Comportamiento del P foliar en individuos brinzales, juveniles y maduros en <i>Abies religiosa</i> y la asignación de su estado nutrimental.	54
Figura 22	Comportamiento del P foliar de acuerdo a la etapa de desarrollo, mes y altitud en <i>Abies religiosa</i> y la asignación de su estado nutrimental.	55
Figura 23	Comportamiento del K foliar en individuos brinzales, juveniles y maduros en <i>Abies religiosa</i> y la asignación de su estado nutrimental.	56
Figura 24	Comportamiento del K foliar de acuerdo a la etapa de desarrollo, mes y altitud en <i>Abies religiosa</i> y la asignación de su estado nutrimental.	57
Figura 25	Comportamiento del Ca foliar en individuos brinzales, juveniles y maduros en <i>Abies religiosa</i> y la asignación de su estado nutrimental.	59
Figura 26	Comportamiento del Ca foliar de acuerdo a la etapa de desarrollo, mes y altitud en <i>Abies religiosa</i> y la asignación de su estado nutrimental.	60
Figura 27	Comparación entre Normales Climatológicas (NC) y % de N, P, K y Ca foliar.	61
Figura 28	Relación entre densidad aparente y % de espacio poroso.	64
Figura 29	Relación entre % de espacio poroso y humedad.	65
Figura 30	Relación entre % de materia orgánica y nitrógeno del suelo.	67
Figura 31	Fósforo del suelo extraíble por el método de Bray y Olsen.	71
Figura 32	Sulfatos (SO_4^{-2}) del suelo extraíbles con NaHCO_3 0.5N pH 8.5, HCl 0.025 N y NH_4F 0.003 N y H_2O .	71
Figura 33	Comportamiento de la actividad ureasa a dos profundidades de 0-5 y de 6-10 cm.	73
Figura 34	Comportamiento de la materia orgánica con la actividad ureasa a dos profundidades de 0-5 y de 6-10 cm.	74
Figura 35	Comportamiento del nitrógeno del suelo con la actividad ureasa a dos profundidades de 0-5 y de 6-10 cm.	74
Figura 36	Comportamiento de la actividad arilsulfatasa a dos profundidades de 0-5 y de 6-10 cm.	76
Figura 37	Comportamiento de la materia orgánica con la actividad arilsulfatasa a dos profundidades de 0-5 y de 6-10 cm.	77



Figura 38	Comportamiento de la actividad de la fosfatasa ácida y alcalina a dos profundidades de 0-5 y de 6-10 cm.	78
Figura 39	Comportamiento de la fosfatasa ácida con el fósforo disponible (P-Bray) a dos profundidades de 0-5 y de 6-10 cm.	79
Figura 40	Comportamiento de la Fosfatasa alcalina con el Fósforo disponible (P-Bray) a dos profundidades de 0-5 y de 6-10 cm.	79
Figura 41	Relación entre N del suelo y nutrimentos foliares.	80
Figura 42	Relación entre P-Bray del suelo y nutrimentos foliares.	81
Figura 43	Relación entre K del suelo y nutrimentos foliares.	81
Figura 44	Relación entre Ca del suelo y nutrimentos foliares.	82
Figura 45	Relación entre Mg del suelo y nutrimentos foliares.	82
Figura 46	Relación entre Na del suelo y nutrimentos foliares.	83



ÍNDICE DE CUADROS

	Pág.
Cuadro 1 Principales horizontes de un suelo y sus características (Buol <i>et al.</i> , 1991; Spurr y Barnes, 1982).	6
Cuadro 2 Indicadores físicos, químicos y biológicos de calidad del suelo (Chen, 2000).	10
Cuadro 3 Esencialidad en estructura y función de los nutrimentos en las plantas (Arnon, 1974; Marschner, 1995).	17
Cuadro 4 Sitios de estudio en el Parque Nacional Izta-Popo	42
Cuadro 5 Promedios de N, P, K y Ca en tejido foliar de <i>Abies religiosa</i> en cada etapa de desarrollo y la asignación de su estado nutrimental.	43
Cuadro 6 Variables que tuvieron una correlación significativa ($\alpha < 0.05$) con respecto a la etapa de desarrollo.	44
Cuadro 7 Intervalos de suficiencia y deficiencia nutrimental en individuos adultos de <i>Abies religiosa</i> (García, 2003).	44
Cuadro 8 Porcentaje general de N, P, K y Ca foliar en <i>Abies religiosa</i> y relación entre nutrimentos por sitio de estudio.	46
Cuadro 9 Porcentaje de N, P, K y Ca en tejido foliar de <i>Abies religiosa</i> , en cada etapa, a lo largo de un ciclo anual y la asignación de su estado nutrimental.	49
Cuadro 10 Normales Climatológicas.	61
Cuadro 11 Promedios generales de las propiedades físicas del suelo.	63
Cuadro 12 Promedios generales de las propiedades químicas del suelo.	68
Cuadro 13 Promedios generales de las propiedades bioquímicas del suelo.	75
Cuadro 14 Variables robustas de los Componentes Principales.	83



RESUMEN

La concentración de nutrimentos en tejido foliar de organismos vegetales está relacionada con el crecimiento y productividad, además de otros factores ambientales. Con el objetivo de evaluar la variación altitudinal de N, P, K y Ca en tejido foliar de *Abies religiosa*, en diferentes etapas de su desarrollo (brinzales, juveniles y maduros) en el Parque Nacional Izta-Popo, se planteó la siguiente hipótesis: La concentración de N, P, K y Ca en tejido foliar de *Abies religiosa* es mayor durante la estación de lluvia, siendo la mejor época del año para el levantamiento nutricional, respecto al período de secas. Para alcanzar dicho objetivo, en siete sitios se seleccionaron individuos en etapa brinzal, juvenil y maduro en los que se colectaron mensualmente, durante ocho meses, muestras foliares recientes (último año de crecimiento) cuantificando N, P, K y Ca. También se colectaron muestras de suelo de 0 a 20 cm de profundidad para determinar sus propiedades físicas y químicas, y de 0 a 5 y 6 a 10 cm para realizar el estudio de enzimas. Se obtuvo una correlación negativa entre los porcentajes de N, P y K foliar con la etapa de desarrollo; sin embargo, el porcentaje de Ca foliar mostró una correlación positiva. Respecto a clases de suficiencia nutrimentales, se encontró al P y al Ca en nivel nutrimental alto. El N con niveles nutrimentales suficientes y altos y al K en niveles nutrimentales bajos. La densidad aparente, porcentaje de porosidad y humedad tuvieron relación con el porcentaje de MOS y contenido de nitrógeno del suelo. La cantidad de sulfatos del suelo fue extraída en mayor cantidad con la solución NaHCO_3 0.5N pH 8.5. La actividad de las enzimas ureasa, arilsulfatasa y fosfatasa alcalina fue ligeramente mayor en la superficie del suelo (0-5 cm) en la mayoría de los sitios y tuvieron correlación positiva con el porcentaje de materia orgánica. Respecto a P-disponible, cuando éste es mayor en los suelos, se encontró una menor actividad enzimática. Como conclusiones, se tiene que, la estabilidad de porcentajes altos de N, P y K foliar en el período de abril a junio en individuos juveniles y maduros puede atribuirse más a la fisiología de la planta (época de desarrollo de renuevos foliares e inicio de la floración) que a la época de lluvias. Conforme avanza el desarrollo (etapa de crecimiento) en *A. religiosa*, los porcentajes de N, P y K en tejido foliar disminuyen y el de Ca foliar aumenta. Junio fue el mes donde coinciden altos porcentaje de N, P y K foliar para las tres etapas. A lo largo del año, no se encontró un período en el que los porcentajes de Ca foliar tuvieran estabilidad en las tres etapas. A mayor altitud el porcentaje de N fue bajo y el P presentó una tendencia opuesta en etapa juvenil y madura. Cuando los niveles de N y P del suelo aumentan, también lo hace el porcentaje de N y P foliar. Los sitios que presentaron un mejor estado nutrimental fueron Coapexco-S1 y Palomas-S1.

Palabras clave: Levantamiento nutricional y *Abies religiosa*.



ABSTRACT

Nutrient concentrations in plant leaf tissue, between other environmental factors, are related to growth and productivity. In order to assess the altitudinal variation of N, P, K and Ca in leaf tissue of *Abies religiosa* in different development stages (seedlings, juveniles and mature) in Iztapopo National Park, it was proposed the following hypothesis: The concentration of N, P, K and Ca in leaf tissue of *Abies religiosa* is highest during the rainy season, being the best time of year for the nutritional survey. To achieve this objective, seven sites were selected sampling and collected monthly for eight months, recent leaf samples (recently year of growth) quantifying N, P, K and Ca. Were also collected soil samples from 0 to 20 cm depth to determine their physical and chemical properties, and 0 to 5 and 6 to 10 cm for the study of enzymes. There was a negative correlation between percentage of N, P and K foliar developmental stage, however, the percentage of foliar Ca showed a positive correlation. With respect to nutritional classes was found adequacy to P and Ca in high nutrient content, N with adequate nutritional levels and high nutrient levels and low-K. Bulk density, porosity and soil moisture were related to the percentage of SOM and soil nitrogen content. Soil sulfates amount was extracted with NaHCO_3 0.5N pH 8.5 solution. The enzyme urease, arylsulfatase and alkaline phosphatase activity was slightly higher in the surface soil (0-5 cm) in most of the sites and had positive correlation with the percentage of organic matter. Regarding P-available, when it is higher in the soil, there was a lower enzyme activity. As conclusions, we observed that stability of high percentages of N, P and K leaf in the period April to June in juvenile and adult individuals can be attributed to plant physiology (shoot development time and early leaf flowering) that the rainy season. As development proceeds (stage of growth) in *A. religiosa*, the percentages of N, P and K in leaf tissue decreased and the foliar Ca increases. June was the month when high match percentage of N, P and K leaf for the three stages. Throughout the year, there was not a period in which foliar Ca rates were stable in three stages. At higher altitudes the percentage of N was low and the P had an opposite trend in juvenile and mature stage. When levels of soil N and P increase, so does the percentage of N and P uptake. Sites that had a better nutritional status were Coapexco-S1 and Palomas-S1.

Keywords: Nutritional status and *Abies religiosa*.

1. INTRODUCCIÓN

Los bosques de oyamel son comunidades vegetales integradas por *Abies*, *Pseudotsuga* y *Picea*, en México cubren aproximadamente 32,000 hectáreas, siendo *Abies religiosa* y *Pseudotsuga menziesii* var. *glauca* las especies más comunes (Rzedowski, 1978).

Los bosques de *Abies* sobresalen entre el conjunto de las comunidades vegetales dominadas por coníferas. Estos bosques están confinados a laderas protegidas del viento así como de la fuerte intensidad solar, muchas veces en cañadas o barrancas que ofrecen un microclima especial (Rzedowski, 1978) ó en terrenos con fuertes pendientes. Sin embargo, ha sido descrito un problema de decline forestal que incluye a comunidades de *Abies religiosa* en bosques templados cercanos a la Cd. de México atribuido principalmente a la contaminación ambiental y a la alta concentración de ozono, lo cual es reflejado en la especie a través de síntomas como, escaso crecimiento y daños en follaje (López-López *et al.*, 2006).

Otros estudios sobre la especie, se atribuyen más a los problemas de efectos de contaminación del aire en bosques de *Abies religiosa*; ya que las actividades humanas influyen en las características químicas de la atmósfera, ocasionando daños de distintos tipos, como son pérdida de hojas y ramas, necrosis foliar, clorosis y descortezamiento; pues la atmósfera y el suelo son las dos fuentes de nutrimentos importantes para sustentar los ecosistemas forestales. En México existen trabajos muy escasos enfocados a su estado nutricional entre éstos; García (2003), quien trabajó con 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; Soriano (2008), trabajó con Levantamiento nutricional de los géneros *Pinus* y *Abies* en bosques templados de México y Martínez (2009), estudió el Contenido foliar de N, P, Ca, Mg y K en especies arbóreas de bosques templados y calidad del suelo en la Sierra de Manantlán y la Sierra Juárez. Sin embargo, en la mayoría de los estudios citados, no fue considerada la época en la que es más favorable la colecta de muestras foliares, lo cual es un requisito importante para establecer con mayor precisión las necesidades nutrimentales de *Abies religiosa*; ya que en las coníferas, la concentración de nutrimentos en el follaje puede ser fuertemente influenciado por factores como la posición de la copa, edad del follaje (tiempo en años) y manejo de la muestra (Brockley, 2001). Además la concentración de nutrimentos dentro de las plantas es dinámica dependiendo del grupo taxonómico y el medio externo, existiendo diferencias de concentración entre órganos dentro de un grupo taxonómico e inclusive dentro de un individuo, dependiendo de su ubicación en la planta, de la edad de los mismos y de su interacción con el medio ambiente (Wells y Allen, 1985; Pritchett, 1986).

2. MARCO TEÓRICO

2.1 Descripción general del suelo

El término suelo se refiere al material exterior, poco compacto, de la superficie terrestre, un estrato característicamente diferente del lecho rocoso subyacente (Alexander, 1980). Es un ente natural, tridimensional, trifásico, dinámico, sobre el cual crecen y se desarrollan la mayoría de las plantas (Sánchez, 2007), entre cuyas funciones primordiales están las de mantener:

- a) La productividad de las especies vegetales que en él se establecen
- b) La biodiversidad en general
- c) La calidad del aire y del agua
- d) La salud humana y el hábitat (Etchevers *et al.*, 2000; Seybold *et al.*, 1997).

Químicamente, el suelo contiene una gran cantidad de sustancias orgánicas que no se encuentran en los estratos más profundos. Es la región en la que se sustenta la vida vegetal y de la cual las plantas obtienen soporte mecánico y muchos de sus nutrimentos (Alexander, 1980). El suelo es también un medio dinámico, ya que adquiere progresivamente sus propiedades por la acción combinada de los factores del medio.

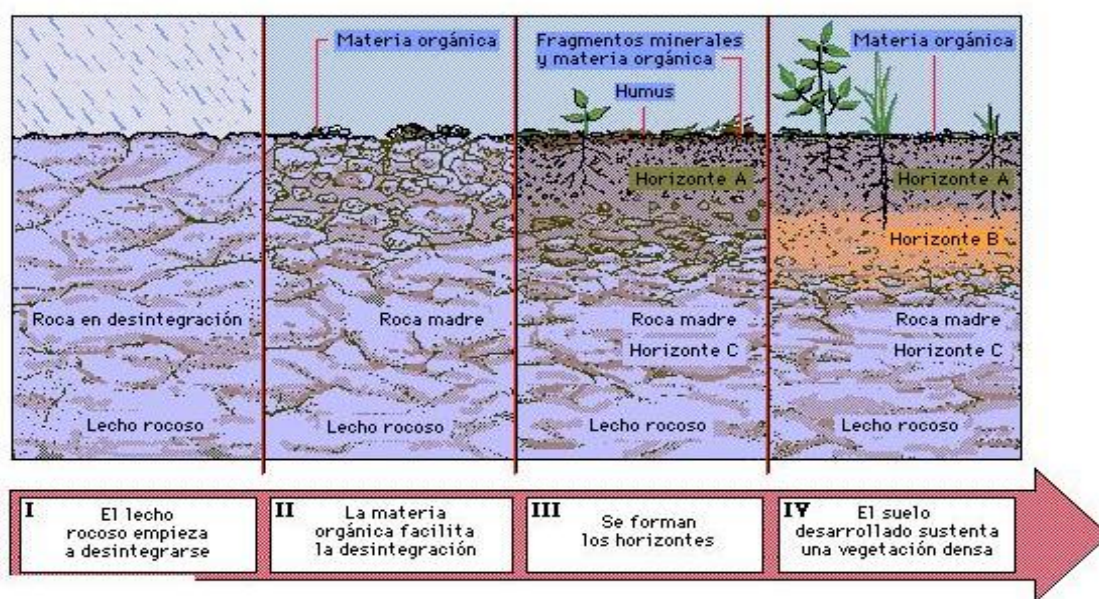


Figura 1. Evolución del suelo. Imagen tomada de <http://www.fortunecity.es/expertos/profesor/171/suelos.html>

El suelo se forma como consecuencia del intemperismo que altera a la roca basal. El intemperismo, también llamado meteorización, es la acción de fuerzas químicas, físicas y biológicas que actúan sobre las rocas, causando inicialmente pequeñas grietas que con el transcurso del tiempo se extienden con profundidad, desintegrándola y dando lugar a la formación del material parental, en donde se inicia el proceso de formación del suelo, con el desarrollo de plantas pequeñas inferiores (líquenes, musgos, etc.) y posteriormente, plantas superiores cuyas raíces se van extendiendo penetrando cada vez más, hasta que finalmente, las plantas adquieren tal crecimiento que influyen decisivamente en la intemperización y desarrollo del suelo (Figura 1), permitiendo la formación de horizontes para constituir así un suelo genéticamente evolucionado (Aguilera, 1989).

El suelo está constituido por una mezcla de material orgánico e inorgánico el cual es biológicamente influenciado; la capa biológica de material que hace posible la vida en el planeta (Richter, Jr. y Markewitz, 2001). El suelo es en efecto, un medio complejo, caracterizado por una atmósfera interna, una economía particular de agua, una flora y una fauna determinada, además de elementos minerales. El suelo constituye un sistema complejo que consiste en proporciones variables de cuatro componentes principales, el mineral o partículas de roca y la materia orgánica muerta que constituyen la matriz sólida, la disolución del suelo y el aire que ocupan el espacio poroso dentro de esa matriz (Figura 2). Además de esos cuatro componentes, el suelo contiene generalmente múltiples organismos vivos tales como bacterias, hongos, algas, protozoos, insectos y animalillos pequeños que afectan directa o indirectamente a la estructura del suelo y el crecimiento de las plantas (Kramer, 1989).

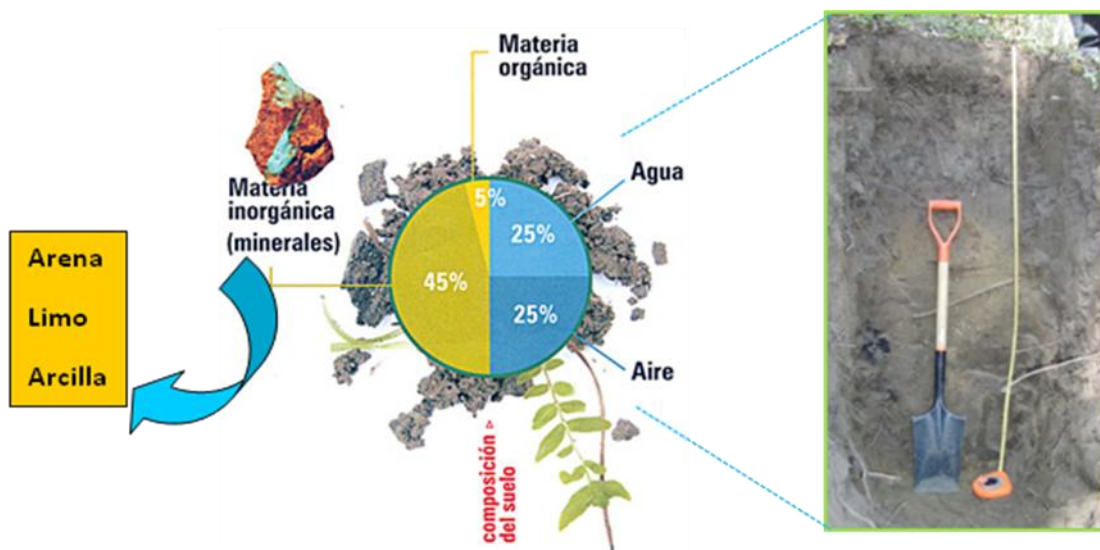


Figura 2. Componentes principales del suelo. Imagen tomada y modificada de <http://primerosbiologia.blogspot.com/2010/05/componentes-del-biotopo.html>

Figura 3. Fotografía de un perfil de suelo en la zona del Parque Nacional Izta-Popo.



La cantidad de estos constituyentes no es la misma en todos los suelos sino que varía con la localidad. La cantidad de materia orgánica y mineral, que forma parte de la porción inanimada, es relativamente fija en un determinado lugar; sin embargo, la proporción de aire y agua varía. El aire y el agua juntos presentan aproximadamente la mitad del volumen del suelo; dicho volumen se denomina espacio poroso. La fracción mineral, que generalmente contribuye con poco menos de la mitad del volumen, se origina de la desintegración y descomposición de las rocas, modificándose con el transcurso del tiempo. Por lo general la materia orgánica constituye del 3 al 6% del total. La porción viviente del suelo (incluyendo varios animales pequeños y microorganismos) constituye menos del 1% del volumen total; aún así, esta porción es indudablemente esencial para la producción de cultivos y la fertilidad del suelo (Alexander, 1980).

Los organismos del suelo desempeñan un papel importante en la degradación de la materia orgánica y en la liberación de desechos nitrogenados y minerales que entonces quedan disponibles para ser reabsorbidos. También tienden a variar la cantidad de oxígeno e incrementar el bióxido de carbono contenido en el suelo, modificando así su atmósfera en la que crecen las raíces. Se dice que los productos orgánicos de descomposición representan un papel importante para conglomerar los gránulos del suelo, mejorando así la estructura de éste (Kramer, 1989).

En la fracción mineral se encuentran partículas de una gran variedad de tamaños, desde aquellas que son visibles al ojo humano hasta las partículas de arcilla que sólo pueden observarse con ayuda de un microscopio (Alexander, 1980).

Los suelos son cuerpos que se forman a una tasa de 1 cm por cada 100 a 400 años, a partir del material mineral y orgánico sometido, bajo la influencia del tiempo geológico, a los efectos del clima, topografía, vegetación y fauna y la acción del hombre (Figura 3). La intensidad de cada uno de los factores formadores de suelos, tienen influencia diferencial y así se tiene la formación y desarrollo de diferentes suelos a partir de material parental del mismo origen geológico y, de la misma manera, los tipos de vegetación que se desarrollen en algún tipo de suelo, podrán o no, ser diferentes (Doran y Parkin, 1994).

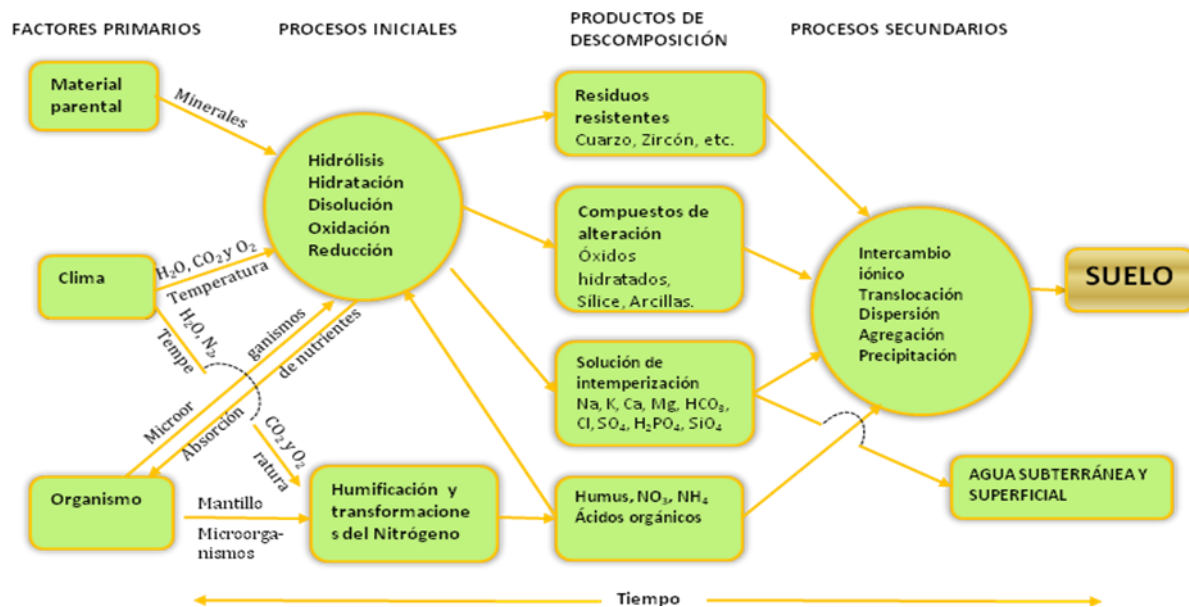


Figura 4. Formación del suelo (Fitz Patrick, 1985).

Una forma de estudiar al suelo en condiciones de campo es describir su perfil, el cual es la exposición vertical de una porción superficial de la corteza terrestre hasta el límite de profundidad de las raíces de las plantas perennes, o hasta la del material rocoso relativamente inalterado. Está integrado por capas aproximadamente paralelas a la superficie de la tierra, que son producto de la evolución del suelo y que poseen características físicas, químicas y biológicas propias. A cada capa individual se le conoce como **horizonte** y generalmente se distinguen entre sí por diferencias de color, estructura, contenido de materia orgánica, etc. (Valencia y Hernández, 2002). Los perfiles de suelos se desarrollan de diferente manera por los efectos de los parámetros formadores de los suelos.

Una roca ígnea, metamórfica o sedimentaria origina horizontes y subhorizontes en un perfil de suelo, pero la profundidad de estos dependerá de la interacción del clima, organismos, topografía y naturaleza de la roca a través del tiempo que da la edad de un suelo.

Para estudiar y clasificar el perfil del suelo se necesita hacer una excavación, aplicando ciertos criterios en función a los estudios que se desean realizar, ya sean bióticos o abióticos. Las propiedades que permiten clasificar los perfiles de suelos son: profundidad, color, textura, estructura, permeabilidad, drenaje, porosidad, porcentaje de materia orgánica, moteado, concreciones, capacidad de intercambio catiónico y consistencia (Aguilera, 1989).



Para conveniencia de su estudio y descripción, los niveles que resultan de los procesos de formación de un suelo se agrupan en tres grupos u horizontes principales: A, B y C. Estos a su vez tienen subdivisiones debido a diferentes características. El horizonte A (eluvial), se encuentra en la superficie y se caracteriza como una zona de máximo lavado y aireado. El horizonte B (iluvial) incluye las capas en las cuales tiene lugar la sedimentación proveniente de las capas superiores y a veces de las inferiores; es la región de máxima acumulación de materiales como los óxidos de hierro, aluminio y de arcillas. El horizonte C, o material parental, se ve menos meteorizado y es comúnmente similar al material que forman los horizontes A y B (Aguilera, 1989). Los principales horizontes y sus características se enlistan en el Cuadro 1.

Cuadro 1. Principales horizontes de un suelo y sus características (Buol *et al.*, 1991; Spurr y Barnes, 1982).

HORIZONTE	CARACTERÍSTICAS
O₁	Horizonte orgánico. Contienen más de 30% de materia orgánica. Se nota a simple vista la forma original de la mayor parte del material vegetal (mantillo).
O₂	Horizonte orgánico. Caracterizada por humus (mantillo descompuesto o en descomposición) en el cual es irreconocible el estado original del material orgánico.
A₁	Contienen menos de 20% de materia orgánica. Capa superficial del suelo mineral que es lixiviada. El suelo es tan oscuro o más que los horizontes subyacentes debido al depósito constante de materia orgánica humificada.
A₂	Horizonte mineral de color más claro y contenido más bajo de materia orgánica. Pérdida de arcilla, hierro o aluminio, con la concentración resultante de cuarzo u otros minerales de tamaño de arenas o limos.
A₃	Horizonte de transición más parecido a A que a B ₂ .
B₁	Horizonte de transición más parecido a B ₂ que a A ₁ o A ₂ .
B₂	Horizonte de acumulación, caracterizada por la deposición de óxidos de hierro y aluminio y diminutas partículas de arcilla y orgánicas, todas derivadas de la lixiviación de materia orgánica y los minerales que se encuentran en la superficie. Es normalmente más fino y oscuro que el material original mientras que el A tiene una textura más gruesa y puede tener tanto un color más oscuro como más claro. Alto contenido de arcilla.
B₃	Horizonte de transición al horizonte C con más características de B que de C.
C	Es un horizonte o una capa mineral que excluye a la roca madre (material a partir del cual se presume que el horizonte A y B ha sido formado). Está relativamente poco afectado por los procesos edafogénicos y con ausencia de propiedades diagnósticas de A o B, pero que incluye materiales modificados por intemperización, cementación, gleización, acumulación o cementación por acumulación de carbonatos de calcio o magnesio o de sales más solubles y cementación por material silíceo o soluble en álcali o por hierro y silicio.
R	Roca subterránea consolidada (dura).



2.2 El suelo como ecosistema

El suelo es un ecosistema que respira y es dinámico, por lo que ocurren procesos importantes como la descomposición de la materia orgánica y la liberación de nutrientes, los cuales fluyen a las plantas y de ahí a los animales y después son regresados al mismo (fuente), es por ello que se considera un sistema vivo, termodinámicamente abierto que corresponde grandemente a los efectos internos y externos de elementos y energía (Richter, Jr. y Markewitz, 2001), y es donde se llevan a cabo los ciclos biogeoquímicos como carbono, azufre, nitrógeno y fósforo.

Los procesos de descomposición y respiración que suceden en él tienen un papel importante para el mantenimiento del balance entre la producción y el consumo del CO₂ de la biosfera, tanto al reciclar el C atmosférico que está en forma de CO₂ como en la formación de la materia orgánica, la cual es reservorio no solo del C atmosférico sino de otros elementos. Las etapas esenciales de los ciclos globales del agua, C, N, P y S suceden en el suelo, la velocidad del ciclaje y la disponibilidad de estos elementos están siendo alteradas continuamente por las diferentes formas de vida y por la constante búsqueda de fuentes de alimento y energía (Doran *et al.*, 1999).

El ambiente influye en la morfogénesis de los suelos y su formación está en relación con los procesos pedogenéticos o edafogénicos, en estos procesos intervienen flujos de entrada y salida de energía; ejemplos de flujos de entrada son el agua de lluvia o riego, el aire de la atmósfera; y de salida, la evaporación del agua y el aire del suelo, y evapotranspiración del agua asociado con CO₂ producido por la microflora del suelo o bien con H₂S que se desprende en los mecanismos de fermentación orgánica o por la alteración de las piritas del suelo (Aguilera, 1989).

El ecosistema es un conjunto de elementos bióticos (especies) y abióticos en constante interacción entre los cuales se tiene al suelo (Figura 5). La naturaleza de los componentes bióticos del ecosistema, hacen del suelo un recurso de extrema importancia pues las plantas (productores primarios en un ecosistema) obtienen de él, nutrientes y agua. El suelo mismo es un ecosistema pues en él vive una gran diversidad de macro y microorganismos, que interactúan con otros factores abióticos, en una sociedad íntimamente relacionada, cuya actividad genera una red compleja de interacciones biológicas que permiten su propio desarrollo y crecimiento y al mismo tiempo el de las plantas superiores (Cruz, 2006).

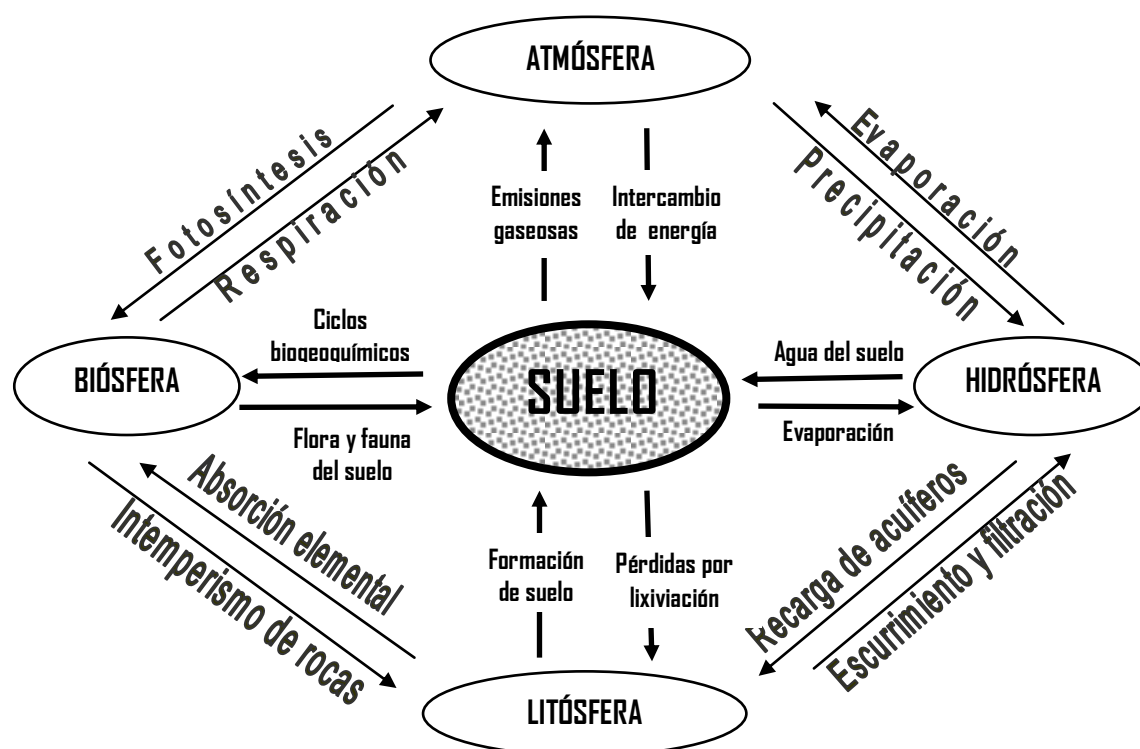


Figura 5. Interacción entre factores físicos y procesos biológicos en y sobre el suelo (Cruz, 2006).

Un ecosistema saludable está definido por la integración de los ciclos de los nutrientes y flujos de energía, y por la estabilidad y elasticidad frente a una alteración o estrés (van Bruggen y Semenov, 2000). En general la respuesta de los suelos y de los ecosistemas a una alteración tiene dos componentes: resistencia y resiliencia. La resistencia, es la capacidad inherente del sistema para tolerar la alteración; y la resiliencia, es la capacidad amortiguadora y la habilidad para regenerarse. Por otro lado, la biodiversidad es una propiedad que condiciona la capacidad de recuperación del sistema edáfico ante una alteración y de mantener su estabilidad funcional (Griffiths *et al.*, 2001), hay evidencias de la relación que existe entre los organismos que habitan en el ecosistema (diversidad, estructura de la cadena trófica, estabilidad de las comunidades) y la elasticidad de un suelo (van Bruggen y Semenov, 2000).

2.3 Calidad del suelo e indicadores de medición

Doran y Parkin (1994) definen la **calidad del suelo** como la capacidad que éste tiene para sostener la productividad biológica y mantener la calidad ambiental de tal forma que se promueva la salud vegetal, animal y humana; todo ello dentro de los límites que imponen el ecosistema y el tipo de manejo que se le da. La definición de calidad de suelos incluye tres principios importantes:

- a) La productividad del suelo, que se refiere a la habilidad del mismo para promover la productividad del ecosistema o agroecosistema, sin perder sus propiedades físicas, químicas y biológicas.
- b) La calidad medio ambiental, entendida como la capacidad de un suelo para atenuar los contaminantes ambientales, los patógenos, y cualquier posible daño hacia el exterior del sistema, incluyendo también los servicios ecosistémicos que ofrece (reservorio de carbono, mantenimiento de la biodiversidad, recarga de acuíferos, etc.).
- c) La salud, que se refiere a la capacidad de un suelo para producir alimentos sanos y nutritivos para los seres humanos y otros organismos (Arshad y Coen, 1992; Parr *et al.*, 1992; Doran y Parkin, 1994).



Figura 6. Principios de calidad de suelos (Adaptado de Parr *et al.*, 1992).

La evaluación de la calidad de un suelo es indispensable para determinar si un sistema de manejo es sustentable a corto y largo plazo (Doran *et al.*, 1994). La calidad del suelo es dinámica y puede cambiar a corto plazo de acuerdo al uso y a las prácticas de manejo; para conservarla es necesario implementar prácticas sustentables en el tiempo (NRCS, 2004).

El mantenimiento o incremento de la calidad del suelo puede generar beneficios económicos en forma de aumentos de productividad, mayor eficiencia en el uso de nutrientes, mejor calidad del agua y del aire, y reducción de los gases de efecto invernadero (Brejeda y Moorman, 2001).

La evaluación de la calidad permite mejorar la respuesta de los recursos, como son: pérdida de suelo por erosión, depósitos de sedimento por viento o inundación, reducción de infiltración e incrementos de lluvia, endurecimiento de la capa superficial, pérdida de nutrientes, transporte de pesticidas, cambios en el pH, aumento en la disponibilidad de metales pesados, pérdida de materia orgánica, reducción de la actividad biológica, infestación de organismos patógenos y reducción de calidad de agua (NRCS, 2004). El concepto de calidad de suelos integra e interconecta los



componentes y procesos biológicos, químicos y físicos de un suelo en una situación determinada (Astier *et al.*, 2002).

La calidad del suelo se evalúa con el uso de indicadores. Un **indicador de calidad del suelo** se concibe como una herramienta de medición que debe dar información sobre las propiedades, procesos y características. Los indicadores se miden para dar seguimientos a los efectos del manejo sobre el funcionamiento del suelo en un período dado. La calidad de suelo se puede evaluar empleando indicadores que reflejen los cambios en la capacidad del suelo y en su función (Dalurzo *et al.*, 2002).

Cuadro 2. Indicadores físicos, químicos y biológicos de calidad del suelo (Chen, 2000).

INDICADOR	RELACIÓN CON LAS FUNCIONES Y CONDICIONES DEL SUELO
Indicadores Físicos	
Textura	Retención y transporte de agua y minerales; erosión del suelo.
Profundidad (suelo superficial y raíces).	Estimación del potencial productivo y de erosión.
Infiltración y densidad aparente	Potencial de lixiviación, productividad y erosión.
Capacidad de retención de agua	Contenido en humedad, transporte, erosión, humedad aprovechable, textura, materia orgánica.
Estabilidad de agregados	Erosión potencial de un suelo, infiltración de agua.
Indicadores Químicos	
Contenido en materia orgánica	Fertilidad de suelo, estabilidad y grado de erosión, potencial productivo.
pH	Actividad química y biológica, límites para el crecimiento de las plantas y actividad microbiana.
Conductividad eléctrica	Actividad microbiológica y crecimiento de las plantas.
N, P y K extraíble	Disponibilidad de nutrientes para las plantas y pérdida potencial de N, indicadores de productividad y calidad ambiental.
Capacidad de intercambio catiónico	Fertilidad de suelo, potencial productivo.
Metales pesados disponibles	Niveles de toxicidad para el crecimiento de la planta y calidad del cultivo.
Indicadores biológicos	
Biomasa microbiana	Potencial catalizador microbiano y reposición de C y N.
N mineralizable	Productividad del suelo y aporte potencial de N.
Nº de lombrices	Actividad microbiana.
Aireación, contenido en agua, temperatura.	Medición de la actividad microbiana.
Rendimiento del cultivo	Producción potencial del cultivo, disponibilidad de nutrientes.

Los indicadores dependen del ecosistema considerado, debiendo determinarse características que sirvan como indicadores de su sustentabilidad. El suelo, al ser un sistema de tres



fases, presenta una variada gama de propiedades las que podemos clasificar, en forma muy general, en propiedades físicas, químicas y biológicas (Cuadro 2). Estas propiedades, actúan como indicadores influenciando el funcionamiento del suelo en el ecosistema, permitiendo conocer la manera óptima de manejar este recurso. Dentro de estas propiedades encontramos las actividades enzimáticas del suelo que se han sugerido como potenciales dentro del conjunto de indicadores, debido a su relación con la biología del suelo, ya que su presencia depende directamente de la continua liberación al ambiente llevada a cabo por los organismos que habitan en el ecosistema (Burns, 1982), además están relacionadas con funciones ecológicas como la producción de biomasa, la remediación de contaminantes y la conservación de ecosistemas. Las actividades enzimáticas pueden ser usadas como parte del conjunto de herramientas necesarias para asignar sostenibilidad, son de fácil determinación y responden rápidamente al manejo del recurso (Dick y Tabatabai, 1992).

Los indicadores de calidad de suelo permiten analizar la situación actual e identificar puntos críticos con respecto a la sustentabilidad del suelo como medio productivo o bien como recurso natural importante para la calidad de la vida y mantención de la biodiversidad; permiten analizar los posibles impactos antes de una intervención; monitorear el impacto de la intervención y ayudar a determinar si el uso del recurso es sustentable (Hunnemayer *et al.*, 1997).

Doran *et al.* (1994) propusieron una lista de condiciones que deben cubrir los indicadores de calidad de suelos. Éstos deben: ser descriptores de los procesos de los ecosistemas; integrar propiedades y procesos físicos, químicos y biológicos del suelo; ser accesibles a los diferentes usuarios y aplicables a diversas condiciones de campo; ser sensibles a las variaciones de manejo y de clima; y provenir de base de datos existentes. La medición de la calidad de suelos mediante el empleo de indicadores permite entender cómo evoluciona el estado (capacidades y propiedades) de los suelos bajo determinados sistemas de manejo (Astier *et al.*, 2002).

2.4 Enzimas del suelo

Las enzimas son proteínas cuyo papel es catalizar las reacciones químicas en los sistemas vivos, actúan sobre sustratos específicos transformándolos en productos necesarios para los ciclos biológicos. Los organismos y las plantas liberan enzimas al suelo por secreción y por lisis celular después de su muerte; un bajo porcentaje de estas proteínas quedan inmovilizadas y estabilizadas en interacción con los diferentes componentes de la fase sólida del suelo, como las arcillas, moléculas orgánicas y complejos organominerales (Joinville *et al.*, 2004). Dependiendo del material, la interacción se da por mecanismos que incluyen: microencapsulación, enlaces transversales,

formación de copolímeros, adsorción, entrapamiento, intercambio iónico y enlaces covalentes (Dick y Tabatabai, 1992). Solo un bajo porcentaje de las enzimas que abandonan las células se encuentran estabilizadas, ya que se liberan a un ambiente inhóspito donde pueden ser sometidas a desnaturalización no biológica, adsorción, inactivación o degradación por proteasas. Al igual que en los otros sistemas vivos, la velocidad de la reacción catalizada por una enzima es dependiente del pH, de la fuerza iónica, de la temperatura y de la presencia o ausencia de inhibidores (Burns, 1982; Sarkar *et al.*, 1989). Las enzimas proceden de células proliferantes, latentes, o restos de ellas. La mayor producción de enzimas extracelulares se le atribuye a microorganismos por su gran biomasa, su alta actividad metabólica y su corto ciclo de vida, en contraste con otros organismos que también las pueden liberar como las plantas y los animales (Dick y Tabatabai, 1992).

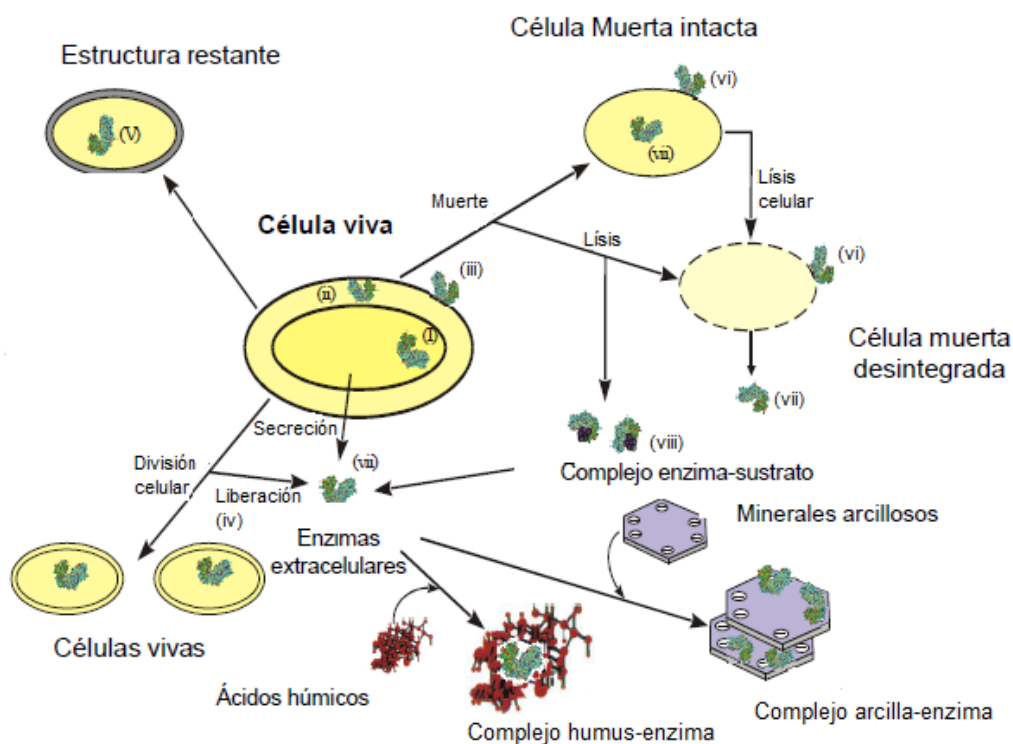


Figura 7. Localización de enzimas del suelo (Burns, 1982; Nannipieri, 1994).

(i) Enzimas intracelulares. **(ii)** Enzimas periplasmáticas. **(iii)** Enzimas que se fijan en la superficie exterior de la membrana celular. **(iv)** Enzimas liberadas durante el desarrollo y la división celular. **(v)** Enzimas dentro de células no proliferativas (esporas, quistes, endosporas y semillas). **(vi)** Enzimas fijadas a restos de células muertas. **(vii)** Enzimas que salen de las células intactas o liberadas por lisis celular. **(viii)** Enzimas temporalmente en el complejo enzima sustrato. **(ix)** Enzimas adsorbidas por la superficie de los minerales arcillosos. **(x)** Enzimas en los complejos arcilla-enzima y humus-enzima.



El estudio de distintas actividades enzimáticas resulta muy útil en el diagnóstico y cuantificación de la degradación o recuperación de un suelo. Algunas actividades enzimáticas junto con otras variables bioquímicas han sido utilizadas en la obtención de índices de calidad del suelo, por su alta sensibilidad y rápida respuesta a las perturbaciones (Trasar-Cepeda *et al.*, 1999).

2.5 Suelos forestales

La ciencia de los suelos forestales se desarrolló lentamente en América del Norte debido a la falta general de una necesidad apremiante respecto a este tipo de información sobre los bosques aún no explotados. Sólo después de la Primera Guerra Mundial comenzó a arraigarse la idea de llevar a cabo un manejo selectivo de los bosques para obtener un rendimiento constante de reforestar las tierras agrícolas abandonadas y establecer franjas de protección en el Medio Oeste (Pritchett, 1991).

Un **suelo forestal** es aquel suelo que se ha desarrollado bajo la influencia de una cubierta forestal (Führer, 2000). 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 que está habitada por organismos. Manifiesta características peculiares adquirida 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 la vegetación forestal (Bockheim, 1991).

Las propiedades de un suelo forestal están asociadas a un microclima, al reciclaje de los elementos, a una población microbiana específica y a la formación de ácidos orgánicos provenientes de la descomposición de la materia orgánica. En ellos se llevan a cabo procesos dinámicos como los ciclos de nutrientes (Pritchett, 1991 y Honorato, 2000).

La mayor parte de los suelos forestales van de moderada a extremadamente ácidos, como resultado de la liberación de ácidos orgánicos durante la descomposición de la capa de mantillo y la consiguiente lixiviación de las bases del suelo mineral superficial. La mayor parte de las especies *Tsuga*, *Picea*, *Abies* y *Pinus* crecen mejor en suelos muy ácidos y, en consecuencia el mantillo es ácido (Pritchett, 1991).

De acuerdo con Pritchett, (1991), la mayor parte de los suelos forestales están en una escala de pH entre 3.5 a 6.5 aproximadamente. Otra característica de la acidez es que ésta varía sólo de manera ligera con los cambios estacionales, pero estos raramente son superiores a 1.0 de pH. El pH de la cubierta forestal puede alcanzar su máximo en otoño, sobre todo en los bosques caducifolios.

Los suelos forestales, en general, son deficientes en agua, cada año, durante parte de la estación de crecimiento y contiene sólo cantidades mínimas de los materiales esenciales para el crecimiento vegetal (Harold y Hocker, 1984).

El retorno anual de materia orgánica y bioelementos al suelo, asociados bajo la forma de hojarasca, constituye el proceso principal de reciclaje de nutrientes de los ecosistemas forestales (Santa Regina y Gallardo, 1985; Gallardo *et al.*, 1994) y representa aproximadamente el 80% del total de nutrientes retornados al suelo por los detritos del árbol (Santa Regina *et al.*, 2001). La liberación de nutrientes durante la descomposición de la hojarasca, es conocida como uno de los cuantitativamente más importantes procesos que contribuyen con el ciclo de los mismos en estos ecosistemas (Laskowski and Berg, 1993) (Figura 7).

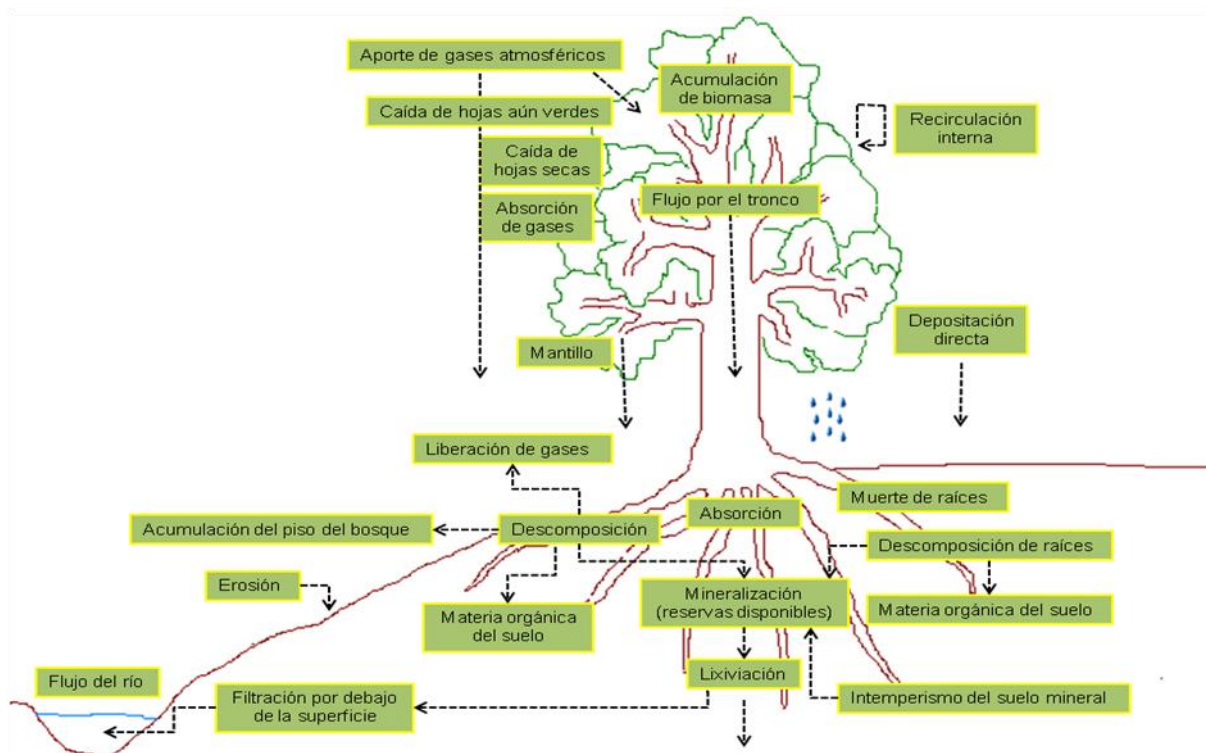


Figura 8. Los ciclos de los nutrientes comprenden reservorios, procesos de transformación y flujos (Binkley, 2000).

En cualquier tipo de bosque la caída masiva de hojarasca se produce cada año en un tiempo determinado. En un ecosistema forestal en equilibrio hay una relación entre la cantidad de material vegetal aportado anualmente al suelo y el que se descompone en ese tiempo; además en éstos ecosistemas, la fracción aportada más importante por su abundancia, le corresponde a las hojas, que tienen composiciones químicas que son características de cada especie (Prause, 1997; Palma *et al.*,



1998). En los bosques tropicales, la mayor parte de las reservas nutritivas están en la biomasa vegetal, siendo escasa la que se encuentra en el suelo (Godeas *et al.*, 1985; Swift *et al.*, 1979).

Por otra parte, si la velocidad de descomposición de la hojarasca fuera menor que su aporte, se produciría una inmovilización de los nutrimentos, lo que se traduciría en una disminución de la productividad (Mangenot y Toutian, 1980). El posible papel de las especies sobre la circulación de nutrimentos en el ecosistema depende de la cantidad de material reciclable y de su tasa de descomposición. La cantidad y naturaleza de la hojarasca tienen una importante relación con la formación del suelo y el mantenimiento de su fertilidad, de ahí que la cuantificación de su producción y naturaleza sea una importante aproximación para la comprensión de los bosques y del ciclaje de nutrimentos (Rai y Proctor, 1986).

La importancia del estudio del ciclo biogeoquímico de los bosques radica en que éste es un proceso integrador en el que participan y por el que se ven afectadas características estructurales y funcionales del ecosistema: fotosíntesis, respiración, absorción radical, etc. (Cole y Rapp, 1981; Rodá, 1993; Moreno, 1994). Además, conocer la influencia de las especies arbóreas sobre la fertilidad de los suelos resulta importante para su eventual utilización en proyectos de recuperación de áreas degradadas o en el manejo de sistemas que tiendan a la sostenibilidad (Montagnini *et al.*, 1995).

2.6 Funciones de los nutrimentos en las plantas

En las plantas, el estado de los nutrimentos minerales está directamente relacionado con el crecimiento y productividad; además de otros factores ambientales. En él influye el potencial genético de absorción y disponibilidad de nutrimentos en el suelo (Mengel y Kirkby, 2001).

Actualmente sabemos que más de 90 elementos químicos que pueden contener las plantas, dieciséis son los que intervienen de manera esencial en su crecimiento (Donahue *et al.*, 1981). Los elementos esenciales reciben específicamente el nombre de “nutrimentos vegetales”; ellos son C, H, O, N, P, K, Ca, Mg, S, Fe, Cl, B, Cu, Mn, Mo y Zn (Rodríguez, 1992); de los cuales carbono, oxígeno e hidrógeno, son tomados del CO₂ atmosférico y agua del suelo, durante el proceso fotosintético. El resto de nutrimentos esenciales son tomados de manera natural del suelo, y de acuerdo a la cantidad en que son absorbidos por las plantas, se clasifican en **macronutrimentos** (N, P, K, Ca, Mg y S) y **micronutrimentos** como Fe, Cl, B, Mn, Cu, Mo y Zn (Donahue *et al.*, 1981).

Otros elementos que poseen una esencialidad reducida, son el Na, utilizado por algunos vegetales como el *Atriplex* (planta de suelos alcalinos); el Va, que algunas algas verdes absorben; el



Co, utilizado por el cacao; el Si, absorbido por las gramíneas (como los cereales) y algunas algas que lo acumulan en su pared celular (las diatomeas); el I, que absorben las algas marinas (Rodríguez, 1992). No todos son requeridos por todas las plantas, pero todos se han demostrado esenciales para algunas. Cada uno juega un papel en el crecimiento y desarrollo de las plantas, y cuando están presentes en cantidades insuficientes pueden reducir el crecimiento y los rendimientos (Marschner, 1995).

El cuadro 3 muestra, para cada nutrimento, la forma química más común que es absorbida por las plantas, las concentraciones aproximadas en las que se encuentran los diferentes elementos en tejido vegetal y finalmente, las principales funciones en el metabolismo celular en el que intervienen y que determinan su esencialidad.

Un elemento esencial debe cumplir con los tres criterios que se mencionan a continuación:

- ❖ La planta no podrá completar su ciclo de vida si hay carencia del elemento.
- ❖ La función del elemento debe de ser específica y ningún otro elemento puede sustituirlo completamente.
- ❖ El elemento debe estar directamente implicado en la nutrición de la planta, o sea que debe ser un constituyente de un metabolito esencial o, por lo menos, ser necesaria su presencia para la acción de una enzima esencial, y no ser simplemente la causa para que otros elementos sean más fácilmente asimilables, o ser por lo menos un antagonista de un efecto tóxico de otros elementos (Cruz, 2006).

Entre las funciones de los nutrimentos en el metabolismo de la planta, está la utilidad estructural, la de impulsores de procesos energéticos o reguladores de la presión osmótica celular y también como enlace en procesos de transferencia de energía. En la función estructural, forman parte de la molécula de uno o más compuestos orgánicos (aminoácidos y proteínas). Como impulsores de procesos energéticos los elementos pueden ser constituyentes de enzimas (generalmente metales o elementos de transición que forman parte del grupo prostético de enzimas) y son esenciales en las actividades de las mismas; éste es el caso del Cu, Fe, Zn, Mn, Mo y Ni. Funcionan como activador enzimático, ya que forma parte del grupo prostético o elemento disociable de la fracción proteica de la enzima y es necesario en las actividades de la misma (Quiroz, 2002).

Cuadro 3. Esencialidad en estructura y función de los nutrimentos en las plantas (Arnon, 1974; Marschner, 1995).

ELEMENTO Y FORMA QUÍMICA ABSORBIDA	CONCENTRACIÓN CON BASE EN TEJIDO SECO mg kg^{-1}	FUNCIONES
C, H, O: (CO ₂ , H ₂ O)	C : 45x10 ⁴ H : 6x10 ⁴ O : 45x10 ⁴	C, H y O: Componentes de todos los compuestos orgánicos: Carbohidratos, proteínas, lípidos y ácidos nucleicos. El H además de componente de todos los compuestos orgánicos, es importante en el balance iónico, actúa como el más importante agente reductor y juega papel clave en la regulación energética de la célula.
N (NO ₃ ⁻ , NH ₄ ⁺) y S (SO ₄ ²⁻)	N : 15x10 ³ S : 1x10 ³	N y S: Constituyentes de las proteínas de enzimas, compuestos de reserva, y componentes de las biomembranas. El S está además relacionado con algunos procesos energéticos de la célula vegetal y en procesos antioxidantes de la célula y de tolerancia de altas concentraciones de metales pesados como Cd y Zn.
P (HPO ₄ ²⁻ y H ₂ PO ₄ ⁻) y N (NO ₃ ⁻ , NH ₄ ⁺)	P : 2x10 ³	P y N: Nucleótidos, transferencia de energía (ATP), transferencia de electrones (NADP), información genética (DNA y RNA) y en el metabolismo de las proteínas. Fosfolípidos-membranas, fosfato inorgánico-síntesis de ATP.
K (K ⁺)	K : 10x10 ³	Ión Potasio: Cofactor en la activación del funcionamiento de varias enzimas del metabolismo de proteínas y carbohidratos, regulador osmótico y iónico.
Ca (Ca ²⁺)	Ca : 5x10 ³	Ión Calcio: En complejo con la calmodulina (proteína modulada por Ca) reguladora de actividad enzimática, reguladora de homeóstasis citoplásmica. Está involucrado en la división celular y en el mantenimiento de la integridad de la membrana celular.
Mg (Mg ²⁺)	Mg : 2x10 ³	Ión Mg: Ión central en el complejo clorofila-fotosíntesis
Fe (Fe ²⁺)	Fe : 1x10 ²	Fe: Componente esencial de ferrocenzimas (hemo y no hemo) y transportadores de electrones como el citocromo y la ferredoxina. Su función es clave en la fotosíntesis, fijación de N y transferencia de electrones.
Cl (Cl ⁻) Mn (Mn ²⁺) Zn (Zn ²⁺) B (H ₃ BO ₃) Cu (Cu ²⁺)	Cl : 1x10 ² Mn : 50 Zn : 20 B : 20 Cu : 6	Cl⁻, Mn²⁺, Zn²⁺, B, Cu²⁺: Asociados con catalizadores o activadores de enzimas, el Cl está involucrado con la división de la molécula del agua durante la fotosíntesis y también en la osmorregulación de plantas que están en suelos salinos. El Mn está involucrado en el sistema de O ₂ en la fotosíntesis y en las enzimas arginasa y fosfotransferasa. El Zn es componente de varias deshidrogenasas, proteinasas y peptidasas incluidas la anhidrasa carbónica, alcohol deshidrogenasa, glutámico deshidrogenasa y málico deshidrogenasa. El B está involucrado en el metabolismo y síntesis de componentes de la pared celular. El Cu forma parte de la citocromo oxidasa, ácido ascórbico oxidasa y lactosa.
Mo (MoO ₄ ²⁻)	0.1	Mo: Componente de enzimas del proceso de fijación de N ₂ , reducción de NO ₃ ⁻ .



2.6.1 Nitrógeno

Es un nutrimento esencial que limita la producción primaria neta en ecosistemas forestales (Näsholm, 1998; Tomaszewski *et al.*, 2003). Es un constituyente de las proteínas de la planta, la clorofila (el pigmento verde importante para la fotosíntesis), los ácidos nucleicos (porciones regenerativas de la célula viva) y otras sustancias de la planta (Donahue *et al.*, 1981). Permite el desarrollo de la actividad vegetativa de la planta, en particular, causa un alargamiento de troncos y brotes y aumenta la producción de follaje y frutos (aunque la calidad dependa de otros elementos). Un exceso de N debilita la estructura de la planta creando una relación desequilibrada entre las partes verdes y las partes leñosas. Además, la planta se vuelve menos resistente a las enfermedades. El N absorbido por las plantas deriva de la mineralización de materia orgánica y la aplicación de fertilizantes, pero las legumbres (soja, guisante, trébol, alfalfa, etc.) son capaces de captar el nitrógeno por una asociación simbiótica con la bacteria *Rhizobium*; que es una de las mayores fuentes de N del suelo. Mediante éste proceso, el N_2 es tomado del aire del suelo y cambiado a formas utilizables por las plantas. La principal fuente de N en el suelo es la materia orgánica, que al descomponerse libera al N como ión amonio utilizable. Aunque la materia orgánica del suelo contiene aproximadamente 5% de N por peso, sólo cerca de 2 a 5% del total es liberado anualmente por descomposición (Donahue *et al.*, 1981).

El N puede ser utilizado por las plantas en forma de catión amonio (NH_4^+) o en forma de anión nitrato (NO_3^-). Sólo una pequeña parte de N del suelo está presente en estas formas. En forma de nitrato es lavado fácilmente y en ambas formas, amonio y nitrato, puede ser consumido por microorganismos o convertido a gas (N_2 o NH_3) originando pérdida a la atmósfera.

La concentración de N en tejido vegetal está normalmente en el intervalo de 0.5 a 5% del peso total de la materia seca, dependiendo de la especie de planta, tipo de tejido, edad del tejido y disponibilidad (Cruz, 2006).

2.6.2 Fósforo

Es el segundo nutrimento vegetal más crítico. Es un elemento importante en la composición del ADN y ARN, regulador del intercambio energético (ATP, ADP), así como las sustancias de reserva en semillas y bulbos. El P es concentrado en las células que se dividen rápidamente, las que activan el crecimiento de las partes de raíces y tallos. Como nutriente es doblemente crítico porque el suministro total de P, en la mayoría de los suelos es bajo y no está realmente disponible para las



plantas (Donahue *et al.*, 1981). Una falta de fósforo tiene como resultado un ahogo de la planta, crecimiento lento, una reducción de la producción, frutos más pequeños y una menor expansión de las raíces.

La fuente original del P en el suelo es la apatita $[\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3\text{F}]$ un fosfato cálcico de baja solubilidad, constituyente de rocas ígneas, metamórficas y sedimentarias. Los iones solubilizados, H_2PO_4^- , reaccionan rápidamente en el suelo con iones de calcio o con hidróxidos de hierro y aluminio para formar fosfatos insolubles, llamado fijación de fosfatos. En suelos ácidos, los fosfatos reaccionan con hierro y aluminio solubles o con sus formas sólidas para formar nuevos fosfatos aún menos solubles. El P no es muy móvil en las soluciones del suelo y debe ser aplicado donde se necesita (Donahue *et al.*, 1981).

2.6.3 Potasio

Ayuda a mantener la permeabilidad de la célula, ayuda en la traslocación de carbohidratos, mantiene el hierro más móvil en la planta y aumenta la resistencia de las plantas a ciertas enfermedades. En las plantas está en una forma móvil más que como una parte integral de cualquier compuesto fijo.

La cantidad total de K en la mayoría de los suelos es suficiente para varias generaciones, inclusive el uso de fertilizantes la está aumentando; la contradicción a esto es que, la mayoría de este elemento en el suelo es un constituyente de minerales muy poco solubles, tales como feldespato ortoclasa (KAlSi_3O_8), resultando potasio soluble disponible en forma muy esparcida para las plantas. Cuando una gran cantidad de K está soluble y no es usado por las plantas, es absorbido en los lugares de intercambio catiónico. La mitad o más del K usado por las plantas proviene de K intercambiable; la otra mitad es K soluble.

La mayoría de los suelos con arcilla illita y aún montmorillonita, cuando se secan, fijan potasio llamado fijación de potasio, en formas no disponibles para las plantas por el fuerte enlace entre las capas de arcilla. El K no forma parte alguna de los constituyentes estructurales de las plantas, por tanto, cuando el tejido vegetal muere, el potasio se torna completamente soluble en agua (Donahue *et al.*, 1981).

2.6.4 Calcio

Es muy importante para mantener la firmeza de tallos y pecíolos en las plantas, y para regular la absorción de nutrientes a través de la membrana celular. Interviene en la división y elongación celular, en la estructura y permeabilidad de la membrana celular, en el metabolismo del N y en la translocación de carbohidratos además de que tiene que ver con la estructura y permeabilidad de las membranas celulares. El Ca es parte de la pared celular y actúa como agente cementante que une las paredes celulares. Forma parte de pectatos de calcio en la lámina media que actúan como agentes cementantes para incrementar la adhesión entre células, y logrando una mejor estabilidad de las mismas. La deficiencia de este elemento produce un pobre crecimiento radical, las pocas raíces se oscurecen y pudren. Debido a que es un elemento inmóvil, los síntomas de deficiencia de Ca se presentan principalmente en tejidos nuevos (zonas meristemáticas de raíces, tallos y hojas), donde ocurre división celular. La deficiencia de calcio causa torcedura y deformación de hojas nuevas. Puede presentarse la muerte de las puntas en crecimiento, como en brotes nuevos, inflorescencias y puntas de raíces (Donahue *et al.*, 1981).

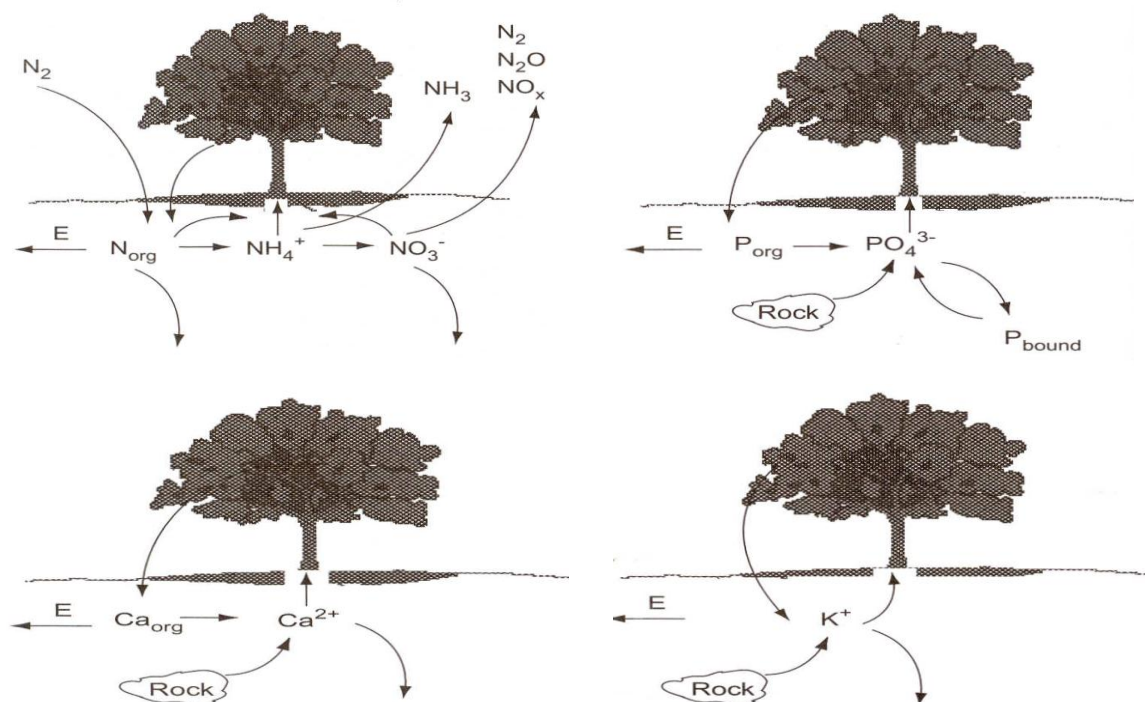


Figura 9. Representación esquemática del ciclaje de N, P, K y Ca en la planta (Chapin *et al.*, 2002).



2.7 Interacciones de los nutrientes en las plantas

Una solución de una población altamente heterogénea de iones, contienen los elementos esenciales, los benéficos y los tóxicos. La velocidad de absorción del elemento puede ser aumentada, disminuida o no ser influenciada por la presencia de otro. Los siguientes casos son los más comunes:

- a) Antagonismo. La presencia de un elemento disminuye la absorción de otro elemento, cuya toxicidad es así evitada.
- b) Sinergismo. La presencia de un elemento dado aumenta la absorción de otro elemento (Prével *et al.*, 1987).

La fertilidad del suelo es la capacidad que tiene para suministrar a las plantas los nutrientes en cantidad y balance adecuado para evitar fenómenos de antagonismo que implica que un nutriente aún presente no se absorba por el exceso de otro y por otro lado favorecer la absorción de dichos nutrientes por relaciones de sinergismo.

2.8 Levantamiento nutricional

Un **levantamiento nutricional** es un inventario del estado nutricional de una especie, en una zona determinada (Etchevers *et al.*, 1985 citado por Hernández, 2000), en esta técnica de diagnóstico se utiliza como herramienta principal, el análisis químico del suelo y la planta.

La evaluación nutrimental se basa en el análisis foliar que provee información sobre la concentración de macro y micronutrientes; es decir el estado nutrimental actualmente encontrado en los árboles (Brockley, 2001). Los análisis de suelo son valiosos para estimar la disponibilidad de nutrientes, pero los análisis foliares son ampliamente utilizados por ser las hojas los principales centros de síntesis de la planta (Sánchez y Curetti, 2009). Cuando se usa apropiada y eficientemente el análisis foliar puede ser una herramienta efectiva de planeación y monitoreo para proyectos de fertilización (Brockley, 2001) y nutrición en plantaciones forestales (Munson y Nelson 1973, Jayamadhavan *et al.*, 2000).

El análisis de tejidos vegetales como técnica de diagnóstico del estado nutrimental, se basa en la relación que existe entre la concentración de nutrientes en los tejidos y el rendimiento o crecimiento (Finck, 1988); sin embargo la concentración de nutrientes dentro de las plantas es dinámica y los cambios de concentración tiene relación con el grupo taxonómico y el medio externo, existiendo diferencias de concentración entre órganos dentro de un grupo taxonómico e inclusive

dentro de un individuo, dependiendo de su ubicación en la planta, de la edad de los mismos y de su interacción con el medio ambiente (Wells y Allen, 1985; Pritchett, 1986).

De acuerdo con varios autores (Leaf, 1973; Drechsel y Zech, 1991; Mills y Jones, 1996 y Boardman *et al.*, 1997), la variación de la concentración de los nutrimentos en los tejidos del árbol varía según la especie, la edad de la planta, la posición del tejido muestreado en la copa (tercio superior, medio y bajo), la posición de la hoja en la rama muestreada (hoja 1,2,3..... a partir del ápice terminal), el estado fisiológico del crecimiento del árbol, la disponibilidad de los nutrimentos y del agua en el suelo y la época de muestreo (aspecto climático).

El análisis de suelos es un valioso instrumento que utilizado en forma adecuada puede ayudar en el diagnóstico de los desórdenes nutrimentales en diferentes especies de plantas ocasionados por los desbalances en los nutrimentos del suelo. El principal objetivo del diagnóstico químico es evaluar la capacidad del suelo para suministrar nutrientes a la planta y con base en una adecuada interpretación, se pueden diagnosticar las deficiencias y/o toxicidades. También pretende determinar el grado de suficiencia o deficiencia de los nutrimentos del suelo, así como las condiciones adversas que pueden perjudicar a los cultivos, tales como la acidez excesiva, la salinidad, y la toxicidad de algunos elementos (Molina, 2007).

Para saber si la planta ha recibido una nutrición adecuada, se comparan los niveles presentes en el tejido foliar, con los rangos o clases de suficiencia publicados para esa especie. El análisis foliar es un buen instrumento para monitorear el estado nutricional de las plantas, y junto con el análisis de suelos, permite obtener información útil para planificar el programa de fertilización. El análisis foliar es también adecuado para comprobar el origen de anomalías causadas por deficiencias nutricionales o por exceso de fertilización o contaminación (Molina, 2007).



Figura 10. Relación entre abastecimiento nutrimental y crecimiento de los vegetales (Urbano y Hernández, 1992).



La interpretación del análisis foliar se basa en el establecimiento de rangos de suficiencia. De acuerdo con la Figura 10:

- a) La zona adecuada o rango normal es aquella en que la concentración de nutrimentos es apropiada para su crecimiento, y por debajo del cual dicha concentración resulta inadecuada.
- b) El límite inferior se conoce como zona de deficiencia o rango crítico de deficiencia.
- c) El límite superior al rango adecuado es la zona de exceso o nivel de toxicidad, en el cual las plantas pueden disminuir su crecimiento por una concentración de toxicidad del elemento. El grado en el cual un nutrimento se encuentra por encima o por debajo del rango aceptable determina la severidad de los síntomas de deficiencia o toxicidad (Molina, 2007).

Las evaluaciones nutricionales, mediante la comparación de datos de análisis de suelos y plantas con concentraciones críticas, estándares o de referencia, permiten inferir la probabilidad de que ocurran limitantes para la producción a causa de déficit de nutrimentos. Debido a la influencia de diversos factores sobre la concentración de nutrimentos, como edad de la planta, órganos o partes analizadas y condiciones ambientales, el muestreo se realiza en cada cultivo según pautas que permiten que los datos sean comparables (Barbazán *et al.*, 2007).

La concentración crítica de un nutrimento es aquella en la cual se alcanza un determinado porcentaje del rendimiento máximo. Dicho porcentaje varía entre un 80 a 95% del rendimiento máximo, según el criterio utilizado (Smith y Loneragan, 1997).

2.9 Bosque de *Abies* en México

Los bosques de oyamel son comunidades vegetales integradas por *Abies*, *Pseudotsuga* y *Picea*, en México cubren aproximadamente 32,000 hectáreas, siendo *Abies religiosa* y *Pseudotsuga menziesii* var. *glauca* las especies más comunes. Estos bosques están confinados a laderas protegidas del viento así como de la intensidad solar fuerte, muchas veces en cañadas o barrancas que ofrecen un microclima especial (Rzedowski, 1978) ó en terrenos con fuertes pendientes.

Los bosques de mayor extensión se presentan en la Faja Volcánica Transmexicana, así como en la Sierra Madre del Sur, comunidades importantes se localizan en Guerrero y al sur de Oaxaca. La



distribución geográfica de los bosques de *Abies* en México es en extremo dispersa y localizada. En la parte septentrional del país estos bosques son mucho más escasos y restringidos (Rzedowski, 1978).



Figura 11. Fotografía de bosque de *Abies* en el Parque Nacional Izta-Popo.



Figura 12. Fotografía de bosque de *Abies* confinados a laderas o cañadas en el Parque Nacional Izta-Popo.

En México el bosque de *Abies* prácticamente no interrumpe sus actividades de fotosíntesis, absorción y transpiración, si acaso sufre una disminución durante los períodos más fríos y más secos del año. El período de floración de muchas especies corresponde precisamente a los meses de diciembre, enero y febrero. En nuestro país, este tipo de vegetación está prácticamente confinado a sitios de alta montaña, por lo común entre 2400 y 3600 m de altitud. Por su extensión los bosques de *Pinus* y de *Pinus-Quercus*, ocupan el primer lugar en importancia, le siguen los bosques de *Juniperus* y los de *Abies*, siendo estos últimos de distribución muy restringida y localizada (Rzedowski, 1978).

Los bosques de *Abies* requieren para su desarrollo condiciones de humedad elevada. La precipitación media anual, es por lo común superior a 1000 mm, distribuida en 100 o más días con lluvia apreciable. Ordinariamente el número de meses secos no es mayor a cuatro. La humedad atmosférica desempeña un importante papel complementario y en muchos casos es decisivo en la distribución del bosque de *Abies*. Los substratos geológicos del bosque de oyamel son variados, pero predominan los de origen volcánico, sobre todo andesitas y basaltos. Los suelos bajo *Abies* son más o menos profundos, bien drenados, pero húmedos todo el año. Presentan un perfil ABC, predominando coloraciones café oscuro, textura franco arenosa, con estructura en bloques (Rzedowski, 1978).

En México la superficie forestal se ha reducido progresivamente, originando problemas ecológicos, económicos y sociales. Entre los factores de mayor degradación se mencionan



aprovechamientos forestales mal planeados, modificación en el régimen del fuego, pastoreo y contaminación atmosférica (Bauer y Hernández, 1986; Alvarado *et al.*, 1991; López-López *et al.*, 1998; Saavedra *et al.*, 2003), así como la fuerte presión por el avance de la frontera agrícola, la mancha urbana, plagas y enfermedades (Verduzco-Gutiérrez, 1976). Los desmontes y la tala inmoderada constituyen los mecanismos más importantes mediante los cuales afecta el hombre al bosque de *Abies*. Los primeros se realizan fundamentalmente con el propósito de utilizar el terreno para fines agrícolas y han hecho disminuir significativamente las extensiones forestales.

En muchas zonas densamente pobladas, lo único que se ha respetado son las laderas demasiado abruptas para cualquier tipo de agricultura. La recuperación y conservación de los recursos naturales es una preocupación de interés nacional (Rzedowski, 1978).

La especie *Abies religiosa* se distribuye naturalmente entre los 14 y 21° latitud N; es decir desde México hasta América Central. Se encuentra en el norte y suroeste de México y el oeste de Guatemala. En México se conocen por lo menos ocho especies de oyamel (Salazar *et al.*, 2001). La especie mejor distribuida, principalmente en la región central es *Abies religiosa*, la cual es endémica de México (Rzedowski, 1978 y Challenger, 1998).



A)

Figura 13. A) Fotografía de *Abies religiosa* en el Parque Nacional Izta-Popo, B) Presencia de hojas simples y alternas. C) Brote de yemas vegetativas.



Su distribución altitudinal varía de 2400 a 3000 m snm con precipitaciones anuales de 1000 a 1400 mm y temperaturas promedio de 10 a 16 °C a lo largo de su distribución geográfica el oyamel se encuentra formando rodales puros, aun en los bosques de pequeña extensión; a veces se asocia con especies de los géneros *Quercus* sp y *Pinus* spp. Prefiere suelos profundos, con alto contenido de materia orgánica, de textura franco arenosa a arena limosa, pH entre 5.0 a 6.7 y con buen drenaje (Salazar *et al.*, 2001).

Es un árbol monoico con alturas de 35 a 50 m y diámetros de 100 a 180 cm; fuste recto, cónico, con ramas extendidas. La corteza es grisácea, áspera, agrietada, dividida en placas irregulares. El grosor total de la corteza varía de 18 a 25 mm. Las hojas son simples, alternas, de 20 a 30 mm de largo y de 1 a 1.5 mm de ancho, dispuestas en espiral. Los frutos son conos cilíndricos, solitarios, de 10 a 16 cm de largo y de 4 a 6 cm de ancho, de color violáceo cuando verdes y moreno violáceo en su madurez. La madera es suave y liviana (Salazar *et al.*, 2001).

El oyamel comienza a florecer a partir de los 25 años de edad. La floración de esta especie es cíclica y se completa en dos años. La floración se inicia en diciembre, y en marzo y abril del año siguiente se da la polinización. Los conos fecundados alcanzan la madurez en noviembre del segundo año del ciclo fenológico y en diciembre comienza la diseminación de semillas (Salazar *et al.*, 2001).

2.10 Parques Nacionales y sus funciones

Los Parques Nacionales son áreas que constituyen muestras representativas de la diversidad natural del país y de sus grandes unidades ecológicas. En ellas se protege con carácter intangible la integridad ecológica de uno o más ecosistemas, las asociaciones de la flora y fauna silvestre y los procesos sucesionales y evolutivos. Son importantes por su belleza escénica, valor científico, educativo, histórico o recreativo, por la existencia de flora y fauna y por su aptitud al turismo (Centro de Datos para la Conservación, 2006).

El Parque Nacional Iztaccíhuatl-Popocatepetl representa a pesar del deterioro creciente de sus recursos, un alto porcentaje de la biodiversidad endémica del Eje Volcánico Transmexicano, cuya variedad y riqueza de especies son características de la provincia que limita la zona de transición entre la flora y la fauna neártica y neotropical.

El parque nacional incluye las montañas más altas de México, con su marcado gradiente altitudinal, constituye una combinación que da origen a la gran diversidad y desarrollo de diferentes

estratos de vegetación, entre los que sobresalen las asociaciones de coníferas (pino, oyamel y cedro) y encino, por su mayor número de especies. Por la abundancia de sus especies endémicas, destaca además la vegetación alpina y por su ubicación en las partes más bajas de la serranía, Así como por la intensidad de su aprovechamiento, sobresalen las asociaciones aisladas de bosque mesófilo de montaña (Hernández y Granados, 2006).



Figura 14. Panorama del Parque Nacional Izta-Popo, con su marcado gradiente altitudinal, constituye una combinación que da origen a una gran diversidad y desarrollo de diferentes estratos de vegetación.

En el Valle de México y consecuentemente en la Sierra Nevada que forma parte de la región biogeográfica del Eje Volcánico Transmexicano, también se observa una fauna con gran diversidad de especies (Alcérreca *et al.*, 1998), cuyo número puede alcanzar casi la mitad del número de especies que existen en la parte central del Eje Volcánico, además de que es punto de escala para diversas especies de aves en las rutas migratorias del Golfo y el Pacífico.

El área del parque es el parteaguas de una amplia zona de captación que alimenta y distribuye sus recursos hídricos tanto a la cuenca de México, como al oriente del estado de Puebla, en la vertiente oriental de la Sierra de Río Frío; pero también a la cuenca que alimenta los valles de



Cuernavaca, Cuautla y Yauhtepec en el estado de Morelos, por lo que la conservación de la cubierta vegetal y el sustrato edáfico, es de importancia trascendental para regular la infiltración de agua al subsuelo y la intensidad de los escurrimientos (Ortiz-Solorio y Cuanalo, 1977 citados por Hernández y Granados, 2006), así como para suministrar el líquido a numerosas comunidades establecidas en las partes bajas de las cuencas para su consumo doméstico, pero también para la realización de actividades agrícolas, pecuarias e industriales (UICN-BID, 1993).

Además, por las características que le confieren las mayores elevaciones de la región las cuales presentan un mosaico de estructuras y paisajes, el potencial para el desarrollo de actividades de recreación, educación ambiental y turismo es muy grande (CEPAL, 1990).

En México, se carece de antecedentes sobre requerimientos nutrimentales de la mayoría de especies forestales, en especial de aquéllas que son endémicas. Esta falta de información dificulta el diagnóstico nutrimental y, en consecuencia, la puesta en marcha de programas efectivos de fertilización química. De lo anterior, resalta la necesidad de generar información sobre requerimientos nutrimentales para las principales especies forestales mexicanas o buscar procedimientos alternos que permitan determinar los factores nutrimentales que limitan el crecimiento de los árboles en un momento dado (López y Estañol, 2007).

Aunado a lo anterior, las unidades de suelo presentes en el Parque Nacional Izta-Popo, de acuerdo con la clasificación de la FAO, 2007 son: Litosoles asociados con Regosoles y Andosoles, además de Cambisoles y Fluvisoles. Estos suelos se caracterizan principalmente, por tener poco espesor, por tener niveles de acidez y por presentar minerales amorfos (alofanos) que pueden ser una limitante en la disponibilidad de N y P para el crecimiento de las plantas.

3. JUSTIFICACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN

Los bosques desempeñan funciones ambientales de gran importancia a distintas escalas, desde locales hasta globales. El Parque Nacional Iztaccíhuatl y Popocatepetl alberga diversos ecosistemas de montaña, entre ellos, el bosque de *Abies*, el valor del bosque se centra en sus funciones como hábitat y fuente de subsistencia para la biodiversidad; actúa como fijador y almacenador de carbono, ayudando a disminuir el calentamiento global, amortigua las variaciones climáticas por el contenido de humedad. La calidad del agua y el control de erosión está ligada a la cubierta forestal dando paso a la conservación de suelos. Además provee a los pobladores de combustible, material de construcción, alimentos, medicina, entre otros.

Desde el punto de vista económico, los bosques de *Abies* son de gran interés para la industria de la celulosa y del papel pues la madera de Oyamel es su materia prima preferida. Sin embargo, el uso inmoderado de estos recursos ha causado la degradación de los ecosistemas del parque. Por otro lado, el aumento poblacional y la fuerte competencia por espacios para la agricultura y la demanda creciente de madera han desencadenado un vertiginoso proceso de deforestación, es por ello que los desmontes y la tala inmoderada son considerados como los mecanismos más importantes mediante el cual, el hombre afecta al bosque de *Abies*.

Se considera que de 80 a 90% de los bosques mexicanos está concesionado para su explotación. Los efectos de las perturbaciones asociados al mal manejo intensivo de los suelos forestales en sus propiedades físicas y químicas, son problemas recientes que no se han investigado lo suficiente. La recuperación y conservación de los recursos naturales es una preocupación de interés nacional, por lo que este trabajo pretende aportar información del estado nutricional en tejido foliar de N, P, K y Ca por ser macronutrientes que limitan el desarrollo vegetal por las condiciones de acidez de los suelos en el Parque Nacional Izta-Popo.

Por otro lado, a nivel mundial existe escasa información sobre los requerimientos nutricionales de especies de bosques forestales que nos permita realizar una comparación sobre el estado nutrimental de esa especie. Al no existir estándares de referencia nutrimentales, esto impide inferir la probabilidad de que ocurran limitantes para la producción a causa de déficit de nutrientes en especies forestales.



4. OBJETIVOS

4.1 Objetivo general

Evaluar durante ocho meses, la variación de N, P, K y Ca en tejido foliar de *Abies religiosa* en diferentes etapas de desarrollo (brinzal, juvenil y maduro) a lo largo de un gradiente altitudinal en el Parque Nacional Izta-Popo.

4.2 Objetivos particulares

- ❖ Evaluar los efectos del rango altitudinal y estado de conservación del bosque sobre los balances N:P, N:K y N:Ca en tejido foliar de *Abies religiosa*.
- ❖ Realizar la caracterización ecológica de sitios bajo *Abies religiosa*.
- ❖ Realizar la caracterización de suelos bajo *Abies religiosa*.

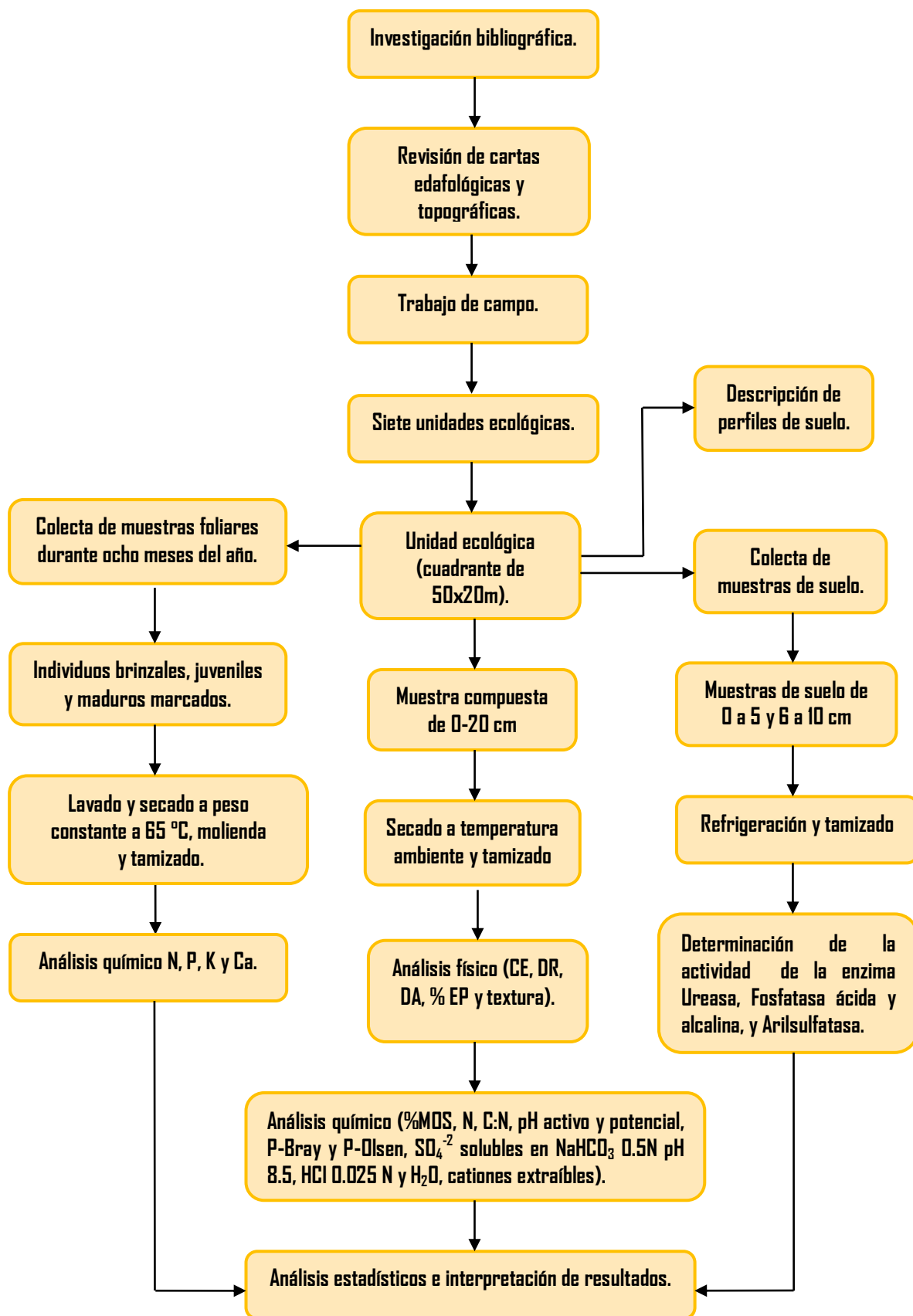
SUPUESTOS

La concentración de nutrimentos dentro de las plantas es dinámica y sus variaciones pueden tener relación con: cambios en el medio externo, en el grupo taxonómico, con diferencias aún entre órganos dentro del mismo grupo taxonómico e inclusive dentro de un individuo, dependiendo de su ubicación en la planta, en la edad y de su interacción con el medio ambiente (Wells y Allen, 1985).

5. HIPÓTESIS

- ❖ Durante la estación de lluvia, en comparación con el período de secas, la concentración de N, P, K y Ca en tejido foliar de *Abies religiosa* es mayor, siendo la mejor época del año para realizar un estudio de levantamiento nutricional.

6. Diagrama de flujo



7. MATERIALES Y MÉTODOS

7.1 Descripción del área de estudio

La investigación se llevó a cabo en el Parque Nacional Iztaccíhuatl-Popocatepetl entre febrero y noviembre del 2008. El Parque cuenta con una superficie de 25,679 ha. Se ubica en los límites de los estados de México, Puebla y Morelos y forma parte de la provincia fisiográfica conocida como Sistema o Eje Volcánico Transmexicano. Entre sus elevaciones destacan el Iztaccíhuatl y el Popocatepetl, con alturas máximas de 5280 y 5482 m snm. Por su gradiente altitudinal, la variedad de clima abarca desde clima templado húmedo hasta un clima frío a muy frío. De acuerdo con su latitud, el parque se ubica en la región de los vientos alisios en una zona donde predominan las circulaciones de tipo convectivo local, lo cual hace posible una gran estabilidad meteorológica durante la mayor parte del año.

Los principales tipos de vegetación son: Bosque de Pino, el cual presenta básicamente 2 estratos, uno superior, arbóreo y otro inferior con pastos amacollados y escasos arbustos con hierbas. En general, de los 2500 a los 4000 m snm encontramos bosques perennifolios del género *Pinus*, en la franja más alta predominan el *Pinus hartwegii*, seguido de *Pinus montezumae*, *Pinus pseudostrobus* y *Pinus rudis*; acompañados algunas veces por *Pinus leiophylla* y *Pinus teocote*. A veces se presentan conviviendo con *Quercus*, *Juníperos* o *Alnus*, en suelos Andosol o Litosol (Rzedowski, 1978).

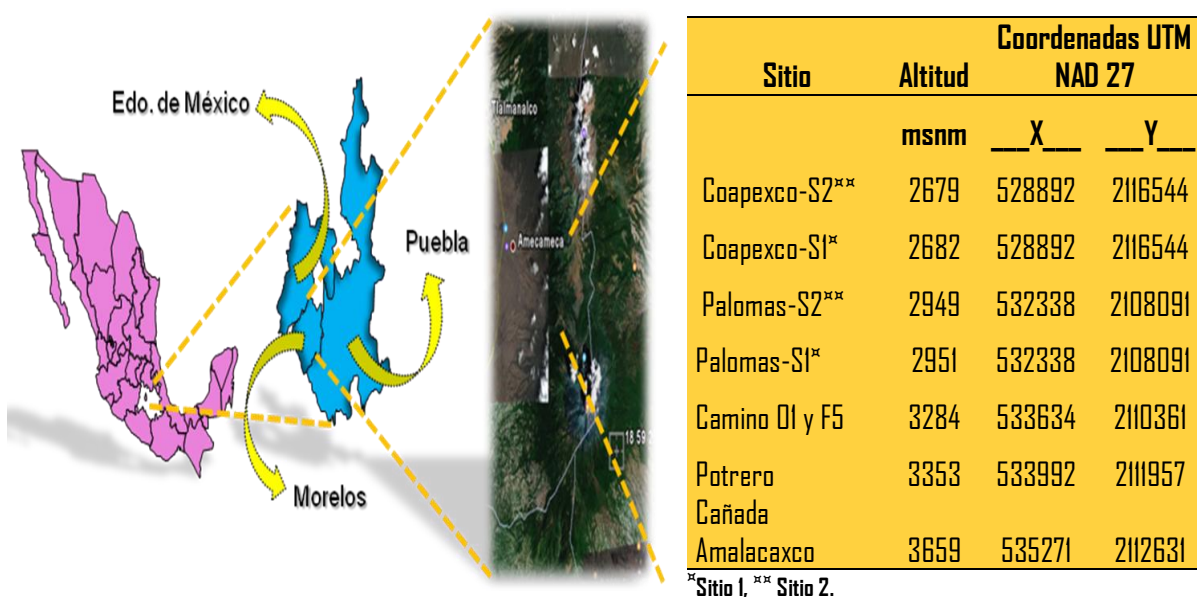


Figura 15. Área y sitios de estudio de *Abies religiosa* en el Parque Nacional Iztaccíhuatl-Popocatepetl.



La flora fanerógama es muy rica en el área, en total se han detectado 914 especies lo que equivale al 5% del total del país. En cuanto a fauna se tiene registrada la existencia de un total de 16 familias, 37 géneros y 52 especies, lo que significa el 30% del total de mamíferos existentes en el país, además contiene casi la mitad de las especies representadas en el Eje Neovolcánico Transversal (CONANP, 2009).

7.2 Selección de sitios de muestreo

Con la utilización de mapas topográficos y con base en reconocimientos en campo, se delimitaron siete unidades ambientales homogéneas en composición, estructura de la vegetación y tipo de suelo en un gradiente altitudinal (2600-3700 m snm) independientemente del grado de conservación pero condicionando la toma de muestras a individuos sanos manifestados sin evidencia de incendios severos, tala, ocoteo o plaga. En cada unidad se midieron cuadrantes de 50×20 m (0.1 hectáreas) con su eje principal perpendicular a la pendiente, en donde se realizó la selección de individuos de *A. religiosa*.

El número de individuos considerados para la toma de muestra foliar dependió del que se encontró en cada cuadrante (1000 m²). Cuando la densidad arbórea fue mayor de 16 árboles por cuadrante, se colectaron muestras foliares de hasta cinco individuos en cada etapa de desarrollo. En su defecto, cuando la densidad arbórea fue menor se colectaron muestras de los que estuvieran presentes de manera que las muestras tomadas fueran representativas del cuadrante.

En este estudio, la selección de individuos brinzales correspondió a árboles menores de 1 m de altura, juveniles entre 1 y 3 m, y maduros aquellos mayores a 3 m. Sin embargo, existen términos que son muy utilizados en la Ingeniería forestal para estimar la edad de los árboles. En este contexto la edad de un árbol es un parámetro variable muy importante, especialmente cuando se trata de estimar la producción forestal y la planificación de su consecuente aprovechamiento maderero. Se puede estimar la edad de un árbol por su tamaño o apariencia en general, a través de un simple análisis visual; éste método puede ser utilizado cuando se trata de clasificar los árboles silviculturalmente, considerando la posibilidad de identificación de los individuos para el ingreso en los respectivos planes de ordenación y de manejo forestal. En este sentido, los árboles pueden ser clasificados en brinzal, latizal y fustal (Imaña y Encinas, 2008).

- **Brinzal.** Etapa de desarrollo de un rodal correspondiente o cuando la regeneración se presenta en forma de manchas y los ejemplares tienen hasta un metro de altura.



- **Latizal.** Etapa de desarrollo de un rodal en que se intensifica la poda natural en los individuos, y se alcanza el máximo crecimiento en altura. Se inicia la diferenciación de copas. Existe latizal bajo, donde los individuos alcanzan 8-15 m de altura y 10 a 20 cm de diámetro; y latizal alto, donde se aprecian alturas medias de 15 a 20 m y diámetros entre 20 y 30 cm.
- **Fustal.** Etapa de desarrollo de un rodal en que se alcanza la madurez de los individuos. Se termina la poda natural. La altura de los ejemplares supera los 20 m y el diámetro varía entre 30 y 50 cm (CIACEF, 2010).

Por otra parte, las etapas de desarrollo de un árbol es uno de los factores que influye en la concentración de nutrimentos dentro de las plantas por lo que fue necesario establecer criterios que nos permitieran diferenciar a cada uno de los árboles muestreados.

7.2.1 Colecta de muestras foliares

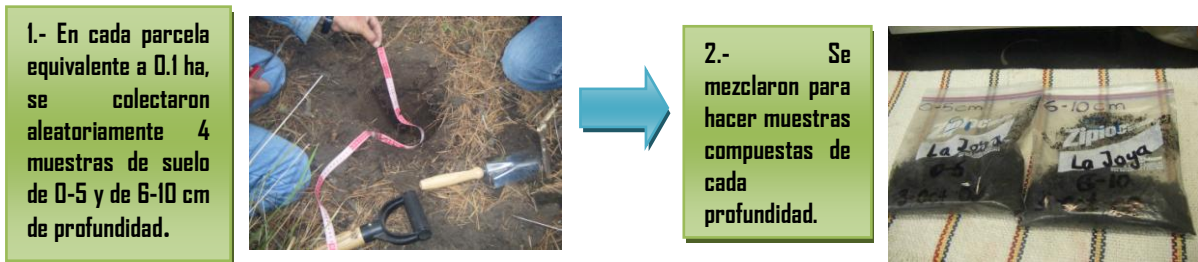


7.2.2 Colecta de muestras de suelo para análisis físico y químico

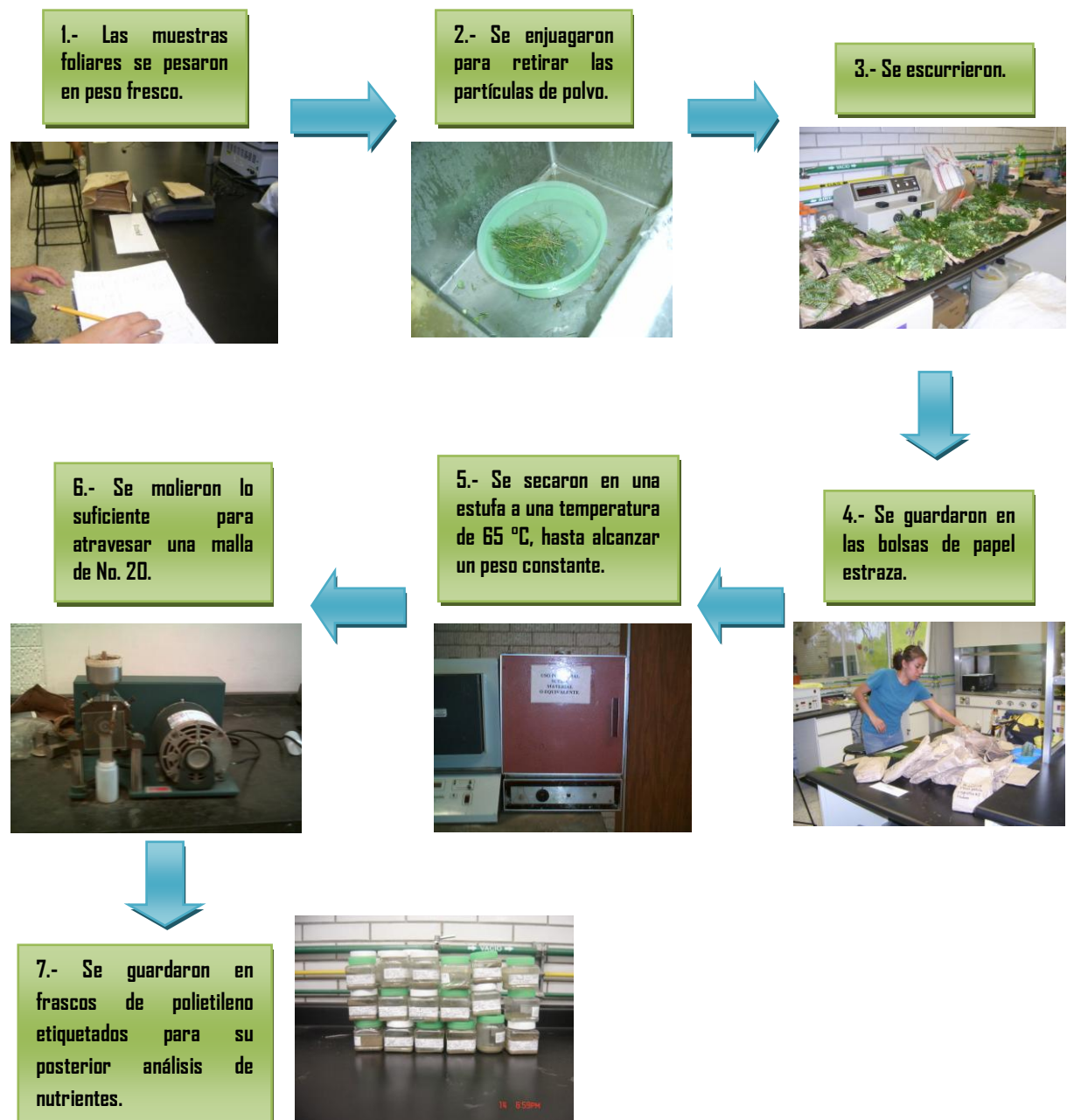


¹ Brinzal (< 1m), ² Juvenil (> 1m y < 3m) y ³ Maduro (> 3m).

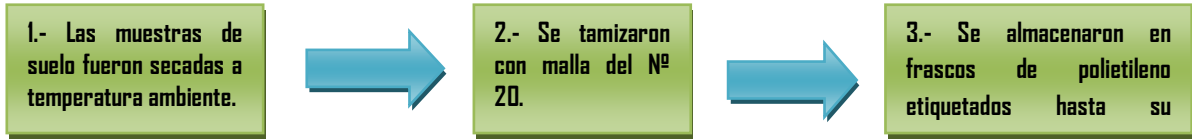
7.2.3 Colecta de muestras de suelo para análisis bioquímico



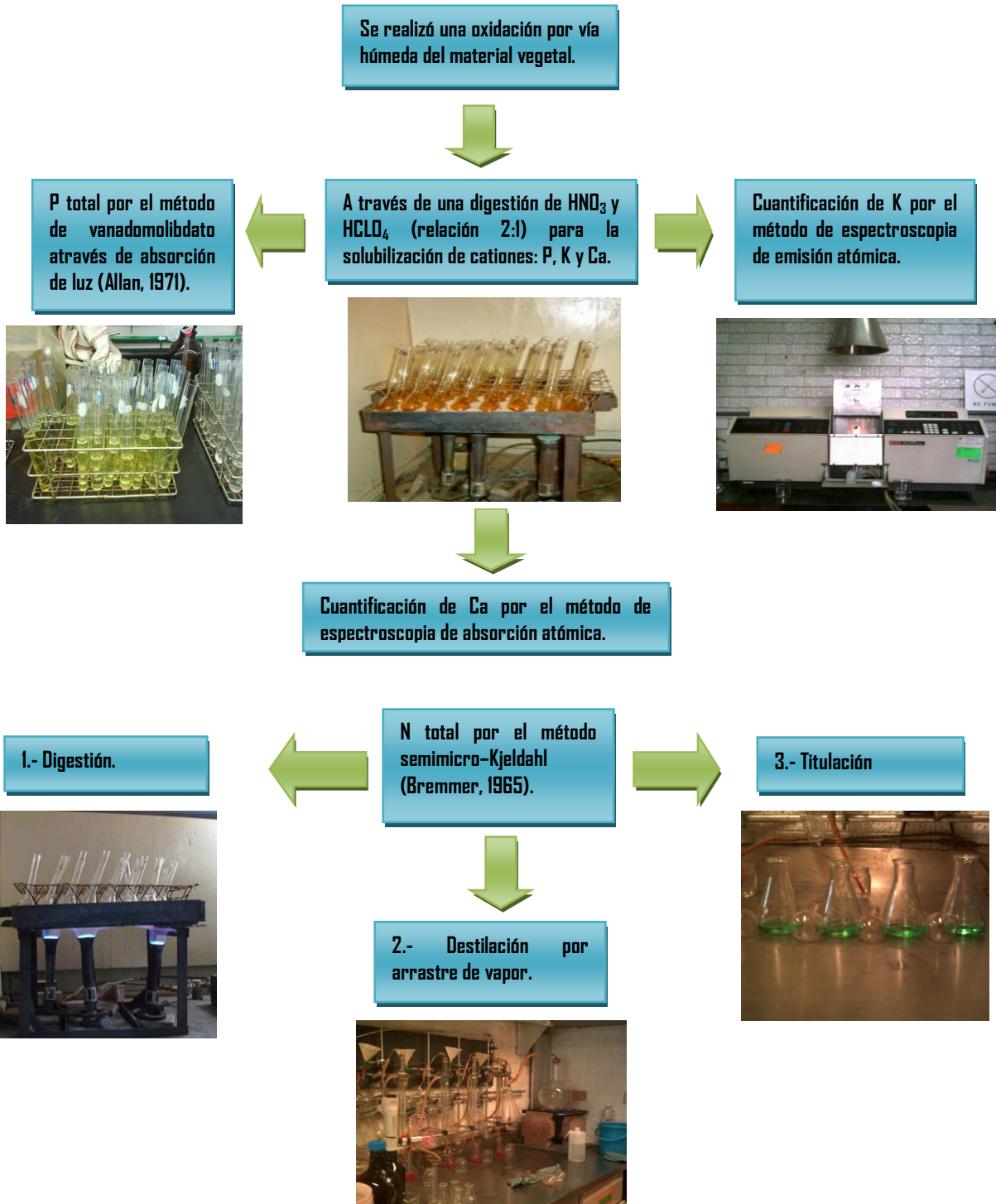
7.2.4 Procesamiento de muestras foliares



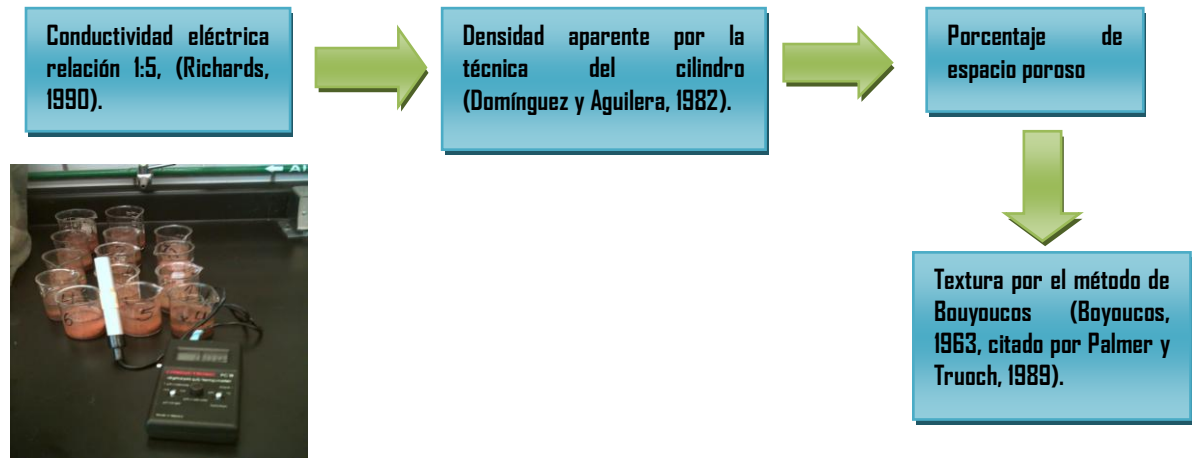
7.2.5 Procesamiento de muestras de suelo



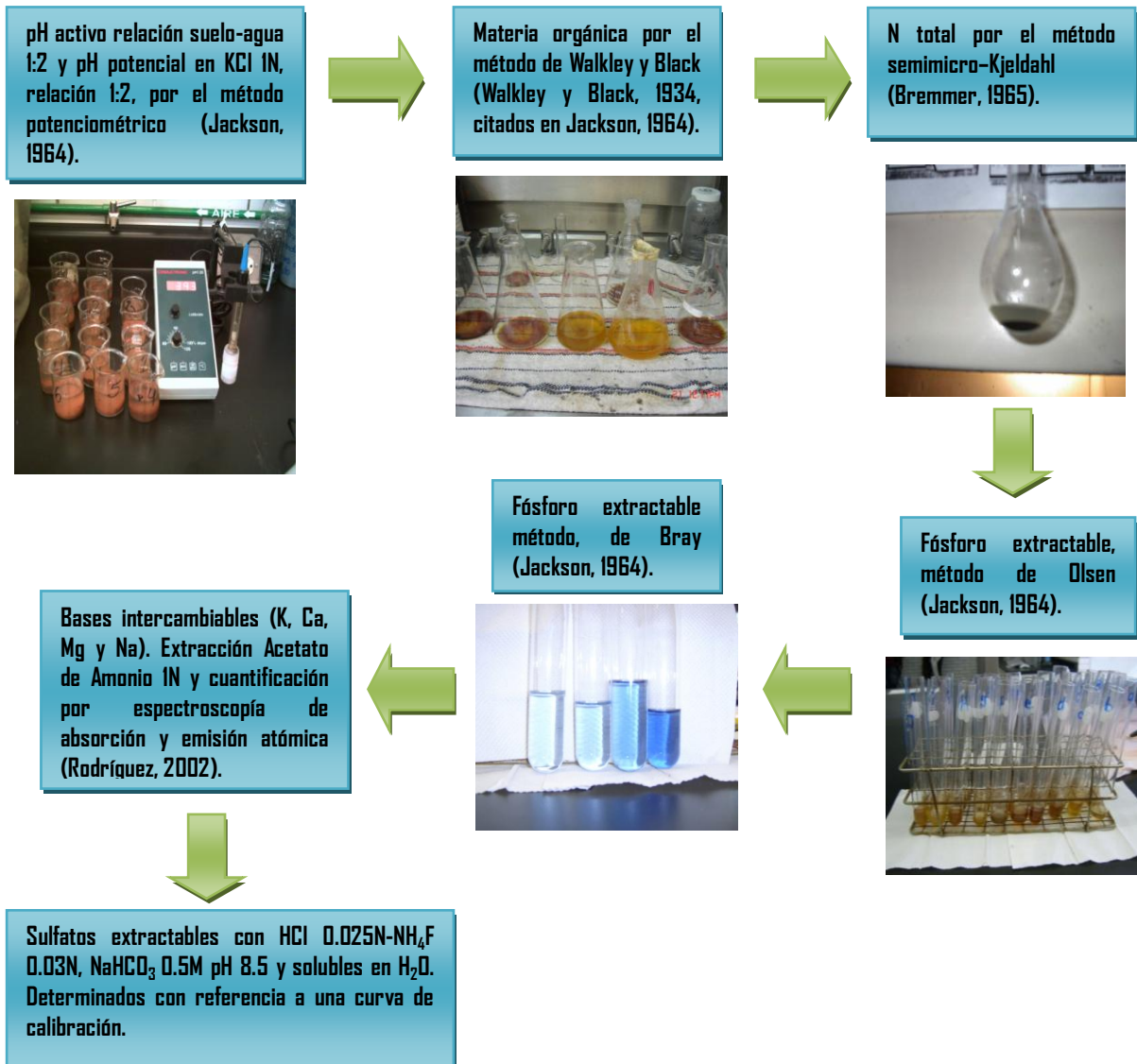
7.2.6 Análisis químico de muestras foliares



7.2.7 Análisis físico de muestras de suelo



7.2.8 Análisis químico de muestras de suelo



7.2.9 Análisis bioquímico de muestras de suelo

7.2.9.1 Actividad de la enzima Arilsulfatasa, método p-Nitrofenil sulfato (Tabatabai, 1994).

1.- Se realizó por el método descrito por Tabatabai y Bremner 1970, utilizando buffer de acetato 0.5 M pH 5.8 y 1 mL de p-nitrofenil sulfato como sustrato.



2.- Se incubó a 37 °C durante una hora.



3.- Se efectuó la cuantificación colorimétrica del p-nitrofenol liberado por la actividad enzimática, que desarrolla un color amarillo.

7.2.9.2 Actividad de la enzima Ureasa, método propuesto por Tabatabai (1994).

a) Medida de la reacción enzimática

1.- Se colocó 2.5 g de suelo en tubos de ensaye de 70 mL.



2.- Se corrió una muestra blanco bajo el mismo procedimiento, sustituyendo con agua, el volumen de solución de urea



3.- Se agregó 0.1 mL de tolueno y 4.5 mL de Buffer THAM, se agitó por unos segundos para homogeneizar.



4.- Se agregó 0.5 mL de urea 0.2 M, y se agitó nuevamente para su mezcla.



5.- Se tapó y se incubó a 37 °C por dos horas.



6.- Se colocaron aproximadamente 15 mL de KCl-Ag₂SO₄, y se dejó enfriar.



7.- Se aforó a 25 mL de volumen y se mezcló nuevamente.

b) Determinación de amonio (N-NH₄⁺) por arrastre de vapor

8.- Se adicionó 0.1 g de MgO en el bulbo de destilación.



9.- Se tomó 10 mL de la suspensión y se agregó al bulbo de destilación.



10.- Se recibió el destilado en 10 mL de H₃BO₃ con mezcla de indicadores.



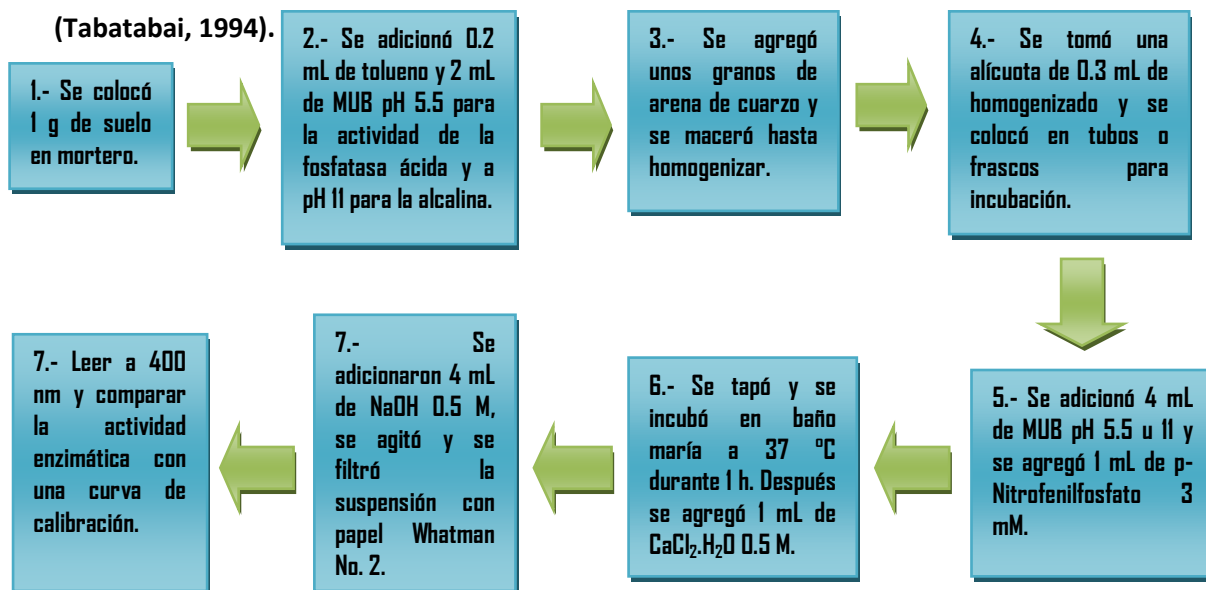
11.- Se destiló aproximadamente 4 minutos o hasta un volumen de 50 mL.



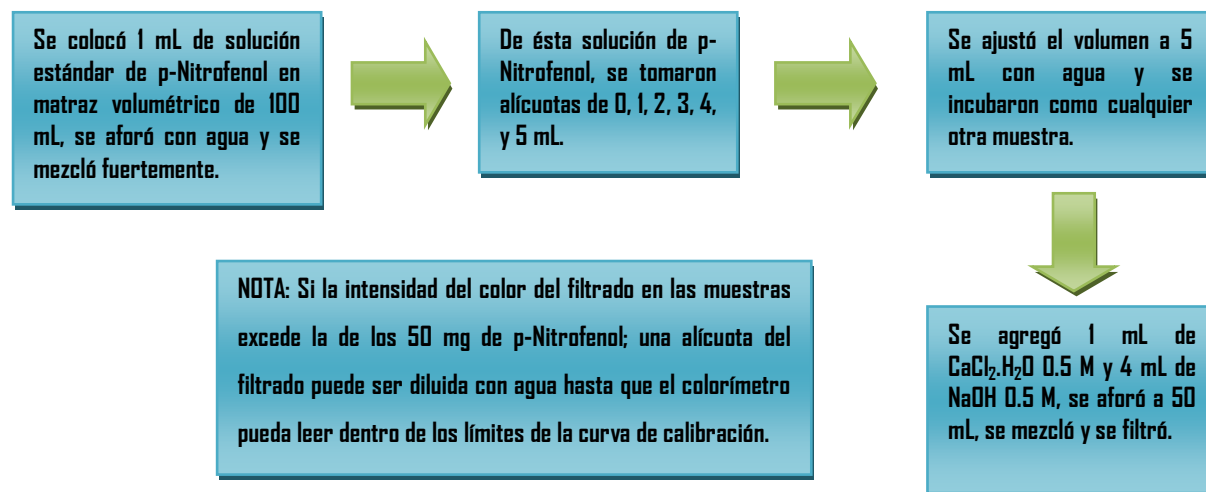
12.- Se tituló con H₂SO₄ 0.0025 N.

7.2.9.3 Actividad de la enzima Fosfatasa ácida y alcalina, método p-Nitrofenilfosfato

(Tabatabai, 1994).



Para realizar la curva de calibración



8. Análisis estadístico

Para conocer la relación entre nutrientes presentes en el suelo con sus correspondientes en tejido foliar se realizó un análisis de correlación simple de Pearson. Por otra parte, se realizó un análisis de varianza para conocer la influencia del efecto altitudinal y el grado de conservación del sitio sobre el estado nutricional. Por último, para conocer que variables tienen mayor influencia en el estado nutricional para el desarrollo de *Abies religiosa*, se llevó a cabo un análisis de componentes principales.



9. ANÁLISIS DE RESULTADOS

9.1 Descripción del sitio de estudio

El Parque Nacional Iztaccíhuatl-Popocatepetl es el remanente más importante de bosques de coníferas y praderas de alta montaña en el centro del país. La distribución de la vegetación en esta zona atiende a la altitud, en donde se distinguen tres pisos fundamentales de vegetación. Los bosques de coníferas siendo la vegetación dominante, seguidas por la pradera de alta montaña o pastizal alpino y vegetación herbácea de no más de 50 cm de altura que colinda con las nieves perpetuas (CONANP, 2009).

Con referencia al Cuadro 4, en el parque se observaron bosques de *Abies religiosa*, *Pinus pseudostrobus*, *Pinus teocote*, *Pinus hartwegii*, *Cupressus* sp. y *Juníperus* sp. en el intervalo altitudinal de 2679 a 3659 m snm. Además se observaron asociaciones vegetales de transición entre *Pinus* y *Abies*, lo que implica zonas de amplia diversidad florística y ecológica conformando rodales mixtos; que de acuerdo con Rzedowski (1978), en México, los bosques de *Abies* están confinados a sitios de alta montaña por lo común entre 2400 y 3600 m snm. En la zona se observó que a más de 3659 m snm la especie *Abies religiosa* deja de ser dominante y da paso a *Pinus hartwegii*, quien se establece en las partes más elevadas y abruptas, y es tolerante a las temperaturas bajas, frecuentes nevadas y probablemente es uno de los pinos más adaptados a los incendios superficiales (CONANP, 2009). En el mismo cuadro se presentan los meses en que fueron muestreados los sitios de estudio. Los meses considerados en el muestreo de tejido foliar fueron de febrero a noviembre de 2008 a excepción de julio y septiembre, donde no hubo colecta de muestras foliares (8 meses de muestreo en total). Es importante señalar que hubo sitios donde no hubo presencia de las tres edades y no todos los sitios fueron muestreados durante los ocho meses.



CUADRO 4. Sitios de estudio en el Parque Nacional Izta-Popo.

Sitio*	Individuos encontrados	Meses muestreados	Coordenadas UTM NAD 27		Altitud m snm	Exposición	Pendiente %	Suelo ¹	Vegetación
			X	Y					
Coapexco-S2 ^{xx}	B y J	Abr y Nov	528892	2116544	2679	Noroeste	10	Andosol húmico, Andosol húmico/ ácrico	<i>A. religiosa</i> <i>P. pseudostrabus</i> , <i>Cupressus</i> sp. y <i>Juniperus</i> sp.
Coapexco-S1 ^x	B, J y M	Abr y Nov	528892	2116544	2682	Noroeste	40	Andosol húmico, Andosol húmico/ ácrico	<i>A. religiosa</i> y <i>P. pseudostrabus</i>
Palomas-S2 ^{xx}	B, J y M	May, Jun, Ago, Oct y Nov	532338	2108091	2949	Este	10	Andosol vítrico	<i>A. religiosa</i> y <i>Pinus</i> sp.
Palomas-S1 ^x	J y M	May, Jun, Ago, Oct y Nov	532338	2108091	2951	Este	70	Andosol vítrico	<i>A. religiosa</i> y <i>Cupressus</i> sp.
Camino O1 y F5	B, J y M	Feb	533634	2110361	3284	Oeste	20	Andosol vítrico	<i>P. teocote</i> y <i>A. religiosa</i>
Potrero Cañada Amalacaxco	B, J y M	Feb, Mar, Abr, Jun, Ago y Oct	533992	2111957	3353	Suroeste	40	Andosol vítrico	<i>A. religiosa</i>
(bajo <i>Abies</i>)	M	Mar, May, Jun, Ago, Oct y Nov	535271	2112631	3659	Sur	15	Andosol vítrico	<i>P. hartweggi</i> y <i>A. religiosa</i>

B=Brinzal, J=Juvenil y M=Maduro

*Sitios ordenados de menor a mayor altitud.

^xSitio 1, ^{xx} Sitio 2.

¹ Tipos de suelos tomados de Miehlich, 1980 de las equivalencias con el esquema de FAO, 1980 y WRB, 2006.



9.2 Muestras foliares

El Cuadro 5, muestra los promedios generales de los porcentajes de N, P, K y Ca en tejido foliar de *A. religiosa* para cada etapa de desarrollo y la asignación de su estado nutrimental con base en la comparación de la escala propuesta por García (2003) que realizó con individuos maduros (Cuadro 7) en este mismo Parque Nacional. Es importante mencionar que la clase nutrimental que se asigna a brinzales y juveniles, se debe tomar con reserva, ya que el estado nutrimental depende de varios factores entre ellos de la edad (Wells y Allen, 1985).

CUADRO 5. Promedios de N, P, K y Ca en tejido foliar de *Abies religiosa* en cada etapa de desarrollo y la asignación de su estado nutrimental.

ETAPA DE DESARROLLO	N	P	K	Ca
Brinzal (< 1m)	1.55 S	0.21 A	0.92 B	1.18 A
Juvenil (> 1m y < 3m)	1.59 A	0.22 A	0.80 B	1.25 A
Maduro (> 3m)	1.48 S	0.21 A	0.77 B	2.98 A

B= Bajo, S= Suficiente, A= Alto (Intervalos propuestos por García, 2003).

Para las tres etapas de desarrollo, la clasificación del estado nutrimental para P y Ca se ubicó en nivel nutrimental alto para los siete sitios, siguiendo el N con niveles nutrimentales suficientes y altos, y por último K con intervalos bajos. Del Cuadro 5 se deduce que los porcentajes de N, P y K fueron mayores tanto en las etapas brinzal y juvenil, respecto al porcentaje que se tiene en la etapa madura y que el de Ca aumenta conforme a la etapa de desarrollo.

Lo anterior, también se reflejó en el análisis de correlación simple de Pearson, en donde el promedio de N, P, K y Ca foliar mostraron una correlación significativa ($p < 0.05$) con respecto a la etapa (Cuadro 6). Los promedios generales de N, P y K foliar tuvieron una correlación negativa, lo cual significa que a medida que la etapa avanza en *A. religiosa*, el porcentaje de estos nutrientes en tejido foliar disminuye; tal circunstancia se atribuye a los procesos de dilución y concentración nutrimental que se generan dentro de los tejidos del árbol en etapa madura (Mengel y Kirby, 1982). Sin embargo, el porcentaje de Ca foliar aumentó con la etapa del individuo ($p < 0.05$); esto se debe a que el Ca en la planta no es móvil, a consecuencia de esto, una parte de este elemento se va almacenando en compartimentos de la planta. Una alta concentración de Ca es encontrada en la pared celular, en la superficie exterior de la membrana plasmática, en el retículo endoplasmático y en las vacuolas (Marschner, 1995).



CUADRO 6. Variables que tuvieron una correlación significativa (alfa < 0.05) con respecto a la etapa de desarrollo.

ETAPA DE DESDARROLLO	
VARIABLE	COEFICIENTE
Promedio N-foliar	-0.23
Promedio P-foliar	-0.24
Promedio K-foliar	-0.41
Promedio Ca-foliar	0.70

De acuerdo con Marschner (1995), el porcentaje de nitrógeno en tejido vegetal está normalmente entre 1-5 % del peso total de la materia seca. El amplio intervalo varía dependiendo de la especie de planta, tipo de tejido, edad del tejido y disponibilidad. Por otro lado, el fósforo es diez veces menor al de nitrógeno, pues se encuentra en el intervalo de 0.1-0.5 %. Junto con el nitrógeno, el potasio es el nutriente mineral requerido en grandes cantidades por las plantas. El requerimiento óptimo de potasio para el crecimiento de las plantas, está en el rango de 2-5 % de peso seco y el de calcio entre 0.1 y >5 % dependiendo de la edad, de las condiciones de crecimiento de la especie de planta y el órgano en ella. Por lo que, la mayoría de los resultados obtenidos se encontraron dentro de los intervalos establecidos por este autor.

CUADRO 7. Intervalos de suficiencia y deficiencia nutrimental en individuos adultos de *Abies religiosa* (García, 2003).

ELEMENTO	Bajo (B)	Suficiente (S)	Alto (A)
	%		
N	≤ 1.340	> 1.340 a 1.583	> 1.583 a 2.033
P	≤ 0.093	> 0.093 a 0.203	> 0.203 a 0.262
K	≤ 1.044	> 1.044 a 2.489	> 2.489 a 2.791
Ca	≤ 0.283	> 0.283 a 0.720	> 0.720 a 1.673

El Cuadro 8 presenta los porcentajes generales de N, P, K y Ca foliar en *A. religiosa* realizado en cada sitio de estudio. Coapexco-S1 y Palomas-S1 fueron los sitios que presentaron niveles altos de N, P y Ca, excepto K que se encuentra bajo en todos los sitios, siendo los sitios que presentaron un mejor estado nutrimental reflejado por los niveles altos de estos tres nutrimentos. Por otra parte fueron los sitios que presentaron un mejor estado de conservación; es decir no hubo presencia de tala, incendio y erosión del suelo. Se observó que en Coapexco-S1 existe una buena regeneración, además de ser una zona que está alejada de caminos.



CUADRO 8. Porcentaje general de N, P, K y Ca foliar en *Abies religiosa* y relación entre nutrimentos por sitio de estudio.

Sitio	Altitud m snm	%				N:P	N:K	N:Ca	P:K	P:Ca	K:Ca
		N	P	K	Ca						
Coapexco-S2 ^{xxx}	2679	1,64 A	0,17 S	0,86 B	2,42 A	9,71	1,91	0,68	0,20	0,07	0,36
Coapexco-S1 ^{xx}	2682	1,83 A	0,22 A	0,81 B	2,22 A	8,14	2,25	0,83	0,28	0,10	0,37
Palomas-S2	2949	1,53 S	0,18 S	0,81 B	1,49 A	8,34	1,88	1,02	0,23	0,12	0,54
Palomas-S1	2951	1,74 A	0,21 A	0,74 B	2,93 A	8,42	2,34	0,60	0,28	0,07	0,25
Camino O1 y F5	3284	1,46 S	0,23 A	0,89 B	2,55 A	6,41	1,64	0,57	0,26	0,09	0,35
Potrero	3353	1,48 S	0,22 A	0,81 B	1,57 A	6,77	1,82	0,94	0,27	0,14	0,52
Cañada Amalacaxco	3659	1,40 S	0,15 S	0,74 B	4,72 A	9,38	1,90	0,30	0,20	0,03	0,16
Mínimo		1,40 S	0,15 S	0,74 B	1,49 A	6,41	1,64	0,30	0,20	0,03	0,16
Máximo		1,83 A	0,23 A	0,89 B	4,72 A	9,71	2,34	1,02	0,28	0,14	0,54
Promedio		1,58 A	0,20 S	0,81 B	2,56 A	8,17	1,96	0,70	0,24	0,09	0,36

B= Bajo, S= Suficiente, A= Alto (Intervalos propuestos por García, 2003).

*Sitios ordenados de menor a mayor altitud.

^{xx}Sitio 1, ^{xxx}Sitio 2.



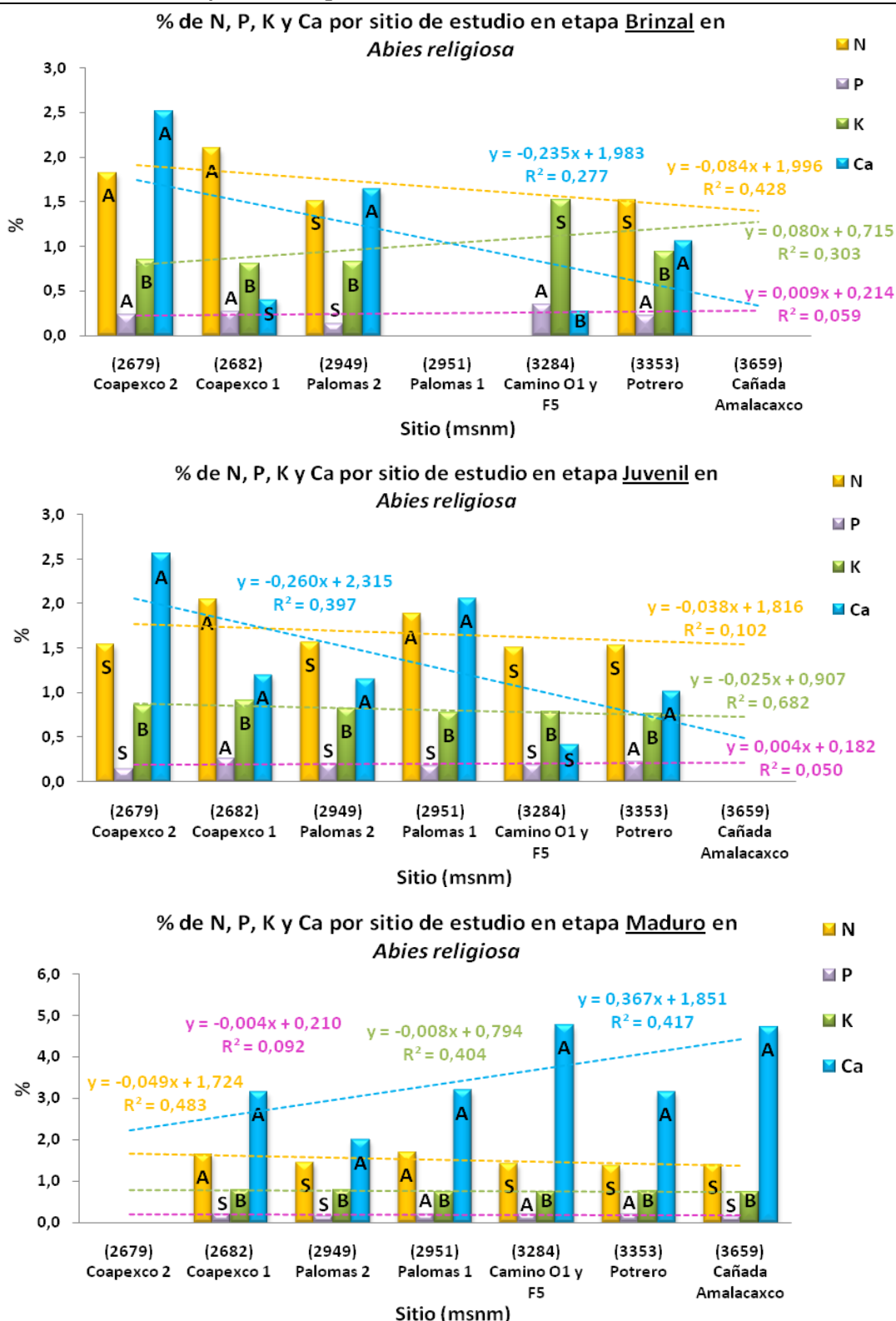
También se presentan las relaciones nutrimentales entre elementos. Esto nos provee información sobre el proceso de mineralización de la materia orgánica presente en el suelo para que los nutrimentos se encuentren disponibles o en solución para su absorción por parte de las plantas. Se pudo observar que los menores valores de relación de nutrientes entre N:Ca, P:K, P:Ca y K:Ca se presentaron en Cañada Amalacaxco y Camino O1 y F5.

Para conocer cómo influyó la altitud sobre el porcentaje de estos nutrimentos, se graficaron los promedios generales de N, P, K y Ca en tejido foliar de *A. religiosa* y su estado nutrimental en cada etapa de desarrollo a lo largo de ocho meses por sitio de estudio (Figura 16). Se observó que en las tres etapas el porcentaje de N foliar tiende a disminuir conforme aumenta la altitud. Este comportamiento de N, es similar con el estudio que reporta Hengxiao *et al.*, (1999) en *Pinus yunnanensis* a tres altitudes (1700, 1850 y 2000 m snm), en donde el menor porcentaje de N foliar se obtuvo a 2000 m snm. La temperatura es un factor clave, pues cuando disminuye, afecta la secuencia de mineralización, porque cada paso bioquímico está catalizado por una enzima sensible a la temperatura, enzima que es producida por microorganismos cuyo crecimiento está a su vez condicionado por este factor del ambiente (Alexander, 1980).

El P presentó un comportamiento contrario al de N. En brinzales y juveniles se observó una tendencia positiva con la altitud; sin embargo, en individuos maduros la tendencia fue contraria. El estado nutrimental general por sitio y etapa de desarrollo encontrados para N y P foliar, fueron niveles suficientes y altos.

En individuos juveniles y maduros, el porcentaje de K disminuyó con la altitud pero en brinzales la concentración aumentó conforme a la altitud. En las tres edades, el K presentó un nivel nutrimental bajo; por lo que tiende a ser un elemento limitante en el crecimiento de *A. religiosa*.

Finalmente, el porcentaje de Ca disminuyó por un lado con el aumento de altitud en individuos brinzales y juveniles, pero aumentó con la altitud en individuos maduros. En la mayoría de los sitios y etapas, el Ca tuvo un rango nutrimental alto; por lo que es el elemento que menos limita el crecimiento de *A. religiosa*. Como se hizo notar anteriormente, se debe señalar que los porcentajes de Ca en etapa de desarrollo maduro son mayores en comparación con las que se tienen en brinzal y juvenil.



B= Bajo, S= Suficiente, A= Alto (Intervalos propuestos por García, 2003).

FIGURA 16. Promedios generales de N, P, K y Ca en tejido foliar de *Abies religiosa* y clasificación nutrimental por sitio de estudio en las tres etapas de desarrollo durante los ocho meses de estudio.



Para conocer el comportamiento de cada nutriente en el transcurso de los ocho meses, se sacaron los promedios generales de cada elemento en las tres etapas correspondientes para cada mes, incluyendo los siete sitios de estudio. El Cuadro 9 presenta de manera general los porcentajes de N, P, K y Ca en tejido foliar de cada etapa, a lo largo de un ciclo anual y la asignación de su estado nutricional. Enseguida, se presenta el comportamiento de cada elemento.

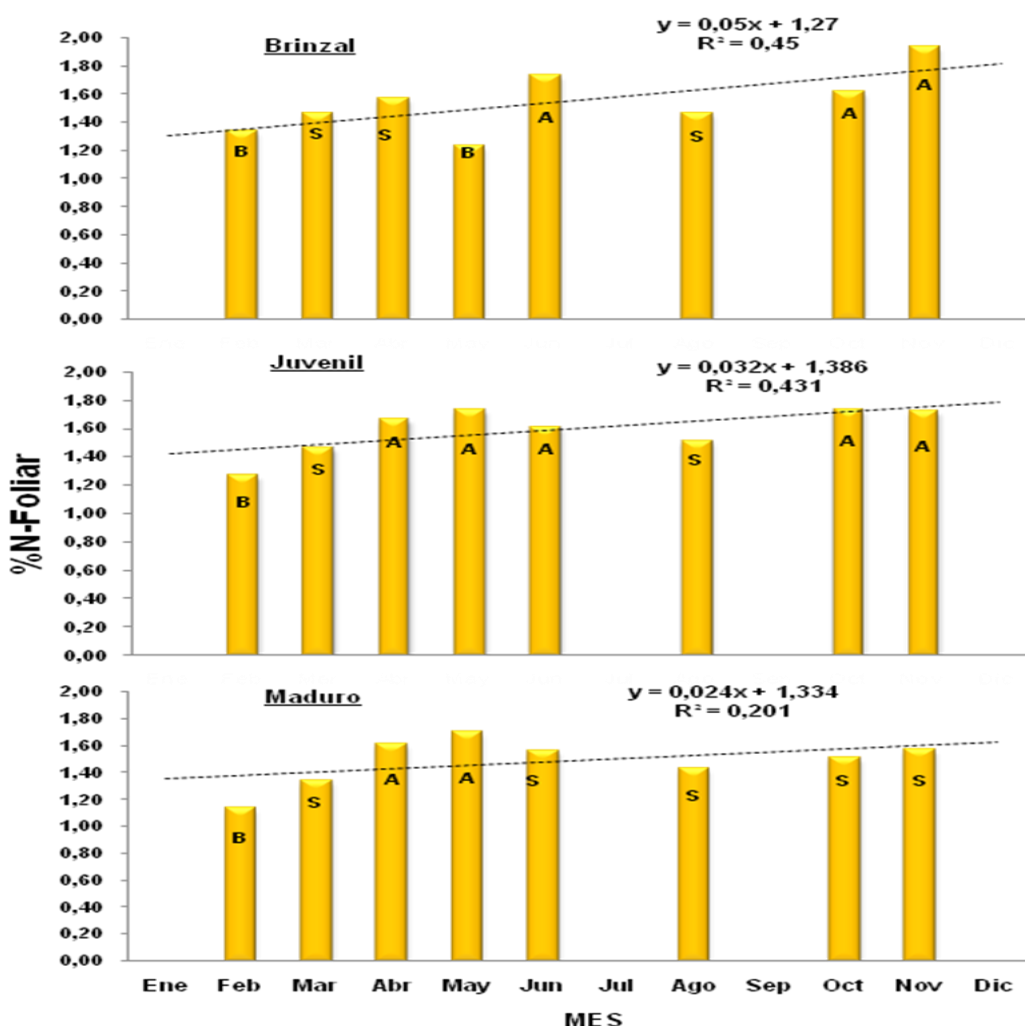
CUADRO 9. Porcentaje de N, P, K y Ca en tejido foliar de *Abies religiosa*, en cada etapa, a lo largo de un ciclo anual y la asignación de su estado nutricional.

MES	N			P			K			Ca		
	Brinzal	Juvenil	Maduro	Brinzal	Juvenil	Maduro	Brinzal	Juvenil	Maduro	Brinzal	Juvenil	Maduro
	%											
Ene	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
Feb	1.34 S	1.27 B	1.14 B	0.22 A	0.21 A	0.19 S	1.29 S	0.73 B	0.80 B	0.84 A	0.71 S	2.33 A
Mar	1.46 S	1.46 S	1.34 S	0.22 A	0.26 A	0.23 A	0.67 B	0.66 B	0.70 B	0.82 A	0.77 A	3.16 A
Abr	1.57 S	1.66 A	1.61 A	0.22 A	0.25 A	0.26 A	0.92 B	0.97 B	0.98 B	1.21 A	1.58 A	2.89 A
May	1.24 B	1.73 A	1.70 A	0.13 S	0.31 A	0.30 A	0.87 B	0.98 B	0.87 B	1.65 A	1.64 A	2.43 A
Jun	1.74 A	1.61 A	1.56 S	0.34 A	0.27 A	0.23 A	1.29 S	1.01 B	0.95 B	1.72 A	0.83 A	2.97 A
Jul	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
Ago	1.47 S	1.51 S	1.44 S	0.27 A	0.11 S	0.11 S	0.50 B	0.54 B	0.44 B	1.00 A	1.25 A	3.11 A
Sep	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
Oct	1.62 A	1.73 A	1.51 S	0.12 S	0.13 S	0.16 S	0.91 B	0.65 B	0.67 B	0.93 A	1.70 A	3.53 A
Nov	1.94 A	1.72 A	1.58 S	0.18 S	0.20 S	0.17 S	0.90 B	0.85 B	0.77 B	1.30 A	1.51 A	3.45 A
Dic	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
R ²	0.45	0.43	0.20	0.05	0.31	0.30	0.07	0.03	0.14	0.60	0.35	0.59

B= Bajo, S= Suficiente, A= Alto (intervalos propuestos por García, 2003).

9.1.1 Nitrógeno Foliar

La Figura 17 muestra que el porcentaje de N foliar tuvo más variación en los individuos brinzales que en el estado juvenil y maduro, debido a que se observó un marcado incremento de poco menos de 1.34 % en febrero a 1.94 % en noviembre. Esta tendencia (de incremento anual) en los cambios observados, disminuye al considerar el aumento de la madurez de los organismos pues lo demuestran las líneas de tendencia en el comportamiento del porcentaje de N foliar en individuos juveniles y maduros, cuya pendiente es menor siendo casi asíntota al eje del tiempo en los individuos maduros.



B= Bajo, S= Suficiente, A= Alto (intervalos propuestos por García, 2003).

FIGURA 17. Comportamiento del N foliar en individuos brinzales, juveniles y maduros en *Abies religiosa* y la asignación de su estado nutrimental.

La Figura 20 muestra el comportamiento del porcentaje de N foliar, de acuerdo a la edad, mes y altitud. Debe destacarse, que en juveniles y brinzales hay meses en los que sólo se colectaron muestras foliares en una sola altitud.

Febrero, marzo y agosto, fueron los meses donde se encontró menor porcentaje de N foliar en las tres edades, presentando en la mayoría de los casos niveles nutrimentales bajos y suficientes; puesto que al iniciar el mes de marzo aparecen nuevos brotes (yemas vegetativas) (Figura 18), que producen el siguiente flujo de crecimiento y continúan su avance durante la temporada de crecimiento (Figura 19); por lo que en meses posteriores (abril a junio), el porcentaje de nutrimentos fué mayor. Los resultados anteriores concuerdan con lo reportado por Santoro y Magalhaes (1983), que mencionan que durante la ontogénesis de una hoja individual, un patrón típico observado en la

actividad de la enzima nitrato reductasa, es que su actividad máxima ocurre cuando el índice de expansión de la hoja es máxima. De allí en adelante la actividad declina rápidamente, de donde se infiere que en *Abies religiosa* ocurre entre abril a junio y declina en agosto porque el porcentaje de N fue bajo.



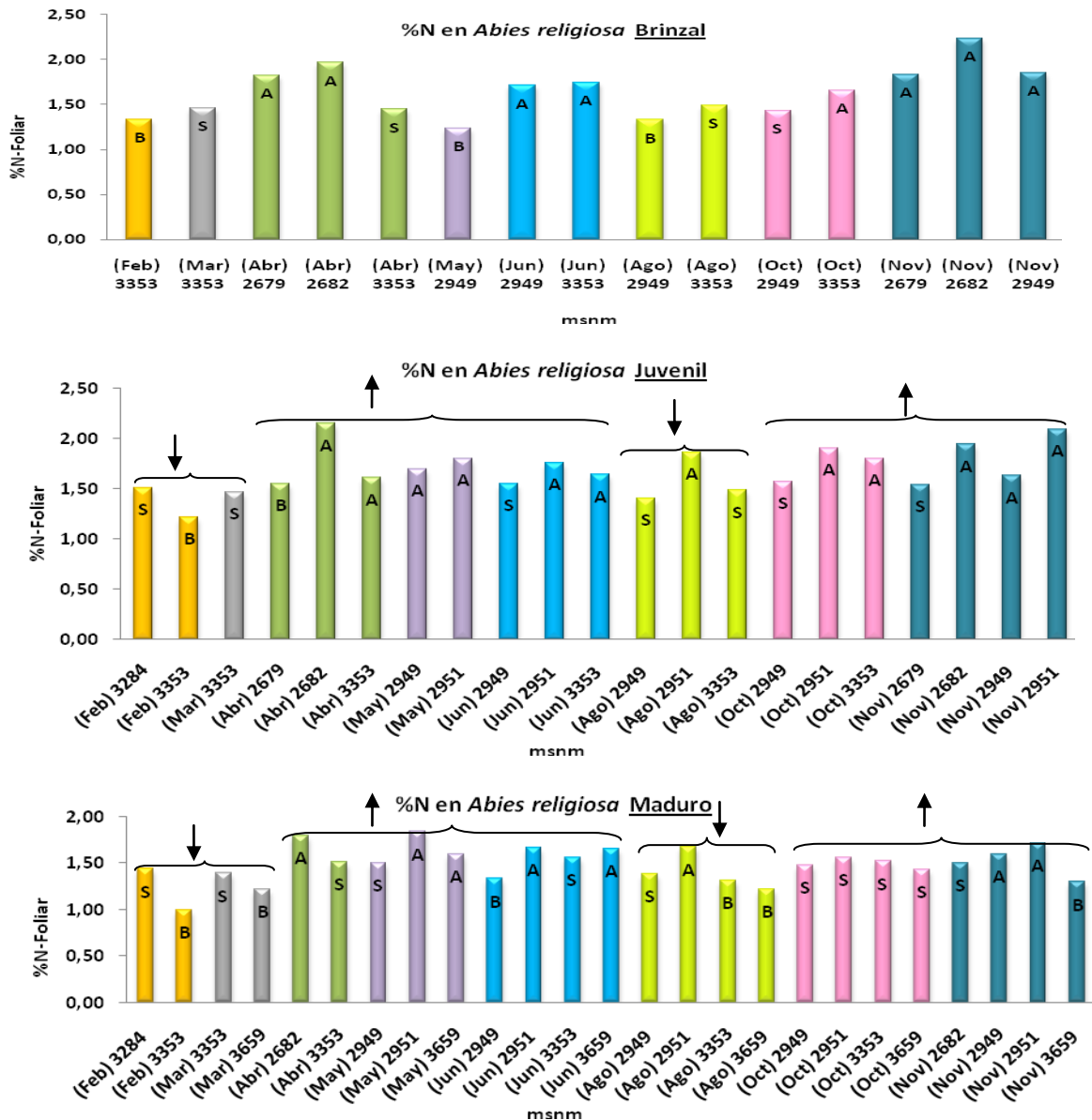
FIGURA 18. Fotografía de yemas vegetativas en *Abies religiosa* en el Parque Nacional Izta-Popo.



FIGURA 19. Fotografía del crecimiento de yemas vegetativas en *Abies religiosa* en el Parque Nacional Izta-Popo.

Cuando empieza octubre, el porcentaje vuelve a mostrar una tendencia a aumentar, lo que puede atribuirse al inicio de la estación de latencia (después de septiembre y a principios de diciembre) y, durante este período, las concentraciones de nutrientes foliares son relativamente estables (Ballard y Carter, 1985). Este aumento de concentración se puede observar mejor en la Figura 17. No obstante, en individuos brinzales el porcentaje varío de un mes a otro a lo largo de los ocho meses.

En individuos brinzales no se observó alguna tendencia con respecto a la altitud. En cuanto a los individuos juveniles y maduros, en la mayoría de los casos se presentó una tendencia negativa; es decir a mayor altitud, el porcentaje de N foliar disminuyó.



↑ Aumenta % N foliar ↓ Disminuye % N foliar

B= Bajo, S= Suficiente, A= Alto (intervalos propuestos por García, 2003).

FIGURA 20. Comportamiento del N foliar de acuerdo a la etapa de desarrollo, mes y altitud en *Abies religiosa* y la asignación de su estado nutricional.

Se debe mencionar, que el comportamiento del N también va a depender del pH en el suelo, de la actividad de la enzima ureasa, la actividad microbiana y de la época en la que es colectada la muestra. En suelos ácidos se presentan bajas tasas de mineralización de materia orgánica, por lo que en ellos se manifiesta problemas de abastecimiento de nitrógeno. El amonio mineralizado, tiene un corto período de vida en el suelo, una parte de los iones son temporalmente absorbidos a la superficie de las arcillas cargadas negativamente o a las partículas orgánicas, otros son usados

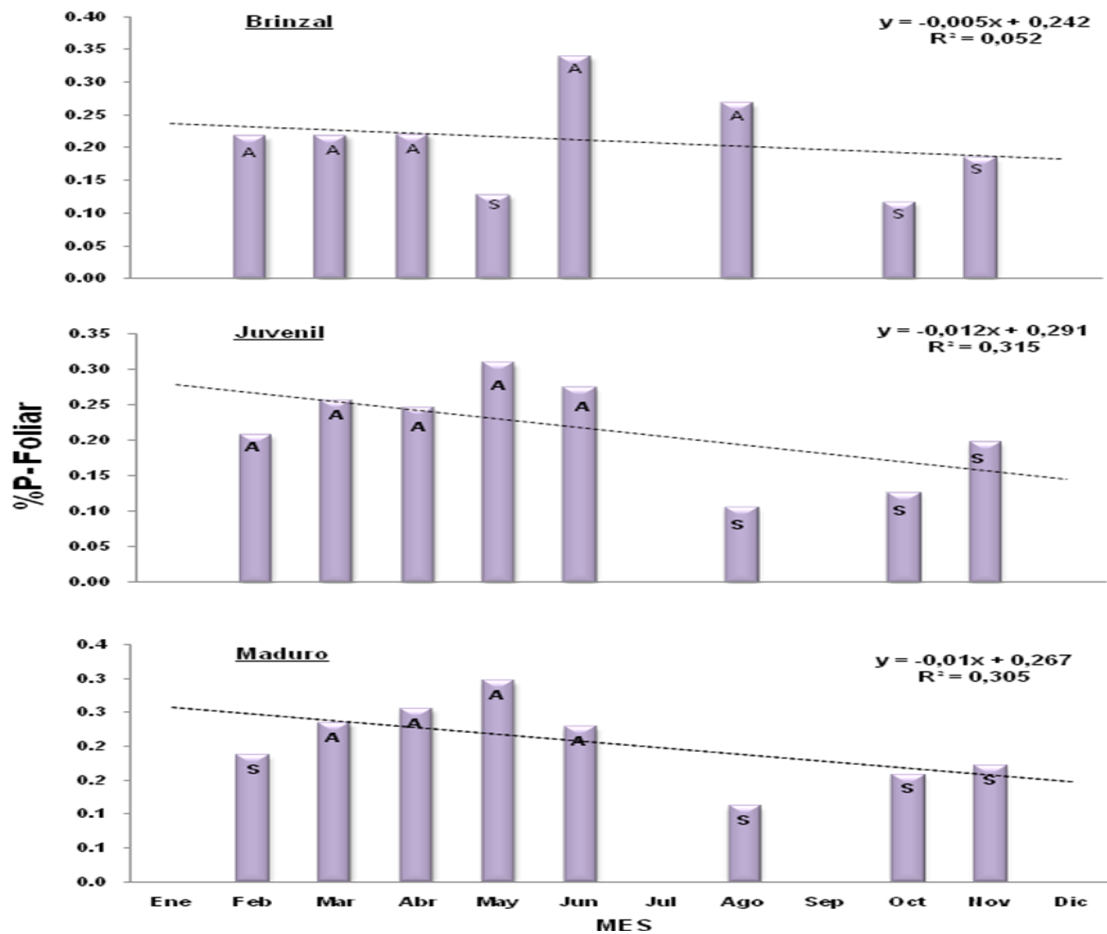


directamente por las plantas y eventualmente la mayoría de los iones amonio son oxidados por bacterias selectivas (nitrosomonas o nitrobacterias) a nitratos. Este proceso es rápido a menos de que el suelo sea fuertemente ácido, frío o húmedo (Donahue, 1981). Sin embargo la liberación por mineralización puede ser muy lenta y su disponibilidad para las nuevas plantas puede estar limitada por factores que afectan su movilidad por competencia intra o interespecífica o por desnitrificación. Así el nitrógeno disponible puede ser el principal limitante de la productividad de las plantas (Cruz, 2006). Sin embargo en épocas muy secas, la actividad microbiana y las tasas de nitrificación se reducen, por lo que la inmovilización microbiana del N es mayor y la mineralización disminuye (Singh *et al.*, 1989).

De lo anterior, se deduce que un estudio de nitrógeno foliar en individuos maduros y juveniles se puede realizar durante el período de abril a junio, dado que se mantienen valores casi constantes. Sin embargo, en la etapa brinzal, sólo se observaron picos de máximo porcentaje en los meses de abril, junio y noviembre.

9.1.2 Fósforo foliar

En la Figura 21, se observa una tendencia negativa entre el tiempo y el porcentaje de P foliar, lo cual indica una disminución de P, presentando una tendencia opuesta con respecto al N foliar. El porcentaje de P foliar presentó más cambios en los individuos juveniles, seguido de los maduros y brinzales con una disminución de poco más de 0.21 % en febrero a 0.20 % en noviembre. En relación a esto, se menciona que la demanda máxima de $\text{H}_2\text{PO}_4^{1-}$ y HPO_4^{2-} se presenta cuando la planta es joven, pudiendo reducirse a medida que el desarrollo avanza; cuando envejecen las células mediante acción enzimática, gran parte de estos nutrimentos pueden ser transferidos a nuevos puntos de crecimiento para construir allí otros nuevos sistemas (Marschner, 1995).



B= Bajo, S= Suficiente, A= Alto (intervalos propuestos por García, 2003).

FIGURA 21. Comportamiento del P foliar en individuos brinzales, juveniles y maduros en *Abies religiosa* y la asignación de su estado nutrimental.

A una altitud de 3353 m snm el porcentaje de P fué alto cuando hubo un alto porcentaje de materia orgánica (6.29 %) y un pH potencial cercano a la neutralidad (6.92). Con respecto a lo anterior, los suelos ricos en materia orgánica contienen abundante P orgánico. Un cambio de pH ácido a neutro incrementa la liberación de fósforo. Los suelos ricos en P orgánico serán los más activos en liberación de fósforo (Alexander, 1980). En altitudes mayores a 3600 msnm se observó un bajo porcentaje de P atribuible a que la temperatura disminuye, lo que afecta el proceso de mineralización. Los individuos brinzales presentaron una marcada variabilidad de P foliar a lo largo del año.

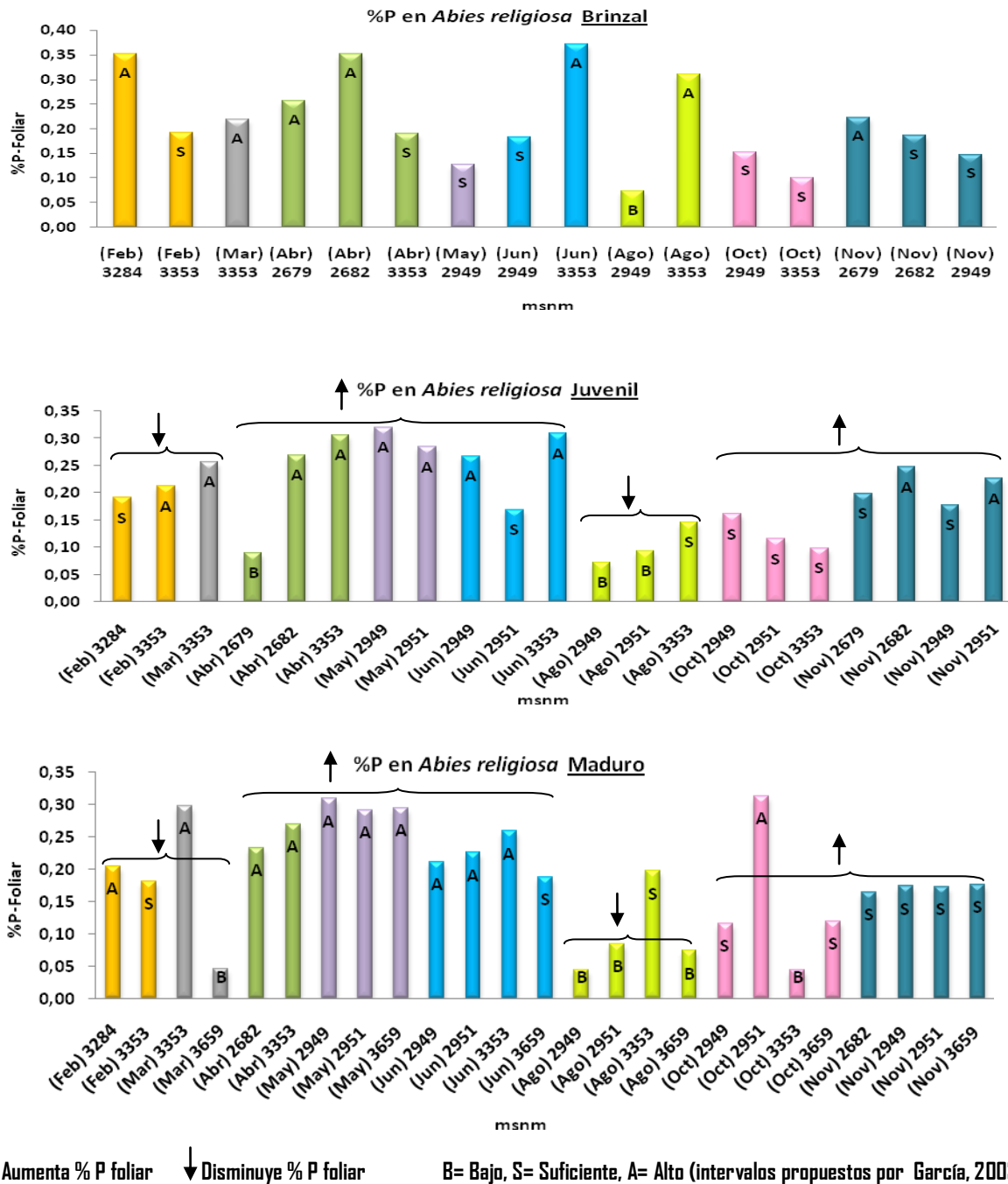


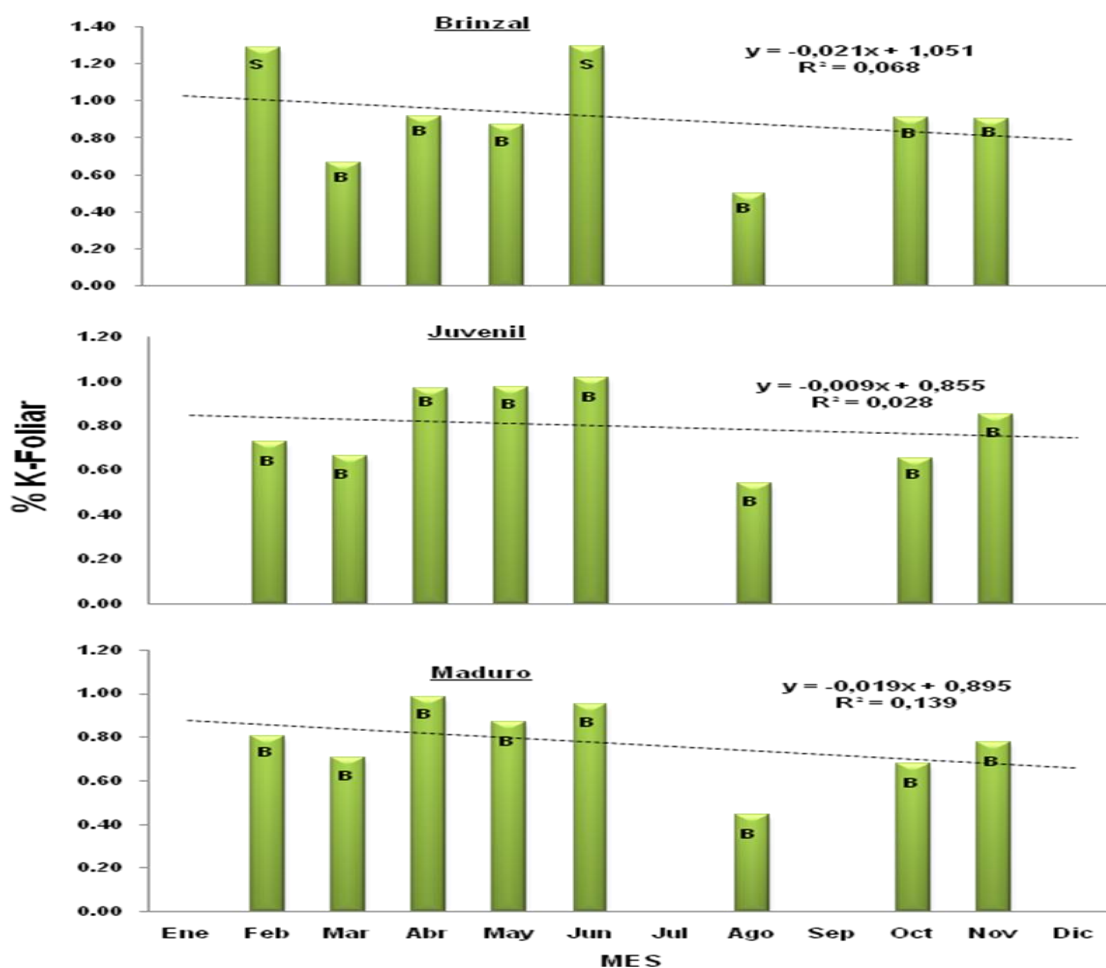
FIGURA 22. Comportamiento del P foliar de acuerdo a la etapa de desarrollo, mes y altitud en *Abies religiosa* y la asignación de su estado nutricional.

El P dentro de la planta es un elemento móvil y tiende a concentrarse en tejidos jóvenes, razón por la cual a partir del mes de abril se encontraron altos porcentajes de P foliar. Al inicio de primavera (marzo) se da el rompimiento de yemas vegetativas que dan lugar al nuevo flujo de crecimiento. Se encontró que después del mes de junio, el porcentaje de P foliar vuelve a disminuir en las tres etapas, presentando en la mayoría clases nutrimentales con niveles bajos y suficientes.

Los resultados de esta investigación indican que para un estudio nutrimental de P foliar en individuos juveniles y maduros, el período de colecta de muestra debe abarcar desde abril a junio; considerando que existe una estabilidad en la concentración de dicho nutrimento. Los picos de máximo porcentaje en la etapa brinzal se presentaron en los meses de febrero, abril, junio y agosto.

9.1.3 Potasio foliar

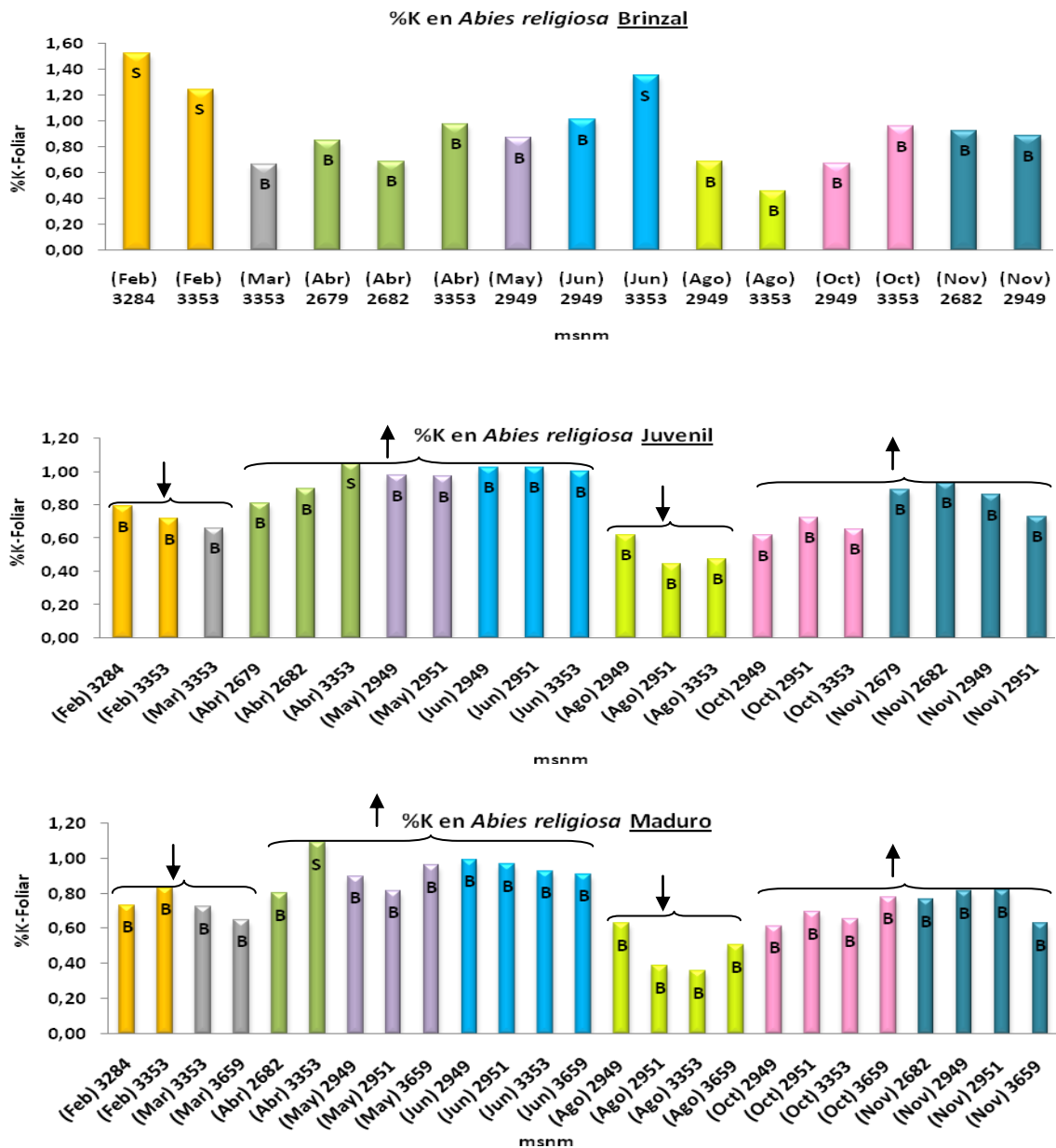
El potasio en tejido foliar al igual que el fósforo presentó una tendencia negativa en el transcurso de los meses del año, lo cual indica una disminución anual. El cambio más significativo tuvo lugar en individuos maduros y fueron menos marcados en la etapa brinzal y juvenil con valores de poco más de 0.80 en febrero a 0.77 % en noviembre (Figura 23).



B= Bajo, S= Suficiente, A= Alto (intervalos propuestos por García, 2003).

FIGURA 23. Comportamiento del K foliar en individuos brinzales, juveniles y maduros en *Abies religiosa* y la asignación de su estado nutrimental.

El análisis de resultados con respecto a la Figura 24, muestra un estado nutrimental bajo de potasio en la mayoría de los casos para individuos juveniles y maduros. Estos niveles bajos de potasio, en parte, se atribuye a que este elemento no se encuentra formando parte de ninguna estructura vegetal y siempre se halla como ión libre o formando sales muy solubles, el cual puede ser removido por efecto de las precipitaciones (De La Horra; *et al.* 2000). Bernhard-Reversat (1975), encontró que del 70-80 % de potasio retornado a través de hojas frescas era lavado en dos semanas.



↑ Aumenta % K foliar ↓ Disminuye % K foliar B= Bajo, S= Suficiente, A= Alto (intervalos propuestos por García, 2003).

FIGURA 24. Comportamiento del K foliar de acuerdo a la etapa de desarrollo, mes y altitud en *Abies religiosa* y la asignación de su estado nutrimental.

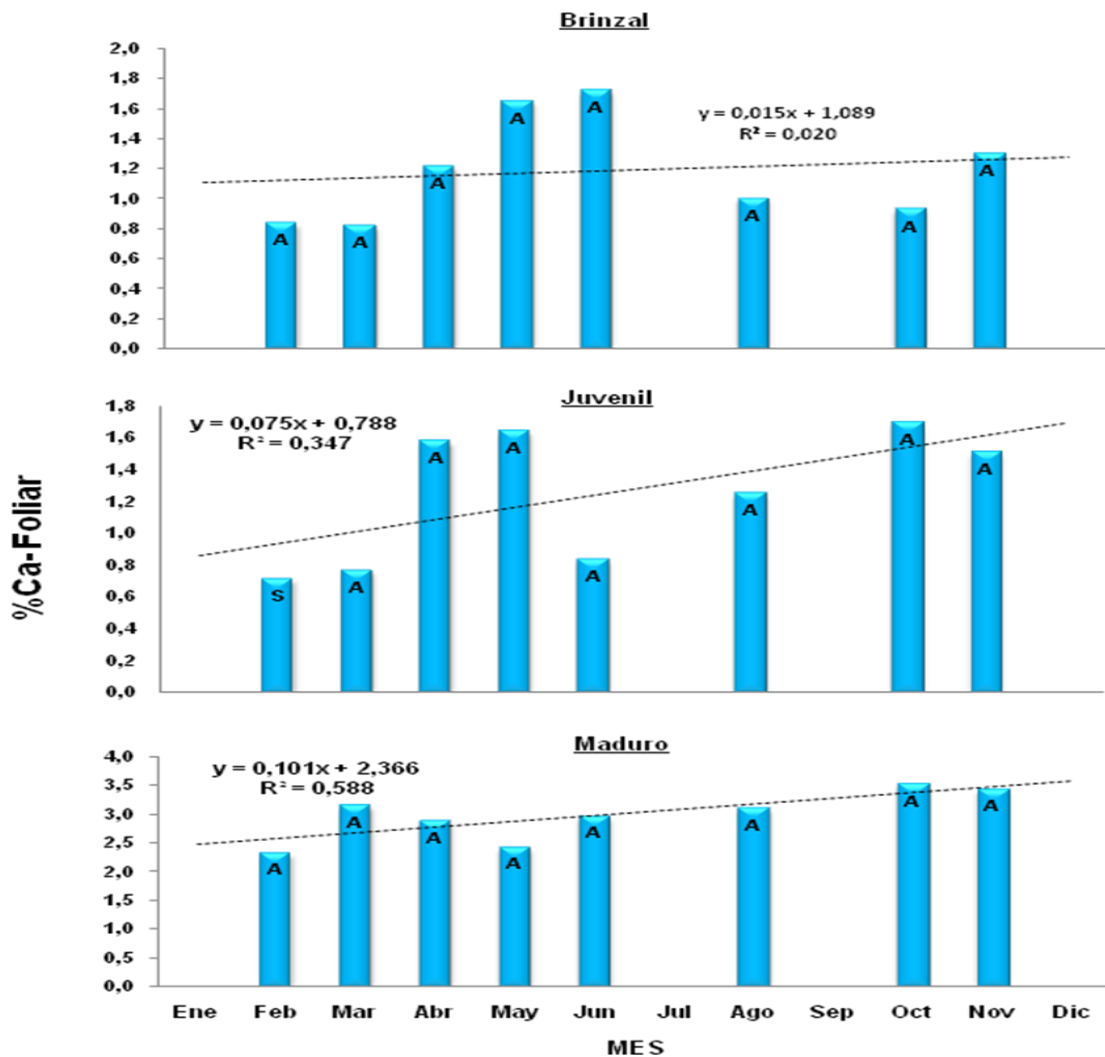


El carácter móvil de este elemento puede marcar un flujo preferencial de circulación por las aguas de escurrimiento cortical y de precipitación interna, antes que por la hojarasca (Ramírez *et al.*, 2007). Los niveles más altos se presentaron en la etapa brinzal con un estado nutrimental de categoría suficiente para el mes de febrero. Agosto fue el mes con menor porcentaje de K en tejido foliar para las tres etapas.

En las variaciones de K durante los ocho meses no se observó alguna tendencia con respecto a la altitud en las tres edades, ya que presentó una gran variabilidad en los porcentajes foliares de éste nutrimento. En los meses de febrero y junio se presentaron los picos de máximos porcentajes en la etapa brinzal; mientras que en individuos juveniles y maduros, durante el período de abril a junio, los porcentajes fueron altos y estables en comparación con los demás meses; por lo que un estudio nutrimental de K foliar puede ser realizado durante estos meses.

9.1.4 Calcio foliar

El Ca en tejido foliar presentó una tendencia a incrementar a lo largo de ocho meses de estudio (febrero a noviembre), debido a que se observó un marcado aumento de 2.33 en febrero a 3.45% en noviembre en individuos maduros (Figura 25). Esta tendencia de aumento anual en los cambios observados, es notablemente marcada al considerar la madurez de los individuos. Aunque el estado nutrimental fué alto para las tres edades, se logró apreciar que los porcentajes fueron mayores en individuos maduros, siguiendo los juveniles y por último los brinzales.

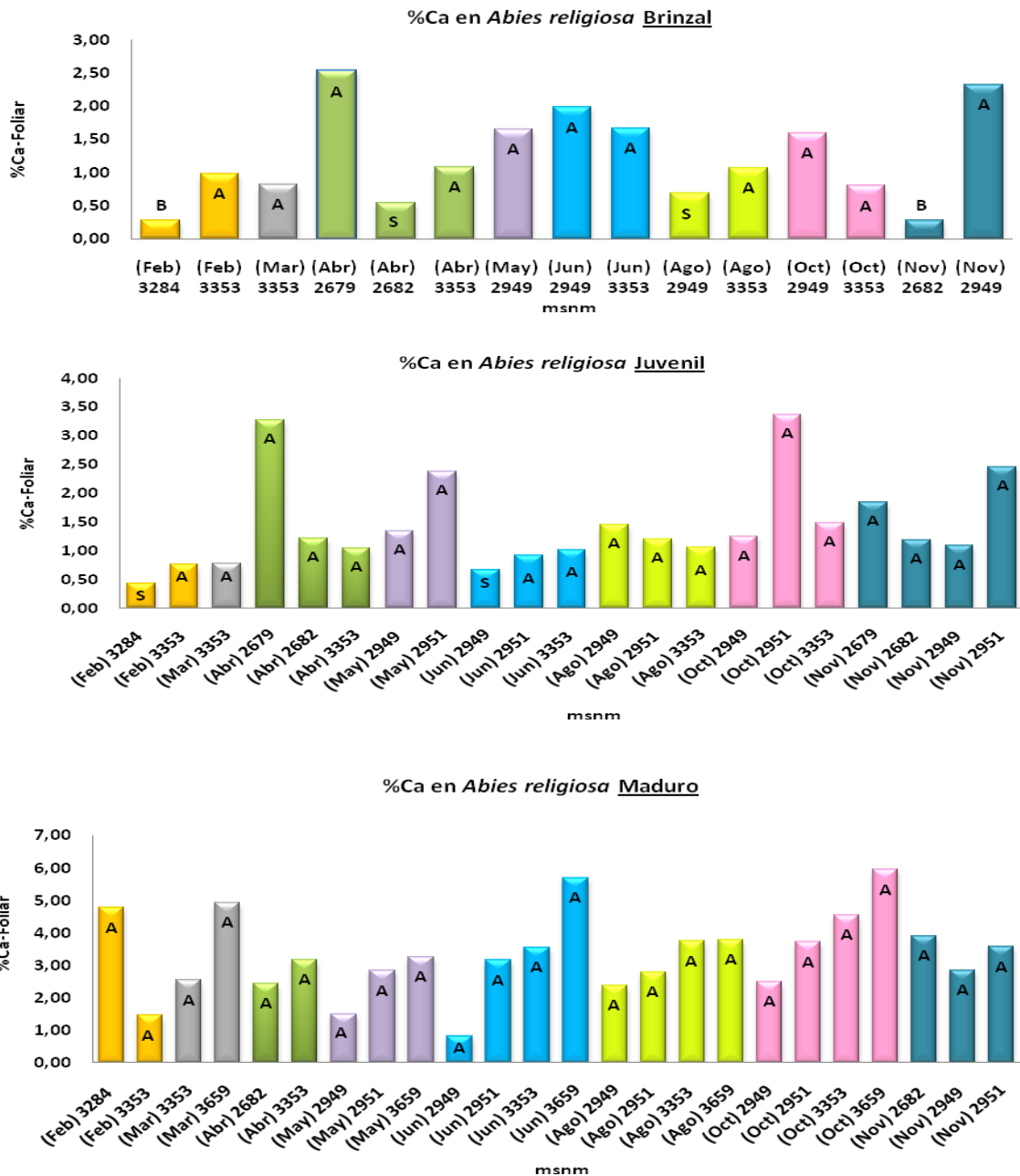


B= Bajo, S= Suficiente, A= Alto (intervalos propuestos por García, 2003).

FIGURA 25. Comportamiento del Ca foliar en individuos brinzales, juveniles y maduros en *Abies religiosa* y la asignación de su estado nutrimental.

En la Figura 26 se observó que los individuos en etapa brinzal presentaron los valores más bajos de concentración en Ca mostrando niveles nutrimentales con categoría de bajo y suficiente. No se observó alguna tendencia en el porcentaje de Ca foliar con respecto a la altitud y al seguimiento anual tanto en brinzales como juveniles. Sin embargo, para el caso de individuos maduros se observó una ligera tendencia es decir a mayor altitud, el porcentaje de Ca aumentó.

El Ca se fue incrementando con la edad de los individuos, siendo en la etapa madura donde se presentaron valores mayores de porcentaje, debido a que como ya se mencionó, una gran parte del Ca queda inmovilizado en forma de pectato y oxalato de calcio.



B= Bajo, S= Suficiente, A= Alto (intervalos propuestos por García, 2003).

FIGURA 26. Comportamiento del Ca foliar de acuerdo a la etapa de desarrollo, mes y altitud en *Abies religiosa* y la asignación de su estado nutrimental.

En las tres edades, no se logró apreciar un período en el cual los valores fueran estables en el tiempo y así establecer la mejor época de colecta de tejido foliar para el estudio nutrimental de calcio. Se puede decir que la concentración de este elemento no depende de la época en la que es colectada la muestra foliar, sino más bien va a depender de la edad de la planta.



Los resultados obtenidos en la investigación muestran en general niveles nutrimentales bajos de potasio y altos para calcio en tejido foliar. En el caso particular de las plantaciones de coníferas, las concentraciones de K y Ca se comportan de manera inversa; poniendo de manifiesto el conocido antagonismo entre ambos elementos, según el cual la absorción de potasio se ve suprimida por la abundancia de calcio (Ramírez *et al.*, 2007).

En general, para individuos brinzales, el porcentaje de N, P y K foliar no presentó ninguna tendencia con respecto a la altitud y época del año; sin embargo se lograron apreciar meses en los cuales se obtuvieron picos de máximos porcentajes para cada uno de estos elementos, para N foliar, los altos porcentajes se presentaron en abril, junio y noviembre; para P foliar se presentaron en febrero, abril, junio y agosto; y por último para K foliar se observaron en febrero y junio. Por otra parte, en individuos juveniles y maduros, los mayores porcentajes de N, P y K foliar se observaron durante el período de abril a junio; por lo que junio es el mes que coincide con un alto porcentaje de estos tres nutrimentos para realizar un estudio nutrimental en las tres etapas de desarrollo.

El Cuadro 10 muestra las Normales Climatológicas y los promedios de los lugares más cercanos a los sitios de estudio durante dos períodos de 1942 a 1970 y de 1971 a 2000. En los dos períodos se observó que los valores más altos de precipitación ocurrieron entre finales de mayo a septiembre (período de lluvias). Sin embargo, se puede apreciar que a partir de abril el aumento de precipitación comienza a ser notoria. Estos datos, dan una idea de cómo ocurren las precipitaciones durante todo el año.

CUADRO 10. Normales Climatológicas

Sitio	Altitud m snm	Normales Climatológicas 1942-1970												
		Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Anual
Amecameca de Juárez	2470	10,4	6,2	7,0	28,1	79,8	158,0	177,3	190,5	182,2	67,2	22,4	6,5	935,6
Río Frío	3000	16,0	10,5	12,4	52,5	105,8	180,0	202,8	192,9	192,7	90,0	24,0	10,0	1089,6
Promedio		13,2	8,4	9,7	40,3	92,8	169,0	190,1	191,7	187,5	78,6	23,2	8,3	1012,6
		Normales Climatológicas 1971-2000												
Amecameca de Juárez	2470	13,9	10,6	18,3	36,2	85,6	160,5	169,9	168,4	183,9	66,1	16,6	9,5	939,5
Río Frío, Ixtapalucan	3000	11,1	15,7	19,6	44,8	107,3	177,6	182,0	152,8	133,9	74,4	13,3	8,8	941,3
San Juan Tetla, 7 Norte	3350	17,1	7,5	12,2	48,4	94,6	152,6	155,0	160,9	143,7	75,9	15,7	4,7	888,3
Promedio		14,0	11,3	16,7	43,1	95,8	163,6	169,0	160,7	153,8	72,1	15,2	7,7	923,0

Fuente: <http://smn.cna.gob.mx/climatologia/normales/estacion/mex/NORMAL15082.TXT>

Respecto a la hipótesis planteada, en la época de lluvias se encontrarían los porcentajes más altos de nutrimentos. Mayo y junio son meses del período de lluvias que corresponden a una alta concentración de nutrimentos; sin embargo, en el mes de agosto dentro de ésta época, disminuyeron los porcentajes de N, P y K foliar (Figura 27). La estabilidad de porcentajes altos de N, P y K foliar en el período de abril a junio en individuos juveniles y maduros puede atribuirse más a la fisiología de la planta que al factor climático, debido a que a partir de marzo comienza el crecimiento de yemas vegetativas en *Abies religiosa*; siendo la mejor época de colecta para un estudio nutrimental. Junio es el mes que coincide con una mayor concentración de N, P y K foliar para las tres etapas.

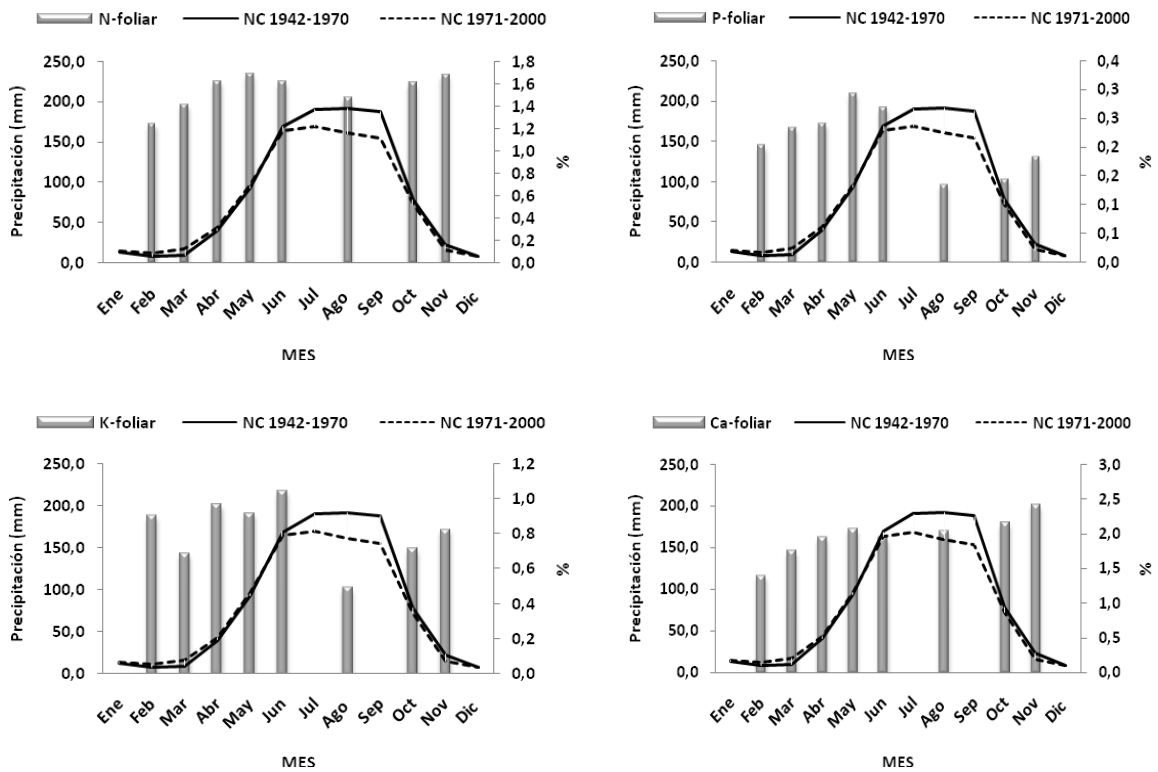


FIGURA 27. Comparación entre Normales Climatológicas (NC) y % de N, P, K y Ca foliar.

9.1.5 N, P, K y Ca en la planta

Los nutrientes, una vez absorbidos por la planta ingresan al circuito fisiológico comportándose de una forma móvil o inmóvil. Los móviles (N, P, K) se mueven casi continuamente dentro del vegetal ocasionando un traslado en los distintos períodos del crecimiento y desarrollo; en cambio los elementos inmóviles (Ca) se fijan en ciertas partes de la planta y no se trasladan desde las hojas viejas a las nuevas. Estas localizaciones permiten reducir las distintas deficiencias de los



elementos poco móviles, ya que estos al no poder trasladarse, una vez descubiertos los síntomas anormales, significan la carencia directa de algunos de ellos.

En las hojas viejas se detectan las carencias de los nutrientes móviles, significando que la planta ya trasladó sus propios nutrientes desde las hojas viejas hacia las jóvenes u otros órganos recientes, denunciando la carencia del elemento (Rodríguez, 1992).

9.2 Muestras de suelo

9.2.1 Propiedades físicas del suelo

Son aquellas que reflejan la manera en que el suelo acepta, retiene y transmite agua a las plantas, así como las limitaciones que se pueden encontrar en el crecimiento de las raíces, la emergencia de las plántulas, la infiltración o el movimiento del agua dentro del perfil y que además estén relacionadas con el arreglo de las partículas y los poros (Bautista *et al.*, 2004).

El Cuadro 11 presenta los promedios generales de las propiedades físicas del suelo. Se observa que Potrero fué el sitio con mayor concentración de sales ($0,485 \text{ dS m}^{-1}$) y el de Palomas-S2, el de menor valor con una conductividad eléctrica de $0,007 \text{ dS m}^{-1}$. El agua afecta la disponibilidad de la mayoría de los elementos esenciales por su efecto sobre la solubilidad y la precipitación. Si la concentración de sales excede los 5 dS m^{-1} , el potencial osmótico del suelo provoca efectos adversos sobre la planta y en primera instancia sobre la raíz. Con respecto a los nutrimentos del suelo la conductividad eléctrica (CE) presentó correlaciones significativas con ppm P-Bray ($r=0.76$) y K-suelo ($r=-0.25$) (Anexo B).

La densidad de las partículas del suelo, conocida también como densidad real (DR), se define como la masa (peso) de los sólidos del suelo por unidad de volumen. Los valores de densidad encontrados son variables y dependen de la composición del suelo. En la mayoría de los suelos minerales, su valor no excede de 2.65 g cm^{-3} . Esto se debe a que el cuarzo, los feldspatos y los silicatos, que son sus principales constituyentes, presentan densidades comprendidas dentro de este valor (Reyes, 1996).

La densidad aparente (DA) es la masa por unidad de volúmen del suelo, en estado natural (Reyes, 1996). En los suelos forestales, la densidad aparente varía desde 0.2 en algunas capas orgánicas hasta casi 1.9 g cm^{-3} en las arenas gruesas (Pritchett, 1991). De acuerdo con los datos obtenidos, Potrero fué el sitio que presentó la mayor densidad aparente (1.08 g cm^{-3}). Con respecto



a lo anterior, los suelos que presentan valores altos, se puede atribuir al pisoteo excesivo del ganado. Por otro lado, Cañada Amalacaxco fue el sitio cuyos suelos tuvieron la menor densidad aparente (0.46 g cm^{-3}); lo cual se puede relacionar con su alto contenido de materia orgánica y su alto contenido de pómez.

CUADRO II. Promedios generales de las propiedades físicas del suelo.

Sitio	Altitud m snm	CE dS m ⁻¹	DR ¹ g cm ⁻³	DA ² g cm ⁻³	EP	Contenido humedad			Clase Textural	
						Arcilla %	Limo %	Arena %		
Coapexco-S1	2682	0.212	2.6	0.66	32	19.6	12.32	26	61.68	franco-arenoso
Coapexco-S2	2679	0.101	2.6	0.8	33	9.7	14.32	28	57.68	franco-arenoso
Palomas-S1	2951	0.023	2.6	0.85	37.5	8.2	8.32	24	67.68	franco-arenoso
Palomas-S2	2949	0.007	2.6	0.78	46.3	20.6	8.32	24	67.68	franco-arenoso
Camino O1 y F5	3284	0.206	2.6	0.88	18.6	10.2	6.32	22	71.68	franco-arenoso
Potrero Cañada Amalacaxco (bajo <i>Abies</i>)	3353	0.485	2.6	1.08	14.3	6.4	6.32	26	67.68	franco-arenoso
Mínimo		0.007	2.6	0.46	14.3	6.4	6.32	22	57.68	
Máximo		0.485	2.6	1.08	47.9	26.4	14.32	28	71.68	
Promedio		0.156	2.6	0.79	32.9	16.4	9.18	24.57	66.25	

CE=Conductividad eléctrica, EP= Espacio poroso

1. DR= Densidad real, valor teórico promedio de minerales dominantes; 2. DA= Densidad aparente, método cilindro.

La DA se relaciona con la porosidad del suelo, y por esto mismo, adquiere valores muy variables aún en un mismo tipo de suelo, y es muy afectada por las actividades de manejo y la cantidad de MO (Brady and Weil, 1999; Warrick, 2002). Una excesiva densidad aparente afecta a la planta porque inhibe la penetración de las raíces y de ella depende la percolación, la infiltración y la aireación. En suelos de textura fina, valores de 1.4 g cm^{-3} en la DA puede restringir el crecimiento de la raíz, pero en suelos de textura gruesa, este efecto se presenta cuando la DA alcanza un valor de 1.6 g cm^{-3} (FAO 1986; León-Arteta 2003). Con respecto a los nutrimentos del suelo; ésta propiedad presentó correlaciones positivas con ppm P-Bray ($r=0.76$) y Ca-suelo ($r=0.33$), y negativas para Na-suelo ($r=-0.18$), K-suelo ($r=-0.30$) y N-suelo ($r=-0.41$) (Anexo B).

Los valores de la DA y la DR permiten calcular el porcentaje de porosidad. El porcentaje de espacio poroso del suelo está íntimamente ligado a la aireación y ésta a su vez es indispensable para

la absorción activa del agua. Por el contrario a la densidad aparente, Potrero fué el sitio con menor porcentaje de espacio poroso (14.3 %) a una altitud de 3353 m snm y Cañada Amalacaxco tuvo un alto porcentaje (47.9 %) a una altitud de 3659 m snm. La DA mostró una correlación negativa con el % de espacio poroso ($r=-0.83$), lo cual hace que exista una relación entre estas dos propiedades (Figura 28). En esta figura se observó que a medida que aumenta la densidad aparente, el % de espacio poroso disminuye. Cabe mencionar, que en algunos horizontes la porosidad fué baja, mientras que los suelos que presentaron valores altos en materia orgánica, el porcentaje de microporos fué mayor (Reyes, 1991).

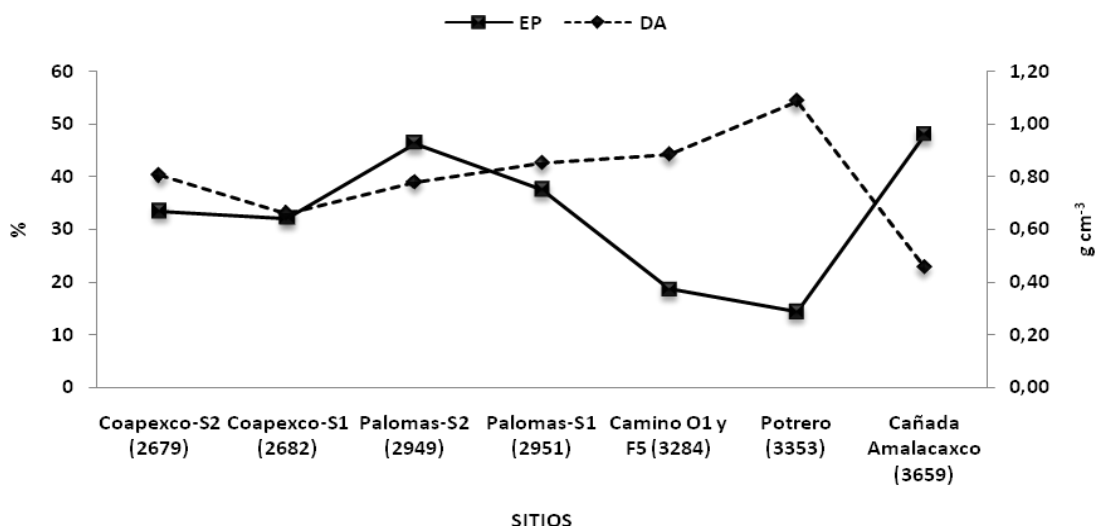


FIGURA 28. Relación entre densidad aparente y % de espacio poroso.

Además de Cañada Amalacaxco y Potrero, también se observó que Palomas-S2 tuvo una alto porcentaje de espacio poroso (46.3 %) y Camino O1 y F5 presentó un porcentaje bajo (18.6 %). El espacio poroso es muy importante para la provisión de agua y oxígeno para el crecimiento de las plantas y la tasa de movimiento del agua en el suelo están relacionados con la cantidad y tamaño de los poros del mismo. Los suelos superficiales de textura fina tienen más espacio poroso y una proporción relativamente grande de ellos se compone de poros pequeños lo que produce un suelo con mayor capacidad para retener el agua (Aguilera, 1989). Con respecto a los nutrientes del suelo el % de espacio poroso presentó una correlación positiva con K-suelo ($r=0.25$) y negativa con ppm P-Bray ($r=-0.73$) (Anexo B).

Por otro lado, se encontró una fuerte relación entre el porcentaje de espacio poroso y el porcentaje de humedad. En la Figura 29, se observó que el comportamiento entre estos dos

parámetros fué similar ya que a medida que aumenta el porcentaje de espacio poroso, el porcentaje de humedad también aumenta. Potrero fue el sitio que presentó un bajo porcentaje de humedad (6.4 %) y Cañada Amalacaxco obtuvo un alto porcentaje de humedad (26.4 %). Cañada Amalacaxco fué el sitio que se encontró a una mayor altitud dentro del rango altitudinal estudiado (3659 m snm), por lo que a esta altitud la temperatura desciende evitando que la humedad retenida se evapore.

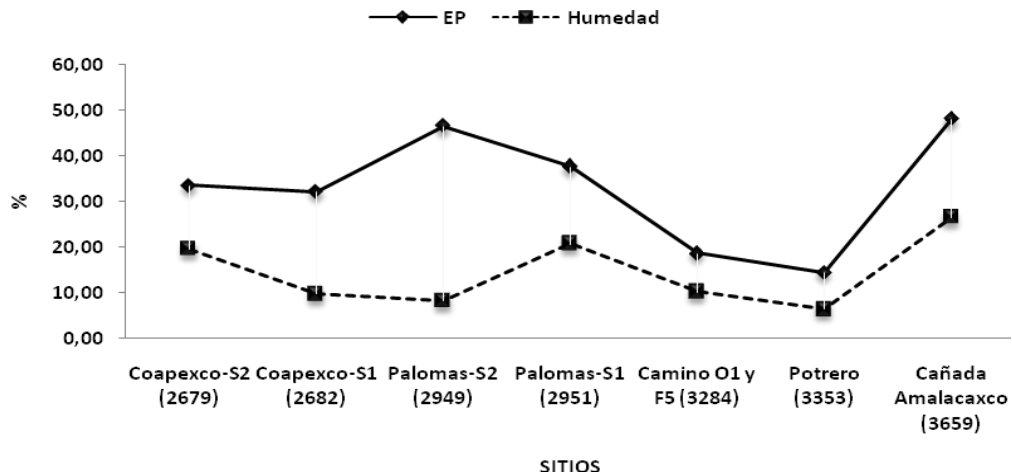


FIGURA 29. Relación entre % de espacio poroso y humedad.

La disponibilidad de agua en el suelo, influye sobre la disponibilidad de fósforo, potasio y nitrógeno en términos de la solubilidad. En suelos secos, la resistencia mecánica y un bajo potencial de agua en el suelo son los principales factores de estrés para el crecimiento de las raíces (Cruz, 2006).

La clase textural encontrada en los sitios de estudio fue franco arenosa. La textura es una importante característica que está relacionada con el tamaño de las partículas minerales de diferente tamaño que componen el suelo, los cuales determinan la humedad, el drenaje, la agregación, la plasticidad, la cohesión, la retención de nutrimentos y la capacidad de intercambio catiónico. Ayuda a determinar la facilidad de abastecimiento de nutrientes, agua y aire (vital para el crecimiento radicular); importantes para la vida de las plantas y otros organismos (Donahue *et al.*, 1981).

La proporción de partículas de diferentes tamaños existentes en un suelo, influyen de forma tal que suelos arenosos y arcillosos contrastan en cantidad y tipo de porosidad. En los primeros, el espacio poroso va de 35 a 50 %, predominando los macroporos, mientras que en los segundos, éste alcanza valores de 40 a 60 %, estando dominado por microporos. Debido a ello, en los suelos



arenosos hay un rápido movimiento de aire y agua en el interior, mientras que en los suelos arcillosos, por la deficiente circulación del aire y agua, la infiltración se ve limitada y genera un ambiente anaeróbico, que afecta el desarrollo de la raíz y el crecimiento de las plantas en general (Ortiz-Villanueva 1975; Scott 2000; Warrick 2002).

El % de arena tuvo una correlación positiva ($r=0.73$) con respecto a la altitud; sin embargo, el % de limo (-0.47) y arcilla (-0.37) presentaron correlaciones negativas; es decir disminuyen con la altitud y el % de arena aumenta.

9.2.2 Propiedades químicas del suelo

La materia orgánica influye marcadamente en la fertilidad del suelo por ser reserva de macroelementos (C, N, P, S) y microelementos; aumenta la estructuración y absorbe e intercambia cationes, por lo que proporciona energía para la biota del suelo (Stevenson, 1986).

El Cuadro 12 muestra los promedios generales de las propiedades químicas del suelo. La NOM-021-RECNAT-2000 establece intervalos de porcentajes de materia orgánica en suelos volcánicos; de acuerdo a esta norma, las localidades Coapexco-S2 y Palomas-S2 se clasifican como muy bajos (<4.0 %). Palomas-S1, Cañada Amalacaxco y Camino O1 y F5 se encuentran en el intervalo de clase baja (4.1-6.0 %), Potrero se ubicó en la clase media (6.1-10.9 %) y por último Coapexco-S1 se clasificó en la clase alta (11.0-16.0 %). El porcentaje de materia orgánica en el suelo (% MOS) depende de distintos factores del medio: clima y vegetación. Del clima depende la cantidad de luz, calor y agua. La vegetación es fundamental en la formación del humus y mantiene una estrecha relación con el clima y dado que las zonas de muestreo son forestales el grado de erosión y perturbación en la vegetación van a influir en la disponibilidad de materia orgánica en el suelo. El contenido de materia orgánica es de suma importancia en suelos forestales gracias a su papel en el almacenamiento y disponibilidad de nutrimentos (fósforo y azufre) como reservorio de carbono y principal fuente de nitrógeno (Buckman, 1991) es fuente de energía de la biomasa microbiana, influye en la retención de humedad, capacidad de intercambio de cationes y da estructura al suelo (Fassbender, 1987).

Palomas-S2 presentó el valor más bajo de materia orgánica (2.9 %), fue un sitio con gran alteración antropogénica, tala, erosión de la cubierta forestal y pastoreo de ganado principalmente. Por otro lado Coapexco-S1, tuvo el mayor porcentaje de materia orgánica (11.6 %); de acuerdo a lo observado en campo, fue un sitio que presentó una buena regeneración, no hubo presencia de tala ni erosión de la cubierta forestal.

La materia orgánica, además de actuar como reguladora del pH, al biodegradarse forma CO_2 que actúa en el intemperismo impartiendo propiedades físicas óptimas para los suelos, como la estructura (granular); modifica la estructura de las capas superficiales; favorece la aireación porque actúa a manera de agentes cementantes aumentando la cantidad de agregados; en esta manera se acrecentan los porcentajes de éstos (Aguilera, 1989).

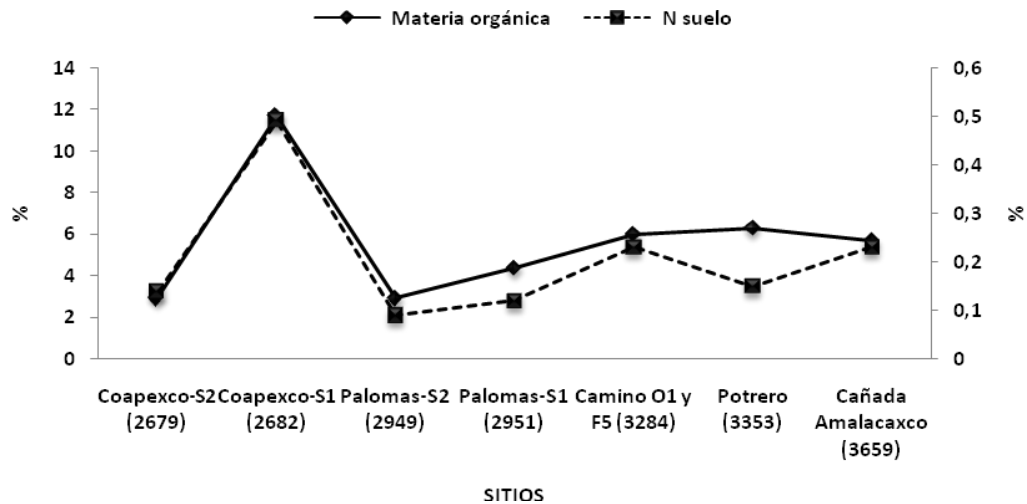


FIGURA 30. Relación entre % de materia orgánica y nitrógeno del suelo (N suelo).

El nitrógeno es un elemento indispensable para la vida de la planta. El % MOS tuvo una correlación positiva con el N-suelo ($r=0.9$), lo cual hace que exista una estrecha relación entre estas dos propiedades; ya que los menores porcentajes de ambos se presentaron en Palomas-S2 y los mayores en Coapexco-S1 (Figura 30).

El valor más bajo de porcentaje de nitrógeno en el suelo fue de 0.09 %, el cual se presentó en Palomas-S2 y el valor más alto (0.49 %) se reportó para Coapexco-S1. El porcentaje de nitrógeno tuvo un comportamiento directamente proporcional al porcentaje de materia orgánica; es decir, a medida que aumenta una de estas propiedades, el otro aumenta y viceversa. Con respecto a los nutrimentos del suelo, el % MOS tuvo una correlación positiva con N-suelo ($r=0.9$), Mg-suelo ($r=0.55$), Na-suelo ($r=0.48$) y ppm P-Bray ($r=0.24$). Las variables que tuvieron una correlación negativa fue Ca-suelo ($r=-0.25$) y K-suelo ($r=-0.35$) (Anexo B).



CUADRO 12. Promedios generales de las propiedades químicas del suelo.

Sitio*	Altitud	MDS	N	C:N	pH 1:2		P-Olsen	P-Bray	SO ₄ ⁻² solubles en			Cationes extraíbles				Suma de cationes extraíbles
					H ₂ O	KCl			H ₂ O	NaHCO ₃ 0.5N pH 8.5	HCl 0.025 N y NH ₄ F 0.003 N	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	
	m snm	%							mg kg ⁻¹			cmol kg ⁻¹				
Coapexco-S2	2679	3	0.14	12	5.65	4.96	14.3	94.7	0.11	0.33	0.16	0.38	14.81	3.38	0.15	18.72
Coapexco-S1	2682	11.6	0.49	14	5.99	5.63	15.9	95.3	0.53	0.17	0.11	0.31	40.47	3.80	0.19	44.78
Palomas-S2	2949	2.9	0.09	19	6.23	5.39	19.2	56.3	0.19	0.20	0.17	0.14	10.92	2.17	0.14	13.36
Palomas-S1	2951	4.4	0.12	21	6.4	5.86	19.2	122.9	0.36	0.38	0.12	0.30	31.44	3.44	0.14	35.31
Camino O1 y F5	3284	6	0.23	15	6.32	5.08	10.6	53.9	0.10	0.36	0.15	0.19	8.28	2.69	0.22	11.38
Potrero Cañada Amalacaxco (bajo <i>Abies</i>)	3353	6.3	0.15	24	6.92	5.3	11.8	155.8	0.09	0.15	0.19	0.17	13.24	2.87	0.23	16.51
	3659	5.7	0.23	14	5.24	4.29	12.7	62.9	0.17	0.46	0.34	0.21	13.93	3.11	0.19	17.43
Mínimo		2.9	0.09	11.94	5.24	4.29	10.6	53.9	0.09	0.15	0.11	0.14	8.28	2.17	0.14	11.38
Máximo		11.6	0.49	24.46	6.92	5.86	19.2	155.8	0.53	0.46	0.34	0.38	40.47	3.80	0.23	44.78
Promedio		5.7	0.21	16.97	6.11	5.22	14.8	91.7	0.22	0.29	0.18	0.24	19.01	3.06	0.18	22.50

*Sitios ordenados de menor a mayor altitud.



El pH real o activo mide la concentración de iones hidrógenos solubles en una suspensión de suelo y agua destilada. De acuerdo con la clasificación reportada para tipos de acidez y mecanismos propuestos de amortiguamiento de pH en varios suelos (Cruz, 2006), el valor obtenido para el sitio Cañada Amalacaxco se clasificó como fuertemente ácido (5.24), ya que se encontró entre el rango de 5.1-5.5, fue el sitio con mayor acidez; Coapexco-S1 y S2 fueron moderadamente ácidos, los cuales se ubicaron en el intervalo de 5.6-6.0. Los sitios restantes se clasificaron como débilmente ácidos o neutros, los cuales se encontraron en el intervalo de 6.1-7.3. El sitio con menor acidez fue Potrero. Con respecto a los nutrimentos del suelo, el pH H₂O mostró una correlación positiva con ppm P-Bray ($r=0.73$) y Ca-suelo ($r=0.26$), y negativo para Na-suelo ($r=-0.17$), N-suelo ($r=-0.32$) y K-suelo ($r=-0.45$) (Anexo B).

El pH del suelo afecta significativamente la disponibilidad de nutrimentos para las plantas y para los microorganismos (Cruz, 2006). El grado de acidez va a depender del tipo y composición de los suelos. En la zona del parque, el tipo de suelo dominante es Andisol. Los Andisoles son suelos con presencia significativa de materiales amorfos, derivados de ceniza volcánica y ricos en materia orgánica (Reyes, 1996).

Cada árbol forestal influye en la acidez del suelo. Las coníferas como los pinos, pinabetes, abetos y abeto Douglas, tienen la tendencia general de intensificar aún más la acidez de la capa superior del suelo en una proporción mayor que los árboles de madera dura o los cedros (Spurr, y Barnes, 1982).

El pH potencial o intercambiable mide el pH de una suspensión compuesta por suelo y una solución salina como el KCl, con la cual se extraen los iones hidrógeno que se encuentran absorbidos en los sitios de intercambio de los coloides del suelo. Por esta razón los valores de pH obtenidos con esta solución salina son más ácidos que los obtenidos con la solución acuosa, debido a que la acidez potencial considera tanto los iones hidrógenos solubles como los intercambiables.

Coapexco-S1 presentó un mayor contenido de nitrógeno (0.49 %), dado que es el sitio que presenta un mayor contenido de materia orgánica (11.7 %) y un pH moderadamente ácido (6.0). Por el contrario, Palomas-S2 presentó el valor más bajo de nitrógeno (0.09 %), puesto que presentó el menor porcentaje de materia orgánica (2.9 %) y un pH débilmente ácido o neutro (6.2). Con respecto a lo anterior cabe mencionar que en suelos ácidos se presentan bajas tasas de mineralización de materia orgánica, por lo que en ellos se manifiestan problemas de abastecimiento de nitrógeno (Cruz, 2006).



Los elementos principales que componen la materia orgánica son el carbono, que está en mayor cantidad y el nitrógeno, además del oxígeno y el hidrógeno. La relación C/N aporta un dato importante de esa materia orgánica pues los microorganismos para desplegar su actividad necesitan primariamente el nitrógeno (Rodríguez, 1992). Coapexco-S2 (12), Coapexco-S1 (14) y Cañada Amalacaxco (14) fueron los sitios que tuvieron una relación C/N inferior a 15 donde comienza la liberación de nitrógeno soluble al suelo y la descomposición continúa hasta un nivel estable donde la C/N es aproximadamente 10, que es la correspondiente a la descomposición del humus; esto quiere decir que hay una mayor mineralización del nitrógeno con respecto al carbono. Por otra parte, los sitios restantes Palomas-S1 (21), Palomas-S2 (19), Camino O1 y F5 (15) y Potrero con la relación más alta de C/N (24) estuvieron entre una relación de 15 a 30. Cuando la relación C/N cae dentro de estos valores nos dice que es la cantidad necesaria de nitrógeno para la actividad microbiana no utilizando el nitrógeno existente en el suelo, pero simultáneamente tampoco hay una liberación de nitrógeno soluble para la absorción inmediata de la planta que sólo lo extrae del nivel que hay en el suelo. En estos sitios la mineralización de la hojarasca es lenta.

En el suelo hay un determinado nivel de nitrógeno utilizable, tanto por las plantas (que lo absorben principalmente en su estado de nitrato, NO_3^-) como por los microorganismos. Al incorporar nuevos compuestos orgánicos al suelo, los microorganismos actúan sobre ellos utilizando una cierta cantidad de nitrógeno. Si los valores tienen una relación C/N superior a 30 significa que hay mucho carbono y poco nitrógeno para las actividades de los microorganismos, debiendo estos tomar el nitrógeno del suelo para comenzar su actividad. En este lapso baja la cantidad de nitrógeno soluble en el suelo, pues está siendo utilizado por los microorganismos: es lo que se llama inmovilización del nitrógeno (Rodríguez, 1992). En los sitios de estudio, todos los valores fueron menores a 30.

Es evidente que en suelos con pH ácidos como los que presentaron las localidades, sea mayor la extracción de fósforo disponible por el método de Bray con valores de 53,9 a 155.9 mg kg^{-1} , que por el método de Olsen (10,6 a 19.2 mg kg^{-1}) (Figura 31). Visto que en suelos ácidos, los fosfatos reaccionan con hierro y aluminio solubles o con sus formas sólidas para formar nuevos fosfatos aún menos solubles. Todos los sitios son de pH ácido debido a su composición mineralógica.

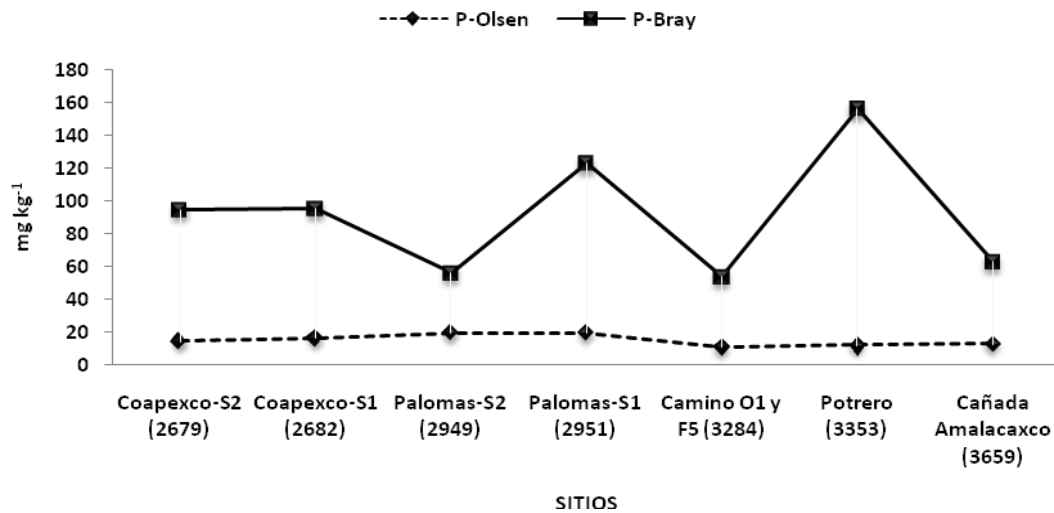


FIGURA 31. Fósforo del suelo extraíble por el método de Bray y Olsen.

Con respecto a los sulfatos (SO_4^{2-}) del suelo extraídos con las tres soluciones, se observó que con la solución **NaHCO₃ 0.5N pH 8.5** se obtuvo una mayor cantidad, siendo Cañada Amalacaxco el sitio con el valor más alto (0.46 mg kg^{-1}) y Potrero con la menor cantidad (0.15 mg kg^{-1}). En promedio, los sulfatos extraídos con esta solución fue de (0.29 mg kg^{-1}). La segunda solución que obtuvo una mayor cantidad de sulfatos solubles, fue el agua con un promedio de 0.22 mg kg^{-1} . Por último, con la solución de **HCl 0.025 N y NH₄F 0.003 N** se obtuvo la menor cantidad de éstos con un promedio de 0.18 mg kg^{-1}) (Figura 32).

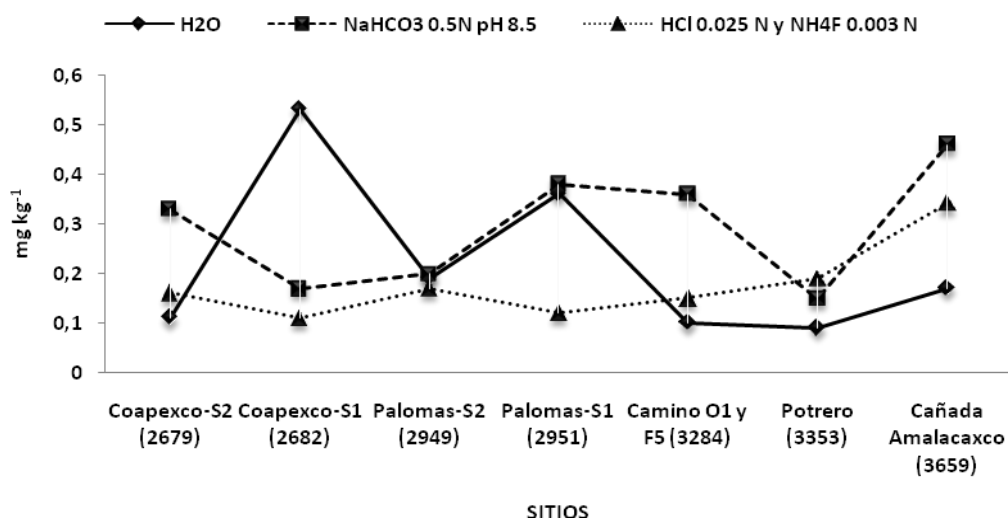


FIGURA 32. Sulfatos (SO_4^{2-}) del suelo extraíbles con NaHCO₃ 0.5N pH 8.5, HCl 0.025 N y NH₄F 0.003 N y H₂O.



La fertilidad del suelo está influenciada por la Capacidad de Intercambio de Cationes (CIC), esta propiedad contempla el porcentaje de los sitios de intercambio llenados con bases, el cual es llamado porcentaje de saturación de bases, el cual incluye Ca, Mg, K y Na. Excepto Na, las demás bases son nutrimentos esenciales para las plantas (Cruz, 2006). Ca presentó valores que van de 8.28 a 40 cmol kg^{-1} , Mg de 2.17 a 3.80 cmol kg^{-1} , K de 0.14 a 0.38 cmol kg^{-1} y Na de 0.14 a 0.23 cmol kg^{-1} . Los valores de Ca, K y Mg concuerdan con los valores obtenidos por García (2003); excepto Na, en el cual se obtuvieron valores bajos comparados con el de dicho autor.

Dichos elementos se hallan en los suelos forestales en cantidades suficientes para el desarrollo de los árboles. Los suelos forestales poseen un grado bajo de saturación de bases, pero esto depende considerablemente del clima y de los materiales a partir de los cuales se formaron los suelos, así como de la vegetación que sostienen (Pritchett, 1991).

9.2.3 Propiedades bioquímicas del suelo

La actividad bioquímica total del suelo está constituida por una serie de reacciones catalizadas por enzimas. Muchas de las transformaciones biológicas que tienen lugar en el suelo, son catalizadas por ellas producidas por los microorganismos presentes en él. En efecto, una parte de la actividad fisiológica desarrollada por estos, viene representada por su capacidad de producir enzimas y liberarlos en el ambiente (Giménez, 1984).

Las propiedades biológicas del suelo relacionadas con la materia orgánica y los procesos asociados a su descomposición regulan y determinan tanto la fertilidad del suelo forestal (y por tanto la productividad del ecosistema) como la calidad del suelo y la diversidad biológica (Nannipieri *et al.*, 1990; Gregorich *et al.*, 1997; Périé y Munson, 2000).

9.2.3.1 Actividad de la ureasa en el suelo

La actividad de la enzima ureasa en el suelo se midió a dos profundidades de 0-5 y de 6-10 cm. Se observó que en la mayoría de los sitios a una profundidad de 0-5 cm la actividad enzimática fue ligeramente mayor comparada con la actividad enzimática de 6-10 cm de profundidad, excepto en los sitios de Potrero y Cañada Amalacaxco que presentaron menor actividad con respecto a la profundidad de 6-10 cm (Figura 33).

En la Figura 33 se observó que a las dos profundidades, Palomas-S2 fue el sitio donde se presentó una menor actividad enzimática de la ureasa de 0-5 cm ($0,00057 \text{ meq NH}_4 \text{ g}^{-1} \text{ h}^{-1}$) y de 6-

10cm ($0,00016 \text{ meq NH}_4 \text{ g}^{-1} \text{ h}^{-1}$). La baja actividad enzimática se relaciona con el bajo porcentaje de materia orgánica que presentó este sitio (2.92 %) y a su alta relación C/N (19), lo que trae como consecuencia una lenta mineralización de la materia orgánica, por lo que no hay liberación de nitrógeno soluble para la absorción de las plantas. Esto explica el bajo porcentaje de nitrógeno (0.09 %) presente en el sitio.

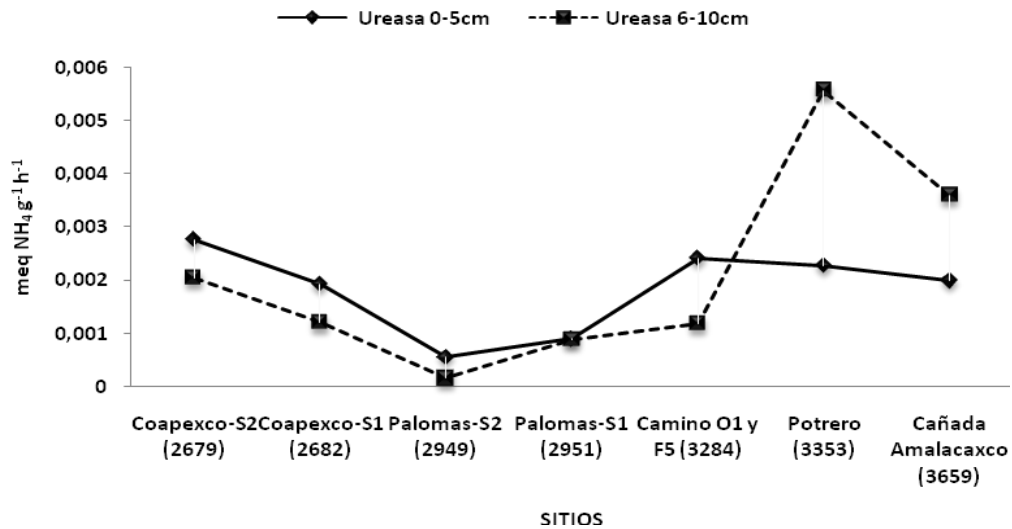


FIGURA 33. Comportamiento de la actividad ureasa a dos profundidades de 0-5 y de 6-10cm.

La materia orgánica constituye el reservorio temporal como secuestrador de C, es fuente primaria de nutrimentos en el suelo para la nutrición vegetal, y presenta una fuerte influencia en la persistencia y degradación de plaguicidas y de residuos orgánicos (Fenton *et al.*, 1999). Además su importancia radica no solo en ser constituyente sino también contribuyente de los complejos humus-enzimas (Masciandaro y Ceccanti, 1999), que son cruciales para las reacciones minerales y orgánicas.

Con respecto a la altitud se obtuvieron correlaciones significativas ($p \leq 0.05$) con la actividad enzimática de la ureasa de 0-5 cm ($r=0.54$) y de 6-10 cm ($r=0.29$). Estas correlaciones fueron positivas, lo cual indicó que la actividad enzimática es mayor conforme aumenta la altitud. Esto concuerda con lo reportado por Suastegui (2009).

El porcentaje de materia orgánica y porcentaje de nitrógeno en el suelo también presentaron correlaciones significativas ($p \leq 0.05$) con la actividad de la ureasa a las dos profundidades (Anexo B), las cuales fueron positivas (Figura 34), en donde se observó en la mayoría de los sitios que a mayor contenido de materia orgánica van a presentarse altas actividades enzimáticas, siempre que exista

una relación de C/N baja. En el caso del nitrógeno en el suelo, este va aumentando a medida que aumenten las actividades enzimáticas en el suelo (Figura 35).

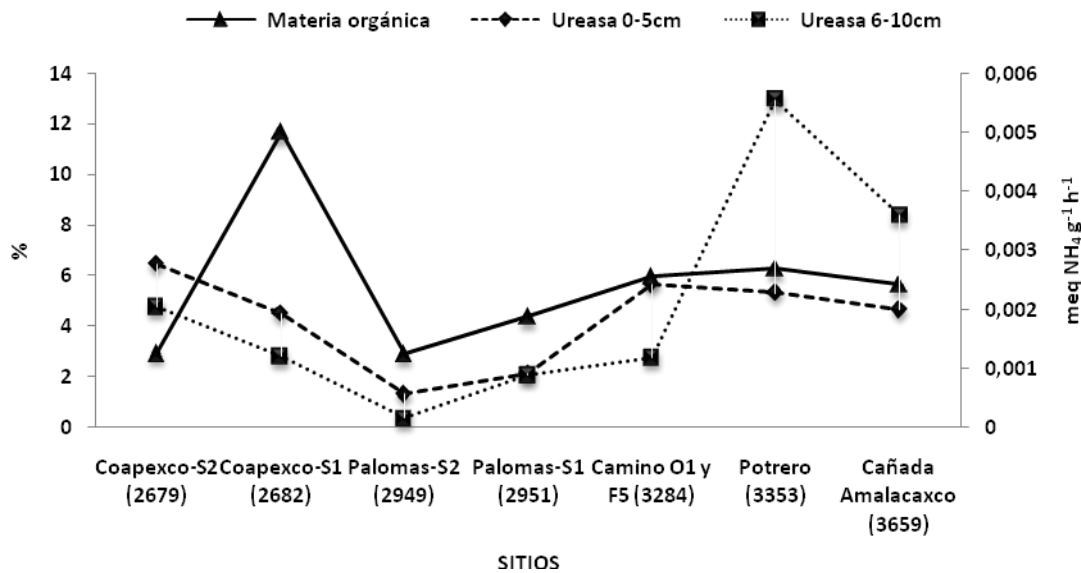


FIGURA 34. Comportamiento de la materia orgánica con la actividad ureasa a dos profundidades de 0-5 y de 6-10 cm.

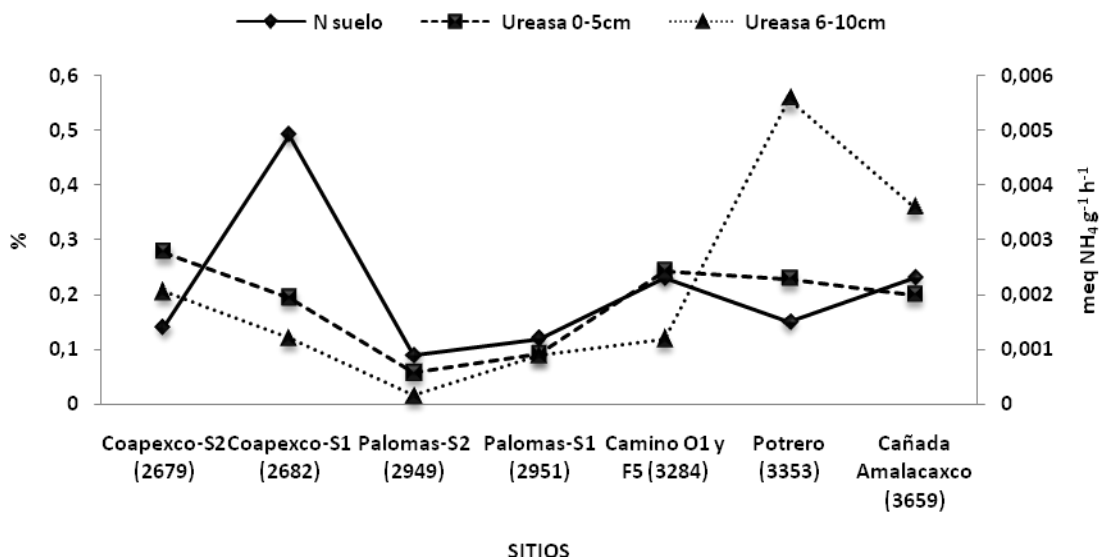


FIGURA 35. Comportamiento del nitrógeno del suelo con la actividad ureasa a dos profundidades de 0-5 y de 6-10 cm.



CUADRO 13. Promedios generales de las propiedades bioquímicas del suelo.

Sitio*	Altitud	Ureasa		Arilsulfatasa		Fosfatasa			
		0-5 cm	6-10 cm	0-5 cm	6-10 cm	ácida 0-5 cm	ácida 6-10 cm	alcalina 0-5 cm	alcalina 6-10 cm
	m snm	meq NH ₄ g ⁻¹ h ⁻¹				µg p-NP g ⁻¹ h ⁻¹			
Coapexco-S2	2679	0,00276	0,00205	0,00012	0,00009	0,00057	0,00060	0,00160	0,00158
Coapexco-S1	2682	0,00193	0,00120	0,00885	0,00722	0,00059	0,00050	0,00098	0,00095
Palomas-S2	2949	0,00057	0,00016	0,00312	0,00203	0,00069	0,00072	0,00167	0,00158
Palomas-S1	2951	0,00091	0,00089	0,00444	0,00296	0,00058	0,00056	0,00165	0,00165
Camino O1 y F5	3284	0,00242	0,00119	0,00092	0,00143	0,00174	0,00104	0,00102	0,00080
Potrero Cañada Amalacaxco (bajo Abies)	3353 3659	0,00228 0,00199	0,00555 0,00359	0,00199 0,00364	0,00179 0,00280	0,00094 0,00066	0,00130 0,00047	0,00153 0,00089	0,00064 0,00089
Mínimo		0,00057	0,00016	0,00012	0,00009	0,00057	0,00047	0,00089	0,00064
Máximo		0,00276	0,00555	0,00885	0,00722	0,00174	0,00130	0,00167	0,00165
Promedio		0,00184	0,00209	0,0033	0,00262	0,00082	0,00074	0,00134	0,00116

*Sitios ordenados de menor a mayor altitud.

9.2.3.2 Actividad de la arilsulfatasa en el suelo

La actividad de la enzima arilsulfatasa en el suelo también se midió a dos profundidades de 0-5 y de 6-10 cm. Se observó que tuvo un comportamiento similar al de la enzima ureasa, ya que su actividad enzimática fue mayor a una profundidad de 0-5 cm con un promedio de ($0.00330 \mu\text{g p-NP g}^{-1} \text{h}^{-1}$) comparado con el promedio obtenido a una profundidad de 6-10 cm ($0.00262 \mu\text{g p-NP g}^{-1} \text{h}^{-1}$) (Figura 36). Este comportamiento de la actividad Arilsulfatasa fue similar a lo reportado por Baltazar (2009) lo cual se atribuye a que en el suelo superficial hay mayor contenido de materia orgánica que está constituida entre otros compuestos de proteínas que tienen, no sólo C, H y O sino además N, S, Fe y P que están en constante degradación microbiana como enzimática.

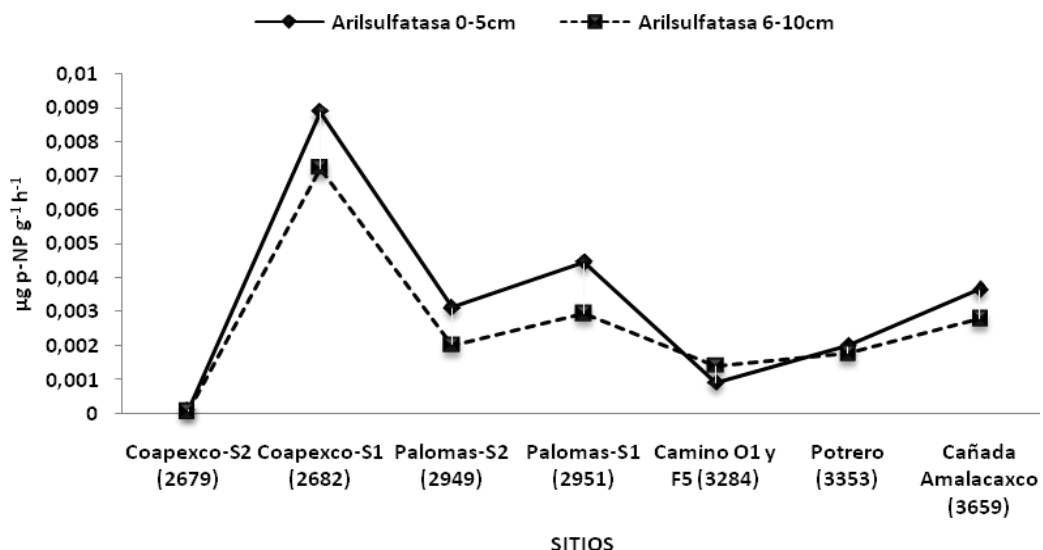


FIGURA 36. Comportamiento de la actividad arilsulfatasa a dos profundidades de 0-5 y de 6-10cm.

Coapexco-S1 fue el sitio con mayor actividad enzimática en las dos profundidades de 0-5 cm ($0.00885 \mu\text{g p-NP g}^{-1} \text{h}^{-1}$) y de 6-10 cm ($0.00722 \mu\text{g p-NP g}^{-1} \text{h}^{-1}$). Este sitio tuvo los valores más altos de materia orgánica (11.65 %) y porcentaje de nitrógeno del suelo (0.49 %) con una relación de C/N de 14. Esto indica que la mineralización de la materia orgánica es rápida por lo que hay liberación de azufre soluble y otros nutrientes como el nitrógeno para la absorción inmediata de la planta, por lo que hubo un porcentaje alto de nitrógeno.

Por otra parte, Coapexco-S2 fue el sitio con menor actividad enzimática en las dos profundidades, esto se puede observar en el Cuadro 12. Cabe mencionar que fue el segundo sitio con

menor porcentaje de materia orgánica (3.0 %), con un valor de nitrógeno en el suelo de 0.14 % y una relación de C/N de 12.

En este sitio se tuvo una adecuada relación de C/N, pero el sitio presentó un valor bajo en materia orgánica comparado a los demás sitios; esto explica una baja liberación de nutrientes. Además una baja cantidad de materia orgánica en el suelo implica una pérdida del sustrato natural de esta enzima que son los sulfatos ligados a dicha materia orgánica (Baltazar, 2009).

Estos resultados obtenidos nos indican que elevados contenidos de materia orgánica y baja relación C/N han sido asociados con altas actividades enzimáticas y viceversa. Con relación a la altitud se obtuvo una correlación ($p \leq 0.05$) positiva con la enzima arilsulfatasa de 0-5 cm ($r=0.67$) y una correlación negativa para la enzima a una profundidad de 6-10 cm ($r=-0.32$). Por otra parte, la materia orgánica presentó correlaciones positivas con la actividad de la enzima arilsulfatasa de 0-5 cm ($r=0.52$) y de 6-10 cm ($r=0.38$) (Figura 37). Esto indicó que a mayor contenido de materia orgánica en el suelo, mayor va a ser la actividad enzimática.

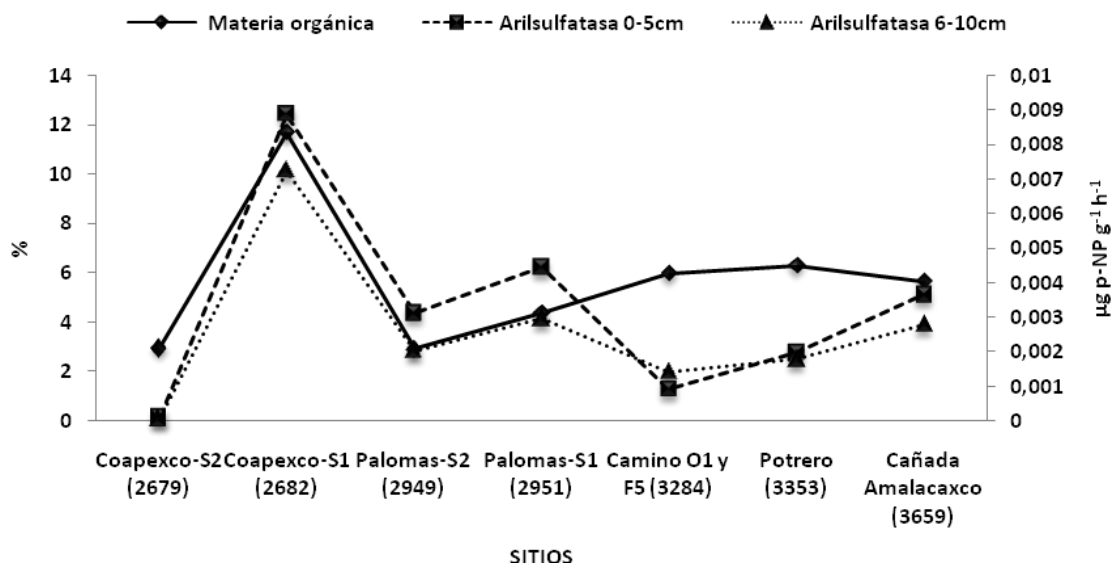


FIGURA 37. Comportamiento de la materia orgánica con la actividad arilsulfatasa a dos profundidades de 0-5 y de 6-10 cm.

En la Figura 36 también se observó que a mayor altitud, la actividad enzimática disminuye y el porcentaje de materia orgánica aumenta, lo cual se atribuye a las bajas temperaturas, lo que afecta a la actividad enzimática y al proceso de mineralización de la materia orgánica, pues la actividad microbiana disminuye.

9.2.3.1 Actividad de la fosfatasa ácida y alcalina en el suelo

La actividad enzimática de la fosfatasa ácida y alcalina en el suelo se midió a dos profundidades de 0-5 y de 6-10 cm. En la Figura 38, se observó que hubo mayor actividad por parte de la fosfatasa alcalina en comparación con la fosfatasa ácida, la cual tuvo promedios generales de 0-5 cm ($0,00134 \mu\text{g p-NP g}^{-1} \text{h}^{-1}$) y de 6-10 cm ($0,00116 \mu\text{g p-NP g}^{-1} \text{h}^{-1}$), siendo aún mayor en los primeros 5 cm de profundidad.

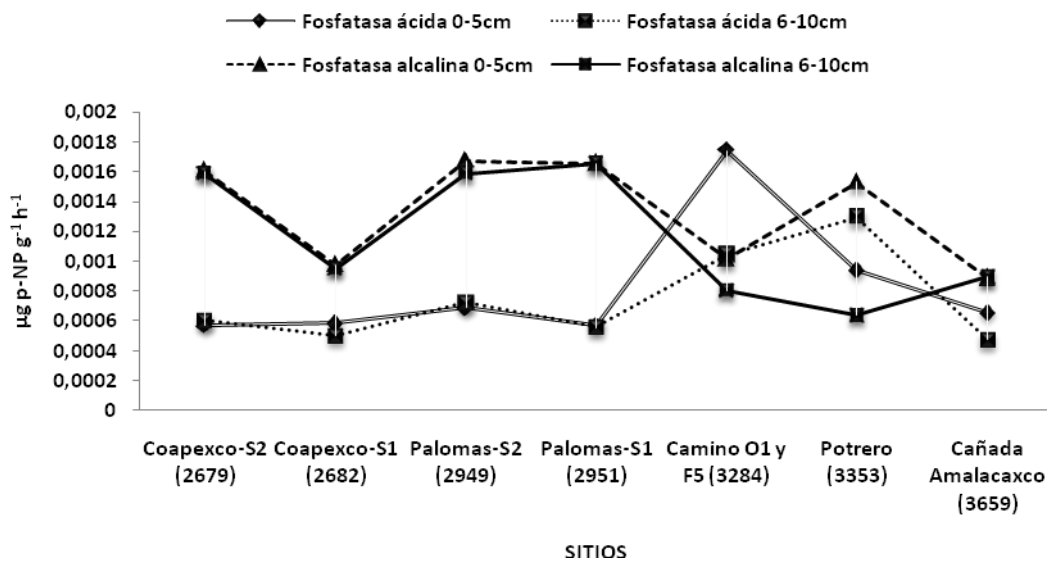


FIGURA 38. Comportamiento de la actividad de la fosfatasa ácida y alcalina a dos profundidades de 0-5 y de 6-10 cm.

También se observó que el comportamiento en ambas profundidades para la fosfatasa ácida fue similar. En el promedio general de todos los sitios se obtuvo un valor mayor ($0,00082 \mu\text{g p-NP g}^{-1} \text{h}^{-1}$) en los primeros 5cm de profundidad comparado con el de 6-10cm con un valor de ($0,00074 \mu\text{g p-NP g}^{-1} \text{h}^{-1}$).

A una profundidad de 0-5 cm, Coapexco-S2, al igual que en la actividad de la enzima arilsulfatasa fue el sitio con menor actividad enzimática ($0,00057 \mu\text{g p-NP g}^{-1} \text{h}^{-1}$). A la misma profundidad, en Camino O1 y F5 se observó una mayor actividad enzimática ($0,00174 \mu\text{g p-NP g}^{-1} \text{h}^{-1}$); dado que fue el sitio con las menores cantidades de fósforo disponible, tanto por el método de Olsen (10.63 mg kg^{-1}) como por el método de Bray (53.94 mg kg^{-1}).

Como se mostró en la Figura 39, en la mayoría de los sitios que presentaron una mayor cantidad de fósforo disponible, se presentó una menor actividad enzimática; lo cual es similar a los resultados obtenidos por Astudillo (2006).

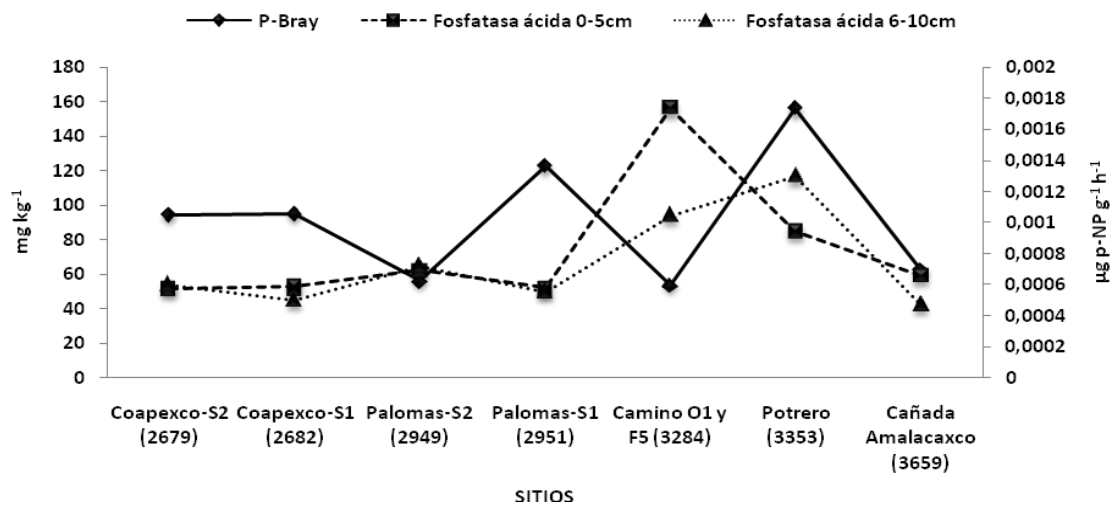


FIGURA 39. Comportamiento de la fosfatasa ácida con el fósforo disponible (P-Bray) a dos profundidades de 0-5 y de 6-10 cm.

Con respecto a la altitud, la fosfatasa ácida de 0-5 cm presentó una correlación ($p \leq 0.05$) negativa ($r = -0.55$) y la fosfatasa ácida de 6-10 cm una correlación positiva ($r = 0.42$). La fosfatasa ácida de 0-5 cm también presentó una correlación positiva ($r = 0.46$) con el porcentaje de materia orgánica.

Sin embargo, para el caso de la fosfatasa alcalina en la mayoría de los sitios, se logró observar claramente en la Figura 40 que a una profundidad de 0-5 cm, la actividad de dicha enzima fue mayor comparada con la de 6-10 cm.

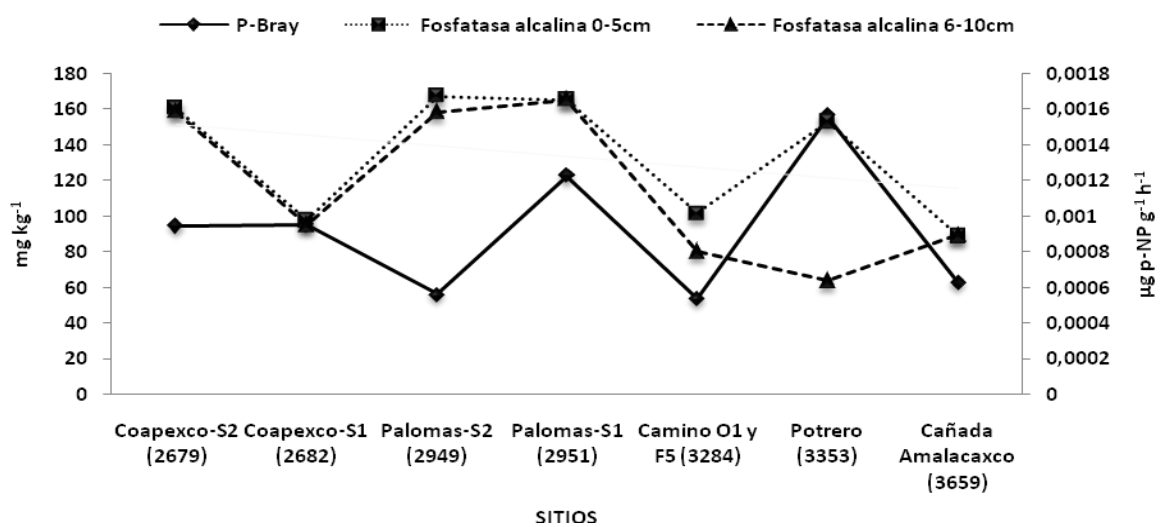


FIGURA 40. Comportamiento de la Fosfatasa alcalina con el Fósforo disponible (P-Bray) a dos profundidades de 0-5 y de 6-10 cm.

En la figura anterior, también se observó que ante una deficiencia de fósforo disponible la actividad de la fosfatasa alcalina es mayor. La fosfatasa alcalina de 0-5 cm presentó una correlación

significativa positiva ($r=0.41$) y la fosfatasa alcalina de 6-10 cm presentó una correlación negativa ($r=-0.36$) con la altitud. Con respecto a la materia orgánica, la fosfatasa alcalina de 6-10 cm presentó una correlación de $r=-0.63$.

En diversas condiciones climáticas y edáficas el fósforo puede limitar el crecimiento y desarrollo de las plantas (suelos de zonas lluviosas o de clima templado pero de origen ácido como Acrisol, Kastañozem, Nitosol y Andosol); bajo estas características, la actividad fosfatásica de la raíz, los exudados, radicales principalmente de ácidos orgánicos y las micorrizas arbusculares juegan un papel determinante para la adquisición de este nutriente esencial (Cruz, 2003). Estudios sobre la actividad enzimática en el suelo han demostrado que la actividad de las enzimas depende de la temperatura, pH, humedad, contenido de materia orgánica calidad de la misma (Dick and Tabatabai, 1993).

9.3 Relación entre nutrientes del suelo y muestras foliares

Con el análisis de correlación simple de Pearson se logró identificar la relación entre nutrientes presentes en el suelo con sus correspondientes en tejido foliar; es decir, las variables que presentaron correlaciones significativas ($p \leq 0.05$). El nitrógeno del suelo tuvo correlaciones positivas con el N-foliar ($r=0.37$), P-foliar ($r=0.31$) y K-foliar ($r=0.22$) (Anexo B); lo cual indica que cuando el nitrógeno del suelo aumenta, también lo hace el porcentaje de nitrógeno, fósforo y potasio foliar (Figura 41). También presentó correlaciones positivas con Mg-suelo ($r=0.52$) y Na-suelo ($r=0.49$) y negativas para K-suelo ($r=-0.16$) y Ca-suelo ($r=-0.35$).

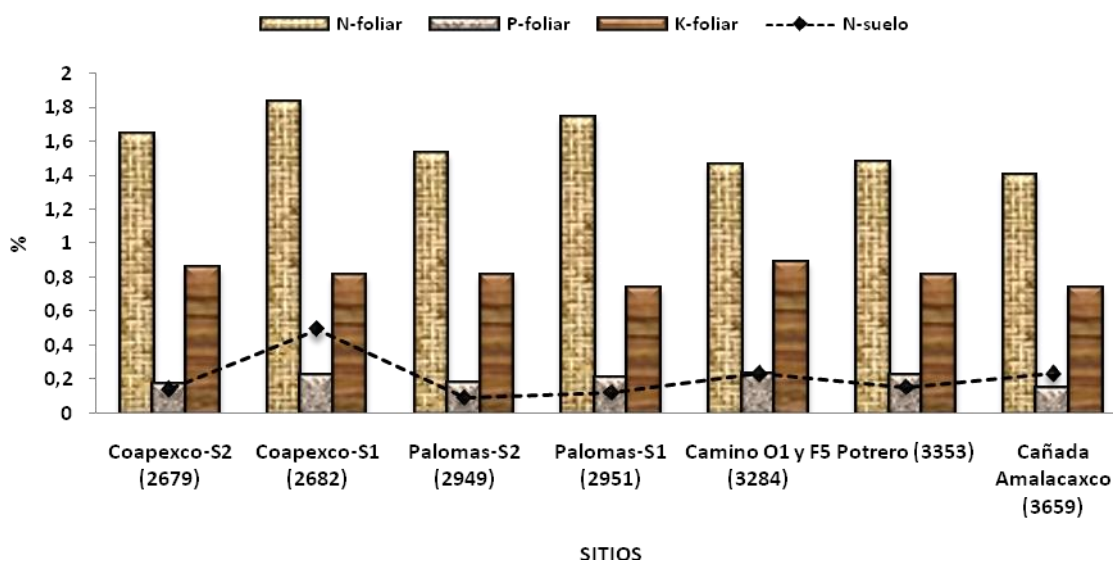


FIGURA 41. Relación entre N del suelo y nutrientes foliares.

El fósforo del suelo por el método de Bray (ppm P-Bray) tuvo correlación positiva con el P-foliar ($r=0.22$) y negativa con K-foliar ($r=-0.19$). Al igual que el nitrógeno foliar, el porcentaje de fósforo foliar también aumenta cuando se incrementa la disponibilidad de fósforo en el suelo y el potasio foliar disminuye (Figura 42). Con respecto al suelo, las variables que tuvieron correlaciones positivas fueron Ca-suelo ($r=0.39$), Na-suelo ($r=0.30$) y Mg-suelo ($r=0.21$), y negativa con K-suelo ($r=-0.32$) (Anexo B).

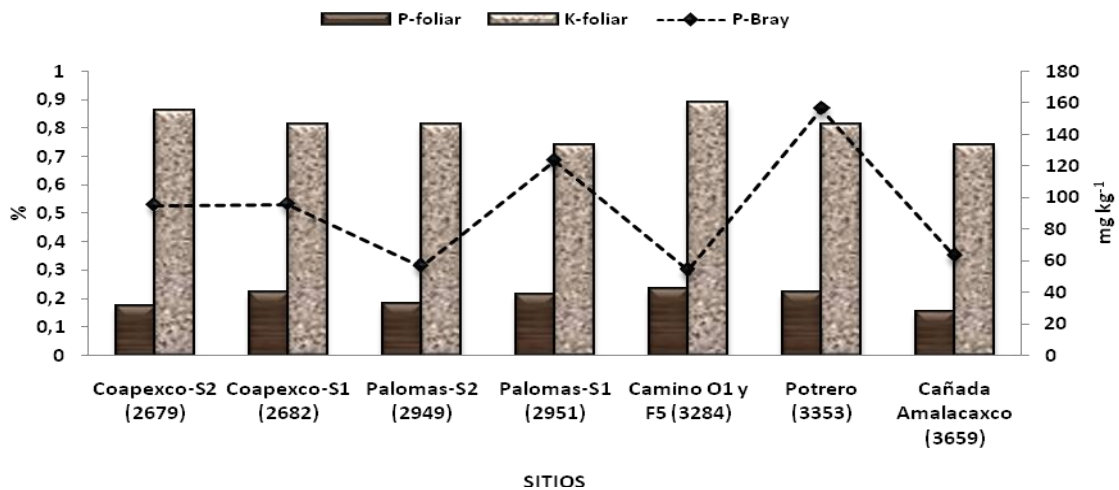


FIGURA 42. Relación entre P-Bray del suelo y nutrientes foliares.

El potasio del suelo disminuye cuando el fósforo y nitrógeno foliar aumentan; lo cual se reflejó en las correlaciones negativas que presentó con P-foliar ($r=-0.22$) y N-foliar ($r=-0.35$) (Figura 43). También presentó correlaciones negativas con algunos nutrientes del suelo, como son Na-suelo ($r=-0.17$), Ca-suelo (-0.61) y Mg-suelo (-0.67) (Anexo B).

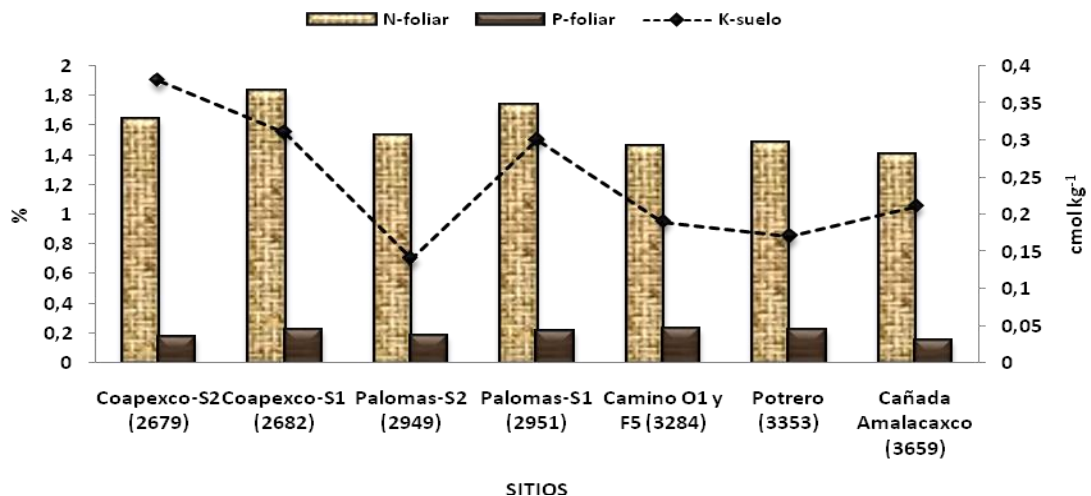


FIGURA 43. Relación entre K del suelo y nutrientes foliares.

El calcio del suelo sólo presentó correlación positiva con N-foliar ($r=0.19$); es decir que a medida que aumentan los niveles de calcio en el suelo, también lo hace el porcentaje de nitrógeno foliar (Figura 44). Por otra parte, presentó correlaciones positivas con Mg-suelo ($r=0.36$) y Na-suelo ($r=0.24$) (Anexo B).

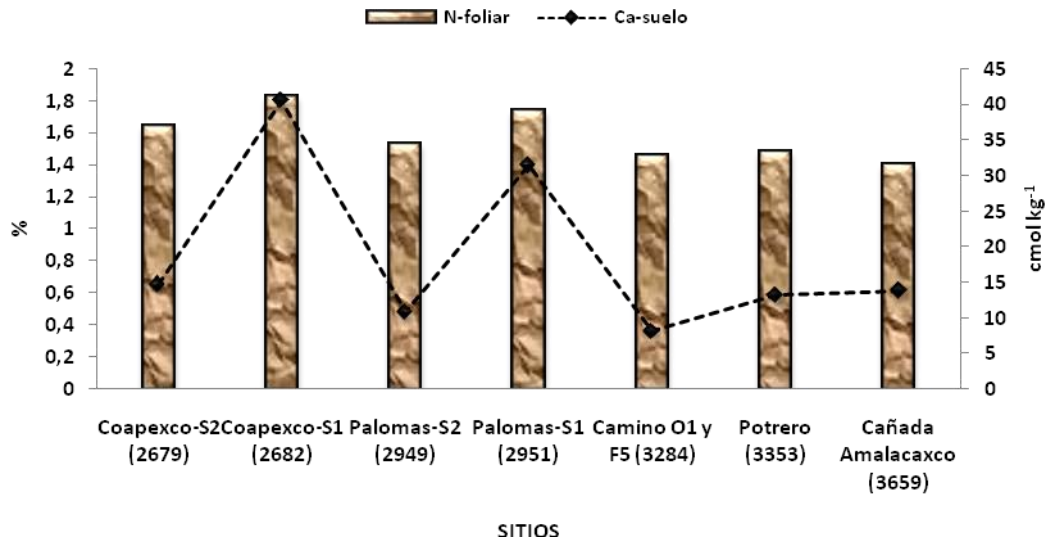


FIGURA 44. Relación entre Ca del suelo y nutrimentos foliares.

El magnesio del suelo mostró un comportamiento directamente proporcional con N-foliar ($r=0.64$), P-foliar ($r=0.24$) y Ca-foliar ($r=0.21$); es decir, conforme aumentan los niveles de magnesio en el suelo, también lo hace el nitrógeno, fósforo y calcio foliar (Figura 45). Lo mismo ocurre con Na-suelo, ya que presentó una correlación positiva ($r=0.55$) (Anexo B).

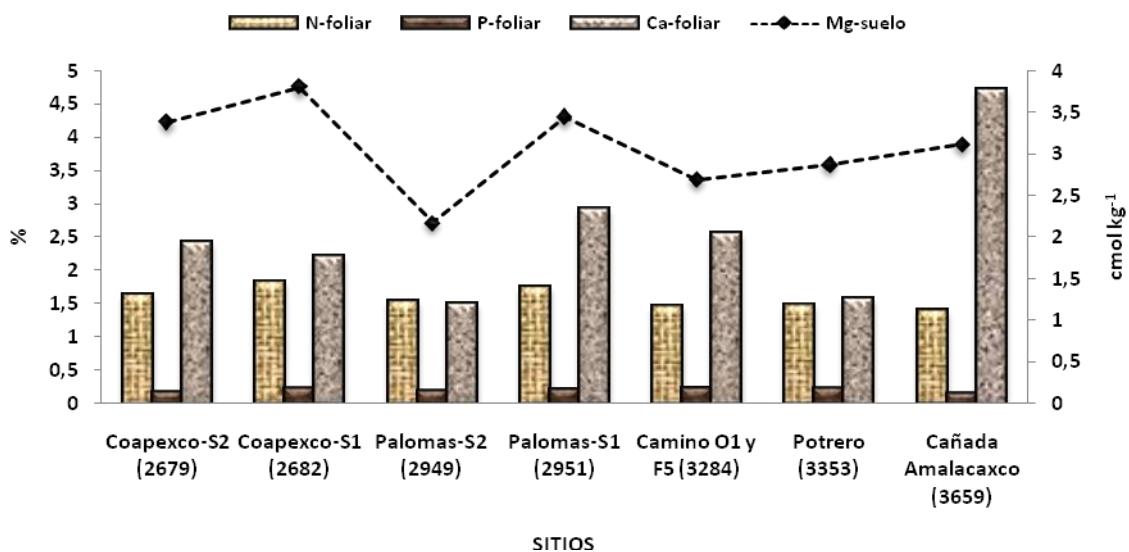


FIGURA 45. Relación entre Mg del suelo y nutrimentos foliares.

Por último, el sodio del suelo tuvo correlaciones positivas con N-foliar ($r=0.42$), Ca-foliar (0.30) y P-foliar ($r=0.18$). Como se observó en la Figura 46, al aumentar los niveles de sodio en el suelo, también lo hace el nitrógeno, fósforo y calcio foliar.

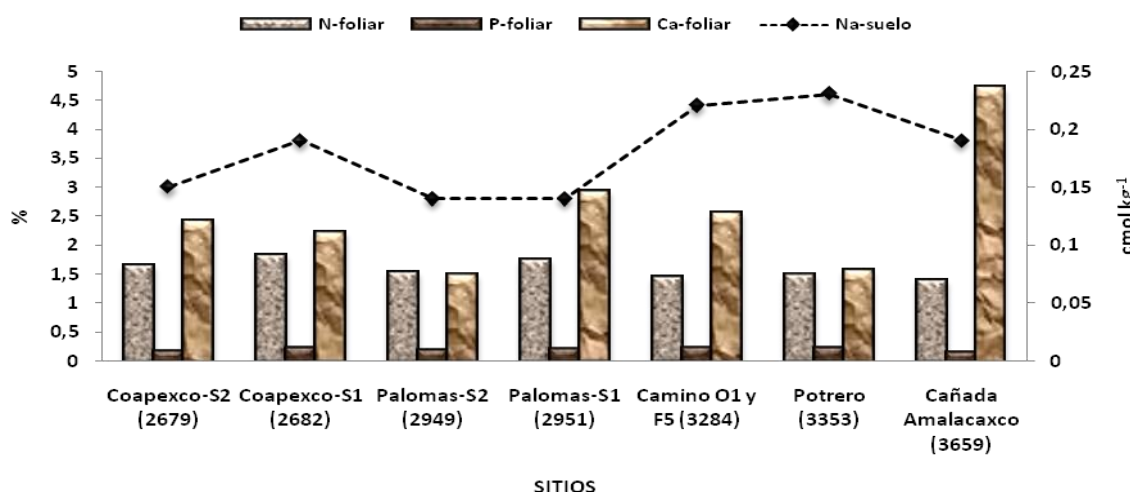


FIGURA 46. Relación entre Na del suelo y nutrimentos foliares.

9.4 Análisis de Componentes Principales (ACP)

Utilizando el modelo descrito, con los resultados del Análisis de Componentes Principales (ACP), se encontró que de 37 propiedades descritas tanto en muestras de suelo como muestras foliares (variables originales), se obtuvieron 8 Componentes Principales, los cuales se definen como variables robustas (VR) que explican el 95 % de la varianza entre sitios (Cuadro 12).

CUADRO 12. Variables robustas de los Componentes Principales.

Componente Principal	Variable que lo define	Coefficientes en los componentes principales	Intervalo para el desarrollo de <i>Abies religiosa</i>
1	Fosfatasa alcalina 0-5 cm	0,37	0,00089 - 0,00167 $\mu\text{g p-NPP g}^{-1} \text{h}^{-1}$
2	% MDS	0,58	2,92 - 11,65 %
3	Fosfatasa alcalina 6-10 cm	0,71	0,00064 - 0,00165 $\mu\text{g p-NPP g}^{-1} \text{h}^{-1}$
4	% Arena	0,78	57,68 - 71,68 %
5	Ca ²⁺ suelo	0,85	8,28 - 4,47 cmol kg^{-1}
6	Promedio K-foliar	0,90	0,74 - 0,89 %
7	Edad	0,93	Brinzal, Juvenil y Maduro
8	Fosfatasa ácida 6-10 cm	0,96	0,00047 - 0,00130 $\mu\text{g p-NPP g}^{-1} \text{h}^{-1}$



El 95% de la varianza acumulada está dada por 8 componentes principales. También se presentan valores mínimos y máximos de cada componente principal los cuales nos proporcionan un intervalo para conocer las condiciones sobre el cual se desarrolla la especie *Abies religiosa*. En otro estudio realizado por Astudillo (2006), reportó que la fosfatasa alcalina al igual que en este estudio fue el componente principal que tuvo más peso sobre las demás variables.



10. CONCLUSIONES

- La estabilidad de porcentajes altos de N, P y K foliar en el período de abril a junio en individuos juveniles y maduros puede atribuirse más a la fisiología de la planta que a la época de lluvias.
- Cuando la etapa de desarrollo avanza en *A. religiosa*, el porcentaje de N, P y K en tejido foliar disminuye; por otra parte, el porcentaje de Ca foliar aumenta conforme a la etapa.
- En general, para las tres etapas de desarrollo, la clasificación del estado nutrimental para P y Ca se ubicó en nivel nutrimental alto para los siete sitios, siguiendo el N con niveles suficientes y altos, y K con niveles bajos.
- Febrero, marzo y agosto, fueron los meses donde se encontró un menor porcentaje de N, P y K foliar en etapa juvenil y madura.
- La mejor época para realizar un levantamiento nutricional de N, P y K foliar en individuos juveniles y maduros, puede ser realizado durante el período de abril a junio.
- En brinzales, el porcentaje de N, P y K foliar no presentó ninguna tendencia con respecto a la altitud y época del año.
- Junio es el mes que coincide con un alto porcentaje de N, P y K foliar para realizar un estudio nutrimental en las tres etapas de desarrollo.
- En el caso de Ca foliar, no se logró apreciar un período a lo largo del año, en el cual los porcentajes fueran estables en las tres etapas.
- Los sitios que presentaron un mejor estado nutrimental fueron Coapexco-S1 y Palomas-S1.
- En las tres etapas de desarrollo el porcentaje de N foliar tiende a disminuir conforme aumenta la altitud.
- Con respecto al P, en brinzales y juveniles se observó una tendencia positiva con la altitud; pero en individuos maduros la tendencia fue contraria.
- En individuos juveniles y maduros, el porcentaje de K disminuyó con el aumento de altitud pero en brinzales aumentó conforme a la altitud.



- En individuos brinzales y juveniles, el porcentaje de Ca disminuyó con el aumento de altitud y en maduros aumentó conforme a la altitud.
- El % de N del suelo tuvo un comportamiento directamente proporcional al % de MOS.
- En la mayoría de los sitios a una profundidad de 0-5 cm, la actividad de la enzima ureasa, arilsulfatasa y fosfatasa alcalina fue ligeramente mayor comparada con la actividad enzimática de 6-10cm de profundidad.
- La actividad de la ureasa es mayor conforme aumenta la altitud.
- Con respecto a la actividad de la fosfatasa tanto ácida como alcalina, se presentó una menor actividad enzimática cuando hubo una mayor cantidad de P en el suelo.
- Cuando los niveles de N y P del suelo aumentan, también lo hace el porcentaje de N y P foliar.
- Del análisis de componentes principales se obtuvieron 8 componentes principales (fosfatasa alcalina 0-5 cm, % MOS, fosfatasa alcalina 6-10 cm, % arena, Ca suelo, promedio K-foliar, edad y fosfatasa ácida 6-10 cm) de 37 variables originales que representaron el 95% de la varianza acumulada.



CITA BIBLIOGRÁFICA

- Aguilera, H. N. 1989. Tratado de edafología de México. Tomo I. Facultad de Ciencias, UNAM. México. D.F.
- Alcérreca, A. C.; Consejo D. J.; Flores, V. O.; Gutiérrez, C. D.; Hentschel, A. E.; Pérez-Gil, S. R.; Reyes, G. J. y Sánchez-Cordero, V. 1998. Fauna Silvestre y Áreas Naturales Protegidas. Ed. Gutiérrez y Universo Veintiuno. México, D. F. 193 p.
- Alexander, M. 1980. Introducción a la microbiología del suelo. Ed. S.A., 2^{da} ed., México. 401p.
- Allan, J. E. 1971. The preparation of agricultural samples for análisis by atomic absorption spectroscopy. Varian Techtron, Walnut Creek, California.
- Alvarado, D.; De Bauer L. y Galindo J. A. 1991. Declinación y muerte de bosque de oyamel (*Abies religiosa*) en el sur del Valle de México. Agrociencia, serie Recursos Naturales Renovables 3: 123-143.
- Arnon, I. 1974. Mineral nutrition of maize. International Potash Institute. Ver-Woblaufen/Switzerland.
- Arshad, M. A. and Coen, G. M. 1992. Characterization of soil quality: physical and chemical criteria. American Journal of Alternative Agriculture 7: 25-31p.
- Astier, C. M.; Mass, M. M. y Etchevers, B. J. 2002. Derivación de indicadores de calidad de suelos en el contexto de la agricultura sustentable. Agrociencia, 36(005). Colegio de Postgraduados, Texcoco, México. 605-620 p.
- Astudillo, B. Y. 2006. Fosfatasa ácida y alcalina del suelo y su efecto en la disponibilidad del P en suelos de bosques templados de México. Tesis de Licenciatura. FES Zaragoza, UNAM.
- Ballard, T. M. and Carter, R. E. 1985. Evaluating Forest Stand Nutrient Status Ministry of Forests. Province of British Columbia. 60 p.
- Baltazar, A. M. 2009. Actividad arilsulfatasa y azufre en suelo y tejido foliar en cuatro especies de coníferas en bosque templado. Tesis de licenciatura. FES Zaragoza, UNAM.
- Barbazán, M.; Ferrando, M y Zamalvide, J. 2007. Estado nutricional de *Lotus corniculatus* L. en Uruguay. Agrociencia Vol XI N° 1. 22-34 p.
- Bauer I. y Hernández T. T. 1986. Contaminación una amenaza para la vegetación en México. Colegio de Postgraduados. Chapingo, Edo. de México. 84 p.
- Bautista, C. A.; Etchevers, B. J.; Del Castillo, R. F. y Gutiérrez, C. 2004. La calidad del suelo y sus indicadores. Asociación Española de Ecología Terrestre. Ecosistemas 13 (2): 90-97.
- Bernhard-Reversat, F. 1975. Recherches sur l'écosystème de la forêt subéquatoriale de Basse Côte d'Ivoire. VI Les cycles des macroéléments. La terre et la vie 29: 229-254.
- Binkley D. 2000. Nutrición forestal, prácticas de manejo. UTEHA/LIMUSA.
- Biología ciclo básico, 2010. Disponible en <http://primerosbiologia.blogspot.com/2010/05/componentes-del-biotopo.html> consultado 7 de junio 2010.
- Boardman, R.; Cromer, R. N.; Lambert, M. J. and Webb, M. J. 1997. Forest Plantations. In: D.J. Reuter, J.B. Robinson (eds.). Plant analysis and interpretation manual. CSIRO Publishing. Australia. 1-2 p.
- Bockheim, J. G. 1991. Suelos forestales. In: Young R. A. (ed). Noriega. Ed. México.
- Brady, N. C. and Weil, R. W. 1999. The nature and properties of soils. 12a. ed. Prentice Hall. N.J. USA. 750 p.
- Buol, S. W.; Hole, F. D. y McCracken, R. J. 1991. Génesis y clasificación de suelos. Ed. Trillas. México. 417 p.
- Brejeda, J. J. and Moorman, T. B. 2001. Identification and interpretation of regional soil quality factors for the Central High Plains of the Midwestern USA. In: D.E Stott. R. H. Mohtar and G. C. Steinhardt (eds.). Sustaining the Global Farm. 535-540 p.
- Bremner, J. M. 1965. Total nitrogen. 1149-1178 p. In: C. A. Black (ed.), Methods of soil analysis. Part 2. Agronomy 9. American Society of Agronomy. Madison, Wisconsin.
- Brockley, R. P, 2001. Foliar análisis as a planning tool for operacional fertilization. Proceedigs of Enhanced Forest Management: Economics Conference. March 1: 62-67 p.
- Buckman, O. H. 1991. Naturaleza y propiedades de los suelos. Ed. Limusa, 4^{ta} ed. México, D. F. 540 p.



- Burns, R. G. 1982. Enzyme Activity in Soil: Location and a Possible Role in Microbial Ecology. *Soil Biology and Biochemistry*. 14: 423-427.
- Centro de Datos para la Conservación–UNALM. Derechos Reservados, 2006.
- Challenger, A. 1998. Utilización y conservación de los Ecosistemas Terrestres de México. Pasado, Presente y Futuro. CONABIO, Instituto de Biología, UNAM y Agrupación Sierra Madre, S. C. México.
- Chapin, F. S.; Matson, P. A. and Mooney, H. A. 2002. Principles of terrestrial ecosystem ecology. New York; Springer-Verlag New York. USA.
- Chen, Z. S. 2000. Relationship between heavy metal concentrations in soils of Taiwan and uptake by crops. En línea <http://www.fftc.agnet.org/library/article/tb149.html> Food and fertilizer technology center.
- CIACEF, 2010. En línea <http://www.infor.cl/ciacef/glosario.htm> consultado 9 de diciembre de 2010.
- Cole, D. W. and Rapp, M. 1981. Elemental cycling in forested ecosystems. En Reichle DE (Ed.) *Dynamic Properties of Forest Ecosystems*. Cambridge University Press. Cambridge, RUAguilera, H. N. 1989. Tratado de edafología de México. Tomo I. Facultad de Ciencias, UNAM. México. D.F.
- Alcérreca, A. C.; Consejo D. J.; Flores, V. O.; Gutiérrez, C. D.; Hentschel, A. E.; Pérez-Gil, S. R.; Reyes, G. J. y Sánchez-Cordero, V. 341-409 p.
- Comisión Económica Para América Latina (CEPAL). Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA). 1990. América Latina y el Caribe: El reto ambiental del desarrollo. Printer, S. A. Santiago de Chile. 124 p.
- CONANP, 2009. En línea <http://iztapopo.conanp.gob.mx/> consultado el 09 de enero de 2010.
- 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 las plantas superiores. *Biología*, FEZ Zaragoza, UNAM. 101 p.
- Cuanalo De La Cerda, H. 1981. Manual para la descripción de suelos. 2^{da} ed. Colegio de Postgraduados Chapingo, México. 40 p.
- Dalurzo, H. C.; Serial, R. C.; Vázquez, S. y Ratto, S. 2002. Indicadores químicos y biológicos de calidad de suelos en Oxisoles de Misiones (Argentina). Facultad de Ciencias Agrarias-UNNE.
- De La Horra, A. M.; Efron, D.; Palma, R. M. y Prause, J. 2000. Liberación y dinámica de calcio, potasio, magnesio y sodio proveniente de la descomposición de hojarasca en un bosque subtropical argentino. *Agroquímica*. VXLIV (3-4):107-114.
- Dick, W. A. and Tabatabai, M. A. 1992. Significance and Potential Use of Soil Enzymes. En Meeting, FJB (Ed.). *Soil Microbial Ecology: Applications in Agriculture and Environmental Management*. Marcel Dekker, NY, USA, 95-127 p.
- Dick, W. A. and Tabatabai, M. A. 1993. Significance and potential uses of soil enzymes. *Soil Microbial Ecology*. Metting FB (ed). Marrel Dekker, New York, 95-127 P.
- Domínguez, R. I. y Aguilera N. H. 1982. Metodología de análisis físicos y químicos de suelos. UNAM, Facultad de Ciencias-Biología 34 p.
- Donahue, L. R.; Miller, W. R. y Shickluna, C. J. 1981. Introducción a los suelos y al crecimiento de las plantas.
- Doran, J. W. and Parkin, T. B. 1994. Defining and Assessing Soil Quality. In: J. Doran, Coleman D, Bezdicek D. y Stewart B. (ed.). *Defining Soil Quality for a Sustainable Environment SSSA Special Publication No. 35*. Wisconsin, U.S.A. 3-21 p.
- Doran, J. W.; Coleman, D. C.; Bezdicek, D. C. and Stewart, B. A. (eds). 1994. *Defining and Assessing Soil Quality for Sustainable Environment*. Soil Science Society of America. Special Publication 35. Madison, Wisconsin, USA. 244 p.
- Drechsel, P. and Zech, W. 1991. Foliar nutrient levels of broad-leaved tropical trees: a tabular review. *Plant and Soil* 131:29-46.
- Estrada-Venegas, G. E. 2008. Fauna del suelo I, micro, meso y macrofauna. Colegio de Postgraduados. Texcoco, Edo. de México.
- Etchevers, J. D.; Bautista, M. A. y Vergara, M. A. 2000. Calidad del suelo, indicadores de calidad y captura de carbono. 507-520 p. In: R. Quintero - Lizaola, T. Reyna - Trujillo, L. Corlay Chee. A. Ibañez - Huerta y N. E. García - Calderón. (ed.). *La edafología y sus perspectivas al siglo XXI*. Tomo II. Colegio de Posgraduados, UNAM. UACH. México.
- FAO, 1986. Soil survey investigations for irrigation. *Soils Bulletin* No. 42. 188 p.



- FAO, 2007. Situación de los Bosques del Mundo, Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación, Roma.
- Fassbender, H. W. y Bornemiza, E. 1987. Química de suelos con énfasis en suelos de América Latina. ed. IICA. Costa Rica. 420 p.
- Fenton, T. E.; Brown, J. R. and Mausbach, M.J. 1999. Effects of Long-Term Cropping on Organic Matter Content of Soils: Implications for Soil Quality. En Rattan Lat (Eds.). Soil Quality and Soil Erosion. CRC Press, Florida.
- Finck, A. 1988. Fertilizantes y fertilización. Ed. Reverté. Barcelona, España. 439 p.
- Fitz Patrick, E. 1985. Suelos: su formación, Clasificación y Distribución. Compañía Editorial Continental. México. 430 p.
- Führer, E., 2000. Forest functions, ecosystem stability and management. Forest ecology and management: 132: 29-37.
- Gallardo, J. F.; Martin, A. and Santa Regina Y. 1994. Dynamics of leaf decomposition in forest ecosystems of the Sierra de Gata (Province of Salamanca, Spain). In: Humic substances in the Global Environment and Implications on Human Health. N.Senesi y T.M. Miano (Eds). Elsevier Sc.,New York.
- García, H. 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 Popocatepetl. Tesis de licenciatura. FES Zaragoza, UNAM.
- Giménez, V. 1984. Efecto inhibitorio de algunos biocidas sobre la actividad enzimática del suelo. Bol. Ser. Plagas, 10:257-298.
- Godeas, A. M.; Arambarri, A. M.; Gamundi, I. J. y Spinedi, H. A. 1985. Descomposición de la hojarasca en el bosque de Lengua (*Nthofagus pumilio*). Ciencia del Suelo 3 (1-2): 68-77.
- Gregorich, E. G.; Carter, M. R.; Doran, J. W.; Pankhurst, C. E. and Dwyer, L. M. 1997. Biological attributes of soil quality. In Gregorich EG, Carter M. R. (Ed) Soil quality, Consejería del medio ambiente.
- Griffiths, B. S.; Bonkowski, M.; Roy, J. and Ritz, K. 2001. Functional Stability Substrate, Utilisation and Biological Indicators of Soil Following Environmental Impacts. Applied Soil Ecology. 16: 49-61.
- Harold, W. y Hocker Jr. 1984. Biología Forestal. Ed. AGT. México.
- Hengxiao, G.; McMillin, J. D.; Wagner, M. R.; Zhou, J.; Zhou, Z. and Xu X. 1999. Altitudinal variation in foliar chemistry and anatomy of Yunnan pine, *Pinus yunnanensis*, and pine sawfly (Hym., *Diprionidae*) performance. The Institute of Forest Protection, Sichuan Academy of Forestry, Chengdu, Sichuan, Peoples Republic of China; School of Forestry, Northern Arizona University, Flagstaff, AZ, USA. J. Appl. Ent. 123, 465-471 p.
- Hernández, G. M. A. y Granados, S. D. 2006. El Parque Nacional Iztaccíhuatl-Popocatepetl -Zoquiapan y el impacto ecológico – social de su deterioro. *Revista Chapingo. Serie Ciencias Forestales y del ambiente*, año/vol. 12, número 002. Universidad Autónoma Chapingo, México. 101-109 p.
- Hernández, C. G. 2000. Levantamiento nutricional del cultivo de maíz, en la subprovincia geográfica de Mil Cumbres correspondiente al estado de México. Tesis de maestría. FES Zaragoza, UNAM.
- Honorato, P.R., 2000. Manual de Edafología. Ed. Alfaomega. 4ª ed. México.
- Hunnemayer, A. J.; De Camino, R. y Muller, S. 1997. Análisis del desarrollo sostenible en Centroamérica. Indicadores para la agricultura y recursos naturales. IICA/GT, San José, Costa Rica.
- Imaña, E. J. y Encinas, B. O. 2008. Epidometría forestal. Universidad de Brasilia, Departamento de Ingeniería Forestal-Universidad de los Andes, Facultad de Ciencias Forestales. Brasil-Venezuela. 68 p.
- Ingeniería Ambiental y Medio Ambiente, 2000. Disponible en línea <http://www.fortunecity.es/expertos/profesor/171/suelos.html> consultado 16 de noviembre 2010.
- Jackson, M. L. 1964. Análisis químico de suelos. Ed Omega. Barcelona, España.
- Jayamadhavan, A.; Sudhakara, K. and Washid, P. A. 2000. Methods of leaf sampling in teak (*Tectona grandis*) for nutrient Analysis. Journal of Tropical Forest Science 12(2): 227-237.
- Joinville, S.; Revault, M.; Quiquampoix, H. and Baron, M. H. 2004. Structural Effects of Drying and Rehydration for Enzymes in Soils: Kinetics-FTIR Analysis of Chymotrypsin Adsorbed on Montmorillonite. Journal of Colloid and Interface Science. 273: 414–425.
- Kramer, J. P. 1989. Relaciones hídricas de suelo y plantas, una síntesis moderna. Ed. Harla, México. 538 p.



- Laskowski, R., and Berg, B. 1993. Dynamics of some mineral nutrients and heavy metals in decomposing litter. *Sacandinavian Journal Research* 8: 446-456.
- Leaf, A. L. 1973. Plant analysis as an aid in fertilizing forests. *In*: L.M. Walsh, J.D. Beaton (eds). *Soil testing and plant analysis*. Soil Science Society of America. Madison, Wisconsin, USA. 427-454 p.
- León-Arteta, R. 2003. *Manual edafológico de campo*. 2a. Ed. Textos Universitarios, Universidad Veracruzana. México. 205 p.
- López-López, M. A.; Velásquez-Mendoza J.; Velásquez-Mendoza, A.; González-Romero, V. y Cetina-Alcalá, V. M. 1998. Estado nutrimental de *Abies religiosa* en una área con problemas de contaminación ambiental. *Agrociencia Serie Recursos Naturales Renovables*. 1: 53-59.
- López-López, M. A.; Velásquez-Martínez, A.; Acosta-Montoya, J. y Estañol-Botello, E. 2006. Biomass distribution in declining sacred-fir seedlings. *Interciencia* 31(6): 451-455.
- López, L. M. y Estañol, B. E. 2007. Detección de deficiencias de hierro en *Pinus leiophylla* a partir de los efectos de dilución y concentración nutrimental. *Terra Latinoamericana* (25)1. 9-15 p.
- Mangenot, F. and Toutian, F. 1980. *Actualités d'Ecologie Forestière*. P. Pearson (Ed) Gauthiers-Villars, París. 3-69.
- Marschner, H. 1995. *Mineral nutrition of higher plants*. Ed. Academic Press Inc., 2^{da} ed., Great Britain by The University Printing House, Cambridge. 889 p.
- Masciandaro, G. and Ceccanti, B. 1999. Assessing Soil Quality in Different Agro-Ecosystems Through Biochemical and Chemo-Structural Properties of Humic Substances. *Soil and Tillage Research*. 51: 129-137.
- Martínez, C. J. F. 2009. Contenido foliar de N, P, Ca, Mg y K en especies arbóreas de bosques templados y calidad del suelo en la Sierra de Manantlán y la Sierra Juárez. Tesis de Licenciatura. FES Zaragoza, UNAM.
- Mengel, K. and Kirkby, E. A. 1982. *Principals of Plant Nutrition*, 3er ed., International Potash Institute, Bern.
- Mengel, K. and Kirkby, E. A. 2001. *Principals of Plant Nutrition*, 5ta ed., Annals of Botany Company. 479-480 p.
- Miehlich, G. 1980. Los suelos de la Sierra Nevada de México. FUNDACIÓN ALEMANA PARA LA INVESTIGACIÓN. Puebla-México. 213 p.
- Mills, H. A. and Jones, J. B. 1996. *Plant analysis handbook II*. MicroMacro Publishing. Athens, Georgia, USA. 180 p.
- Molina, E. 2007. Análisis foliar y suelos y su interpretación. Centro de Investigaciones Agronómicas. Universidad de Costa Rica. 1-8 p.
- Montagnini, F.; Fanzeres, A. y Guimaraes da Vinha, S. 1995. Estudios de restauración en la región del Bosque Atlántico de Bahía, Brasil. *Yvyrareta*. Año 6, N°6: 5-12.
- Moreno, M. G. 1994. Balances de Agua y Nutrientes en Rebollares (*Quercus pirenaica Willd.*) de la Vertiente Salmantina de la Sierra de Gata. Tesis. Universidad de Salamanca. España. 470 p.
- Munson, R. D. and Nelson, W. L. 1973. Principles and practices in plant analysis. *In*: L.M. Walsh, J.D. Beaton (eds). *Soil testing and plant analysis*. Soil Science Society of America. Madison, Wisconsin, USA. 223-248 p.
- Nannipieri, P. 1994. The potential use of soil enzymes as indicators of soil productivity, sustainability, and pollution. *In*: *Soil biota: management in sustainable farming systems*.
- Nannipieri, P.; Greco, S. and Ceccanti, B. 1990. Ecological significance of biological activity. *In*: Bollag J. M, Stotzky G (Ed) *Soil biochemistry*, vol 6. Dekker, New York. 293-355 p.
- Näsholm, T. 1998. Qualitative and quantitative changes in plant nitrogen acquisition induced by anthropogenic nitrogen deposition. *New Phytol*. 139: 87-90.
- National Resource Conservation Soil (NRCS). 2004. What is soil quality?. Unites States Departmen Agriculture.
- Norma Oficial Mexicana PROY-NOM-021-RECNAT-2000. Especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de suelos. Estudios, muestreo y análisis. SEMARNAT.
- Normales Climatológicas en <http://smn.cna.gob.mx/climatologia/normales/estacion/mex/NORMAL15082.TXT> consultado 23 de noviembre de 2010.
- Ortiz-Villanueva, B. 1975. *Edafología*. E.N.A. (U.A.CH.). Chapingo, México. 291 p.



- Palma, R. M.; Prause, J.; Fontanive, A. V. and Jiménez, M. P. 1998. Litter fall and litter decomposition in a forest of the Parque Chaqueño Argentino. *Forest Ecology and Management* 106: 205-210.
- Palmer, G. R. y Truoch, F. R. 1989. Introducción a la ciencia del suelo. Manual de laboratorio AGT Edo. México.
- Parr, J. F.; Papendick, R. I.; Hornick, S. B. and Meyer, R. E. 1992. Soil quality: Attributes and relationships to alternative and sustainable agriculture. *American Journal Alternative of Agriculture* 7: 5-11.
- Périé, C. and Munson, D. 2000. Ten year responses of soil quality and conifer growth to silvicultural treatments. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 64: 1815-1826.
- Prével, M. P.; Gagnard, J. and Gautier, P. 1987. Plant analysis, as a guide to the nutrient requirements of temperate and tropical crops. Lavoisier. New York, USA. 49-64 p.
- Pritchett, L. W. 1986. Suelos forestales. Propiedades, conservación y mejoramiento. Traducción del inglés por J. Hurtado V. y M. Cervantes R. Limusa. México. 634 p.
- Pritchett, L. W. 1991. Suelos forestales. Propiedades, conservación y mejoramiento. Traducción del inglés por J. Hurtado V. y M. Cervantes R. Limusa. 2^{da} ed. México. 634 p.
- Prause, J. 1997. Aporte de las principales especies forestales a la dinámica de la materia orgánica y de los nutrientes en un monte nativo del Parque Chaqueño húmedo. M.Sc. Tesis. Facultad de Agronomía. Universidad de Buenos Aires. Argentina. 205 p.
- Quiroz, G. V. 2002. Relación nutrimental nitrógeno/fósforo y nitrógeno/potasio en maíz y su influencia sobre la eficiencia de estos nutrimentos. Tesis de licenciatura. FES Zaragoza, UNAM.
- Rai, S. N. and Proctor, J. 1986. Ecological studies on four rainforests in Karnataka, India. II. Litterfall. *J. Ecol.* 74: 455-463.
- Ramírez, C. J. A.; Zapata, D. C. M.; León, P.J.D. y González, H. M. I. 2007. Caída de hojarasca y retorno de nutrientes en bosques montanos andinos de Piedras Blancas, Antioquia, Colombia. *VERCIANCIA*. Vol. 32, Nº 5. 303-311 p.
- Reyes, J. I. 1996. Fundamentos teóricos – prácticos de temas selectos de la ciencia del suelo. UAM. México, D.F. 257 p.
- Richards, L.A. 1990. Diagnóstico y rehabilitación de suelos salinos y sódicos. Departamento de Agricultura de los Estados Unidos de América, Limusa, México D.F.
- Richter, Jr. D. D. and Markewitz, D. 2001. Understanding Soil Change. Soil Sustainability over Millennia, Centuries and Decades. Cambridge. University Press 255 p.
- Rodà, F. 1993. Funcionamiento de ecosistemas forestales: La circulación de nutrientes. Congreso Forestal Español. Lourizan 4:529-542.
- Rodríguez, F. H. 2002. Métodos de análisis de suelos y plantas, criterios de interpretación. Trillas. México. 196 p.
- Rodríguez, S. F. 1992. Fertilizantes, nutrición vegetal. AGT EDITOR, S. A. México. 157 p.
- Rzedowski, J. 1978. Vegetación de México. Ed. Limusa. México.
- Saavedra-Romero, L.; Alvarado-Rosales, D.; Vargas-Hernández, J. y Hernández-Tejeda, T. 2003. Análisis de la precipitación pluvial en bosques de *Abies religiosa* (HBK.) Schlecht. et Cham., en el sur de la ciudad de México. *Agrociencia serie Recursos Naturales Renovables*. 1: 57-64.
- Salazar, R. y Soihet, C. 2001. Manejo de semillas de 75 especies forestales de América Latina. Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza, CATIE. Turrialba, Costa Rica. 15-17 p.
- Sánchez, E. E. y Curetti, M. 2009. Producción y manejo nutricional de frutales de clima templado. Instituto Internacional de Nutrición de Plantas, Programa Latinoamerica-Cono Sur. *Informaciones agronómicas, Argentina* 44:1-7.
- Sánchez, V. J. 2007. Fertilidad del suelo y nutrición mineral de las plantas, conceptos básicos. Fertitec S. A. JSV-GG-FT. <http://www.agronegociosperu.org/downloads/FERTILIDAD%20DEL%20SUELO%20Y%20NUTRICION.pdf> Consultado el 09 de diciembre de 2010.
- Santa Regina, I.; Leonardi, S. and Rapp, M. 2001. Foliar nutrient dynamics and nutrient-use efficiency in *Castanea sativa* coppice stands of southern Europe. *Forestry* 74: 1-10.
- Santa Regina, I. y Gallardo, J. F. 1985. Producción de hojarasca en tres bosques de la sierra de Béjar (Salamanca). *Annu. XI CEBA*. Salamanca, España. 57:63.



- Santoro, L. G. and Magalhaes, A. C. N. 1983. Changes in nitrate reductase activity during development of soybean leaf. *Z. Pflanzenphysiol.* 112, 113-121.
- Sarkar, J.; Leonowicz, A. and Bollag, J.M. 1989. Immobilization of Enzymes in Clays and Soil. *Soil Biology and Biochemistry.* 21: 223-230.
- Scott, H. D. 2000. *Soil physics. Agricultural and environmental applications.* 1st edit. Iowa State University Press. USA. 421 p.
- Seybold, C. A.; Mausbach, M. J.; Karlen, D. L. and Rogers, H.H. 1997. Quantification of soil quality. 387-4004 p. In: Rattan, L.; Kimble, J. M.; Follet, R. F.; Stewart, B. A. (ed.). *Soil processes and the carbón cycle.* CRC. U.S.A.
- Singh, J. S.; Raghubanshi, A. S.; Singh, R. S. and Srivastava, S. C. 1989. Microbial biomass acts as a source of plant nutrients in dry tropical forest and savanna. Department of Botany, Banaras Hindu University. *NATURE.* Vol. 338. 499-500 p.
- Smith, F. W. and Loneragan, J. F. 1997. Interpretation of plant analysis: concepts and principles. In *Plant análisis, an interpretation manual.* Second Edition. Reuter D. J. and J. B. Robinson. Assistant Editor. C. Dutkiewicz. CSIRO. Australia.
- Soriano, E. B. G. 2008. Levantamiento nutricional de los géneros *Pinus* y *Abies* en bosques templados de México. Tesis de Licenciatura. FES Zaragoza, UNAM.
- Spurr, H. S. y Barnes, V. B. 1982. *Ecología forestal.* AGT Editor, S. A. México. 690 p.
- Stevenson, F. J. 1986. *Cycles of soils.* Wiley & Sons, Inc., 380 p., New York, Singapore. Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria.
- Suastegui, M. E. 2009. Contribución de la actividad de la ureasa a la liberación de nitrógeno en suelos de uso agrícola y forestal. Tesis de Licenciatura. FES Zaragoza, UNAM.
- Swift, M. J.; Haeal, O. W. and Anderson, J. M. 1979. *Decomposition in terrestrial Ecosystems.* Blackwell Scientific (Ed). Oxford.
- Tabatabai, M. A. 1994. Soil enzymes. In: Weavve R. W., J. S. Angle and P. S. Bottomley, D. Besdizek, S. Smith, A. Tabatabai, A. Wollum (ed). 775-834 p. *Methods of soil analysis. Part 2. Microbial and biochemical properties.* Soil Sci of Am. USA.
- Tabatabai, M. A. and Bremner, J. M. 1970. Factors affecting soil arylsulfatase activity. *Soil Science Society of America. Proceedings* 34: 225- 229.
- Tomaszewski, T.; Boyce, R. L. and Sievering, H. 2003. Canopy uptake of atmospheric nitrogen and new growth nitrogen requirement at a Colorado subalpine forest. *Can. J. For. Res.* 33: 2221-2227.
- Trasar-Cepeda, C.; Leirós, C. and Gil Torres, F. 1999. Biochemical properties of acid soils under climax vegetation (Atlantic oak-wood) in an area of the European temperate-humid zone (Galicia, NW Spain): specific parameters. *Soil Biol. Biochem.* 25 (2): 295-296.
- Unión Mundial Para la Naturaleza (UICN) Banco Interamericano de Desarrollo. 1993. *Parques y Progreso. Áreas protegidas y Desarrollo Económico en América Latina y el Caribe.* Unión Internacional para la conservación de la naturaleza y los Recursos Naturales. Washington, D. C., U. S. A. 258 p.
- Urbano, T. y Hernández, C. R. 1992. *Condiciones del suelo y desarrollo de las plantas.* Según Russell.
- Valencia, I. C. E. y Hernández, B. A. 2002. *Muestreo de suelos, preparación de muestras y guía de campo.* UNAM, Facultad de Estudios Superiores Cuautitlán. México, D. F. 131 p.
- Van Bruggen, A. H. C. and Semenov, A. M. 2000. In Search of Biological Indicators for Soil Health and Disease Suppression. *Applied Soil Ecology.* 15: 13-24.
- Verduzco-Gutiérrez, J. 1976. *Protección forestal.* PATENA, A.C. Chapingo, México. 369 p.
- Warrick, A. W. 2002. *Soil physics companion.* CRC PRESS. Washington D.C., USA. 389 p.
- Wells, C. y Allen, L. 1985. A loblolly pine management guide. When and where to apply fertilizer? USDA Forest Service. Gen. Tlch. Rep. SE-36. 23 p.



ANEXO A. Descripción de algunos perfiles de suelo (Cuanalo De La Cerda, 1981) bajo *Abies religiosa*.

PERFIL I.

I. Descripción del sitio	
1. Fecha	27-Feb-2009
2. Localización	X=534478 Y=2096137
3. Localidad	Sur del salto
4. Elevación	3180 m snm
5. Relieve	Convexo
6. Drenaje superficial	Sitio donador
7. Material parental	Ceniza volcánica
a) Edad estratigráfica	Terciario-cuaternario
b) Ángulo y dirección del material depositado	Suroeste
c) Modo de origen	Deposición reciente de material volcánico.
d) Descripción litológica	Riolita, caliza, basalto, andesita y caliza con conglomerados
8. Flora	Bosque de <i>Abies-Pinus</i> , 60% de estrato arbóreo de 20-25m de altura, 30% arbustivo senecio y 10% herbácea <i>Bacharis sp.</i>
a) Forma de vida	
b) Función	Perennifolio
c) Tamaño de las formas de vida	Alto (árbol, mayor de 20 m; matorral, de 2 a 4 m y herbáceo, mayor de 2 m).
d) Forma y tamaño de la hoja	<i>Abies</i> (hojas racimosas), senecio (hojas anchas).
e) Textura de la hoja	<i>Abies</i> (esclerófilas), senecio (pergamínosa y suave).
f) Cobertura	Compacta a continua de 100 - 200%.
9. Fauna	Madrigueras
10. Condiciones meteorológicas	Época de seca, un día soleado.

Observaciones: Superficie del suelo cubierta de mantillo, conos, leña y helechos; espesor de hojarasca de 2-3 cm.; pendiente 30-40%; exposición noroeste; hay presencia de tala, uso de suelo forestal.

II. Descripción del perfil		
Horizonte	Profundidad	Descripción
A₁	0-30cm	Distancia sobre la cual una capa cambia a otra marcada, ligeramente húmedo, color en seco IOYR 3/2 (café grisáceo muy oscuro), color en húmedo IOYR 2/1 (negro), estructura subangular, contraste tenue, tamaño de pedregosidad 1-2 mm (muy fina).
A₂	30-60cm	Distancia sobre la cual una capa cambia a otra marcada, ligeramente húmedo, color en seco IOYR 3/1 (gris muy oscuro), color en húmedo IOYR 3/1 (gris muy oscuro), estructura poliédrica subangular.
C	más de 60cm	Espesor de la capa marcada, ligeramente húmedo, color en seco IOYR 5/3 (café), color en húmedo IOYR 4/3 (café).
Paleosuelo	30cm debajo de la capa de ceniza	Ligeramente húmedo, color en seco IOYR 3/4 (café amarillento oscuro), color en húmedo IOYR 3/3 (café oscuro).

Fotos Perfil 1



PERFIL 2.

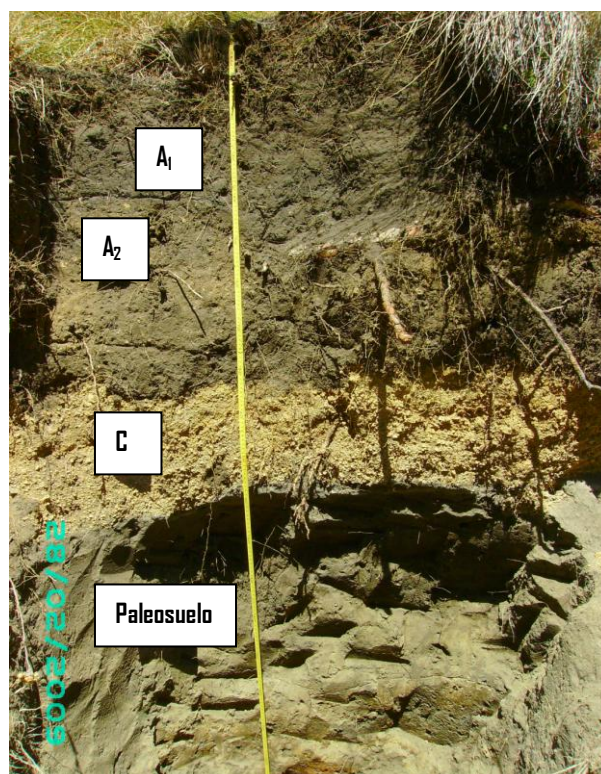
I. Descripción del sitio

1. Fecha	28-Feb-2009	8. Flora	Bosque de <i>Pinus Hartwegii</i> con presencia de algunos <i>Abies</i> , estrato arbóreo alto (30-40m), medio (2-5m) y bajo (1-2m). El estrato arbóreo abarca 50%, arbustivo 5% (senecio) y herbáceo 45% (<i>Lupinus</i> y pastos amacollados como <i>Mulenbergia</i> y <i>Festuca</i>).
2. Localización	X=535270 Y=2112629	a) Forma de vida	y bajo (1-2m). El estrato arbóreo abarca 50%, arbustivo 5% (senecio) y herbáceo 45% (<i>Lupinus</i> y pastos amacollados como <i>Mulenbergia</i> y <i>Festuca</i>).
3. Localidad	Cañada Amalacaxco	b) Función	Perennifolio
4. Elevación	3659 m snm	c) Tamaño de las formas de vida	Alto (árbol, mayor de 20 m; matorral, de 2 a 4 m y herbáceo, mayor de 2 m).
5. Relieve	Cóncavo - convexo	d) Forma y tamaño de la hoja	<i>Pinus</i> y <i>Abies</i> aciculares, senecio hojas anchas, <i>Lupinus</i> hojas anchas y pastos amacollados aciculares.
6. Drenaje superficial	Sitio receptor	e) Textura de la hoja	<i>Pinus</i> y <i>Abies</i> esclerófilas, senecio pergaminosa y suave, y <i>Lupinus</i> membranosa.
7. Material parental	Ceniza volcánica	f) Cobertura	Compacta a continua de 100 - 200%.
a) Edad estratigráfica	Terciario-cuaternario	9. Fauna	Presencia de madrigueras
b) Ángulo y dirección del material depositado	Este a oeste	10. Condiciones meteorológicas	Época de seca, un día soleado con viento.
c) Modo de origen	Aluvión estable de ceniza volcánica.		
d) Descripción litológica	Rocas ígneas de tipo riolita, caliza, basalto y andesita.		
e) Presencia de óxidos de Fe u otros	Presencia de óxidos de Mn		

II. Descripción del perfil

HORIZONTE	PROFUNDIDAD	DESCRIPCIÓN
A ₁	1-40cm	Distancia sobre la cual una capa cambia a otra marcada, forma del límite de la capa ondulada, color en seco 10YR 4/1 (Gris-oscuro), color en húmedo 10YR 2/1 (Negro), tamaño de las motas finas de 2-5 mm, pedregosidad en cantidad menos del 1 %, estructura granular y muy fina, consistencia de los agregados en seco blanda, pH activo 4.94, presencia de raíces delgadas de pastos.
A ₂	40-75cm	Distancia sobre la cual una capa cambia a otra marcada, forma del límite de la capa ondulada, color en seco 10YR 5/2 (Café grisáceo), color en húmedo 10YR 2/2 (Café muy oscuro), consistencia de los agregados en seco blanda, estructura granular con tendencia a poliédrica subangular, pH activo 5.13, y presencia de raíces de <i>Pinus</i> muy gruesas.
A-C	75-84cm	Distancia sobre la cual una capa cambia a otra marcada.
C	84-110cm	Distancia sobre la cual una capa cambia a otra marcada, color en seco 10YR 6/8 (Amarillo), color en húmedo 10YR 4/6 (Café amarillento oscuro), pH activo 5.18 y no hay presencia de raíces.
Paleosuelo		Presencia de madrigueras
Observaciones generales		Velocidad de infiltración 10cm de agua en 4 min.

Fotos Perfil 2





PERFIL 3.

I. Descripción del sitio	
1. Fecha	26-Mar-2009
2. Localización	X=529232 Y=2125124
3. Localidad	Teclacuilunco
4. Elevación	2857 m snm
5. Relieve	Convexo
6. Drenaje superficial	Sitio donador
7. Material parental	Ceniza volcánica
a) Edad estratigráfica	Terciario-cuaternario
b) Ángulo y dirección del material depositado	Sureste a Noroeste
c) Modo de origen	Volcánico, roca extrusiva
d) Descripción litológica	Riolita dacítica y basalto.
8. Flora	Bosque de Pino-encino y oyamel, estrato arbustivo conformado por senecio, y estrato herbáceo conformado por helechos y mala mujer. Vegetación secundaria ailes. Es un relicto de bosque mesófilo.
a) Forma de vida	
b) Función	Perennifolio
c) Tamaño de las formas de vida	Mediano (árbol, de 15 a 20 m; matorral, de 1 a 2 m y herbáceo, de 0.2 a 2 m).
d) Forma y tamaño de la hoja	<i>Pinus</i> y <i>Abies</i> hojas aciculares, encino laminar ancha.
e) Textura de la hoja	<i>Pinus</i> y <i>Abies</i> hojas esclerófilas, senecio pergaminoza y suave.
f) Cobertura	Compacta a continua de 100 - 200%.
9. Fauna	Ardillas
10. Condiciones meteorológicas	Época de seca, un día soleado. Hay lluvia escasa.

Observaciones: Exposición noroeste, hay regeneración natural, nunca se ha reforestado. La mayoría de los suelos son Leptosoles o Litosoles, Leptosol ándico y riolítico.

II. Descripción del perfil		
HORIZONTE	PROFUNDIDAD	DESCRIPCIÓN
A ₁	0-30cm	Textura al tacto areno-migajón. Ligeramente pedregoso del 1 al 5 %, tamaño de las piedras muy grande más de 20 cm, forma de las piedras angular y subangular. Tipo y clase de estructura granular fina, consistencia de los agregados en seco ligeramente dura. La estabilidad de agregados es alta (agregados que se encuentran en la raíz). La permeabilidad del suelo es rápida. Número de raíces en un cuadrante de 10x10 cm ² de 5 a 10 raíces delgadas. El porcentaje de M.O es media alta.
A ₂	30-50cm	Color en seco 10YR 3/2 (Café grisáceo muy oscuro), color en húmedo 10YR 2/1 (Negro), pH activo 5.18, pH potencial 4.92, Conductividad eléctrica 0.0407 dS m ⁻¹ , arcilla 2%, limo 26%, arena 72%, textura areno migajón. MO de 6.16 y DA de 1.22 g cm ⁻³ .
Observaciones generales		Drenaje del perfil bien drenado. El material parental tiene poco Fe. Es un suelo joven de estructura débil.



PERFIL 4.

I. Descripción del sitio

1. Fecha	28-Mar-2009	8. Flora	
2. Localización	X=532338 Y=2108091	a) Forma de vida	Bosque de oyamel (2 estratos juvenil y maduro) con presencia de Cupresus y <i>Pinus Pátula</i> , estrato arbustivo senecio y herbáceo <i>Bacharis sp.</i>
3. Localidad	Barranca de las Palomas	b) Función	Perennifolio
4. Elevación	2990 m snm	c) Tamaño de las formas de vida	Alto (árbol, mayor de 20 m; matorral, de 2 a 4 m y herbáceo, mayor de 2 m).
5. Relieve	Cóncavo-convexo	d) Forma y tamaño de la hoja	<i>Abies</i> hojas racimosas, Cupresus hojas escamiformes, <i>Pinus pátula</i> hojas aciculares y senecio hojas anchas.
6. Drenaje superficial	Sitio receptor	e) Textura de la hoja	<i>Abies</i> y <i>Pinus pátula</i> hojas esclerófilas, senecio hojas pergaminosas y suaves.
7. Material parental	Ceniza volcánica	f) Cobertura	Abierta o discontinua, de 50 a 90 %.
a) Edad estratigráfica	Terciario-cuaternario	9. Fauna	Avifauna y reptiles (lagartijas)
b) Modo de origen	Deposito de material volcánico (ceniza volcánica).	10. Condiciones meteorológicas	Época de seca, un día soleado.
c) Descripción litológica	Andesita, riolita, pómez y vidrio volcánico		

II. Descripción del perfil

HORIZONTE	PROFUNDIDAD	DESCRIPCIÓN
A1	0-24cm	Distancia sobre la cual una capa cambia a otra marcada, color en seco 10YR 3/2 (Café grisáceo muy oscuro), color en húmedo 10YR 2/1 (Negro), pedregosidad menos del 1%, piedras pequeñas de 1 a 5 cm, ligeramente húmedo. pH activo 5.08, pH potencial 4.94, pH con CaCl 4.33, conductividad eléctrica 0.085 dS m ⁻¹ , arcilla 2 %, limo 26 %, arena 72 %, textura areno migajón. MO de 13.38 % y DA de 1.03 g cm ⁻³ .
A2	24-57cm	Color en seco 10YR 5/2 (Café grisáceo), color en húmedo 10YR 2/2 (Café muy oscuro), pedregoso del 5-20%, piedra grande de 10 a 20 cm. pH activo 4.73, pH potencial 4.56, pH con CaCl 4.07, conductividad eléctrica 0.024 dS m ⁻¹ , arcilla 2 %, limo 12 %, arena 86 %, textura arena. DA de 1.554 g cm ⁻³ . Transición de A2 a C es tenue.
C	más de 57cm	Color en seco 10YR 5/2 (Café grisáceo), color en húmedo 10YR 3/2 (Café grisáceo muy oscuro), piedras muy grandes de más de 20 cm. pH activo 5.06, pH potencial 4.42, conductividad eléctrica 0.021, arcilla 2 %, limo 10 %, arena 88 %, textura arena. MO de 4.43 % y DA de 1.608 g cm ⁻³ .

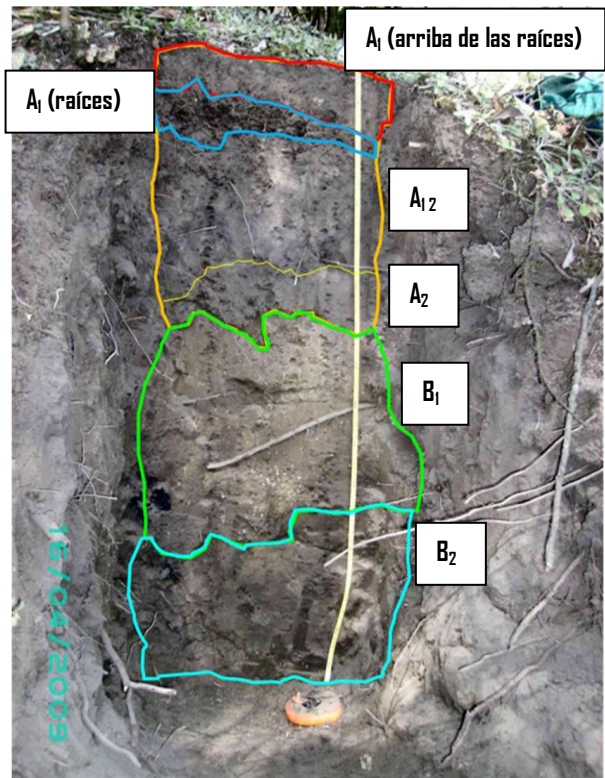


PERFIL 5.

I. Descripción del sitio		
1. Fecha	16-Abr-2009	8. Flora Bosque de Oyamel con Aile, Cletra. Estrato arbóreo alto: Oyamel <40 m. Medio: Oyamel <25m, Aile <15m. Garrya. Arbustivo: Bacharis, Senecio y Cletra <1.8 m. Herbáceo. Helechos (2 sp.). Mantillo: Hojarasca y ramas de arboles gruesas y delgadas.
2. Localización	X=531857 Y=2115680	a) Forma de vida
3. Localidad	Entre Cruce El 8 y Las Anomias	b) Función Perennifolio
4. Elevación	3103 m snm	c) Tamaño de las formas de vida Mediano (árbol, de 15 a 20 m; matorral, de 1 a 2 m y herbáceo, de 0.2 a 2 m).
5. Relieve	Cóncavo-recto	d) Forma y tamaño de la hoja Abies hojas racimosas y Senecio hojas anchas.
6. Drenaje superficial	Sitio receptor	e) Textura de la hoja Abies hojas esclerófilas, Senecio hojas pergaminosas y suaves.
a) Material parental	Ceniza volcánica	f) Cobertura Abierta y discontinua, de 50 a 90 %.
b) Edad estratigráfica	Terciario-cuaternario	9. Condiciones meteorológicas Época de seca, un día soleado.
c) Descripción litológica	Andesita, riolita, pómez y vidrio volcánico	

II. Descripción del perfil		
HORIZONTE	PROFUNDIDAD	DESCRIPCIÓN
A₁ (arriba de las raíces)	1-10cm	Color en seco 10YR4/2 (Café grisáceo oscuro), color en húmedo 10YR 2/1 (Negro), pH activo 6.39, pH potencial 5.91, pH con CaCl 4.33, conductividad eléctrica 0.151 dS m ⁻¹ , arcilla 2 %, limo 26 %, arena 72 %, textura areno migajón. MD de 10.52 % y DA de 0.94 g cm ⁻³ .
A₁ (raíces)	10-15cm	Color en seco 10YR 3/2 (Café grisáceo muy oscuro), color en húmedo 10YR 2/2 (Café muy oscuro), pH activo de 5.69, pH potencial de 5.26, conductividad eléctrica 0.079 dS m ⁻¹ , arcilla 14 %, limo 12 %, arena 74 %, textura migajón arenoso. MD de 8.38 % y DA de 1.10 g cm ⁻³ .
A₁₂	15-21cm	Color en seco 10YR 4/2 (Café grisáceo oscuro), color en húmedo 10YR 2/2 (Café muy oscuro), pH activo 5.83, pH potencial 5.40, conductividad eléctrica 0.058 dS m ⁻¹ , arcilla 2 %, limo 24 %, arena 74 %, textura areno migajón. MD de 3.86 % y DA de 1.14 g cm ⁻³ .
A₂	21-65	Color en seco 10YR 3/2 (Café grisáceo muy oscuro), color en húmedo 10YR 2/1 (Negro), pH activo 6, pH potencial 5.76, conductividad eléctrica 0.062 dS m ⁻¹ , arcilla 4 %, limo 20 %, arena 76 %, textura areno migajón. MD de 8.05 % y DA de 1.16 g cm ⁻³ .
B₁	65-120cm	Color en seco 10YR 5/3 (Café), color en húmedo 10YR 3/3 (Café oscuro), pH activo 6.24, pH potencial 5.71. Conductividad eléctrica 0.056 dS m ⁻¹ , arcilla 2 %, limo 22 %, arena 76 %, textura areno migajón. MD de 6.11 % y DA de 1.14 g cm ⁻³ .
B₂	mas de 120cm	Color en seco 10YR 4/3 (Café grisáceo oscuro), color en húmedo 10YR 2/2 (Café muy oscuro), pH activo de 6.29, pH potencial de 6. Conductividad eléctrica de 0.054 dS m ⁻¹ , % de arcilla 2, % de limo 24, % de arena 76, textura areno-migajón. MD de 5.46 % y DA de 0.95 g cm ⁻³ .

Fotos Perfil 5





ANEXO B. Análisis de correlación simple de Pearson

Edad	
Variable	Coefficiente
Ca-foliar	0,70
K-foliar	-0,41
P-foliar	-0,24
N-foliar	-0,23
Mg-suelo	0,31
Fosfatasa ácida 0-5cm	0,16
SO ₄ ⁻² solubles HCl 0.025 N y NH ₄ F 0.003 N	-0,16
SO ₄ ⁻² solubles NaHCO ₃ 0.5N pH 8.5	-0,18

Altitud (msnm)			
Variable	Coefficiente (+)	Variable	Coefficiente (-)
% Arena	0,73	Ca-suelo	-0,16
SO ₄ ⁻² solubles NaHCO ₃ 0.5N pH 8.5	0,73	Na-suelo	-0,21
Arilsulfatasa 0-5cm	0,67	% Espacio poroso	-0,25
Ureasa 0-5cm	0,54	Arilsulfatasa 6-10cm	-0,32
Fosfatasa ácida 6-10cm	0,42	Fosfatasa alcalina 6-10cm	-0,36
Fosfatasa alcalina 0-5cm	0,41	% Limo	-0,47
Conductividad eléctrica	0,41	Mg- suelo	-0,51
Ureasa 6-10cm	0,29	Fosfatasa ácida 0-5cm	-0,55
		N-foliar	-0,55
		pH KCl	-0,6
		ppm P-Olsen	-0,64
		% Arcilla	-0,73

N-foliar		P-foliar		K-foliar		Ca-foliar	
Variable	Coefficiente	Variable	Coefficiente	Variable	Coefficiente	Variable	Coefficiente
Mg-suelo	0,64	N-suelo	0,31	N-suelo	0,22	Na-suelo	0,29
P-foliar	0,45	K-foliar	0,24	ppm P-Bray	-0,19	Mg-suelo	0,21
Na-suelo	0,42	Mg-suelo	0,24	Ca-foliar	-0,24		
N-suelo	0,37	ppm P-Bray	0,22				
ppm P-Olsen	0,37	Na-suelo	0,18				
K-foliar	0,2	K-suelo	-0,22				
Ca-suelo	0,19	Ca-foliar	-0,37				
Ca-foliar	-0,19						
K-suelo	-0,35						



N-foliar		P-foliar	
Variable	Coficiente	Variable	Coficiente
Fosfatasa ácida 0-5 cm	0,63	% MOS	0,43
Arilsulfatasa 6-10 cm	0,53	SO ₄ ⁻² solubles HCl 0.025 N y NH ₄ F 0.003 N	0,33
pH KCl	0,48	Ureasa 0-5 cm	0,29
% Arcilla	0,47	pH H ₂ O	0,28
% MOS	0,28	Conductividad eléctrica	0,28
% Espacio poroso	0,21	pH KCl	0,27
pH H ₂ O	-0,22	Arilsulfatasa 6-10 cm	0,27
Conductividad eléctrica	-0,26	Fosfatasa ácida 0-5 cm	0,2
DA cilindro	-0,28	DA cilindro	0,17
Ureasa 0-5 cm	-0,3	Fosfatasa alcalina 6-10 cm	-0,2
Arilsulfatasa 0-5 cm	-0,35	SO ₄ ⁻² solubles NaHCO ₃ 0.5N pH 8.5	-0,25
Fosfatasa ácida 6-10 cm	-0,39	SO ₄ ⁻² solubles H ₂ O	-0,25
% Arena	-0,4	% Espacio poroso	-0,29
Fosfatasa alcalina 0-5 cm	-0,43		
SO ₄ ⁻² solubles NaHCO ₃ 0.5N pH 8.5	-0,48		

K-foliar		Ca-foliar	
Variable	Coficiente	Variable	Coficiente
% Arcilla	0,2	SO ₄ ⁻² solubles H ₂ O	0,52
Fosfatasa ácida 6-10 cm	0,19	Fosfatasa ácida 0-5 cm	0,19
Ureasa 6-10 cm	0,18	% Espacio poroso	0,17
Fosfatasa alcalina 6-10 cm	-0,23	Conductividad eléctrica	-0,23
		% Limo	-0,24
		Fosfatasa alcalina 6-10 cm	-0,24
		Fosfatasa alcalina 0-5 cm	-0,3
		DA cilindro	-0,32
		pH H ₂ O	-0,35

% MOS			
Variable	Coficiente (+)	Variable	Coficiente (-)
N-suelo	0,9	Ca-suelo	-0,25
Arilsulfatasa 6-10cm	0,65	SO ₄ ⁻² solubles H ₂ O	-0,29
Mg-suelo	0,55	K-suelo	-0,35
Ureasa 0-5cm	0,52	ppm P-Olsen	-0,36
Na-suelo	0,48	Fosfatasa alcalina 6-10cm	-0,63
Fosfatasa ácida 0-5cm	0,46		
Ureasa 6-10 cm	0,38		
Arilsulfatasa 0-5cm	0,27		
ppm P-Bray	0,24		



Conductividad Eléctrica		Densidad aparente		% Espacio poroso	
Variable	Coficiente	Variable	Coficiente	Variable	Coficiente
Arisulfatasa 0-5cm	0,87	pH H ₂ O	0,94	ppm P-Olsen	0,69
Fosfatasa alcalina 0-5 cm	0,86	Fosfatasa alcalina 0-5cm	0,85	SO ₄ ⁻² solubles H ₂ O	0,55
Ureasa 0-5cm	0,83	ppm P-Bray	0,76	% Arcilla	0,40
ppm P-Bray	0,76	Fosfatasa alcalina 6-10cm	0,58	Fosfatasa ácida 0-5cm	0,40
DA cilindro	0,74	Arisulfatasa 0-5cm	0,50	Arisulfatasa 6-10cm	0,33
pH H ₂ O	0,69	% Limo	0,49	k-suelo	0,25
Ureasa 6-10cm	0,64	pH KCl	0,46	SO ₄ ⁻² solubles NaHCO ₃ 0.5N pH 8.5	0,21
% Limo	0,46	Ureasa 0-5cm	0,45	pH KCl	-0,16
% MDS	0,45	Fosfatasa ácida 6-10cm	0,41	% MDS	-0,38
Fosfatasa ácida 6-10 cm	0,45	Ca-suelo	0,33	% Limo	-0,45
Arisulfatasa 6-10cm	-0,24	Ureasa 6-10cm	0,22	Fosfatasa ácida 6-10 cm	-0,61
k-suelo	-0,25	Na-suelo	-0,18	Ureasa 6-10cm	-0,64
Fosfatasa ácida 0-5cm	-0,43	ppm P Olsen	-0,28	Arisulfatasa 0-5cm	-0,70
% Arcilla	-0,44	K-suelo	-0,30	ppm P-Bray	-0,73
SO ₄ ⁻² solubles H ₂ O	-0,65	N-suelo	-0,41	Ureasa 0-5cm	-0,74
ppm P-Olsen	-0,74	SO ₄ ⁻² solubles NaHCO ₃ 0.5N pH 8.5	-0,41	pH H ₂ O	-0,75
% Espacio poroso	-0,92	Fosfatasa ácida 0-5cm	-0,43	Fosfatasa alcalina 0-5cm	-0,85
		Arisulfatasa 6-10cm	-0,44		
		% Arcilla	-0,48		
		SO ₄ ⁻² solubles H ₂ O	-0,63		
		% Espacio poroso	-0,83		

% Arcilla		% Limo		% Arena	
Variable	Coficiente	Variable	Coficiente	Variable	Coficiente
% Limo	0,45	ppm P-Bray	0,58	Fosfatasa ácida 6-10cm	0,51
Fosfatasa ácida 0-5cm	0,42	Fosfatasa alcalina 6-10cm	0,43	SO ₄ ⁻² solubles NaHCO ₃ 0.5N pH 8.5	0,32
Na-suelo	0,39	Ureasa 6-10cm	0,42	pH H ₂ O	0,27
N-suelo	0,38	Fosfatasa alcalina 0-5 cm	0,32	Fosfatasa alcalina 0-5 cm	0,26
Mg-suelo	0,30	pH H ₂ O	0,32	Ureasa 0-5cm	0,22
ppm P-Olsen	0,29	Arisulfatasa 0-5cm	0,31	SO ₄ ⁻² solubles H ₂ O	0,17
Arisulfatasa 6-10cm	0,25	pH KCl	0,27	Fosfatasa ácida 0-5cm	-0,25
K-suelo	0,19	Mg-suelo	0,23	N-suelo	-0,28
SO ₄ ⁻² solubles H ₂ O	0,17	Na-suelo	0,22	Ureasa 6-10cm	-0,29
SO ₄ ⁻² solubles NaHCO ₃ 0.5N pH 8.5	-0,19	Ca-suelo	0,20	Mg-suelo	-0,32
ppm P-Bray	-0,30	Ureasa 0-5cm	0,17	Na-suelo	-0,37
Arisulfatasa 0-5cm	-0,44	Fosfatasa ácida 6-10cm	-0,27		
Ureasa 0-5cm	-0,45	SO ₄ ⁻² solubles NaHCO ₃ 0.5N pH 8.5	-0,38		
Fosfatasa ácida 6-10cm	-0,56	SO ₄ ⁻² solubles H ₂ O	-0,58		
Fosfatasa alcalina 0-5 cm	-0,61	% Arena	-0,79		
pH H ₂ O	-0,62				
% Arena	-0,90				



pH H ₂ O		pH KCl		N-suelo	
Variable	Coficiente	Variable	Coficiente	Variable	Coficiente
Fosfatasa alcalina 0-5 cm	0,79	Mg-suelo	0,61	Arilsulfatasa 6-10cm	0,69
ppm P-Bray	0,73	ppm P-Olsen	0,58	Fosfatasa ácida 0-5cm	0,57
pH KCl	0,59	Fosfatasa alcalina 6-10cm	0,56	Mg-suelo	0,52
Fosfatasa alcalina 6-10cm	0,53	Fosfatasa ácida 0-5cm	0,53	Na-suelo	0,49
Ureasa 0-5cm	0,44	Arilsulfatasa 6-10cm	0,38	Ureasa 6-10cm	0,33
Arilsulfatasa 0-5cm	0,42	ppm P-Bray	0,38	Ureasa 0-5cm	0,24
Fosfatasa ácida 6-10cm	0,38	Ca-suelo	0,37	K-suelo	-0,16
Ca-suelo	0,26	Na-suelo	0,17	ppm P-Olsen	-0,22
Na-suelo	-0,17	Ureasa 0-5cm	-0,20	Fosfatasa alcalina 0-5cm	-0,28
Arilsulfatasa 6-10cm	-0,19	Arilsulfatasa 0-5cm	-0,33	Ca-suelo	-0,35
Fosfatasa ácida 0-5cm	-0,23	SO ₄ ⁻² solubles H ₂ O	-0,37	Fosfatasa alcalina 6-10cm	-0,78
N-suelo	-0,32	Ureasa 6-10cm	-0,48		
K-suelo	-0,45	K-suelo	-0,50		
SO ₄ ⁻² solubles NaHCO ₃ 0.5N pH 8.5	-0,46	SO ₄ ⁻² solubles NaHCO ₃ 0.5N pH 8.5	-0,88		
SO ₄ ⁻² solubles H ₂ O	-0,68				

ppm P-Bray		ppm P-Olsen		K-suelo	
Variable	Coficiente	Variable	Coficiente	Variable	Coficiente
Arilsulfatasa 0-5cm	0,71	Fosfatasa ácida 0-5cm	0,6	SO ₄ ⁻² solubles NaHCO ₃ 0.5N pH 8.5	0,42
Fosfatasa alcalina 0-5cm	0,61	Fosfatasa alcalina 6-10cm	0,47	SO ₄ ⁻² solubles H ₂ O	0,37
Ureasa 0-5cm	0,5	Arilsulfatasa 6-10cm	0,44	SO ₄ ⁻² solubles HCl 0.025 N y NH ₄ F 0.003 N	0,16
Ca-suelo	0,39	Mg-suelo	0,35	Na-suelo	-0,17
Fosfatasa alcalina 6-10cm	0,38	Ca-suelo	0,18	Ureasa 0-5cm	-0,21
Ureasa 6-10cm	0,34	ppm P-Bray	-0,3	Fosfatasa ácida 0-5cm	-0,31
Na-suelo	0,3	SO ₄ ⁻² solubles NaHCO ₃ 0.5N pH 8.5	-0,5	Arilsulfatasa 6-10cm	-0,36
Mg-suelo	0,21	Fosfatasa alcalina 0-5cm	-0,6	Ca-suelo	-0,61
SO ₄ ⁻² solubles NaHCO ₃ 0.5N pH 8.5	-0,3	Fosfatasa ácida 6-10cm	-0,6	Mg-suelo	-0,67
K-suelo	-0,3	Ureasa 0-5cm	-0,8		
SO ₄ ⁻² solubles H ₂ O	-0,4	Arilsulfatasa 0-5cm	-0,8		
		Ureasa 6-10cm	-0,9		

SO ₄ ⁻² solubles HCl 0.025 N y NH ₄ F 0.003 N		SO ₄ ⁻² solubles NaHCO ₃ 0.5N pH 8.5		SO ₄ ⁻² solubles H ₂ O	
Variable	Coficiente	Variable	Coficiente	Variable	Coficiente
SO ₄ ⁻² solubles NaHCO ₃ 0.5N pH 8.5	0,26	SO ₄ ⁻² solubles H ₂ O	0,27	Fosfatasa ácida 0-5cm	0,16
SO ₄ ⁻² solubles H ₂ O	-0,16	Fosfatasa alcalina 6-10cm	-0,47	Fosfatasa alcalina 6-10cm	-0,32
		Fosfatasa ácida 0-5cm	-0,49	Fosfatasa alcalina 0-5cm	-0,65



Ca-suelo		Mg-suelo		Na-suelo	
Variable	Coefficiente	Variable	Coefficiente	Variable	Coefficiente
Fosfatasa alcalina 6-10cm	0,45	Fosfatasa ácida 0-5cm	0,78	Fosfatasa ácida 0-5cm	0,6
Mg-suelo	0,36	Arilsulfatasa 6-10cm	0,72	Arilsulfatasa 6-10cm	0,47
Na-suelo	0,24	Na-suelo	0,55	SO ₄ ⁻² solubles H ₂ O	0,34
Arilsulfatasa 6-10cm	-0,16	Ureasa 6-10cm	-0,16	Ureasa 6-10cm	0,29
SO ₄ ⁻² solubles NaHCO ₃ 0.5N pH 8.5	-0,35	Arilsulfatasa 0-5cm	-0,24	Ureasa 0-5cm	0,25
		Fosfatasa alcalina 0-5cm	-0,28	Fosfatasa alcalina 6-10cm	-0,23
		Fosfatasa ácida 6-10cm	-0,31	Fosfatasa ácida 6-10cm	-0,31
		SO ₄ ⁻² solubles NaHCO ₃ 0.5N pH 8.5	-0,58	SO ₄ ⁻² solubles NaHCO ₃ 0.5N pH 8.5	-0,34
				Fosfatasa alcalina 0-5cm	-0,41
				SO ₄ ⁻² solubles HCl 0.025 N y NH ₄ F 0.003 N	-0,5

Ureasa 0-5cm		Ureasa 6-10cm		Arilsulfatasa 0-5cm	
Variable	Coefficiente	Variable	Coefficiente	Variable	Coefficiente
Arilsulfatasa 0-5cm	0,79	Arilsulfatasa 0-5cm	0,67	Fosfatasa alcalina 0-5cm	0,69
Ureasa 6-10cm	0,67	Fosfatasa alcalina 0-5cm	0,42	SO ₄ ⁻² solubles NaHCO ₃ 0.5N pH 8.5	0,39
Fosfatasa alcalina 0-5cm	0,62	Fosfatasa ácida 6-10cm	0,4	Fosfatasa ácida 6-10cm	0,25
Fosfatasa ácida 0-5cm	0,55	SO ₄ ⁻² solubles NaHCO ₃ 0.5N pH 8.5	0,22	SO ₄ ⁻² solubles H ₂ O	-0,3
Fosfatasa alcalina 6-10cm	-0,27	Arilsulfatasa 6-10cm	-0,4	Arilsulfatasa 6-10cm	-0,3
Fosfatasa ácida 6-10cm	-0,3	Fosfatasa alcalina 6-10cm	-0,4	Fosfatasa ácida 0-5cm	-0,5
SO ₄ ⁻² solubles H ₂ O	-0,32	Fosfatasa ácida 0-5cm	-0,4		
SO ₄ ⁻² solubles HCl 0.025 N y NH ₄ F 0.003 N	-0,45				

Arilsulfatasa 6-10cm		Fosfatasa ácida 0-5cm		Fosfatasa ácida 6-10cm	
Variable	Coefficiente	Variable	Coefficiente	Variable	Coefficiente
Fosfatasa ácida 0-5cm	0,92	Fosfatasa alcalina 6-10cm	-0,2	Fosfatasa alcalina 0-5cm	0,61
SO ₄ ⁻² solubles NaHCO ₃ 0.5N pH 8.5	-0,26	Fosfatasa ácida 6-10cm	-0,5	Fosfatasa alcalina 6-10cm	-0,3
Fosfatasa alcalina 6-10cm	-0,35	Fosfatasa alcalina 0-5cm	-0,7		
Fosfatasa ácida 6-10cm	-0,45				
Fosfatasa alcalina 0-5cm	-0,53				

Fosfatasa alcalina 0-5cm	
Variable	Coefficiente
Fosfatasa alcalina 6-10cm	0,25



ANEXO C. Análisis de Componentes Principales

	Eigenvalue	Difference	Proportion	Cumulative				
1	13.4519372	6.0503854	0.3737	0.3737				
2	7.4015518	2.8173978	0.2056	0.5793				
3	4.5841540	1.8341304	0.1273	0.7066				
4	2.7500236	0.2444143	0.0764	0.7830				
5	2.5056093	0.9786462	0.0696	0.8526				
6	1.5269631	0.2972834	0.0424	0.8950				
7	1.2296797	0.1738532	0.0342	0.9292				
8	1.0558265	0.5144814	0.0293	0.9585				

	Prin1	Prin2	Prin3	Prin4	Prin5	Prin6	Prin7	Prin8
IND	0.248194	-.030453	-.025910	-.207342	-.056924	-.016529	-.052069	-.128754
REP	-.001224	-.000176	-.009509	0.125917	-.056936	0.460670	0.293136	-.615896
SITIO	0.254503	-.035386	-.013221	-.182381	-.009007	0.053304	-.093519	-.080058
EDAD	0.057584	-.070116	0.169872	0.317711	0.154281	0.222076	-.420458	0.115406
ALT	-.232476	-.063972	0.149962	0.116433	0.031541	-.015382	0.232773	0.159416
PromN	0.154803	0.156904	-.120761	0.041296	-.033531	-.152438	0.353992	-.078312
PromP	-.009642	0.197532	-.062210	0.128922	-.241125	-.193681	0.283931	0.021715
PromK	0.052405	0.089255	-.021245	-.323723	-.006327	-.458020	-.081863	0.240288
PromCa	0.047805	-.054960	0.226390	0.220975	0.359334	0.056369	-.267189	0.058933
CE	-.222431	0.207008	0.011084	-.031811	-.030098	0.072399	-.034168	0.038086
DR	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
DACilindro	-.223957	0.080127	-.231413	0.054742	0.021514	-.005815	-.125230	-.041248
PEP	0.215406	-.208419	0.021630	-.027072	-.071935	0.066122	0.106085	0.118800
PArcilla	0.218278	0.100845	0.045764	-.268613	0.123659	0.105746	-.061381	-.073426
PLimo	-.055753	0.240554	-.167327	-.295361	0.073265	0.279747	-.109511	0.069635
PArena	-.136557	-.192396	0.046939	0.344771	-.128272	-.215101	0.099185	0.021231
PMOS	0.023408	0.323868	0.193708	0.062135	-.102405	0.001281	-.038979	-.003017
pHact	-.201572	0.093223	-.236723	0.165855	-.114885	-.005437	-.126356	0.020737
pHKCl	0.109191	0.118642	-.316110	0.279024	-.084294	-.043794	-.170942	-.005645
PNsuelo	0.107987	0.267785	0.247498	-.012948	-.078073	-.033942	-.059590	-.083118
ppmPOlsen	0.214372	-.137232	-.191611	0.095067	-.108242	0.059943	-.008801	0.110274
ppmPBray	-.163879	0.208095	-.163584	0.114150	0.160644	0.140890	0.101325	0.213576
Ksuelo	-.083872	-.223501	0.261833	-.001550	-.168241	0.143229	-.034515	0.120345
Casuelo	0.019220	-.006343	-.266523	0.022223	0.490753	-.122658	0.148964	-.071038
Mgsuelo	0.188007	0.224606	-.018416	0.198408	0.086169	0.018084	0.050938	0.098232
Nasuelo	0.101227	0.267689	0.056974	0.109434	0.316347	0.004890	0.123974	0.056705
AU0_5	-.214697	0.197825	0.134749	-.011938	-.023575	-.025233	-.029645	-.047810
AU6_10	-.153273	0.207327	0.167794	-.172785	0.223194	-.026689	-.012967	-.142108
AAS0_5	-.234334	0.138668	0.032530	-.039343	0.082221	0.147292	0.136608	0.184778
AAS6_10	0.198670	0.183939	0.083643	0.153697	-.176509	0.067416	0.030987	0.148000
SO4_BRAY	0.169900	0.227454	0.130452	0.133072	-.178857	0.037352	-.001368	0.091712
SO4_OLSEN	-.132011	-.148012	0.254886	-.140196	0.002077	0.163124	0.320864	0.269693
SO4_H2O	0.110717	-.154517	0.105023	0.162741	0.394902	-.209646	0.221548	-.063286
AFac0_5cm	0.233272	0.150804	0.015723	0.175668	-.034269	-.004599	0.009783	0.062114
AFac6_10cm	-.182448	-.013916	0.129972	0.069936	-.035268	-.365406	-.219555	-.424690
AFal0_5cm	-.261844	0.060586	-.064401	-.014642	-.081513	-.003510	-.095619	-.041641
AFal6_10cm	-.048834	-.153353	-.401325	-.012865	0.014535	0.143156	-.042743	0.126494