



# UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

PROGRAMA DE POSGRADO EN CIENCIAS DE LA TIERRA  
INSTITUTO DE GEOLOGÍA-FES ZARAGOZA

*Calidad del suelo forestal y su distribución espacial en bosques  
de coníferas del Parque Nacional IztaPopo.*

## TESIS

QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE  
MAESTRO EN CIENCIAS DE LA TIERRA  
Presenta

JUAN MANUEL VALDERRÁBANO GÓMEZ

DIRECTOR DE TESIS  
DR. GERARDO CRUZ FLORES  
FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES ZARAGOZA-UNAM

MIEMBROS DEL COMITÉ TUTOR  
DRA. CHRISTINA SIEBE GRABACH, INSTITUTO DE GEOLOGÍA-UNAM  
DRA. ELIZABETH SOLLEIRO REBOLLEDO, INSTITUTO DE GEOLOGÍA-UNAM  
DR. JORGE ENRIQUE GAMA CASTRO, INSTITUTO DE GEOLOGÍA-UNAM  
M. EN C. ARMANDO CERVANTES SANDOVAL, FES ZARAGOZA-UNAM

MÉXICO, D. F., 2013



Universidad Nacional  
Autónoma de México



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

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

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

## **DEDICATORIA**

### **A Dios:**

*Por la oportunidad de seguirme superando profesional y personalmente, por el regalo que me diste hace 7 años (ya casi 8) al poner en mis manos la custodia de un ángel.*

### **A mi ángel de la guarda y maestro de vida Ángel Yael Valderrábano Ramos:**

*Gracias hijo...gracias por existir y convertirme en el motor que me aterriza y mueve mis sueños y aspiraciones, eres mi ejemplo de coraje, nobleza, trabajo y superación constante, a través de ti he visto con otros ojos a esos ángeles que a veces pasan inadvertidos y que en ocasiones hasta despreciamos, gracias porque por medio de ti Dios me ha dado la oportunidad de crecer también como ser humano...TE AMO pecoso.*

### **A mis padres Rita Gómez Juárez y Manuel Valderrábano Ramos:**

*Nuevamente, por medio de este escrito les reitero mi respeto y admiración por su sacrificio, comprensión y amor incondicional. Sin ustedes, la tarea encomendada por la vida sería prácticamente imposible.*

### **A Sandra Enriqueta Ramos Figueroa:**

*Iniciaste conmigo esta aventura, aún recuerdo tus "lonches" que me ponías cuando presenté los exámenes de ingreso y me sentaba en un árbol a degustarlos en CU mientras esperaba el siguiente examen. Gracias por darme la tranquilidad al tener tu apoyo incondicional y compartir conmigo la aventura y bendición de ser padres, colegas y amigos...En verdad...gracias por lo bueno y **perdón** por lo malo.*

# **AGRADECIMIENTOS**

## ***A la Universidad Nacional Autónoma de México:***

*Nuevamente por la oportunidad de formar parte de su gran y diversa comunidad, ahora de posgrado, por arroparme y dejarme sentir el orgullo y compromiso de ser universitario.*

## ***A mis asesores:***

*Dra. Elizabeth Solleiro Rebolledo, Dra. Christina Siebe Grabach, Dr. Jorge Enrique Gama Castro y M. en C. Armando Cervantes Sandoval por enriquecer el contenido de este trabajo.*

## ***A mi director de tesis Dr. Gerardo Cruz Flores:***

*Porque antes de ser un maestro, es un amigo, por la forma en que ha vertido sus conocimientos hacia mí, no solo académicos, sino también su experiencia de vida. Gracias por sus consejos que me han hecho crecer como profesionalista y persona.*

## ***A María Enriqueta Figueroa Rubio:***

*Por tener una paciencia infinita y soportar al inmaduro padre de su nieto, sin su apoyo habría sido muy difícil llevar a cabo mis metas...En verdad muchas gracias.*

## ***A Francisco Vásquez Vásquez (Espero que ahora si esté bien escrito):***

*Brother...pues que te puedo decir...simplemente gracias por todo el tiempo que has compartido conmigo aventuras y desventuras...y lo que falta.*

**A Alonso Altuzar Román:**

*A través de este escrito quiero expresarle mi más sincero respeto y admiración por la gran persona y profesionalista que es. Usted me ha enseñado que la humildad, sencillez y espíritu humano no tienen precio. Gracias por sus regaños, pero también por su entrega y compromiso para con Yael, porque él avanza gracias a usted...y a pesar de sus padres.*

*Sinceramente gracias a todos:*

*Juan Manuel*

# Índice temático

## Capítulo página

<b>Índice de Cuadros</b> .....	i
<b>Índice de Figuras</b> .....	vi
<b>Resumen</b> .....	x
<b>Summary</b> .....	ix
<b>1 Introducción</b> .....	2
1.1 Antecedentes .....	2
1.2 Planteamiento y justificación .....	3
1.3 Hipótesis .....	3
1.4 Objetivos .....	4
1.4.1 General.....	4
1.4.2 Particulares .....	4
1.5 Revisión de Literatura.....	5
1.5.1 Concepto de suelo y su calidad .....	5
1.5.2 Carbono (C), Nitrógeno (N) y Fósforo (P) como indicadores de calidad de suelo .....	7
1.5.3 Análisis estadístico multivariado (AEM) .....	11
1.5.4 Análisis de componentes principales (ACP).....	11
1.5.5 Sistemas de información geográfica (SIG).....	12

1.6. Metodología.....	12
1.6.1 Descripción y ubicación de la zona de estudio.....	12
1.6.2 Trabajo de gabinete.....	14
1.6.2.1 Calidad del suelo y análisis de componentes principales.....	18
1.6.2.2 Análisis de correlación simple.....	19
1.6.2.3 Conformación de información espacial.....	19
1.6.3 Trabajo de campo.....	20
1.6.4 Trabajo de laboratorio.....	21
<b>2 Resultados y Discusión.....</b>	<b>23</b>
2.1 Suelos dominantes en la zona PN IztaPopo y su zona de influencia.....	23
2.2 Tipos de vegetación.....	32
2.3 Propiedades bioquímicas y calidad del suelo.....	37
2.4 Propiedades químicas y calidad del suelo.....	49
2.4.1 Contenido de carbono orgánico del suelo (COS).....	58
2.4.2 Nitrógeno total del suelo (N-total).....	62
2.4.3 Fósforo disponible del suelo.....	65
2.4.4 Bases intercambiables y fertilidad de los suelos.....	71
2.5 Propiedades físicas y calidad del suelo.....	85
2.6 Valor total de calidad del suelo.....	92
2.6.1 Calidad total de suelo y su relación con la productividad forestal y contenidos de N y P en tejido foliar.....	98
2.7 Análisis y discusión de resultados.....	104
<b>3 Conclusiones.....</b>	<b>116</b>
<b>4 Literatura citada.....</b>	<b>117</b>
<b>Apéndice 1.....</b>	<b>129</b>

<b>Apéndice 2</b> .....	146
<b>Apéndice 3</b> .....	147



# Índice de cuadros

<b>Cuadro</b>	<b>página</b>
1. Grupos de suelo reportados por INEGI .....	23
2. Grupos de suelo reportados por Miehlich (1980) y WRB (2006) .....	24
2. Grupos de suelo reportados por Miehlich (1980) y WRB (2006) (Continuación) .....	25
3. Descripción de perfiles de suelos dominantes en el PN IztaPopo .....	29
3. Descripción de perfiles de suelos dominantes en el PN IztaPopo (Continuación) .....	30
3. Descripción de perfiles de suelos dominantes en el PN IztaPopo (Continuación) .....	31
4. Período de humedad del suelo .....	34
5. Descripción fisiográfica y edáfica de los sitios.....	36
6. Propiedades bioquímicas de los suelos del PN IztaPopo .....	37
7. Eigenvalores de las propiedades bioquímicas del suelo.....	38
8. Eigenvectores de las propiedades bioquímicas del suelo.....	38
9. Valor de calidad de suelo estimado por sus propiedades bioquímicas .....	42
9. Valor de calidad de suelo estimado por sus propiedades bioquímicas (Continuación) .....	43
10. Coeficientes de correlación entre calidad de suelo y propiedades bioquímicas.....	44
11. Coeficientes de correlación para COS, CO <sub>2</sub> y CBM.....	47
12. Descripción de propiedades químicas de los suelos del PN IztaPopo .....	49

<b>Cuadro</b>	<b>página</b>
12. Descripción de propiedades químicas de los suelos del PN IztaPopo (continuación).....	50
13. Eigenvalores de las propiedades químicas del suelo.....	50
14. Eigenvectores de las propiedades químicas del suelo.....	51
15. Calidad de suelo estimada por sus propiedades químicas.....	51
15. Calidad de suelo estimada por sus propiedades químicas (Continuación) ....	52
16. Coeficientes de correlación para la calidad de suelo por parámetros químicos.....	55
16. Coeficientes de correlación para la calidad de suelos por parámetros químicos (Continuación).....	56
17. Coeficientes de correlación para el valor de calidad de suelo por parámetros químicos.....	59
18. Coeficientes de correlación del P-disponible del suelo.....	69
19. Coeficientes de correlación del Na intercambiable del suelo.....	73
20. Coeficientes de correlación del K intercambiable del suelo.....	74
21. Coeficientes de correlación del Ca intercambiable del suelo.....	77
22. Contenidos de bases intercambiables en diferentes zonas de estudio.....	81
23. Contenidos de bases intercambiables, N-total y P-disponible en suelos bajo bosques de coníferas en diferentes zonas de estudio.....	81
24. Intervalos de nivel de fertilidad edáfica.....	82
25. Nivel de fertilidad edáfica propuesto para los suelos del PN IztaPopo.....	83
25. Nivel de fertilidad edáfica propuesto para los suelos del PN IztaPopo (Continuación).....	84
26. Propiedades físicas del suelo.....	85
27. Eigenvalores de las propiedades físicas del suelo.....	86

<b>Cuadro</b>	<b>página</b>
28. Eigenvectores de las propiedades físicas del suelo.....	86
29. Valor de calidad de suelo estimada por sus propiedades físicas .....	89
30. Comparación de propiedades físicas en sitios con calificación máxima y mínima .....	90
31. Variables robustas de las propiedades de los suelos del PN IztaPopo.....	92
32. Valor total de calidad de suelo para el PN IztaPopo .....	93
33. Comparación de valores extremos de calidad de suelo .....	94
34. Análisis de correlación del valor total de calidad del suelo.....	96
35. Valor de calidad de suelo en bosques de <i>Pinus</i> y de <i>Abies religiosa</i> .....	97
36. Productividad forestal en el PN IztaPopo.....	101
37. Productividad forestal máxima y mínima en suelos bajo <i>Abies religiosa</i> y <i>Pinus</i> .....	102
38. Intervalos de valores experimentales de las variables robustas, productividad forestal y valor de calidad de suelo total .....	103

## Apéndice 1

Cuadro	página
1. Propiedades químicas del suelo utilizadas o propuestas como indicadores de calidad del suelo .....	129
1. Propiedades químicas del suelo utilizadas o propuestas como indicadores de calidad del suelo (Continuación) .....	130
2. Contenido de carbono y coeficientes metabólicos.....	131
3. Contenido promedio de carbono del suelo y coeficientes metabólicos por tipo de vegetación .....	132
4. Nitrógeno en suelo, relación C:N y porcentaje de nitrógeno foliar en especies arbóreas dominantes.....	133
4. Nitrógeno en suelo, relación C:N y porcentaje de nitrógeno foliar en especies arbóreas dominantes (Continuación).....	134
5. P-disponible, carbono y materia orgánica del suelo y pH activo .....	135
5. P-disponible, carbono y materia orgánica del suelo y pH activo (Continuación) .....	136
6. Porcentajes de N y P en tejido foliar y su relación con la fertilidad del suelo y valor de calidad de suelo .....	137
7. Calidad del suelo por parámetros químicos y características del sitio .....	138
7. Calidad del suelo por parámetros químicos y características del sitio (Continuación).....	139
8. Cuadro resumen de los valores de calidad del suelo por parámetros bioquímicos, químicos, físicos y total del PN IztaPopo .....	140
9. Intervalos de estadio nutrimental propuestos para las especies de <i>Pinus</i> y <i>Abies religiosa</i> del Parque Nacional Zoquiapan y Anexas.....	141

## Apéndice 1

<b>Cuadro</b>	<b>página</b>
10. Contenido nutrimental de N y P en tejido foliar en sitios con <i>Abies religiosa</i> en el PN IztaPopo.....	142
11. Contenido nutrimental de N y P en tejido foliar de sitios con especies de <i>Pinus</i> en el PN IztaPopo .....	143
12. Volumen maderable en bosques de <i>Pinus</i> del PN IztaPopo .....	144
13. Volumen maderable en bosques de <i>Abies religiosa</i> del PN IztaPopo .....	145

## Apéndice 2

a). Procedimiento para obtener el nivel de fertilidad edáfica (NFE).....	146
--	-----

## Apéndice 3

A. Análisis de regresión múltiple para N-total, altitud, precipitación y temperatura media anual. ....	147
B. Análisis de regresión múltiple para P-disponible, pH activo, altitud, precipitación y temperatura media anual .....	148
C Análisis de regresión múltiple para el volumen maderable, conductividad eléctrica y valor total de calidad de suelo .....	150

# Índice de figuras

<b>Figura</b>	<b>página</b>
1. Estratificación del suelo .....	6
2. Reacción química general de las fosfatasas .....	10
3. Panorámica del Iztaccíhuatl y Popocatepetl.....	13
4. Ubicación geográfica del Parque Nacional IztaPopo, Zoquiapan y su Zona de Influencia .....	17
5. Distribución de grupos de suelo reportados por INEGI (2009) y Miehlich (1980).....	26
6. Cambisol en el sitio denominado “Cruce El 8” .....	27
7. Andosol en el sitio denominado “S de El Salto”.....	27
8. Andosol en el sitio denominado “Amalacaxco” .....	28
9. Andosol en el sitio denominado “La Joya” .....	28
10. Distribución de los sitios de estudio.....	32
11. Sitio “La Joya” a 3858 m snm .....	33
12. Período de humedad y principales grupos de suelo según Miehlich (1980).....	35
13. Gráfica de CP <sub>1</sub> (producción de CO <sub>2</sub> del suelo) .....	40
14. Gráfica de CP <sub>2</sub> definido por la fosfatasa alcalina .....	40
15. Calidad del suelo por parámetros bioquímicos .....	45
16. Relación entre la producción de CO <sub>2</sub> del suelo con altitud.....	46

<b>Figura</b>	<b>página</b>
17. Producción de CO <sub>2</sub> del suelo por tipo de vegetación.....	46
18. Producción de CO <sub>2</sub> /CBM con la altitud.....	48
19. Carbono lábil por tipo de vegetación.....	48
20. Gráfica de CP <sub>1</sub> por propiedades químicas del suelo.....	52
21. Gráfica de CP <sub>2</sub> por propiedades químicas del suelo.....	53
22. Gráfica de CP <sub>3</sub> y CP <sub>4</sub> por propiedades químicas del suelo.....	54
23. Distribución del valor de calidad de suelo por parámetros químicos.....	57
24. Carbono orgánico del suelo con relación a la altitud.....	58
25. Relación entre carbono orgánico del suelo, N-total y N-foliar.....	59
26. Promedio y distancia estándar espacial del carbono orgánico del suelo.....	60
27. Distribución espacial del N-total.....	61
28. Contenido de N-total del suelo de acuerdo con temperatura media anual, precipitación media anual y altitud.....	62
29. Relación C:N por tipo de vegetación.....	62
30. Distribución espacial de la relación C:N.....	64
31. N-total del suelo, porcentaje de N-foliar y relación C:N del suelo.....	65
32. Distribución espacial del P-disponible del suelo.....	67
33. P-disponible y su relación con altitud, temperatura y precipitación.....	68
34. Relación entre P-disponible y reacción del suelo.....	69
35. Relación entre P-disponible con porcentaje de materia orgánica y pH activo del suelo.....	70

<b>Figura</b>	<b>página</b>
36. Distribución espacial de Na intercambiable en suelos del PN IztaPopo.....	72
37. Na intercambiable por tipo de vegetación.....	73
38. Distribución de K intercambiable en suelos del PN IztaPopo.....	75
39. K intercambiable por tipo de vegetación.....	76
40. Ca intercambiable por tipo de vegetación.....	76
41. Distribución espacial de Ca intercambiable.....	78
42. Mg intercambiable por tipo de vegetación.....	79
43. Distribución espacial de Mg intercambiable.....	80
44. Calificación de CP <sub>1</sub> , por parámetros físicos del suelo.....	87
45. Calificación de CP <sub>2</sub> , por parámetros físicos del suelo.....	87
46. Calificación de CP <sub>3</sub> , por parámetros físicos del suelo.....	88
47. Distribución espacial del valor de calidad de suelo por parámetros físicos.....	91
48. Porcentajes de sitios y valor de calidad de suelos total.....	94
49. Clases de calidad total de suelo y producción de CO <sub>2</sub> del suelo.....	95
50. Variables robustas y clase de calidad total de suelos.....	95
51. Análisis de varianza entre tipo de vegetación, valor total de calidad de suelos y valor de calidad de suelos por parámetros químicos.....	96
52. Relación CO <sub>2</sub> /CBM y valor total de calidad del suelo.....	97
53. Distribución espacial del valor total de calidad de suelo.....	99



<b>Figura</b>	<b>página</b>
54. Análisis de varianza entre <i>Pinus</i> y <i>Abies religiosa</i> con el valor total de calidad de suelos y N-foliar .....	100
55. Volumen maderable .....	100
56. Análisis de varianza de volumen maderable entre <i>Abies religiosa</i> y <i>Pinus</i> spp de la zona IztaPopo.....	101
57. Relación entre CO <sub>2</sub> /CBM con el valor total de calidad de suelos y el volumen maderable en suelos bajo <i>Abies religiosa</i> y <i>Pinus</i> .....	102

## Resumen

En un área aproximada de 200 km<sup>2</sup> dentro del Parque Nacional IztaPopo y su zona de influencia se estudiaron 39 sitios trazando cuadrantes de 50 m × 20 m = 1000 m<sup>2</sup> colectando en cada uno al azar cinco muestras de suelo (0-0.2 m de profundidad) para determinar características físicas y químicas y ocho muestras (0-0.1 m) para las bioquímicas. Se tomaron muestras al azar de tejido foliar en individuos de *Pinus* y *Abies religiosa* y analizaron contenidos de N y P, registrando su diámetro a la altura del pecho para estimar productividad forestal. Del análisis de componentes principales (ACP), de 23 variables edáficas, se obtuvieron 9 variables robustas (VR) que explican 80% de la variabilidad total (evolución de CO<sub>2</sub> del suelo, actividad de la fosfatasa alcalina, materia orgánica del suelo, pH activo, Na y Mg intercambiables, porcentaje de arena, conductividad eléctrica y densidad real). Con las variables robustas y un modelo aditivo por grupo de parámetros se asignó a cada sitio un Valor de Calidad de Suelo (VCS) y estimó el Valor Total de Calidad de Suelo (VTCS = parámetros bioquímicos + parámetros físicos + parámetros químicos). Para conocer la relación entre VTCS con productividad forestal y porcentajes de N y P foliares, se realizó un análisis de correlación. Bosques de *A. religiosa* y *Pinus* más productivos se relacionaron con suelos agrupados en calidad media. *A. religiosa* tuvo mayor productividad forestal y más concentración de N-foliar, sus suelos tuvieron más contenido de N-total, menor desprendimiento de CO<sub>2</sub>, menor relación CO<sub>2</sub>/CBM y fueron menos ácidos que los desarrollados bajo *Pinus*. Con información vectorial procesada en un sistema de información geográfica (SIG) se delimitó el Parque Nacional (PN) y su zona de influencia (ZI), se obtuvo la distribución y extensión de los tipos de suelo a partir de mapas edafológicos digitalizados. Los grupos de suelo principales fueron Andosol, Cambisol, Feozem, Litosol y Regosol. De la vegetación, el bosque de pino (*Pinus* spp.) se distribuyó de 2650 a 3828 m snm, destacando *P. montezumae*, *P. pseudostrobus*, *P. teocote*, *P. patula* y *P. hartwegii*. *Abies religiosa* se observó de 2832 a 3585 m snm formando asociaciones con *Alnus*, *Quercus*, *Cupressus*, *Cornus* y *Pinus*. Con base en los contenidos de Na, K, Ca y Mg intercambiables, N-total y P-disponible del suelo se determinó la fertilidad edáfica, encontrándola entre media y muy alta. La evolución de CO<sub>2</sub> del suelo, el carbono de la biomasa microbiana, pH activo, conductividad eléctrica, carbono orgánico del suelo y N-foliar fueron las variables que mejor caracterizaron a los sitios de mayor productividad forestal.

# 1. INTRODUCCIÓN

## 1.1 Antecedentes

El concepto de calidad del suelo (CS), tiene como base la premisa de manejo, estabilización y mejoramiento de sus funciones en los ecosistemas terrestres tendientes a promover la salud vegetal y animal, de ahí que la CS es resultado de la combinación de sus atributos físicos, químicos y biológicos (Board on Agriculture, 1993; Doran y Parkin, 1994; Franzluebbbers, 2002). Los indicadores que habrán de usarse para evaluar CS deben reflejar sus procesos, integrar sus propiedades y ser sensibles a cambios ambientales, para poder generar métodos que evalúen la calidad edáfica y sus cambios generalizados. La diversidad de suelos es uno de los factores que dificulta que sea propuesto un índice que combine todas sus propiedades en una fórmula sencilla y permita comparar la CS entre sitios y parcelas (Janvier *et al.*, 2007; Velásquez *et al.*, 2007; Zornoza *et al.*, 2007). Para evaluar la calidad del suelo en un marco de sustentabilidad, el conocimiento de sus características permite entender cuáles influyen más en la salud vegetal y animal.

Por su variedad de geoformas, sustratos geológicos de diversas edades y gradiente altitudinal que influye sobre diversos tipos de vegetación que van desde zacatonales montanos hasta plantas de cultivos agrícolas o forrajes con vegetación de bosques templados, como buena parte del país, el Parque Nacional IztaPopo que es la zona de estudio posee un mosaico con gran diversidad de suelos.

Como en la presente investigación donde se agrupan las propiedades del suelo en tres diferentes grupos, cuando se pretende analizar amplios conjuntos de datos de diferentes variables en diversas Unidades Experimentales (UE), se pueden aplicar técnicas de análisis estadístico multivariado. Entre estos, el Análisis de Componentes Principales (ACP) es útil para cribar datos de variables múltiples por su utilidad para agrupar las UE en subgrupos semejantes (Johnson, 2000), como puede ser el análisis de CS de diferentes unidades edáficas con distinto manejo.

Ante la aplicación inapropiada de los métodos de la estadística clásica que ignoran las asociaciones espaciales entre los datos que se analizan, recientemente se ha incrementado la demanda y uso del análisis estadístico inherente a los Sistemas de

Información Geográfica (SIG) que pueden procesar y transformar la información espacial para construir modelos predictivos y mapas relacionados con la información contenida en la base de datos (Jay y Wong, 2001; ESRI, 2002; MapInfo Corporation, 2004).

Con la determinación y estudio de las propiedades físicas, químicas y bioquímicas del suelo, el objetivo de esta investigación fue conocer la calidad de los suelos del Parque Nacional IztaPopo, utilizando para cada grupo de propiedades, un ACP que destacara las variables robustas y, mediante un modelo aditivo, se agrupara a lo diversos sitios en clases de calidad del suelo para representarlas espacialmente mediante un SIG.

## **1.2 Planteamiento y justificación**

El cambio de uso del suelo y la degradación forestal afectan los ciclos biogeoquímicos que se realizan sobre el suelo y perturban la salud y calidad de los sistemas forestales, que dependen de los nutrimentos presentes en el suelo que puede considerarse como recurso no renovable por su lenta tasa de formación y por ser un sistema heterogéneo al que se dificulta establecerle estándares de calidad.

Con base en el análisis de las propiedades físicas, químicas y bioquímicas de los suelos forestales del Parque Nacional IztaPopo, procesadas con un análisis de componentes principales y un sistema de información geográfica, esta investigación contribuye al conocimiento del estado de la calidad del suelo y de su distribución espacial.

## **1.3 Hipótesis**

La diferenciación y agrupación de los sitios con suelos forestales de distinta calidad, para la productividad forestal, obtenida mediante el análisis de componentes principales, permite identificar a los suelos de mayor calidad que son los que acumulan más COS y tienen menor relación C:N para inducir mayor productividad forestal y porcentajes superiores de N y P en tejido foliar de las especies que sustentan.

## 1.4 Objetivos

### 1.4.1 General

Explorar mediante análisis de componentes principales de algunas propiedades físicas, químicas y bioquímicas, un modelo de agrupamiento de diferentes niveles de calidad de suelos forestales en el Parque Nacional IztaPopo y su área de influencia que, validado con la productividad forestal y porcentaje de N y P en tejido foliar de las especies sustentadas, permita zonificarlos y conocer su distribución espacial con apoyo en un SIG.

### 1.4.2 Particulares

- Identificar y establecer índices derivados de parámetros físicos, químicos, y bioquímicos para determinar la calidad de los suelos.
- Conocer los capitales de C, N-total y de P-disponible del horizonte biológico (0-0.2m) en los suelos bajo bosques de *Pinus* y *Abies religiosa*.
- Conocer la relación existente entre calidad del suelo con productividad forestal y porcentajes de N y P en tejido foliar.
- Evaluar la fertilidad edáfica mediante la cuantificación de los contenidos de N-total y K, Ca, Mg y Na intercambiables en suelos bajo *Pinus* y *Abies religiosa* y conocer su relación con el modelo de calidad del suelo.
- Contribuir al estudio y análisis espacial de la calidad de los suelos en el Parque Nacional IztaPopo y zona de influencia.

## 1.5 Revisión de literatura

### 1.5.1 Concepto de suelo y su calidad

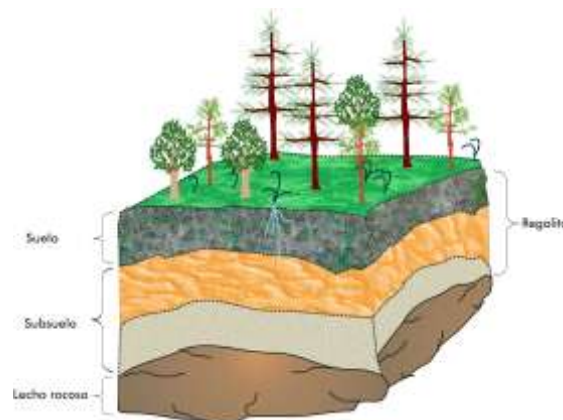
El concepto de calidad de suelo surge en la década de los 90 en respuesta al interés mundial sobre el manejo sostenible de la tierra con un enfoque integral y recalcando que la gestión de los suelos requiere algo más que el control de su erosión (Douglas *et al.*, 2003). En la Conferencia de las Naciones Unidas sobre el Ambiente y el Desarrollo en Río 1992, dicho concepto se concibe para caracterizar el estado del ambiente y monitorear los cambios ocurridos en él. Por ello, se impulsó el uso de indicadores para evaluar la calidad ambiental; entre ellos, la calidad del suelo. Como el aire o el agua, el suelo es un componente crítico de la biósfera que tiene un profundo efecto sobre la salud y productividad de un ecosistema.

El suelo no solo funciona como productor de alimento y fibra, sino que también cumple con el mantenimiento de la calidad del ambiente, razón que ha generado un interés creciente para evaluar su calidad (Doran y Parkin, 1994; Franzluebbers, 2002), mediante la selección y uso de indicadores que se caracterizan por simplificar información relevante de un fenómeno, haciéndolo perceptible y cuantificable, aunque también puede ser cualitativo o nominal (Cantú *et al.*, 2007; Janvier *et al.*, 2007).

Se han sugerido diferentes técnicas analíticas (regresión lineal simple, índices de calidad/fertilidad) y multivariadas que proporcionan información adecuada de indicadores para establecer la calidad del suelo (Zornoza *et al.*, 2007). La regresión lineal múltiple ha sido usada satisfactoriamente en suelos forestales y agrícolas. Entre los indicadores de calidad edáfica hasta ahora estudiados se encuentran (Apéndice 1-Cuadro 1): la textura, densidad aparente y real, color, pH activo y potencial, conductividad eléctrica, porcentaje de materia orgánica y nitrógeno total; además de la disponibilidad de nutrimentos esenciales, respiración del suelo como indicador de actividad microbiana (Schoenholtz *et al.*, 2000) y estado nutrimental de comunidades de *Pinus* y *Abies religiosa* (Granados-Damián, 2003; García-Hernández, 2003; Valderrábano-Gómez, 2005). Las especies del género *Pinus* y *Abies religiosa* son coníferas pertenecientes a los ecosistemas templados subhúmedos de México (Challenger, 1998) y, debido a su clima favorable, sus suelos han sido afectados por el uso agrícola, ganadero y de asentamientos humanos (Romeu, 1995; Farjon, 1997).

El suelo definido como un cuerpo natural que posee tanto profundidad como extensión, es dinámico y vital para el funcionamiento de los ecosistemas terrestres. En promedio se forma a una tasa de 1 cm por cada 100 a 400 años por interacción del clima, topografía, biota y material parental; por lo que puede considerarse como un recurso no renovable en la escala humana de tiempo (Doran y Parkin, 1994). En el desarrollo del suelo y la vegetación intervienen factores relativamente independientes, uno de ellos es el clima. Suelo-vegetación-clima forman un complejo dinámico e interrelacionado, y cuando uno de ellos se altera, los demás cambian de manera similar para establecer un nuevo equilibrio (Pritchett, 1991). Por estar cerca de la atmósfera, la zona superior del suelo está más influenciada por el viento, la lluvia y cambios de temperatura; además de ser el asiento de las raíces de las plantas (Buckman y Brady, 1991), por ello los residuos vegetales depositados en la superficie del suelo contribuyen con compuestos orgánicos que son descompuestos por microorganismos y, mediante la humificación y mineralización los elementos nutritivos, son aprovechados por la biota del suelo. La materia orgánica descompuesta en diferente estado de degradación junto con la meteorización de los minerales, origina una estratificación horizontal en el suelo (Figura 1). El suelo superficial modificado bioquímicamente se puede distinguir del material subyacente por:

- Contenido relativamente alto de materia orgánica (2-5%).
- Abundancia de raíces de plantas superiores y microorganismos del suelo.
- Meteorización más intensa.
- Presencia de capas horizontales características producto de detritus orgánicos en diferente estado de descomposición.



**Figura 1.** Estratificación del suelo. Se ejemplifica un suelo bien desarrollado donde se observan sus horizontes (modificado de Buckman y Brady, 1991).

Los componentes del suelo incluyen materiales minerales (arena, limo y arcilla), agua, gases, materia orgánica y organismos vivos donde existen el intercambio de iones y moléculas mediante procesos químicos, físicos y biológicos, todo lo cual puede influir en la salud de un bosque al depender de estas interacciones y de los nutrimentos tomados del suelo; por la que la calidad de éste puede medirse con base en el estado nutricional de las especies vegetales (Pritchett, 1991; Etchevers *et al.*, 2000; Velázquez *et al.*, 2001). Al perderse alguno o varios de los elementos esenciales del suelo, se provoca una degradación de los ecosistemas forestales, de la reserva genética y se alteran los ciclos hidrológico y biogeoquímicos (Narváez, 2001; Velásquez *et al.*, 2007).

### **1.5.2 Carbono (C), Nitrógeno (N) y Fósforo (P) del suelo como indicadores de su calidad**

El C es uno de los macronutrimentos más ampliamente distribuido en la naturaleza; en diversos minerales como carbonatos y bicarbonatos en el agua y en el aire como CO<sub>2</sub> y CH<sub>4</sub>. Aproximadamente 50% del peso seco de cualquier organismo lo constituye el C y una de sus fuentes principales, en el caso de los productores primarios, es el CO<sub>2</sub> atmosférico. La materia orgánica del suelo (MOS) representa la mayor reserva de C dentro de la biósfera (Ordóñez, 1999; López Pérez, 2002).

El ciclo de C combina diversos procesos. Se estima que las plantas terrestres fijan mediante la fotosíntesis 60 Gt (gigatoneladas) de C anuales y su *detritus* es descompuesto por microorganismos y otros seres vivos que habitan en el suelo. Este proceso libera una parte del C contenido en sus tejidos vegetales reintegrándolo a la atmósfera (Enkerlin *et al.*, 1997; Celis, 2003). Se ha calculado que por deforestación se libera anualmente 1 Gt de C hacia la atmósfera, y sumado al liberado por combustibles fósiles, resulta un aporte anual de 5 a 6 Gt de C por año, ocasionando un aumento en la concentración de CO<sub>2</sub> en la atmósfera y consecuentemente en la temperatura global (IPCC, 1995; Enkerlin *et al.*, 1997).

Si un organismo o un ecosistema absorbe más C del que libera, se dice que son un reservorio; por el contrario, cuando absorben menos C del liberado son considerados como fuente (Celis, 2003).

Se calcula que dos terceras partes del total de C de los ecosistemas forestales se encuentra en el suelo, 0.3% en la fauna edáfica y 0.03% en la atmósfera en forma de CO<sub>2</sub>



(Ordóñez J, 1999), mientras que algunos datos indican que en los primeros 100 cm del suelo se almacenan de 1462 a 1548 Pg (petagramos) de C en forma de materia orgánica; por ello, ésta se considera como un indicador de la calidad. Del contenido de C en el suelo (COS) dependen la disponibilidad de otros nutrimentos y el manejo de residuos del sistema (López Pérez, 2002; González-Molina *et al.*, 2008). Cambios en el contenido de COS influyen en la concentración de CO<sub>2</sub> en la atmósfera y en la disponibilidad de N para las plantas. Muchos factores impactan el ciclo biogeoquímico del COS y por consecuencia se altera su distribución espacial y temporal (Hancock *et al.*, 2010). Un factor importante es el cambio de uso de suelo, pues se estima que el cambio de vegetación nativa a suelos agrícolas provocó durante la década de 1990 una pérdida de COS de aproximadamente 40 Pg C (Fu *et al.*, 2010).

El nitrógeno que se presenta como N<sub>2</sub> en la atmósfera y constituye 78% de ella, también se encuentra en la litósfera en forma de sal como NaNO<sub>3</sub> (conocido comúnmente como nitrato de Chile), y en las plantas y animales en forma de proteínas (Sienko y Plane, 1990; Brownlow, 1996). En la atmósfera se combina con O<sub>2</sub> para formar N<sub>2</sub>O<sub>3</sub> y N<sub>2</sub>O<sub>5</sub> (anhídridos) "precursores" de los ácidos nitroso y nítrico y también con H<sub>2</sub>, para producir amoníaco (NH<sub>3</sub>). El N es un elemento esencial para el crecimiento de todos los organismos debido a la síntesis de ácidos nucleicos y otros componentes celulares. El triple enlace entre los átomos de N hace a la molécula casi inerte; por lo que no puede ser aprovechado de manera libre por la mayoría de las formas vivientes. Para ser utilizado deber ser primero reducido y luego fijado en forma de iones amonio (NH<sub>4</sub><sup>+</sup>) por grupos de microorganismos que incluyen algas, bacterias y actinomicetes. El N en el suelo normalmente se encuentra de 0.02 a 0.5%; pero un valor de 1.5% es representativo. Se estima que una hectárea de suelo podría llegar a contener cerca de 3.3 Megagramos (Mg) de N<sub>2</sub>, mientras que el aire en la superficie de ese suelo podría tener aproximadamente 300,000 Mg. En la planta, el contenido de N varía de 2 a 4% en materia seca del que 80 a 85% corresponde a proteínas y 10% a los ácidos nucleicos (Corona, 2007).

El ciclo del nitrógeno se puede dividir en dos "miniciclos" (Tate III, 1995):

- 1) Los procesos llevados a cabo en la atmósfera que implican la conversión de N<sub>2</sub> atmosférico a formas disponibles para la biota del ecosistema mediante descargas eléctricas, donde el nitrógeno molecular se convierte en diversos óxidos

de nitrógeno que se disuelven en el agua de la atmósfera y llegan al suelo con la precipitación.

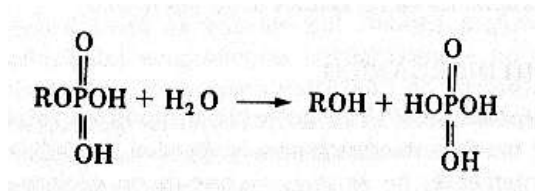
2) Una porción del ciclo del N residente en el suelo (fijado de la atmósfera por microorganismos del suelo) convertido a compuestos nitrogenados orgánicos y minerales (amonificación y nitrificación) disponibles para la biota edáfica (plantas, microbios e indirectamente animales).

Las etapas del ciclo de N en la biota inician cuando el N absorbido por las plantas es transformado en su interior a las formas R-N=, R-NH, R-NH<sub>2</sub>. Este N reducido es asimilado en compuestos más complejos y finalmente transformado en proteínas. Con un excesivo contenido de N en la planta, se reduce la acumulación de hidratos de carbono en la célula y la pared celular puede verse afectada y obtenerse plantas más débiles. Una deficiencia de este elemento en la planta se manifiesta con hojas amarillas, y cuando se secan de color café claro, tallos cortos y muy delgados si el elemento es deficiente en estadios avanzados del crecimiento. Las partes aéreas son delgadas, ahiladas y de crecimiento vertical con hojas de tamaño reducido y en algunos casos, con baja temperatura puede aparecer alguna tonalidad púrpura. La deficiencia es más frecuente al principio de la primavera tras periodos de lluvia intensa y en la época de maduración en condiciones de baja temperatura (Salisbury y Ross, 2000).

El contenido de N mineralizable junto con COS son parámetros sensibles a pequeños cambios edáficos y proporcionan información exacta e inmediata de cambios en la calidad del suelo. La relación carbono-nitrógeno (C:N) determina el grado que existe de mineralización de la materia orgánica en el suelo, así como el tipo de humus que se encuentra en él. Cuanto menor sea el valor de la relación, mayor será el grado de mineralización de la materia orgánica y la calidad edáfica será superior (Pajares-Moreno *et al.*, 2010).

Con respecto al ciclo del P, este elemento no forma compuestos volátiles que le permitan pasar de los océanos a la atmósfera y retornar a tierra firme. Sin embargo, participa tanto en un ciclo interno como en uno global y geológico. En el interno, la materia orgánica es descompuesta y el P queda disponible para ser absorbido por las raíces de la planta donde se unirá a compuestos orgánicos. En los sistemas marinos solo tiene dos mecanismos para su reciclaje desde el océano hacia los ecosistemas terrestres. Uno mediante las aves marinas que lo devuelven a tierra firme en sus excrementos. Otra parte

es absorbida por el plancton que; a su vez, es comido por peces filtradores de éste. Cuando estos peces son comidos por aves que tienen sus nidos en tierra, nuevamente devuelven parte del P en las heces a tierra. Además de la actividad de estos animales, existe la posibilidad del levantamiento geológico de los sedimentos del océano para formar tierra firme, un proceso medido en millones de años (Astudillo, 2006). En la mayoría de los suelos, la cantidad de P en formas disponibles por tiempos determinados es muy baja, raramente excede del 0.01% del total de los suelos. En los minerales, donde es parte de su estructura, se presentan grandes cantidades de formas inorgánicas (fosfatos insolubles de Ca, Fe y Al). Las sales de Ca predominan en los ambientes alcalinos, mientras que las de Fe y Al lo hacen en medios ácidos. Después del N, el P es el segundo nutrimento más importante para la planta. Es esencial para el crecimiento de ésta y ningún otro elemento puede sustituirlo. En el suelo es más abundante que el N, pero se fija muy fácilmente en complejos químicos que la planta no puede separar. Se estima que del 15 al 85 % del P-total del suelo está en la fracción orgánica, por lo que la proporción total de P-orgánico es mayor en la superficie que en los horizontes inferiores. Las enzimas que separan al P de los sustratos orgánicos son llamadas fosfatasa (Alexander, 1980) y catalizan la reacción mostrada en la Figura 2.



**Figura 2.** Reacción química general de las fosfatasa. Imagen tomada de Tabatabai (1994).

Plantas cultivadas generalmente contienen de 0.05 a 0.5% de P en sus tejidos, el cual se encuentra en compuestos como la fitina, fosfolípidos, ácidos nucleicos, azúcares fosforilados, coenzimas, ATP y compuestos relacionados. Puede presentarse también en vacuolas y sustancias amortiguadoras internas como ortofosfato inorgánico (Marschner, 1995).

Es importante en todas las reacciones de la planta en las que hay intercambio de energía de fosfato mono ( $\text{H}_2\text{PO}_4^-$ ) y dibásico ( $\text{HPO}_4^{2-}$ ). Las plantas pueden absorberlo del suelo aún de concentraciones muy bajas (Tisdale y Nelson, 1991). En los tejidos de las plantas vivas es aproximadamente una décima parte del N (Marschner, 1995) y su mayor concentración se presenta en tejidos vegetales jóvenes. Los síntomas más característicos

de su deficiencia son: coloración anormal de las hojas (tono oscuro azul verdoso, con tinte bronceado o púrpura visible por formación de antocianina en los bordes de los nervios) y el sistema radicular es fibroso y poco desarrollado (Salisbury y Ross, 2000).

### **1.5.3 Análisis estadístico multivariado (AEM)**

Como en el estudio de la calidad del suelo que incluye propiedades físicas, químicas y bioquímicas, además de su capacidad para suministrar nutrimentos a las plantas que se evalúan en el tejido foliar, el AEM es útil para analizar conjuntos grandes, complicados y complejos de datos con gran cantidad de variables en números grandes de Unidades Experimentales (UE) evaluadas.

A menudo, el interés de los análisis multivariados es encontrar relaciones entre: 1) las variables de respuesta, 2) las unidades experimentales y 3) tanto las variables de respuesta como las unidades experimentales (Marques de Cantú, 1991; Johnson, 2000).

### **1.5.4. Análisis de componentes principales (ACP)**

Es un método multivariado clasificado como técnica dirigida por las variables enfocada en las relaciones entre las variables de respuesta. Se recomienda hacer antes que cualquier otro análisis multivariado porque criba datos de variables múltiples y es útil cuando se desea agrupar las unidades experimentales (UE) en subgrupos semejantes. Se realiza sobre una matriz de correlación o sobre una matriz de varianza-covarianza. Cuando se realiza sobre una matriz de correlaciones, las calificaciones de los componentes principales (CP) deben calcularse a partir de los valores Z (Valores estandarizados). Cuando las variables no se presentan con escala de valores homogéneos, es necesario aplicar métodos de ACP a los datos estandarizados (Calificaciones Z), lo que se hace al calcular los eigenvalores y eigenvectores de la matriz de correlaciones. Las calificaciones de cada UE proporcionan la ubicación de las observaciones en un conjunto de datos con respecto a sus ejes CP. Para determinar el número de CP realizados sobre una matriz de correlaciones, se buscan eigenvalores que sean mayores que 1 y se estima que la dimensionalidad del espacio muestral es el del número de eigenvalores que sean mayores que 1.

Un objetivo básico del ACP es descubrir la dimensionalidad verdadera del espacio en que se encuentran los datos. Se pueden crear nuevas variables llamadas CP en orden decreciente de importancia, de modo que (Johnson, 2000):

- a) No estén correlacionadas.
- b) El primer CP explique tanto de la variabilidad como sea posible.

- c) Cada CP subsiguiente tome en cuenta tanto de la variabilidad restante como sea posible.

### **1.5.5 Sistemas de información geográfica (SIG)**

Surgieron de la necesidad de almacenar, manipular y desplegar información proveniente del mundo real y evaluarla geográficamente. Su capacidad permite crear escenarios a partir del análisis de la información contenida en la base de datos mediante modelos predictivos y mapas (Jay y Wong, 2001; ESRI, 2002; MapInfo Corporation, 2004).

Los SIG son técnicas y herramientas sustanciales con las que se obtiene información geográfica y espacial de un objeto; muchas veces sin tener contacto directo con él (Duarte, 2006).

Ante la necesidad de procesar, analizar y mapear geográficamente los datos en el mismo ambiente de trabajo se ha incrementado la combinación del análisis estadístico con los SIG. La ventaja de los SIG para la aplicación de la estadística espacial es su disponibilidad de información geográfica en formato digital y su capacidad para la interpretación de los resultados territorialmente (Lee y Wong, 2001).

## **1.6 Metodología**

### **1.6.1 Descripción y ubicación de la zona de estudio**

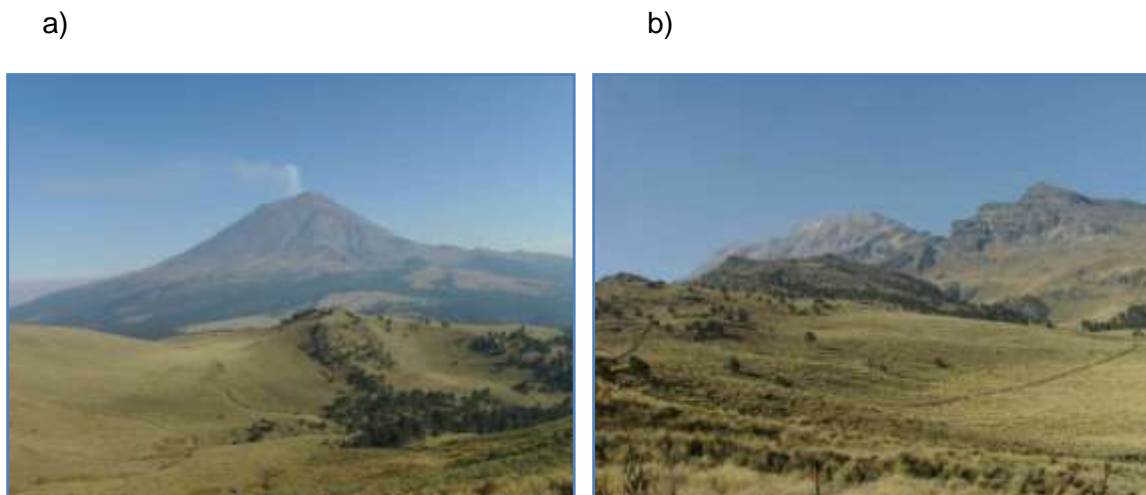
El Parque Nacional IztaPopo, Zoquiapan ubicado en la parte centro-oriental del Eje Volcánico Transversal, ocupa parte de la Sierra Nevada en su porción sur y la Sierra de Río Frío al norte. Según la CONANP (2007) se localiza entre 98° 40' 18" y 19° 28' 2" (extremo norte); 98° 46' 40" y 19° 20' 29" (extremo oeste); 98° 37' 28" y 19° 16' 16" (extremo este) y 98° 40' 27" y 19° 14' 36" (extremo sur).

La cordillera de la Sierra Nevada de México separa los valles altos de México y Puebla y está formada por una cadena de cuatro volcanes (Tláloc, Telapón, Iztaccíhuatl y Popocatepetl), orientados de norte a sur (Miehlich, 1980). En este Parque Nacional, el Popocatepetl (5,452 m snm) e Iztaccíhuatl (5,280 m snm) son la segunda y tercera cumbres más altas de México (Figura 3). Las geoformas del Parque Nacional IztaPopo, Zoquiapan son de origen volcánico, predominando rocas basálticas y andesíticas.

Geológicamente, solo el Popocatepetl ha estado activo en el Pleistoceno y Holoceno. Su cono actual ha sido construido durante los últimos 23000 años y está

edificado por depósitos piroclásticos y coladas de lava de composición andesítica-dacítica, cuyos fragmentos juveniles están compuestos por fenocristales de plagioclasa, hiperstena, augita, olivino y escasa hornblenda, en una matriz vítrea microcristalina. Durante los últimos 20000 años, la actividad explosiva del Popocatepetl ha sido caracterizada por cuatro eventos mayores, con producción de pómez de caída y flujos de ceniza (14000, 5000, 2150 y 1100 años antes del presente) y cuatro menos expuestos, ocurridos hace 11000, 9000, 7000 y 1800 años (Macías, 2005).

En zonas inferiores a 3100 m snm aparecen al norte del Popocatepetl sedimentos sueltos (toba) de mayor edad, constituidos por capas de ceniza andesítica, transportadas eólicamente, en las que se encuentran también cenizas de depósito primario. En el área del Popocatepetl los sedimentos de toba están cubiertos en parte por sedimentos glacifluviales, pedregales recientes y corrientes de lahares (Miehlich, 1980).



**Figura 3.** Panorámica del Iztaccíhuatl y Popocatepetl. a) Exposición norte volcán Popocatepetl. b) Exposición sur Volcán Iztaccíhuatl. Fotografías tomadas el 17 de abril de 2009 a 3900 m snm.

El parque tiene cañadas de entre 25 y 50° y laderas de 2 a 10° de inclinación. De acuerdo con la Comisión de Áreas Naturales Protegidas (CONANP, 2007b) y la clasificación de WRB (2006), entre las unidades de suelo presentes en el parque se encuentran Leptosoles, Regosoles, Andosoles, Cambisoles y Fluvisoles.

El clima va de templado húmedo a frío y muy frío dado que la temperatura disminuye con la altura a razón de 0.68 °C por cada 100 m (CONANP, 2007c),

provocando, a mayor elevación, el aumento de días con heladas de 66 a más de 240 por año, por lo que el período de meses húmedos dura un mes más en la parte media de la Sierra que en las cumbres y en los valles (Miehlich, 1980).

La zona posee un régimen típico de alta montaña tropical, con oscilaciones térmicas entre día y noche durante todo el año, en contraste con las temperaturas medias mensuales situadas de 3 a 4 °C. La isoterma de 5 °C se ubica a los 4000 m de altitud; el mes más frío es febrero y el más caliente abril (CONANP, 2007c). Miehlich (1980), reconoce en la región tres escalas climáticas: La zona A (fresco-seco con temperatura de 10 a 14 °C y precipitación de 1000 a 1200 mm) ubicada a menos de 2750 y hasta 3100 m snm (zona inferior), la B (frío-húmedo con temperatura de 5 a 10 °C y precipitación de entre 800 a 1400 mm) localizada entre 3100 y 4000 m snm (parte media de la ladera) y la C (helado-seco con temperatura menor de 5 °C y menos de 800 mm de precipitación) establecida a más de 4000 m (cumbres de los volcanes). El régimen pluviométrico muestra un período lluvioso entre mayo y octubre y otro seco entre noviembre y abril. Por encima de 4000 m snm se registra un clima frío subhúmedo de alta montaña tipo E(T)HC ( $w_2$ ); por debajo de esta cota se presenta un clima semifrío subhúmedo tipo Cb'(w<sub>2</sub>)(w)ig (Giménez de Azcárate *et al.*, 2009).

Con respecto a la vegetación, en esta región se encuentran bosques de coníferas y praderas de alta montaña. A lo largo del gradiente altitudinal la vegetación se dispone en un patrón de pisos con bosques de encino hasta 2800 m, bosques de oyamel (*Abies religiosa*) y mixtos (*Quercus* spp., *Pinus* spp., *Abies religiosa* y *Alnus jorullensis*) hasta 3400 m, bosques de *Pinus hartwegii* hasta 4000 m (límite de vegetación arbórea en el centro de México) y zacatonal hasta los 4400 m (Giménez de Azcárate *et al.*, 2009). Los bosques de coníferas son dominantes, seguidos por la pradera de alta montaña o pastizal alpino y la vegetación herbácea de no más de 50 cm de altura que colinda con las nieves perpetuas (CONANP, 2007d).

### 1.6.2 Trabajo de gabinete

Se analizó una base de datos de muestras de suelo de 39 sitios georeferenciados procedentes del Parque Nacional IztaPopo y su área de influencia colectadas entre 2001 y 2006. Los datos proceden de resultados de investigaciones hechas en el Laboratorio de Edafología y Fisiología de la Nutrición Vegetal de la Unidad Multidisciplinaria de

Investigación Experimental de la Facultad de Estudios Superiores Zaragoza, UNAM. Entre junio de 2007 y octubre de 2008, de estos 39 sitios se visitaron nuevamente 17 para coleccionar suelo, medir su profundidad con una barrena y evaluar y recabar información de productividad forestal.

Con datos vectoriales disponibles en línea (INEGI, 2009; CONABIO, 2009) que fueron procesados en un SIG, se estableció el área de influencia del PN IztaPopo, Zoquiapan, tomando como límites los centros de población más cercanos al PN en los cuatro puntos cardinales, quedando así definidas tanto el área de influencia como la zona del PN. La región del PN IztaPopo, Zoquiapan se dividió en dos zonas al considerar que la Autopista y la Carretera Federal México-Puebla es infraestructura que fragmenta el sistema. Así, la Zona PN IztaPopo quedó ubicada de la Autopista México-Puebla hacia el sur y la zona de Zoquiapan de la carretera federal México-Puebla hacia el norte (Figura 4). Así, los resultados mostrados en la presente investigación corresponden a la zona del PN IztaPopo.

Los sitios de estudio fueron nombrados con base en los registros de las Cartas Topográficas E14B41 (Amecameca) y E14B42 (Huejotzingo) escala 1:50,000 y editadas por INEGI, o en función de algún rasgo ecológico o de ubicación con respecto a otro sitio. A continuación se presenta el significado de la simbología utilizada para denominar a los sitios: **D** indica sitio con algún tipo de disturbio (Tala, límite con infraestructura o suelo agrícola, incendio forestal); **O**, señala sitio donde *A. religiosa* (oyamel) dominó el dosel; **F**, quiere decir *Faseta* y representa sitios con fisiografía uniforme y mismo tipo en la estructura de la vegetación; y **N**, **NW**, **S**, **SW**, **E** y **W** indican la ubicación geográfica del sitio con respecto a otro.

Los grupos de suelo y sus áreas se conocieron con la digitalización en SIG de mapas edafológicos reportados por Miehlich (1980) y así se estableció la unidad de suelo correspondiente a cada sitio. Además, se describieron perfiles de suelos en algunos sitios. Con la información obtenida de los análisis de suelo registrados en la base de datos y de la obtenida recientemente, se generaron Valores de Calidad de Suelo (VCS) mediante un Análisis Multivariado de Componentes Principales.

La información de precipitación y temperatura media anual determinada para cada sitio, se obtuvo de las estaciones meteorológicas Amecameca (ubicada a 2470 m snm), San Rafael (2530 m snm), San Pedro Nexapa (2650 m snm), Santa Rita Tlahuapan (2720



m snm), Hueyatlaco (3557 m nsm), Río Frío de Juárez (3000 m snm) y Ávila Camacho (2900 m nm). La información asignada a cada sitio fue la correspondiente a la estación meteorológica ubicada a la misma altitud; o bien, la más cercana a éste.

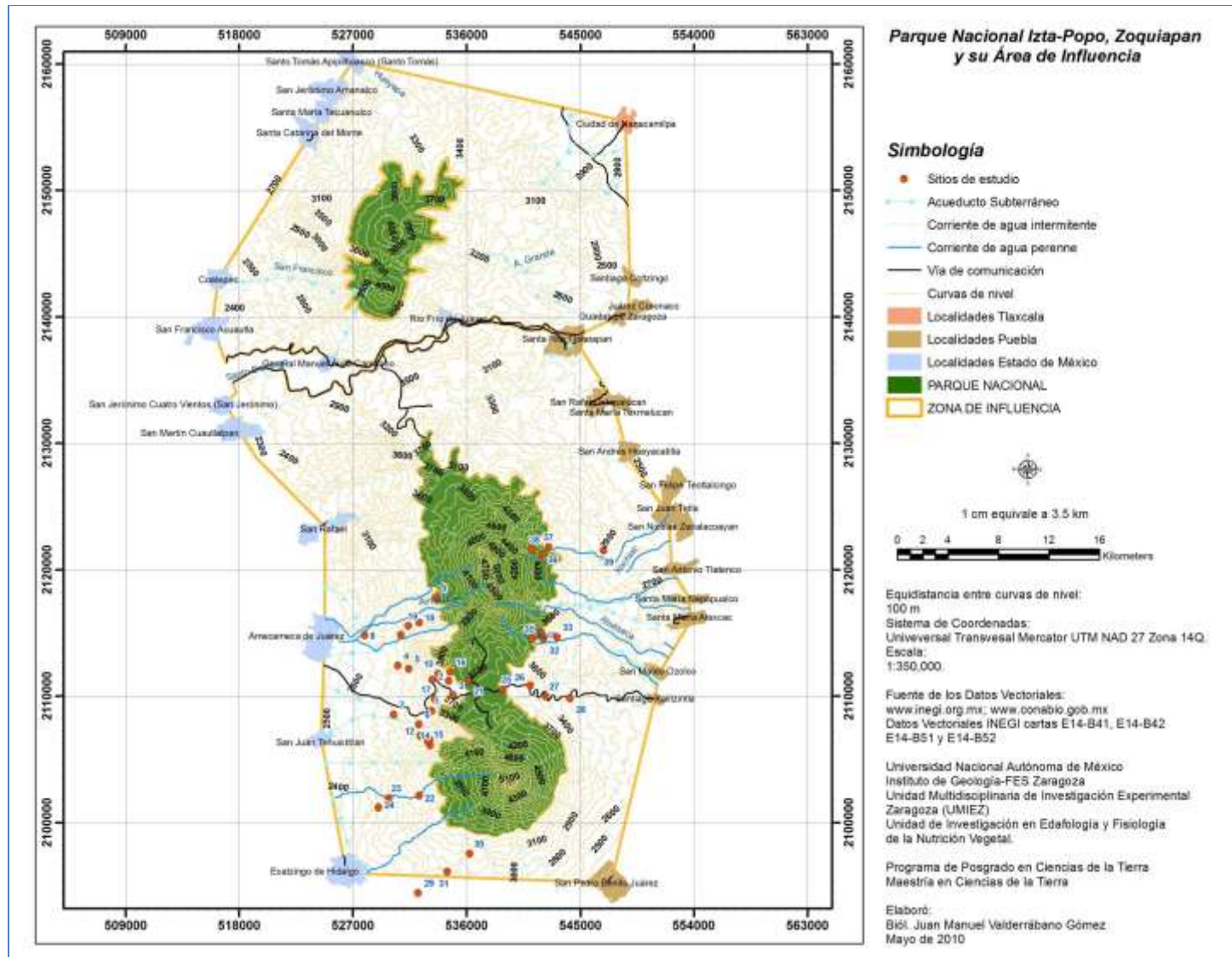


Figura 4. Ubicación geográfica del Parque Nacional Izta-Popo, Zoquiapan y su Zona de Influencia. Para identificar el sitio ver Cuadro 4.

Juan Manuel Valderrábano Gómez  
Calidad del suelo forestal y su distribución espacial en bosques de coníferas del Parque Nacional Izta-Popo

### 1.6.2.1. Calidad del suelo y análisis de componentes principales

Para definir las variables del suelo con la mayor variabilidad y reducir la dimensionalidad del análisis, se consideraron solo a los *eigenvalores* con autovalor mayor a 1 y para identificar las variables robustas (VR) que definen cada componente principal ( $CP_1, CP_2, \dots, CP_n$ ) se consideró el valor absoluto más alto de cada *eigenvector* (Johnson, 2000). Finalmente, para conocer la calificación de cada sitio y su ubicación gráfica en sus ejes componentes principales, se utilizó la ecuación de la siguiente expresión:

$$y_i = a_j * Z \quad \text{Ecuación 1}$$

Donde:

$y$  = Calificación del  $j$ -ésimo componente principal (CP) para el  $r$ -ésimo sitio.

$a$  = valor del *eigenvector* del  $j$ -ésimo componente principal para  $j = 1, 2, \dots, p$  ( $CP_1, CP_2, \dots, CP_p$ ).

$Z$  = valor estandarizado de la propiedad del suelo ( $x$ ), obtenido de restar el valor promedio del valor experimental  $x$  y dividirlo entre su desviación estándar (ecuación 2):

$$Z = \left( \frac{x - \bar{x}}{\sqrt{\sigma}} \right) \quad \text{Ecuación 2}$$

Sustituyendo los valores en la ecuación 1, se obtuvo que:

$$y_i = a_j * \left( \frac{x - \bar{x}}{\sqrt{\sigma}} \right) = CP_j = a_j * \left( \frac{x - \bar{x}}{\sqrt{\sigma}} \right) \quad \text{Ecuación 3}$$

El Valor de Calidad de Suelo (VCS) por grupo de parámetros bioquímicos (VCSBq), físicos (VCSF), químicos (VCSQ) y la calificación total (VTCS) se obtuvieron del análisis de Componentes Principales (ACP) que estandarizó las variables originales (valores  $Z$  de la ecuación 1) para cumplir la condición de ortogonalidad (Granados-Damián, 2001); ya que, por definición, la teoría de probabilidades indica que cuando dos eventos son mutuamente excluyentes, la probabilidad de que cualquiera de los dos eventos ocurra es igual a la probabilidad individual de los eventos; es decir:

$$P(A \cup B) = P(A) + P(B) \quad \text{Ecuación 4}$$

Así, la propiedad aditiva de la teoría de probabilidades se considera adecuada para establecer la calificación total de las propiedades físicas, químicas, bioquímicas y valor total de calidad de suelo (VTCS) dado que ésta puede extenderse al caso de tres o más eventos mutuamente excluyentes (Pagano y Gauvreau, 2001). Lo anterior sirvió para proponer a cada una de las propiedades quedando expresado de la siguiente manera:

$$\text{a) } \mathbf{VCSBq = CP_1 + CP_2 + \dots + CP_n} \quad \text{Ecuación 5}$$

$$\text{b) } \mathbf{VCSF = CP_1 + CP_2 + \dots + CP_n} \quad \text{Ecuación 6}$$

$$\text{c) } \mathbf{VCSQ = CP_1 + CP_2 + \dots + CP_n} \quad \text{Ecuación 7}$$

La calificación total (VTCS) se obtuvo de la suma de cada VCS por grupo de parámetros, considerando lo expuesto en la ecuación 4:

$$\mathbf{VTCS = VCSBq + VCSQ + VCSF} \quad \text{Ecuación 8}$$

Con el desarrollo de la ecuación 8, los sitios con mayor VTCS quedaron con valores positivos en el eje de las ordenadas y aquellos con calificaciones bajas tuvieron valores negativos.

### 1.6.2.2 Análisis de correlación simple

Para validar el VTCS, se propuso determinar la correlación entre éste con la productividad forestal (volumen maderable) y con los porcentajes de N y P en tejido foliar de las especies de coníferas presentes por sitio y los coeficientes metabólicos del suelo como variables de respuesta al VTCS. La dirección de la relación fue positiva cuando los valores de una variable se comportaron similar a la otra. Por otro lado, la relación fue negativa cuando el valor de una variable incrementó y la otra disminuyó (Jay y Wong, 2001).

### 1.6.2.3. Conformación de información espacial

Mediante el SIG y la base de datos georeferenciada con los valores de C, N, P, cationes intercambiables (Na, K, Ca y Mg) y Valores de Calidad de Suelo (VCSBq, VCSQ, VCSF y VTCS) se calcularon el promedio y desviación estándar espacial de cada uno de

los parámetros citados (Jay y Wong, 2001). La ecuación con la que se obtuvo el promedio espacial fue:

$$(\bar{x}_{wmc}, \bar{y}_{wmc}) = \left( \frac{\sum_{i=1}^n w_i x_i}{\sum_{i=1}^n w_i}, \frac{\sum_{i=1}^n w_i y_i}{\sum_{i=1}^n w_i} \right) \quad \text{Ecuación 9}$$

Donde  $x_{wmc}$ ,  $y_{wmc}$  equivale a la ubicación promedio de las coordenadas  $x$  e  $y$  en función de los valores experimentales ( $w_i$ ) para cada grupo de parámetros (C, N, P, Ca, Mg, pH, N-total, etc...) en su sitio ( $p_i$ ) correspondiente para ubicar su promedio en mapas. Por otra parte, la distancia estándar se usó para estimar el grado de dispersión espacial de los datos alrededor de su promedio (ecuación 10):

$$DS = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n f_i (x_i - x_{mc})^2 + \sum_{i=1}^n f_i (y_i - y_{mc})^2}{\sum_{i=1}^n f_i}} \quad \text{Ecuación 10}$$

Donde  $f_i$  define el peso o contribución (equivalente a  $w_i$  en la ecuación 9). Las expresiones  $x_{mc}$ ,  $y_{mc}$  corresponden a los valores promedio, producto del análisis de la media ponderada ( $x_{wmc}$ ,  $y_{wmc}$  de la ecuación 9).

### 1.6.3 Trabajo de Campo

Se describieron treinta y nueve sitios distribuidos en un área aproximada de 200 km<sup>2</sup>. Los recorridos de campo se programaron con la ayuda de las cartas de uso de suelo y vegetación E14B41 y E14B42 editadas por el Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI). Los sitios de muestreo se eligieron dentro de zonas con bosques de pino y oyamel donde se realizó un muestreo al azar estratificado. Los recorridos se realizaron en forma descendente a partir del límite de la vegetación arbórea y en los cuales se ubicaron los sitios previamente seleccionados en las cartas de uso de suelo. Debido a la irregularidad del relieve en la zona, y de acuerdo con el método de área fija (Moscovich y Brena, 2006) y el del Inventario Nacional Forestal y de Suelos (2004-2010), que ha establecido 1000 m<sup>2</sup> como área mínima de muestreo, se optó por trazar en cada sitio de estudio, cuadrantes rectangulares de 50 x 20 metros cuadrados (1000 m<sup>2</sup>), perpendiculares a la orientación de la pendiente donde se registraron atributos ecológicos y del relieve (tipos de vegetación, inclinación y exposición de la ladera). La altitud y ubicación geográfica se tomaron con un GPS marca Garmin modelo eTrex Legend con 12 canales. Dentro de cada cuadrante en cada sitio se colectaron al azar al menos cinco

muestras de suelo (0-0.2 m de profundidad) para determinar sus propiedades físicas y químicas, y ocho muestras (0-0.1 m) para evaluar las propiedades bioquímicas. Para ello, se removió el mantillo previo al muestreo y se formaron muestras compuestas *in situ* para cada profundidad.

En los 17 sitios visitados recientemente, también se registraron datos dasométricos (diámetro a la altura del pecho a 1.3m, altura del árbol, estimada trigonométricamente mediante lectura con clínoómetro del ángulo formado entre la distancia de la base del árbol al observador (Chapingo, 2001), y densidad de la vegetación arbórea en lugares con dominancia de individuos de especies del género *Pinus* y de *Abies religiosa*.

Con respecto a las muestras foliares, éstas se tomaron al azar de individuos arbóreos que no presentaron evidencias de tala, herbivoría, incendio o plaga. Para individuos menores a 5 m las hojas fueron recolectadas con pinzas para jardinería en los cuatro puntos cardinales del individuo. En árboles mayores a 5 m, las muestras se tomaron con ayuda de tijeras con extensión de hasta 8 m de alto. Cada muestra fue almacenada en bolsas de papel estraza previamente etiquetadas con datos de altitud, exposición, pendiente y género o especie del individuo.

#### 1.6.4 Trabajo de laboratorio

Las muestras de suelo se secaron a temperatura ambiente y posteriormente se tamizaron en malla de 2 mm. A cada muestra se le determinaron las siguientes propiedades:

**Físicas:** Conductividad eléctrica (CE) de la solución del suelo relación 5:1 se obtuvo al agitar la suspensión y dejar reposar por 24 horas, al cabo de las cuales se tomó la lectura del sobrenadante con su registro de temperatura (Richards, 1990). La textura del suelo se obtuvo mediante la técnica de Bouyoucos, la densidad real (DR) por la técnica del picnómetro y la densidad aparente (DA) por la técnica del cilindro. El espacio poroso (EP) se estableció mediante la ecuación:  $(1-DA/DR) \times 100$  (Elliott *et al.*, 1999).

**Químicas:** El pH potencial del suelo se estableció con KCl 1N (relación 1:2) y el activo con H<sub>2</sub>O (relación 1:2); en ambos casos, la solución se agitó 1 minuto y reposó 10 minutos. El procedimiento se repitió dos veces. Posteriormente se agitó y se tomó la lectura con un potenciómetro previamente calibrado con soluciones amortiguadoras

(Jackson, 1964). Los cationes intercambiables (CI) se obtuvieron por extracción con acetato de amonio 1N a pH 7 y cuantificación por absorción atómica (Robertson *et al.*, 1999). La materia orgánica del suelo (MOS) fue determinada por el método de Walkley y Black (Jackson, 1964) y a partir de ella fue estimado el C-orgánico del suelo (COS) mediante el factor de Van Bemmelen expresado en la ecuación  $MOS = COS * 1.724$  (SSSA, 1996). El porcentaje de N-total fue obtenido por digestión ácida mediante el método semimicro-kjeldahl modificado para incluir nitratos (Sollins *et al.*, 1999) y el P-disponible se cuantificó con solución extractante de Bray y Kurtz con lectura en espectrofotómetro a 660 nm (Lajtha *et al.*, 1999). Los porcentajes de MOS, N-total y P-disponible fueron transformados a  $Mg\ ha^{-1}$  al considerar la densidad aparente y profundidad de las muestras de suelo de cada sitio.

**Bioquímicas:** Las muestras destinadas para análisis bioquímicos se almacenaron a 4 °C hasta su estudio para reducir las reacciones bioquímicas y biológicas del suelo (Jenkinson *et al.*, 2004). La respiración microbiana se determinó mediante la evolución de  $CO_2$  del suelo por el método de fumigación-incubación, en donde se tomó una muestra de suelo y se fumigó con cloroformo. A otra muestra de suelo se le agregó agua para que sirviera como testigo. Ambas muestras fueron incubadas por 10 días a 37°C y se les cuantificó el  $CO_2$  mediante titulación con KOH 1N. Con esta lectura fue determinado el carbono de la biomasa microbiana (CBM) al considerar el factor 0.45 (Paul *et al.*, 1999). La actividad de la fosfatasa ácida y fosfatasa alcalina se cuantificó por el método del p-Nitrofenil fosfato (Tabatabai, 1994).

**Análisis del tejido foliar:** El peso de las muestras foliares fue registrado al llegar a laboratorio y después fueron secadas en una estufa a 70°C hasta peso constante. Posteriormente fueron molidas, tamizadas (malla 2 mm) y almacenadas hasta su determinación en frascos de polietileno previamente etiquetados con datos de fecha, sitio, altitud, porcentaje y orientación de la pendiente, especie o género y tipo de vegetación del sitio. El porcentaje de nitrógeno fue cuantificado con el método semimicro-kjeldahl (Sollins, 1999) y el de fósforo mediante solubilización por digestión con ácidos nítrico y perclórico y desarrollo de color con el reactivo vanadomolibdico, que produce el complejo fosfovanadomolibdico, el cual se lee en absorción a 470 nm (Allan, 1971).

Así, los análisis físicos y químicos se realizaron por triplicado y los bioquímicos por cuadruplicado.

## 2. Resultados y discusión

### 2.1 Suelos dominantes en la zona PN IztaPopo y su zona de influencia.

Con análisis de información vectorial procesada en un SIG, se determinó que entre su zona de influencia (ZI) y el propio Parque suman 112,041 ha; de las cuales, 23,017.8 ha (20.5%) corresponden al PN Izta-Popo y 89,033 ha (79.5%) a la ZI (Figura 4).

Con la digitalización de los mapas de suelo obtenidos por Miehlich (1980) y con la información vectorial de INEGI (2009a) se conoció que los principales suelos fueron Andosol, Cambisol, Feozem, Litosol y Regosol, de los cuales se presenta su textura, fase lítica y extensión superficial (Cuadro 1).

**Cuadro 1.** Grupos de suelo reportados por INEGI (2009a).

Unidad	Suelo 1	Suelo 2	Suelo 3	Fase	Textura	Área	
						ha	%
Be+Tm+l/2	Cambisol	Andosol	Litosol		Media	53047.1	47.3
Rd+l+Tm/1/L	Regosol	Litosol	Andosol	Lítica	Gruesa	29680.8	26.5
Re+To+Tm/1	Regosol	Andosol	Andosol		Gruesa	24810.3	22.1
Hh+Be+Vp/2/D	Feozem	Cambisol	Vertisol	Dúrica	Media	2368.3	2.1
Hh+To/2	Feozem	Andosol			Media	2144.3	1.9
Suma						112050.7	100.0

*Datos ordenados en forma decreciente de superficie.*

Dentro del esquema alfanumérico propuesto por Miehlich (1980), la unidad de suelos dominante fue C1 (Andosol vítrico), en tanto que los suelos L (Andosol húmico-Litosol-Fluvisol) representaron la menor superficie (Cuadro 2). Este Cuadro presenta los sitios estudiados con sus grupos de suelo según Miehlich (1980) y su equivalencia con el esquema de la WRB (2006). La unidad C1 (Figura 5) contiene suelos típicos de laderas medias, frías y húmedas con cenizas andesíticas recientes, franco-arenosos y rodean al Popocatepetl entre 3100 y 3800 m snm, con diversas especies de pino en su exposición este y en la oeste, bosques de pino y oyamel, lo cual también fue observado en el trabajo de campo de esta investigación.



**Cuadro 2.** Grupos de suelo reportados por Miehlich (1980) y WRB (2006).

Unidad	S	Clasificación de acuerdo con Miehlich (1980)		Equivalencia con WRB (2006)		Superficie	
		Suelos Dominantes	Suelos Acompañantes	Suelos Dominantes	Suelos Acompañantes	ha	%
A1	-	Regosol cryico-Litosol	Andosol criandino	Regosol dístico-Leptosol	Andosol vítrico	5967.7	5.5
A2	-	Litosol-Regosol cryico	Andosol criandino	Leptosol-Regosol dístico	Andosol vítrico	2326.8	2.2
B1	-	Andosol criandino	Regosol cryico-Litosol	Andosol vítrico	Regosol dístico-Leptosol	3898.4	3.6
B2	3	Andosol criandino-Andosol humánico	Regosol cryico-Litosol	Andosol vítrico-Andosol húmico	Regosol dístico-Leptosol	4335.4	4.0
<b>C1</b>	<b>18</b>	<b>Andosol mesandino</b>	<b>Fluvisol-Andosol humánico-Andosol criandino</b>	<b>Andosol vítrico</b>	<b>Fluvisol-Andosol húmico-Andosol vítrico</b>	<b>22612.1</b>	<b>21</b>
C2	-	Andosol mesandino	Andosol criandino-Litosol	Andosol vítrico	Andosol vítrico-Leptosol	1321.2	1.2
D1	-	Andosol termandino -Regosol térmico	Fluvisol	Andosol vítrico	Fluvisol	1835.2	1.7
D3	7	Andosol termandino-Andosol mesandino	Fluvisol	Andosol vítrico	Fluvisol	4715.1	4.4
E	-	Regosol térmico-Cambisol eútrico	Andosol termandino-Fluvisol	Regosol eútrico-Cambisol eútrico	Andosol vítrico-Fluvisol	1218.7	1.1
F	-	Litosol-Ranker térmico	Fluvisol	Leptosol-Andosol vítrico	Fluvisol	334	0.3
H	-	Cambisol eútrico-Regosol térmico	Fluvisol	Cambisol eútrico-Regosol eútrico	Fluvisol	1494.8	1.4
I1	1	Andosol humánico-Cambisol dístico	Litosol	Andosol húmico-Cambisol dístico	Leptosol	6847.8	6.4
I2	3	Andosol humánico-Cambisol dístico	Andosol humandos	Andosol húmico-Cambisol dístico	Andosol vítrico	2228.1	2.1
I3	3	Andosol cambánico-Andosol cambandos	Andosol termandino	Andosol húmico-Andosol húmico/ótrico	Andosol vítrico	2071.2	1.9
K1	-	Andosol humandos	Andosol silhumandos-Cambisol dístico-Fluvisol	Andosol húmico	Andosol húmico-Cambisol dístico-Fluvisol	7864.7	7.3

**S=** Número de sitios estudiados en el presente trabajo.

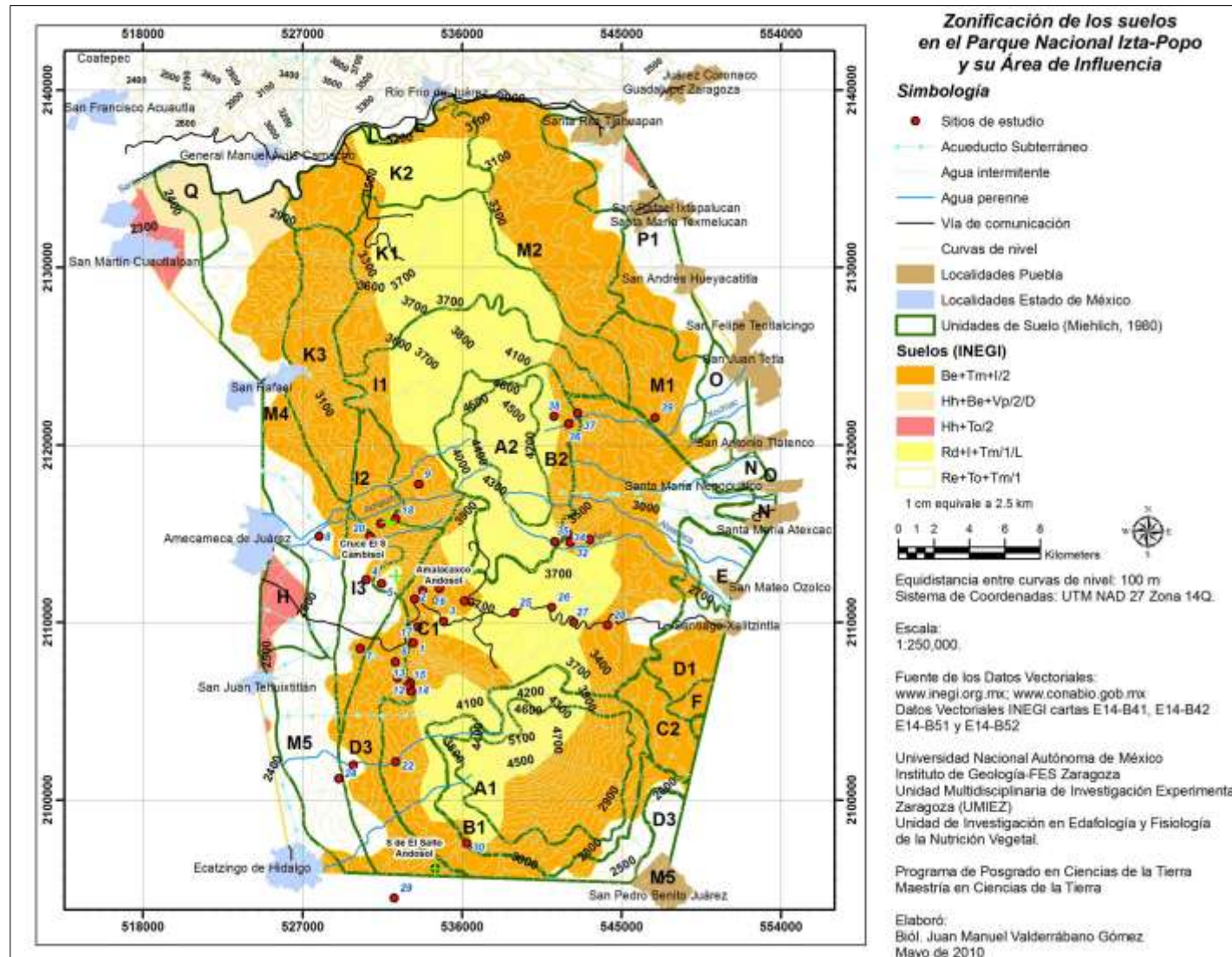
– sin sitios en la unidad de suelo. Los valores en negrita corresponden a la unidad de suelo con mayor superficie.

**Cuadro 2 (Continuación).**

Unidad	S	Clasificación de acuerdo con Miehlich (1980)		Equivalencia con WRB (2006)		Superficie	
		Suelos Dominantes	Suelos Acompañantes	Suelos Dominantes	Suelos Acompañantes	ha	%
K2	-	Andosol humandos-Andosol silhumandos	Andosol cambandos-Litosol	Andosol húmico	Andosol húmic/ócrico-Leptosol	4317.9	4.0
K3	-	Andosol humandos-Andosol cambandos	Andosol humandico	Andosol húmico-Andosol húmico/ócrico	Andosol húmico	4368.2	4.0
L	-	Andosol cambandico-Andosol humandos	Litosol-Fluvisol	Andosol húmico	Leptosol-Fluvisol	116.9	0.1
M1	1	Andosol cambtixico-Andosol cambandos	Andosol durcambtixico-Andosol cambandico-Regosol térmico	Andosol mólico-Andosol húmico/ócrico	Andosol ócrico fase duripan-Andosol húmico-Regosol eutrico	3085.2	2.9
M2	-	Andosol cambtixico-Andosol cambandos	Cambisol dureútrico-Duripan	Andosol mólico-Andosol húmico/ócrico		6876	6.4
M4	1	Andosol cambandos-Andosol humandos	Andosol cambtixico-Cambisol eutrico-Cambisol dureutrico	Andosol húmico/ócrico-Andosol húmico	Andosol mólico-Andosol vítrico-Cambisol eutrico fase duripan	8181.5	7.6
M5	2	Andosol cambandos-Andosol humandos	Andosol cambtixico-Regosol térmico-Cambisol eutrico	Andosol húmico/ócrico-Andosol húmico	Andosol mólico-Regosol eutrico-Andosol vítrico	3848.1	3.6
N	-	Andosol cambtixico-Cambisol eútrico	Regosol térmico-Fluvisol	Andosol mólico-Cambisol eútrico	Regosol eútrico-Fluvisol	864.5	0.8
O	-	Andosol durcambtixico-Andosol cambtixico	Duripan-Fluvisol	Andosol ócrico fase duripan-Andosol mólico		1313.6	1.2
P1	-	Cambisol dureútrico-Duripan	Andosol cambtixico-Litosol		Andosol húmico/ócrico-Leptosol	4678.3	4.3
Q	-	Duripan-Cambisol durétrico-Cambisol durvertico	Andosol cambtixico		Andosol húmico/ócrico	1123.7	1.0
<b>Total</b>						<b>107873</b>	<b>100</b>

S= Número de sitios estudiados en el presente trabajo.

– sin sitios en la unidad de suelo.



**Figura 5.** Distribución de grupos de suelo reportados por INEGI (2009a) y Miehlich (1980). Las cruces verdes indican sitios donde se realizaron perfiles de suelo. Los números azules señalan los sitios de estudio (Cuadro 5).

Además de verificar lo reportado por INEGI (2009a) y Miehlich (1980), en cuatro sitios se describieron perfiles para realizar su descripción. Con base en WRB (2006), tres sitios tuvieron Andosoles (Amalacaxco a 3659 m snm, La Joya a 3627 m snm y S de El Salto a 3180 m snm) y otro tuvo Cambisol, en el sitio “Cruce El 8” a 3300 m (Cuadro 3 y Figuras 6 a 9).



**Figura 6.** Cambisol en el sitio denominado “Cruce El 8”. El tipo de suelo se clasificó de acuerdo con WRB (2006).



**Figura 7.** Andosol en el sitio denominado “S de El Salto”. El tipo de suelo se clasificó de acuerdo con WRB (2006).



**Figura 8.** Andosol en el sitio denominado “Amalacaxco”. Bosque de Pinus con Abies religiosa, jarilla (*Senecio* sp.) y pastizal. El tipo de suelo se clasificó de acuerdo con WRB (2006).



**Figura 9.** Andosol en el sitio denominado “La Joya”. Bosque de Pinus. El tipo de suelo que se clasificó de acuerdo con WRB (2006).

Cuadro 3. Descripción de perfiles de suelos dominantes en el PN IztaPopo.

Tipo de suelo Andosol									
Horizonte	Profundidad cm	Textura al tacto	Color		Estructura		Matriz	Consistencia	
			Seco	Húmedo				Seco	
A1	0-40	Arenosa-limosa	10YR 4/1	Gris oscuro	10YR 2/1	Negro	Granular muy fina	Moteado fino 2-5 mm. Alta densidad de raíces gruesas y finas	Friable
A2	40-75	Arenosa-limosa	10YR 5/2	Café grisáceo	10YR 2/2	Café muy oscuro	Granular que rompe a subangular	Abundantes poros pequeños por raíces finas. Partículas amarillas por oxidación de material parental (Regolito).	Friable
A-C	75-84	Arenosa	-	-	-	-	-	Partículas amarillas con raíces finas y gruesas	Friable
C	84-110	-	10YR 6/8	Amarillo	10YR 4/6	Café amarillento oscuro	-	Partículas amarillas con raíces finas	Friable
Paleosuelo	110-290	-	-	-	-	-	-	-	-
Atributos físicos del sitio									
Sitio	Fecha	Coordenadas UTM NAD 27		altitud	pendiente	Exposición	Estructura de la vegetación		
		X	Y	m snm	%				
Amalacaxco (Cerca de F 11)	28/02/2009	535270	2112629	3659	20	SE	Bosque templado perennifolio de <i>Pinus hartwegii</i> con <i>Abies religiosa</i> . Estrato arbóreo alto (30-40m), medio (2-5m) y bajo (1-2m). Cobertura del estrato arbóreo 50%, arbustivo ( <i>Senecio</i> sp.)5% y herbáceo 45% ( <i>Lupinus</i> sp., <i>Mulenbergia</i> sp y <i>Festuca</i> sp.), Cobertura vegetal de compacta a continua sobre relieve cóncavo-convexo (sitio receptor). Ver Figura 8.		

-= Sin dato.

Cuadro 3 (Continuación).

Tipo de suelo Cambisol									
Horizonte	Profundidad cm	pH activo	Color		Textura		CE dS m <sup>-1</sup>	DA g cm <sup>-3</sup>	
			Seco	Húmedo					
A1 (arriba de raíces)	1-10	6.39	10YR 4/2	Café grisáceo oscuro	10YR 2/1	Negro	Areno-migajón	0.15	0.94
A1 (en raíces)	10-15	5.69	10YR 3/2	Café grisáceo muy oscuro	10YR 2/2	Café muy oscuro	Migajón-arenoso	0.079	1.10
A1-2	15-21	5.8	10YR 4/2	Café grisáceo oscuro	10YR 2/2	Café muy oscuro	Areno-migajón	0.058	1.14
A2	21-65	6	10YR 3/2	Café grisáceo muy oscuro	10YR 2/1	Negro	Areno-migajón	0.062	1.16
B1	65-120	6.24	10YR 5/3	Café	10YR 3/3	Café oscuro	Areno-migajón	0.056	1.14
B2	>120	6.29	10YR 4/3	Café grisáceo oscuro	10YR 2/2	Café muy oscuro	Areno-migajón	0.054	0.95
Atributos físicos del sitio									
Sitio	Fecha	Coordenadas UTM NAD 27		altitud	pendiente	Exposición	Estructura de la vegetación		
		X	Y	m snm	%				
Cruce El 8	16/04/2009	531857	2115680	3103	15	S	Bosque de <i>A. religiosa</i> con <i>Aile</i> sp. Estrato arbóreo alto <40m, medio <25m y bajo <15m. Arbustivo: <i>Bacharis</i> sp. y <i>Senecio</i> sp. <1.8 m. Herbáceo (Helechos, 2 especies.) y <i>Eupatorium petiolare</i> Moc. Mantillo: Hojarasca y ramas gruesas y delgadas. Parte baja de ladera con relieve cóncavo-recto (sitio receptor). Cobertura vegetal abierta y discontinua. Horizonte B con matriz moteada y restos de carbón (Figura 7).		

Cuadro adaptado de Domínguez-Bernal (2011).

Cuadro 3 (Continuación).

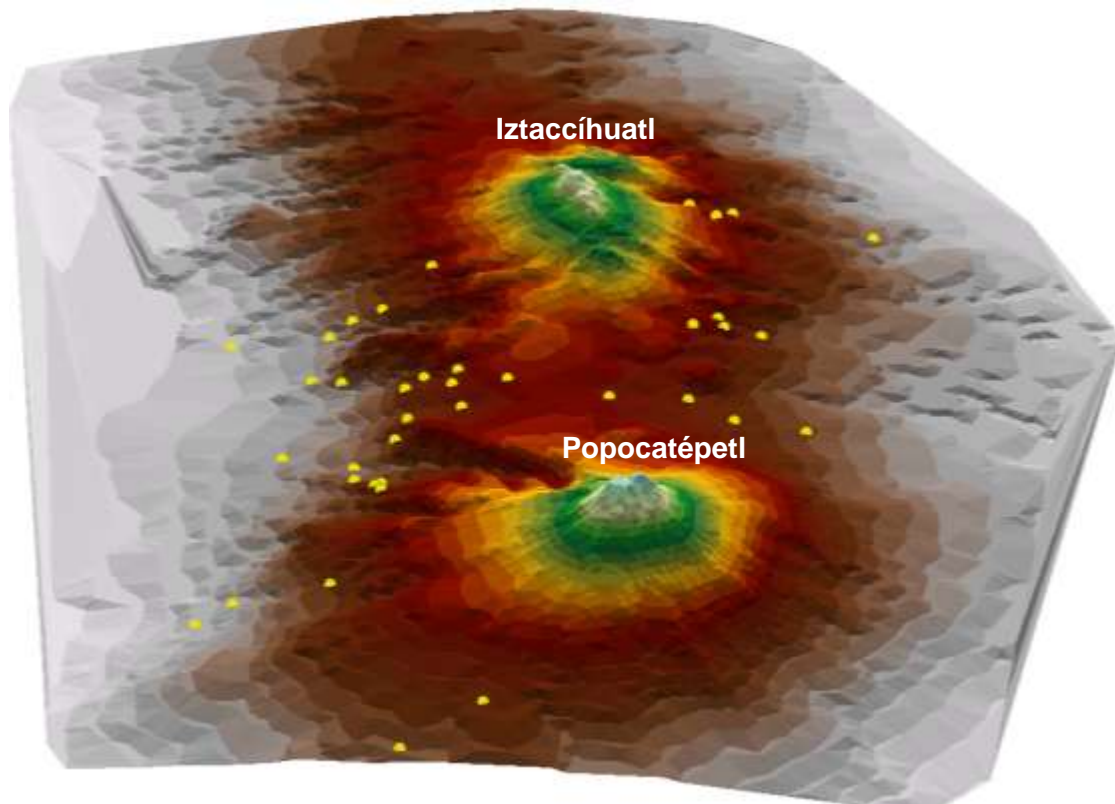
Tipo de suelo Andosol									
Horizonte	Profundidad	Textura al tacto	Color				Estructura	Matriz	Consistencia
	__cm__		____ Seco ____		____ Húmedo ____				____ Seco ____
A1	0-30	Arenosa-limosa	10YR 3/2	Café grisáceo muy oscuro	10YR 2/1	Negro	subangular	Alta densidad de raíces gruesas y finas con restos de carbón. Pedregosidad de 1-2 mm (muy fina)	-
A2	30-60	-	10YR 3/1	Gris muy oscuro	10YR 3/1	Gris muy oscuro	Poliédrica subangular	Abundantes poros pequeños por raíces finas con restos de carbón.	-
C	>60	-	10YR 5/3	Café	10YR 4/3	Café	-	Raíces finas con restos de carbón	-
Paleosuelo	30 cm por debajo de la capa de ceniza	-	10YR 3/4	Café amarillento oscuro	10YR 3/3	Café oscuro	-	-	-
Atributos físicos del sitio									
Sitio	Fecha	Coordenadas UTM NAD 27		altitud	pendiente	Exposición	Estructura de la vegetación		
		__X__	__Y__	__m snm__	__%__				
S de El Salto	27/02/2009	534478	2096137	3180	8	NW	Bosque templado perenifolio de <i>Abies religiosa</i> con <i>Pinus</i> . Estrato arbóreo alto (20-25m), arbustivo (2-4m) y herbáceo (<2m). Cobertura del estrato arbóreo 60%, arbustivo ( <i>Senecio</i> sp.) 30% y herbáceo 10% ( <i>Bacharis</i> sp.), Cobertura vegetal de compacta a continua sobre relieve convexo (sitio donador). Ver Figura 6.		

-- Sin dato. Cuadro adaptado de Domínguez-Bernal (2011).



## 2.2 Tipos de vegetación

La descripción de la vegetación se hizo en treinta y nueve sitios, de los cuales, doce se ubicaron en la vertiente este, dieciséis en la oeste y uno (Paso de Cortés) en el puerto que forman los volcanes Popocatepetl e Iztaccíhuatl (Figura 10).



**Figura 10.** Distribución de los sitios de estudio. Los Intervalos altitudinales se diferencian, a partir de 2300 m como elevación mínima, por el cambio de color cada 100 m snm. Los puntos amarillos indican sitios estudiados. Fuente: Datos vectoriales INEGI, cartas E1402 y E1405.

Los bosques de pino (*Pinus* spp.) fueron la vegetación dominante al distribuirse entre 2650 y 3828 m snm, dominando en veintiocho de treinta y nueve sitios estudiados (Cuadro 5). Entre las especies del género *Pinus* se encontraron a *Pinus montezumae* (2650 a 3250 m snm), *P. pseudostrobus* (2900 a 3288 m snm), *P. teocote* (2700 a 2900 m snm), *P. patula* (2900 m snm) y *P. hartwegii* de 3288 a 3840 m snm (Figura 11).

a)



b)



**Figura 11. a)** Sitio La Joya a 3858 m snm. **a)** Bosque de *Pinus hartwegii* asociado con pastizal, representando el límite de la vegetación arbórea en la Sierra Nevada. Al ascender, el pastizal domina. Al fondo, cumbre del Iztaccíhuatl. **b)** Popocatepetl, desde Altzomoni 4,000 m snm. *Pinus hartwegii* con pastizal y arbustos del género *Senecio* sp.

Respecto a los bosques de *Abies religiosa* (oyamel), éstos se observaron de 2832 a 3585 m snm dominando la comunidad. También se observaron en asociación con *Alnus* (aile), *Quercus* (encino), *Cupressus* (cedro), *Cornus* y *Pinus* entre 2834 y 3288 m snm. El intervalo altitudinal donde convergen la mayor diversidad de especies vegetales se encontró de 2800 a 3300 m snm y en este se observaron; además de pino y oyamel, árboles de *Buddleia cordata* (tepozán), *Quercus* spp. (encino), *Alnus* sp. (aile), *Arbutus* sp. (madroño), *Cupressus* sp. (cedro), *Garrya* y *Cornus* sp.; y entre los arbustos se encontraron *Senecio* spp. (jarilla), *Bacharis* spp. (escobilla), *Eupatorium petiolare* Moc. (Hierba del ángel) y *Simphoricarpus* spp. (perlilla).

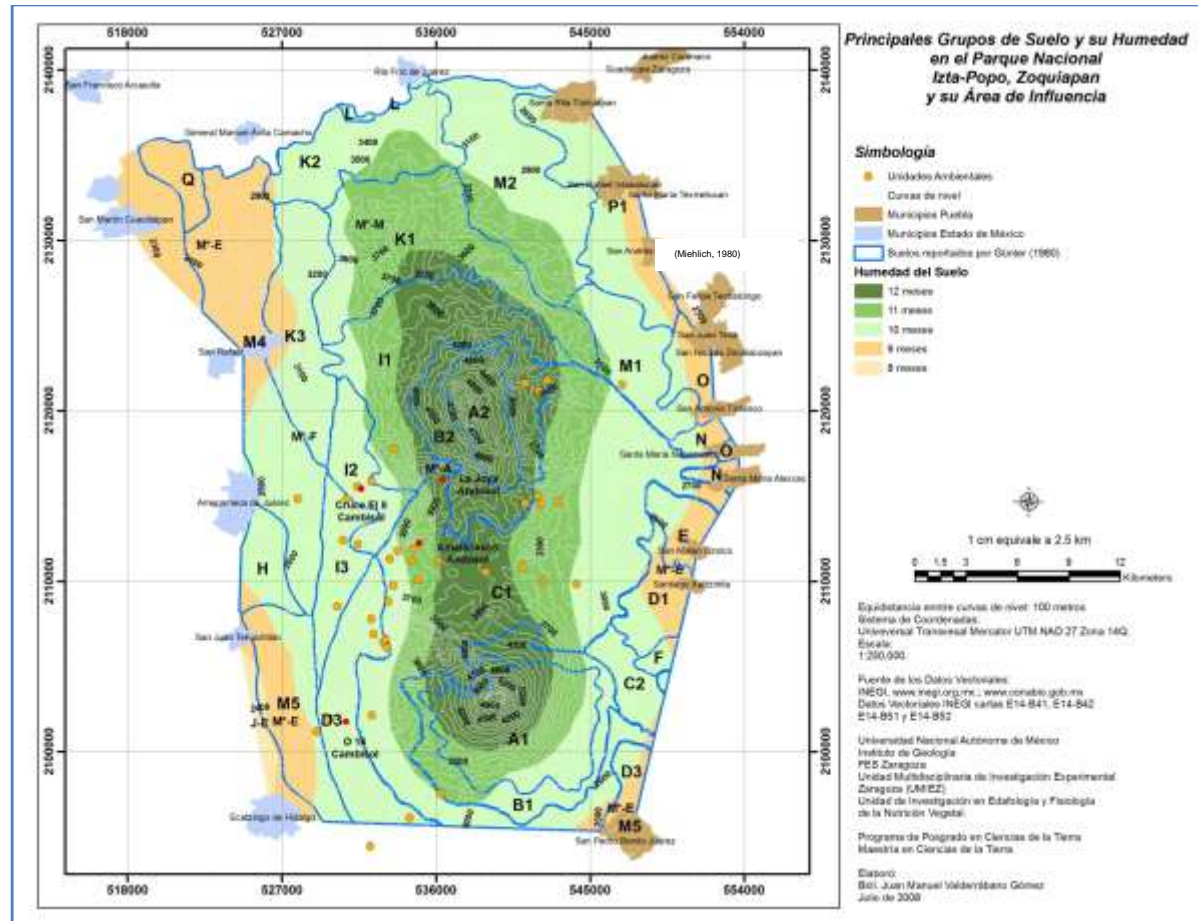
Según la información derivada del análisis del SIG, se sabe que la duración de la humedad del suelo en la zona (INEGI, 2009b) tiene un periodo de 10 a 12 meses, y aumenta con la altitud. Las zonas con 10 meses de humedad edáfica (mayo-febrero) representan 46.5% (52062.4 ha) de la superficie del parque y su zona de influencia, mientras que suelos que mantiene humedad durante 8 meses de (junio-enero) cubrieron menor área (0.6%) y se distribuyen en zonas bajas de la Sierra Nevada (Cuadro 4 y Figura 11).

**Cuadro 4.** *Período de humedad del suelo.*

Duración de humedad del suelo (meses)	Mes	Superficie	
		ha	%
8	Junio-Enero	661.48	0.59
9	Mayo-Enero	17433.62	15.56
10	Mayo-Febrero	<b>52062.39</b>	<b>46.46</b>
11	Mayo-Marzo	22581.31	20.15
12	Mayo-Abril	19311.79	17.23
Total		112050.60	100.00

*Fuente: Datos Vectoriales: INEGI (2009b).*

Con excepción de sitios como “Cuiloxochitla”, “D 11” y “S de El Salto” donde dominan terrenos con inclinación menor a 10%, otros 25 sitios tuvieron pendientes entre moderadas a fuertes (10 a 65%) y sólo algunos con pendientes de moderadas a muy fuertes (20 a 80%). En cuanto a la exposición de la pendiente en los sitios estudiados, las más frecuentes fueron las orientadas al sur y al oeste (Cuadro 5).



**Figura 12.** Período de humedad y principales grupos de suelo según Miehlich (1980). Los puntos en rojo indican los sitios donde se realizaron perfiles de suelo. Para las claves de las unidades de suelo ver Cuadro 5.

**Cuadro 5.** Descripción fisiográfica y edáfica de los sitios.

S	Nombre	Coordenadas UTM NAD27		Exp	P	G	E	Altitud m snm	Suelos INEGI	Suelos Miehlich (1980)	Clave WRB (2006)	Humedad meses	Vegetación
		X	Y										
24	W de D 14	529032	2101200	W	35	1	1	2650	Re+To+Tm/1	M5	Th+To+Tm+Re+Tv	10	<i>Pinus montezumae</i>
8	Cuiloxochitla	527927	2114839	S	10	1	1	2710	Re+To+Tm/1	M4	Th+To+Tm+Tv+Be/D	10	<i>Pinus teocote</i>
23	D 14	529850	2101950	W	20	1	1	2800	Re+To+Tm/1	D3	Tv+J	10	<i>Pinus montezumae</i>
7	D 3	530240	2108542	NE	16	1	1	2832	Be+Tm+I/2	I3	Th+To+Tv	10	<i>Abies religiosa</i>
29	Barranca Apaxo	532177	2094455	NW	60	6	6	2834	Be+Tm+I/2	M5	Th+To+Tm+Re+Tv	10	<i>Pinus</i> spp. <i>Abies religiosa</i> , <i>Quercus</i> sp., <i>Aile</i> , <i>Cupressus lusitanica</i> , <i>Cornus</i> sp.
20	Pasiontitla	530800	2114850	W	35	1	3	2900	Be+Tm+I/2	I3	Th+To+Tv	10	<i>Pinus patula</i> , <i>Pinus pseudostrobus</i> , <i>Pinus Teocote</i>
4	O 17	530582	2112415	S	42	1	2	2918	Re+To+Tm/1	I3	Th+To+Tv	10	<i>Pinus montezumae</i> , <i>Pinus pseudostrobus</i>
5	O 18	531440	2112175	NE	80	1	1	2932	Re+To+Tm/1	I2	Th+Bd+Tv	10	<i>Abies religiosa</i>
39	La Papa Acatzi	546875	2121540	SE	15	1	2	2964	Be+Tm+I/2	M1	Tm+Th+To+Tv	10	<i>Pinus montezumae</i> , <i>Pinus patula</i> .
6	D 11	532240	2107789	W	4	3	3	2965	Be+Tm+I/2	D3	Tv+J	10	<i>Abies religiosa</i> , <i>Pinus</i> sp., <i>Cupressus lusitanica</i>
19	Las Anomias	531400	2115570	W	25	1	1	3000	Be+Tm+I/2	I2	Th+Bd+Tv	10	<i>Abies religiosa</i>
31	S de El Salto	534478	2096137	NW	8	2	2	3099	Be+Tm+I/2	D3	Tv+J	10	<i>Pinus patula</i> , <i>Abies religiosa</i> .
28	La Ventana	544221	2109851	E	16	1	2	3127	Be+Tm+I/2	C1	Tv+J+Th+Tv	10	<i>Pinus ayacahuite</i> , <i>Pinus pseudostrobus</i> .
22	O 16	532250	2102150	S	55	1	1	3225	Be+Tm+I/2	C1	Tv+J+Th+Tv	10	<i>Abies religiosa</i>
12	D2 4	532351	2106898	SW	20	1	1	3228	Be+Tm+I/2	D3	Tv+J	10	<i>Abies religiosa</i>
1	O 1	533236	2108833	S	65	2	2	3250	Be+Tm+I/2	C1	Tv+J+Th+Tv	10	<i>Abies religiosa</i> , <i>Pinus montezumae</i>
33	SE Barranca Tlalquecotchcotl	543181	2114683	SE	45	5	5	3281	Be+Tm+I/2	C1	Tv+J+Th+Tv	11	<i>Abies religiosa</i> , <i>Pinus ayacahuite</i> , <i>Cupressus lusitanica</i> cultivo y pastizal
2	F 1	533304	2111309	W	30	3	4	3288	Be+Tm+I/2	C1	Tv+J+Th+Tv	10	<i>Pinus hartwegii</i> , <i>Pinus pseudostrobus</i> , <i>Abies religiosa</i> , <i>Quercus</i> sp.
17	O 2	533500	2109750	W	35	1	1	3300	Be+Tm+I/2	C1	Tv+J+Th+Tv	10	<i>Abies religiosa</i>
18	Cruce el 8	532250	2115850	SW	25	2	2	3300	Be+Tm+I/2	I2	Th+Bd+Tv	10	<i>Abies religiosa</i> , <i>Alnus</i> sp.
30	N Barranca Mata Leones	536262	2097553	S	20	2	2	3312	Be+Tm+I/2	C1	Tv+J+Th+Tv	10	<i>Abies religiosa</i> , <i>Pinus hartwegii</i>
27	Agua Escondida	542286	2110002	E	60	1	2	3333	Rd+I+Tm/1/L	C1	Tv+J+Th+Tv	11	<i>Pinus montezumae</i> , <i>Pinus teocote</i>
13	O 15	533082	2106584	N	44	1	1	3336	Be+Tm+I/2	D3	Tv+J	10	<i>Abies religiosa</i>
15	D 5	532932	2106452	W	26	1	1	3390	Be+Tm+I/2	D3	Tv+J	10	<i>Abies religiosa</i>
10	O1 3	533785	2111786	SE	60	1	1	3398	Be+Tm+I/2	C1	Tv+J+Th+Tv	10	<i>Abies religiosa</i>
26	La Venta	541056	2110845	E	20	1	2	3418	Rd+I+Tm/1/L	C1	Tv+J+Th+Tv	11	<i>Pinus teocote</i> , <i>Pinus hartwegii</i> .
32	S Barranca Tlalquecotchcotl	542103	2114526	S	40	2	2	3425	Be+Tm+I/2	C1	Tv+J+Th+Tv	11	<i>Abies religiosa</i> , <i>Pinus hartwegii</i>
14	O 14	533121	2106124	S	55	2	3	3440	Be+Tm+I/2	D3	Tv+J	10	<i>Abies religiosa</i> , <i>Pinus montezumae</i> , <i>Pinus</i> sp.
37	Tlalcomajada E de Tectorre	542529	2121800	N	61	2	3	3512	Be+Tm+I/2	C1	Tv+J+Th+Tv	12	<i>Pinus</i> spp., <i>Abies religiosa</i>
3	F 5	534939	2110074	NW	20	1	1	3522	Rd+I+Tm/1/L	C1	Tv+J+Th+Tv	11	<i>Pinus hartwegii</i>
35	SW Barranca Tlalquecotchcotl	541221	2114562	S	35	2	2	3540	Rd+I+Tm/1/L	B2	Tv+Th+Rd	12	<i>Pinus hartwegii</i> , <i>Abies religiosa</i>
16	F 11	534716	2111918	E	45	2	2	3550	Be+Tm+I/2	C1	Tv+J+Th+Tv	11	<i>Pinus hartwegii</i> , <i>Abies religiosa</i>
11	F 2	534603	2111225	SE	35	2	2	3585	Be+Tm+I/2	C1	Tv+J+Th+Tv	11	<i>Pinus hartwegii</i> , <i>Abies religiosa</i>
9	Coronilla	533552	2117782	S	35	1	1	3600	Be+Tm+I/2	I1	Th+L	11	<i>Pinus hartwegii</i>
25	Pela Gallina	538910	2110546	NE	8	1	1	3615	Rd+I+Tm/1/L	C1	Tv+J+Th+Tv	12	<i>Pinus hartwegii</i>
34	S Barranca Tlalquecotchcotl	541942	2115007	S	60	2	3	3667	Be+Tm+I/2	C1	Tv+J+Th+Tv	11	<i>Pinus hartwegii</i>
36	Chalchoapa NE de Tectorre	542010	2121193	N	21	1	1	3696	Be+Tm+I/2	B2	Tv+Th+Rd	12	<i>Pinus hartwegii</i>
21	Paso de Cortes	536125	2111200	NE	20	1	1	3723	Be+Tm+I/2	C1	Tv+J+Th+Tv	11	<i>Pinus hartwegii</i>
38	La Laguna Xahuehahuatlco	541183	2121616	N	24	1	2	3828	Rd+I+Tm/1/L	B2	Tv+Th+Rd	12	<i>Pinus hartwegii</i>

S= Sitio; Exp= Exposición; P= Pendiente; G y E= Número de géneros y especies arbóreas. Para la descripción de suelos de Miehlich consultar Cuadro 2. Duración de la humedad del suelo (INEGI, 2009b).

## 2.3 Propiedades bioquímicas y calidad del suelo

La actividad de las fosfatasas ácidas (Fac) y alcalinas (Falc) del suelo, el carbono de la biomasa microbiana (CBM) y evolución de CO<sub>2</sub> se reconocieron como los parámetros del suelo de las propiedades bioquímicas más influyentes sobre el establecimiento, crecimiento y desarrollo de la vegetación (Cuadro 6).

**Cuadro 6.** Propiedades bioquímicas de los suelos del PN IztaPopo.

Sitio	Nombre	UTM NAD 27		Exposición	Pendiente %	Géneros	Especies	Altitud m snm	Fac	Falc	CBM	CO <sub>2</sub>
		X	Y						µg p-NP g <sup>-1</sup> h <sup>-1</sup>	µg p-NP g <sup>-1</sup> h <sup>-1</sup>	Mg ha <sup>-1</sup>	kg ha <sup>-1</sup> día <sup>-1</sup>
1	O 1	533236	2108833	S	65	2	2	3250	0.027	0.013	0.27	158.4
2	F 1	533304	2111309	W	30	3	4	3288	0.027	0.012	1.19	62.8
3	F 5	534939	2110074	NW	20	1	1	3522	0.029	0.014	1.66	37.7
4	O 17	530582	2112415	S	42	1	2	2918	0.025	0.016	2.58	63.4
5	O 18	531440	2112175	NE	80	1	1	2932	0.027	0.014	0.08	145.0
6	D 11	532240	2107789	W	4	3	3	2965	0.050	0.020	0.60	145.6
7	D 3	530240	2108542	NE	16	1	1	2832	0.040	0.013	0.15	62.0
8	Cuixochitla	527927	2114839	S	10	1	1	2710	0.035	0.018	2.48	80.2
9	Coronilla	533552	2117782	S	35	1	1	3600	0.051	0.015	2.36	67.6
10	O1 3	533785	2111786	SE	60	1	1	3398	0.046	0.017	0.70	101.7
11	F 2	534603	2111225	SE	35	2	2	3585	0.032	0.016	1.41	65.5
12	D2 4	532351	2106898	SW	20	1	1	3228	0.030	0.013	1.24	140.0
13	O 15	533082	2106584	N	44	1	1	3336	0.047	0.014	1.15	153.6
14	O 14	533121	2106124	S	55	1	1	3440	0.041	0.011	1.41	61.9
15	D 5	532932	2106452	W	26	1	1	3390	0.031	0.020	2.57	70.7
16	F 11	534716	2111918	E	45	2	2	3550	0.032	0.015	2.97	86.5
17	O 2	533500	2109750	W	35	1	1	3300	0.027	0.014	4.37	50.4
18	Cruce El 8	532250	2115850	SW	25	2	2	3300	0.038	0.017	1.03	95.0
19	Las Anomias	531400	2115570	W	25	1	1	3000	0.037	0.018	2.89	60.8
20	Pasiontitla	530800	2114850	W	35	1	3	2900	0.027	0.017	1.29	72.7
21	Paso de Cortés	536125	2111200	NE	20	1	1	3723	0.039	0.013	1.17	75.5
22	O 16	532250	2102150	S	55	1	1	3225	0.030	0.012	0.86	185.5
23	D 14	529850	2101950	W	20	1	1	2800	0.026	0.014	2.07	65.7
24	W de D 14	529032	2101200	W	35	1	1	2650	0.032	0.016	3.23	38.3
25	Pela Gallina	538910	2110546	NE	8	1	1	3615	0.015	0.014	0.004	415
26	La Venta	541056	2110845	E	20	1	2	3418	0.015	0.021	0.029	170
27	Agua Escondida	542286	2110002	E	60	1	2	3333	0.011	0.015	0.017	200
28	La Ventana	544221	2109851	E	16	1	2	3127	0.013	0.010	0.025	230
29	Barranca Apaxo	532177	2094455	NW	60	6	6	2834	0.012	0.015	0.029	140
30	N Barranca Mata Leones	536262	2097553	S	20	2	2	3312	0.024	0.013	0.037	240
31	S de El Salto	534478	2096137	NW	8	2	2	3099	0.013	0.013	0.032	140
32	S barranca Tlalquecotchcotl 1	542103	2114526	S	40	2	2	3425	0.003	0.053	0.037	240
33	SE Barranca Tlalquecotchcotl	543181	2114683	SE	45	3	3	3281	0.004	0.022	0.037	240
34	S Barranca Tlalquecotchcotl 2	541942	2115007	S	60	2	3	3667	0.004	0.026	0.021	295
35	SW Barranca Tlalquecotchcotl	541221	2114562	S	35	2	2	3540	0.019	0.024	0.004	415
36	Chalchoapa NE de Tetorre	542010	2121193	N	21	1	1	3696	0.024	0.021	0.004	415
37	Tlalcomajada E de Tetorre	542529	2121800	N	61	2	3	3512	0.042	0.022	0.021	295
38	La Laguna Xahuehauatlalco	541183	2121616	N	24	1	2	3828	0.049	0.018	0.028	155
39	La Papa Acatzi	546875	2121540	SE	15	1	2	2964	0.017	0.018	0.035	100
	<b>Mínimo</b>							<b>2650</b>	<b>0.003</b>	<b>0.010</b>	<b>0.004</b>	<b>37.7</b>
	<b>Promedio</b>							<b>3269</b>	<b>0.028</b>	<b>0.017</b>	<b>1.028</b>	<b>149.7</b>
	<b>Máximo</b>							<b>3828</b>	<b>0.051</b>	<b>0.053</b>	<b>4.37</b>	<b>415.0</b>
	<b>Desviación estándar</b>							<b>306.2</b>	<b>0.013</b>	<b>0.007</b>	<b>1.16</b>	<b>104.8</b>

Géneros y Especies= número de especies y géneros arbóreos en el sitio; Fac= Fosfatasa ácida; Falc= Fosfatasa alcalina. Datos ordenados con respecto a la altitud. CO<sub>2</sub>= producción de CO<sub>2</sub> del suelo.

Para reducir la dimensionalidad de los datos y reconocer las variables robustas (VR), se procesó un Análisis de Componentes Principales (ACP) sobre una matriz de correlaciones donde se deben considerar los eigenvalores mayores a uno. Sin embargo, en este análisis, solo un autovalor fue mayor a la unidad (2.19) que representa 0.55 de la varianza definiendo al primer Componente Principal (CP<sub>1</sub>). El Cuadro 7 muestra que aunque el segundo autovalor fue menor a uno, puede ser incluido para reducir el porcentaje de aleatoriedad y, al adicionarlo al primero, se acumula 77% de la varianza.

**Cuadro 7.** Eigenvalores de las propiedades bioquímicas del suelo.

Eigenvalor	Autovalor	Diferencia	Proporción	Acumulada(%)
1	2.19	1.29	0.55	55
2	0.89	0.29	0.22	77
3	0.61	0.29	0.15	92
4	0.31		0.08	100

Las VR que definieron al CP<sub>1</sub> y CP<sub>2</sub> se identificaron con base en el valor absoluto más alto. En este caso -0.58 para la evolución del CO<sub>2</sub> y 0.895 para la Fosfatasa alcalina (Cuadro 8).

**Cuadro 8.** Eigenvectores de las propiedades bioquímicas del suelo.

Variable	CP <sub>1</sub>	CP <sub>2</sub>	CP <sub>3</sub>	CP <sub>4</sub>
Fosfatasa ácida	0.499	-0.09	0.86	0.024
<b>Fosfatasa alcalina</b>	-0.322	<b>0.895</b>	0.288	-0.11
Carbono en Biomasa Microbiana	0.555	0.38	-0.298	0.677
<b>Evolución de CO<sub>2</sub> del suelo</b>	<b>-0.58</b>	-0.22	0.293	0.73

La calificación del sitio y en consecuencia de su calidad de suelo, se obtuvo del desarrollo de las ecuaciones 1 a 5 descritas en la sección de Materiales y Métodos.

A manera de ejemplo:

Para el CP<sub>1</sub>, los valores experimentales de las variables consideradas en los sitios "O 1" y "F 1" (Cuadro 6) y sus coeficientes del eigenvector de cada CP se sustituyeron en la ecuación 3:

$$y_i = a_i \left( \frac{x - \bar{x}}{\sqrt{\sigma}} \right) = CP_{i1} a_i \left( \frac{x - \bar{x}}{\sqrt{\sigma}} \right)$$

Desarrollando la ecuación para CP<sub>1</sub>:

$$CP_{11} = 0.499 * [(0.027 - 0.028) / 0.013] + -0.32 * [(0.013 - 0.017) / 0.007] + 0.55 * [(0.27 - 1.028) / 1.16] + -0.58 * [(158.4 - 149.7) / 104.78] = -0.20.$$

$$CP_{21} = 0.499 * [(0.027 - 0.028) / 0.013] + -0.32 * [(0.012 - 0.017) / 0.007] + 0.55 * [(1.19 - 1.028) / 1.16] + -0.58 * [(62.830 - 149.662) / 104.78] = 0.78.$$

Nota:  $CP_{11}$ , es el  $CP_1$  del sitio 1 (O 1) y  $CP_{21}$ , el  $CP_1$  del sitio 2 (F 1).

y para  $CP_2$ :

$$CP_{12} = -0.09 * [(0.027 - 0.028) / 0.013] + 0.895 * [(0.013 - 0.017) / 0.007] + 0.38 * [(0.27 - 1.028) / 1.16] + -0.22 * [(158.360 - 149.662) / 104.775] = -0.79.$$

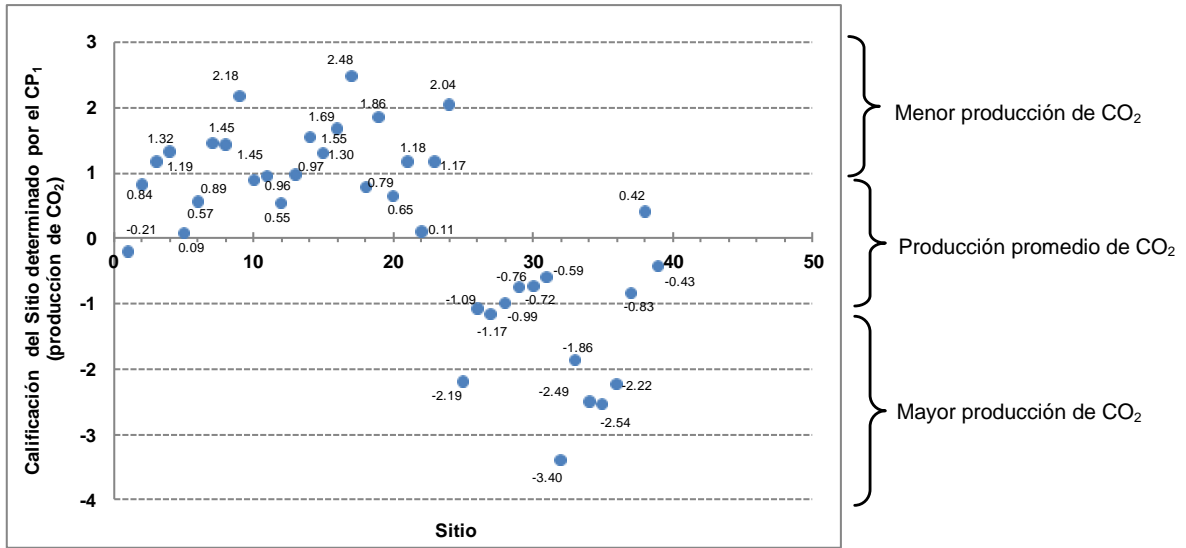
$$CP_{22} = -0.09 * [(0.027 - 0.028) / 0.013] + 0.895 * [(0.012 - 0.017) / 0.007] + 0.38 * [(1.19 - 1.028) / 1.16] + -0.22 * [(62.830 - 149.662) / 104.775] = -0.208.$$

Nota:  $CP_{12}$ , es el  $CP_2$  del sitio 1 (O 1) y  $CP_{22}$ , el  $CP_2$  del sitio 2 (F 1).

Con el desarrollo anterior se encontró que la producción de  $CO_2$  del suelo fue la primera VR para el  $CP_1$  y la calificación del sitio atribuible a propiedades bioquímicas del suelo, dependió principalmente de la respiración del suelo. Si a los sitios con valores cercanos al promedio en emisión de  $CO_2$  se les atribuye una buena calidad de suelos, entonces un coeficiente de menor valor del eigenvector en esta variable, sugiere que los sitios con evolución de  $CO_2$  mayor al promedio tuvieran calificación de calidad del suelo baja (Cuadro 9) y, se ubicaran con valor negativo debajo de cero en el eje de las ordenadas en el gráfico de la Figura 13.

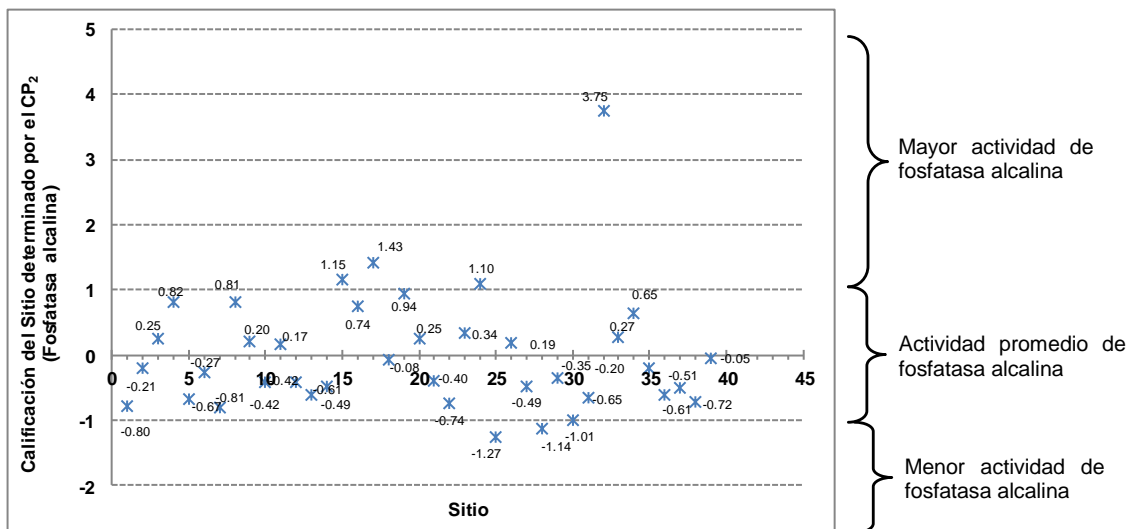
El sitio denominado "S Barranca Tlaquecochcotl 1" tuvo la calificación de  $CP_1$  más baja (-3.40) con una liberación de  $CO_2$  igual a  $240 \text{ kg ha}^{-1} \text{ día}^{-1}$  y el lugar "O 2" la calificación más alta (2.48) con baja producción de  $CO_2$  ( $50.4 \text{ kg ha}^{-1} \text{ día}^{-1}$ ). Los sitios con calificaciones de  $CP_1$  entre -1 y 1 en el eje de las ordenadas, que se muestra en la Figura 13, fueron los que tuvieron producción de  $CO_2$  del suelo cercana al promedio general ( $149.6 \text{ kg ha}^{-1} \text{ día}^{-1}$ ).





**Figura 13.** Gráfica de  $CP_1$  (producción de  $CO_2$  del suelo). Sitios con valor menor a 0 en el eje de las  $y$  tuvieron producción de  $CO_2$  del suelo mayor al promedio. Números a lado de puntos indican la calificación de  $CP$  para cada sitio.

Para el  $CP_2$  (definido por la actividad de la fosfatasa alcalina) el coeficiente positivo determinó que sitios con actividad de fosfatasa alcalina (Falc), menor al valor promedio, tuvieron valores negativos (Figura 14).



**Figura 14.** Gráfica de  $CP_2$  definido por la fosfatasa alcalina. Números a lado de asteriscos indican la calificación de  $CP$  para cada sitio.

A los sitios denominados “Pela Gallina” y “La Ventana” donde hubo menor actividad enzimática les correspondieron los menores valores del CP<sub>2</sub> y, en treinta y cuatro sitios con actividad promedio, se tuvieron valores entre -1 y 1.

Para obtener la calificación del sitio atribuible a las propiedades bioquímicas del suelo y derivar así la clase de calidad de suelo al que pertenecen se aplicaron las ecuaciones:

$$P(A \cup B) = P(A) + P(B) \quad \text{Ecuación 4}$$

$$VCSBq = CP_1 + CP_2 \dots + CP_n \quad \text{Ecuación 5}$$

$$VCSBq = CP_{1, CO_2} + CP_{2, Falc} \quad \text{Ecuación 6}$$

Al realizar los cálculos respectivos, se encontraron los datos que se presentan en el Cuadro 9.

Los resultados indicaron que a los suelos con baja producción de CO<sub>2</sub>, alto contenido de CBM, pero con valores de actividad de fosfatasa alcalina, menores al promedio se les clasificó, por estas propiedades bioquímicas, como suelos de alta calidad (Cuadro 9).

El análisis de correlación de Pearson mostró que el VCSBq tuvo correlación significativa ( $p \leq 0.05$ ) con las variables presentadas en el Cuadro 10.

**Cuadro 9.** Valor de calidad de suelo estimado por sus propiedades bioquímicas.

Sitio	Nombre	Altitud	Fac	Falc	CBM	CO <sub>2</sub>	CP <sub>1</sub>	CP <sub>2</sub>	VCSBq	*Clase de calidad del suelo
		m snm	µg p-NPP g <sup>-1</sup> h <sup>-1</sup>		Mg ha <sup>-1</sup>	kg ha <sup>-1</sup> día <sup>-1</sup>				
25	Pela Gallina	3615	0.015	0.014	4.32	415.0	-2.190	-1.210	<b>-3.400</b>	<b>MB</b>
36	Chalchoapa NE de Tectorre	3696	0.024	0.021	4.32	415.0	-2.224	-0.293	<b>-2.517</b>	<b>B</b>
35	SW Barranca Tlalquecotchcotl	3540	0.019	0.024	4.32	415.0	-2.539	0.123	<b>-2.416</b>	<b>B</b>
28	La Ventana	3127	0.013	0.010	24.86	230.0	-0.986	-1.213	<b>-2.199</b>	<b>B</b>
27	Agua Escondida	3333	0.011	0.015	17.02	200.0	-1.169	-0.530	<b>-1.699</b>	<b>B</b>
34	S Barranca Tlalquecotchcotl 2	3667	0.004	0.026	21.07	295.0	-2.491	0.840	<b>-1.651</b>	<b>B</b>
30	N Barranca Mata Leones	3312	0.024	0.013	37.29	240.0	-0.719	-0.859	<b>-1.578</b>	<b>B</b>
33	SE Barranca Tlalquecotchcotl	3281	0.004	0.022	37.29	240.0	-1.862	0.392	<b>-1.470</b>	<b>B</b>
31	S de El Salto	3099	0.013	0.013	31.88	140.0	-0.585	-0.714	<b>-1.299</b>	<b>B</b>
29	Barranca Apapaxo	2834	0.012	0.015	29.18	140.0	-0.757	-0.370	<b>-1.127</b>	<b>B</b>
1	O 1	3250	0.027	0.013	27.28	158.36	-0.205	-0.79	<b>-0.995</b>	<b>B</b>
37	Tlalcomajada E de Tectorre	3512	0.042	0.022	21.07	295.0	-0.833	0.028	<b>-0.805</b>	<b>M</b>
26	La Venta	3418	0.015	0.021	28.64	170.0	-1.085	0.354	<b>-0.732</b>	<b>M</b>
22	O 16	3225	0.030	0.012	86.01	185.53	0.112	-0.763	<b>-0.651</b>	<b>M</b>
39	La Papa Acatzi	2964	0.017	0.018	34.58	100.0	-0.430	0.036	<b>-0.394</b>	<b>M</b>
5	O 18	2932	0.027	0.014	84.82	145.01	0.089	-0.367	<b>-0.278</b>	<b>M</b>
12	D2 4	3228	0.030	0.013	124.22	140.03	0.551	-0.490	<b>0.061</b>	<b>M</b>
38	La Laguna Xahuehahuatíalco	3828	0.049	0.018	27.83	155.0	0.422	-0.252	<b>0.170</b>	<b>M</b>
13	O 15	3336	0.047	0.014	114.90	153.56	0.970	-0.443	<b>0.527</b>	<b>M</b>
2	F 1	3288	0.027	0.012	118.98	62.83	0.78	-0.208	<b>0.57</b>	<b>M</b>
6	D 11	2965	0.050	0.020	59.94	145.59	0.572	0.099	<b>0.671</b>	<b>M</b>
10	O1 3	3398	0.046	0.017	69.67	101.71	0.887	-0.203	<b>0.683</b>	<b>M</b>
21	Paso de Cortés	3723	0.039	0.013	117.06	75.49	1.180	-0.383	<b>0.797</b>	<b>M</b>

Fac= Fosfatasa ácida del suelo; Falc= Fosfatasa alcalina del suelo; VCSBq= Valor de calidad de suelo de los parámetros bioquímicos; MB= Muy Bajo; B= Bajo; M= Medio; A= Alto; MA= Muy Alto. Valores ordenados conforme al VCSBq.

A manera de ejemplo, si se sustituye en la ecuación 6 los valores de los CP<sub>1</sub> y CP<sub>2</sub> del sitio denominado "F 1": VCSBq= 0.835 + (-) 0.355= 0.481.

\* Atribuible a sus propiedades bioquímicas.

**Cuadro 9 (Continuación).**

Sitio	Nombre	Altitud	Fac	Falc	CBM	CO <sub>2</sub>	CP <sub>1</sub>	CP <sub>2</sub>	VCSBq	*Clase de calidad del suelo
		m snm	µg p-NPP g <sup>-1</sup> h <sup>-1</sup>	Mg ha <sup>-1</sup>	kg ha <sup>-1</sup> día <sup>-1</sup>					
18	Cruce El 8	3300	0.038	0.017	102.80	94.97	0.791	0.029	<b>0.820</b>	<b>M</b>
20	Pasiontitla	2900	0.027	0.017	128.73	72.74	0.652	0.200	<b>0.852</b>	<b>M</b>
14	O 14	3440	0.041	0.011	141.27	61.89	1.547	-0.520	<b>1.027</b>	<b>A</b>
11	F 2	3585	0.032	0.016	140.72	65.53	0.961	0.134	<b>1.095</b>	<b>A</b>
32	S barranca Tlalquecotcht 1	3425	0.003	0.053	37.29	240	-3.403	4.538	<b>1.135</b>	<b>A</b>
7	D 3	2832	0.040	0.013	149.36	62.02	1.452	-0.224	<b>1.228</b>	<b>A</b>
3	F 5	3522	0.029	0.014	165.59	37.75	1.186	0.117	<b>1.303</b>	<b>A</b>
23	D 14	2800	0.026	0.014	206.53	65.75	1.171	0.143	<b>1.315</b>	<b>A</b>
4	O 17	2918	0.025	0.016	258.22	63.44	1.322	0.611	<b>1.933</b>	<b>A</b>
8	Cuiloxochitla	2710	0.035	0.018	247.67	80.23	1.445	0.783	<b>2.229</b>	<b>A</b>
16	F 11	3550	0.032	0.015	297.41	86.52	1.689	0.567	<b>2.256</b>	<b>A</b>
15	D 5	3390	0.031	0.020	256.57	70.74	1.302	1.112	<b>2.413</b>	<b>A</b>
9	Coronilla	3600	0.051	0.015	235.81	67.57	2.176	0.293	<b>2.469</b>	<b>A</b>
19	Las Anomias	3000	0.037	0.018	288.67	60.81	1.857	0.868	<b>2.726</b>	<b>A</b>
24	W de D 14	2650	0.032	0.016	322.66	38.34	2.041	0.910	<b>2.952</b>	<b>A</b>
17	O 2	3300	0.027	0.014	437.5	50.43	2.483	1.044	<b>3.526</b>	<b>MA</b>
	<b>Mínimo</b>		<b>0.003</b>	<b>0.010</b>	<b>4.320</b>	<b>37.75</b>	<b>-3.403</b>	<b>-1.213</b>	<b>-3.400</b>	
	<b>Promedio</b>		<b>0.028</b>	<b>0.017</b>	<b>116.495</b>	<b>149.66</b>	<b>0.159</b>	<b>0.083</b>	<b>0.242</b>	
	<b>Máximo</b>		<b>0.051</b>	<b>0.053</b>	<b>437.5</b>	<b>415.0</b>	<b>2.483</b>	<b>4.538</b>	<b>3.526</b>	
	<b>Desviación estándar</b>		<b>0.013</b>	<b>0.007</b>	<b>107.325</b>	<b>104.78</b>	<b>1.479</b>	<b>0.945</b>	<b>1.691</b>	

Fac= Fosfatasa ácida del suelo; Falc= Fosfatasa alcalina del suelo; VCSBq= Valor de calidad de suelo de los parámetros bioquímicos; MB= Muy Bajo; B= Bajo; M= Medio; A= Alto; MA= Muy Alto. Valores ordenados conforme al VCSBq.

A manera de ejemplo, si se sustituye en la ecuación 6 los valores de los CP<sub>1</sub> y CP<sub>2</sub> del sitio denominado "F 1": VCSBq= 0.78 + (-) 0.208= 0.57.

\*Atribuible a sus propiedades bioquímicas.

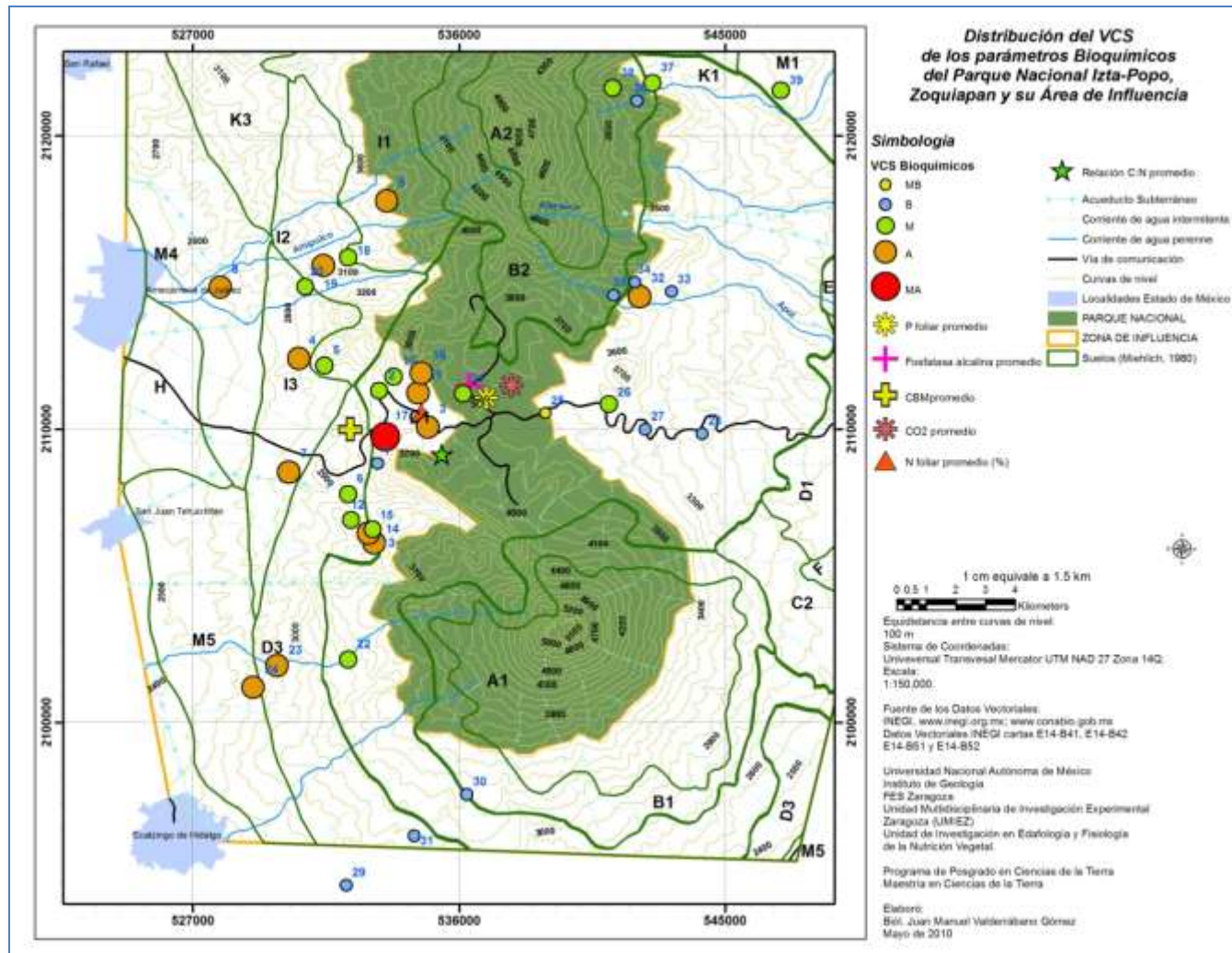
**Cuadro 10.** Coeficientes de correlación entre calidad del suelo y propiedades bioquímicas.

Variable	VCSBq ( $p \leq 0.05$ )
	— r —
C-lábil	0.6
CO <sub>2</sub> /CBM	-0.6
CBM/COS	0.6
Producción de CO <sub>2</sub> del suelo	-0.8
CBM	0.9
Fosfatasa ácida	0.5
N-foliar	0.6
P-foliar	-0.7
Suma de bases intercambiables	-0.4
Na intercambiable	0.4
Ca intercambiable	-0.6
Conductividad eléctrica	----
VCS Total	0.7
VCS Químicos	0.5
Temperatura media anual (°C)	0.4
Número de géneros arbóreos dominantes	----
Número de especies arbóreas dominantes	-0.3

COS= Carbono orgánico del suelo; CO<sub>2</sub>= respiración del suelo; CBM= Carbono de la biomasa microbiana; VCS= Valor de calidad del suelo; Bq= atribuible a parámetros bioquímicos; r= coeficiente de correlación; ----= no significativo.

Del análisis espacial se encontró que solo 2.6% del área superficial del Parque Nacional IztaPopo tuvo calidad de suelo (VCSBq) muy baja, 26% fue calidad baja, 36% calidad de suelo media y poco más de 36% calidad alta y muy alta.

El mapa de la Figura 15 muestra que el promedio espacial de producción de CO<sub>2</sub> del suelo es lejano a los sitios con mayor VCSBq pero los promedios espaciales de actividad de fosfatasa alcalina, relación C:N, porcentaje de N-foliar y CBM, se localizaron cercanos a los VCSBq más altos. En esta Figura también se observa que los sitios agrupados con calidad baja (B) y muy baja (MB) se distribuyeron en la vertiente oriental de la Sierra hacia el valle de Puebla, quizá por ser una región con mayor número de localidades urbanas en la Zona de Influencia del PN IztaPopo (INEGI, 2009c).



**Figura 15.** Calidad de suelo por parámetros bioquímicos. Círculos rojos grandes representan sitios con valores de calidad de suelo más altos y círculos azul y amarillo más pequeños a los de calidad de suelo más baja. Los polígonos verdes son las unidades de suelo reportadas por Mielich (1980). Los números en azul indican el sitio de muestreo (Cuadro 9).

En general se observó un aumento de CO<sub>2</sub> del suelo con la altitud hasta 3700 m snm, aunque este incremento no fue significativo (Figura 16) porque después de esta altitud disminuyó la producción de CO<sub>2</sub>.

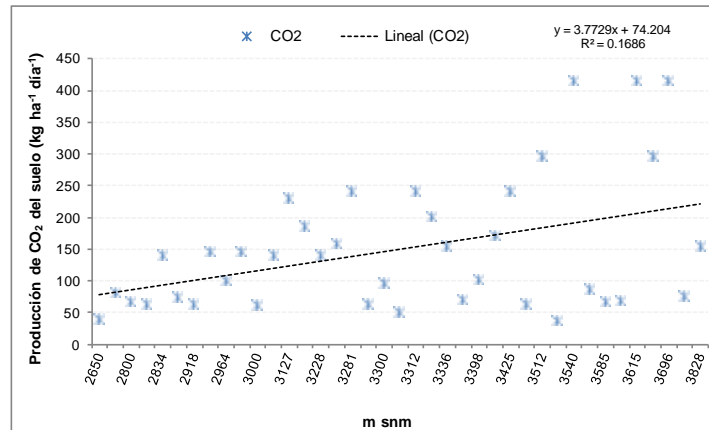


Figura 16. Relación entre la producción de CO<sub>2</sub> del suelo con altitud.

La producción de CO<sub>2</sub> del suelo si presentó correlación significativa ( $p \leq 0.05$ ) con los porcentajes de fósforo en tejido foliar y con el valor calculado de calidad de suelo atribuible a parámetros químicos ( $r = 0.7$  y  $-0.9$ ); también, fue dependiente del tipo de vegetación (Cuadro 11). En sitios con bosque monoespecífico de *P. montezumae* hubo la producción mínima y en suelos bajo vegetación asociada de *P. spp.-Abies religiosa* se tuvo la producción más alta de CO<sub>2</sub> (Figura 17).

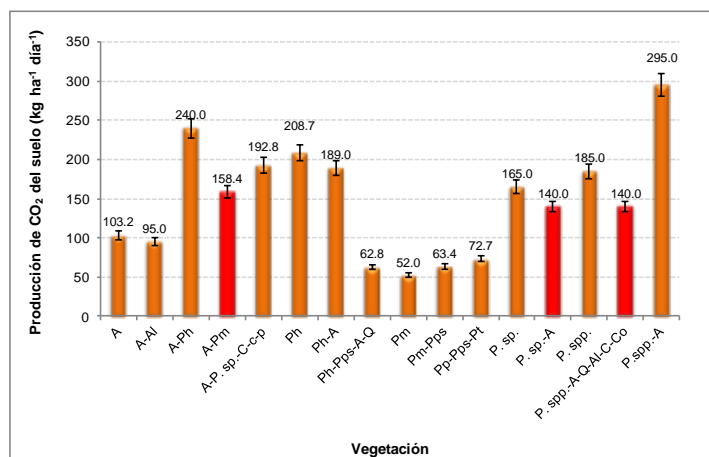


Figura 17. Producción de CO<sub>2</sub> del suelo por tipo de vegetación. Las barras color rojo señalan los valores cercanos al promedio ( $149.7 \text{ kg ha}^{-1} \text{ día}^{-1}$ ).

*P. sp*= Una sola especie de pino; *Pm*= *Pinus montezumae*; *Pps*= *Pinus pseudostrobus*; *Pt*= *Pinus teocote*; *Pp*= *Pinus patula*; *Ph*= *Pinus hartwegii*; *P. spp.*= Dos a más especies de pino; *p*= pastizal; *A*= *Abies religiosa*; *Al*= *Alnus sp.*; *C*= *Cupressus lusitanica*; *c*= cultivo; *Co*= *Cornus sp.*; *Q*= *Quercus spp.* Barra de error= 0.05.

**Cuadro 11.** Coeficientes de correlación para COS, CO<sub>2</sub> y CBM del suelo.

Variable	COS		CO <sub>2</sub>		CBM	
	r	p≤0.05	r	p≤0.05	r	p≤0.05
C-lábil	ns	ns	-0.5	0.001	0.8	<0.0001
CO <sub>2</sub> /CBM	ns	ns	0.8	<0.0001	-0.4	0.03
CBM/COS	-0.3	0.03	-0.5	0.001	0.7	<0.0001
CO <sub>2</sub>	ns	ns	ns	ns	-0.6	<0.0001
CBM	ns	ns	-0.7	<0.0001	ns	ns
COS	ns	ns	ns	ns	ns	ns
P-disponible	0.8	<0.0001	-0.5	0.003	0.5	0.003
N-total	0.6	<0.0001	ns	ns	ns	ns
pH activo	ns	ns	-0.3	0.05	ns	ns
Fosfatasa alcalina	ns	ns	0.3	0.03	ns	ns
Fosfatasa ácida	0.4	0.004	-0.4	0.005	0.4	0.02
Altitud	0.5	0.003	0.4	0.01	ns	ns
Precipitación media anual (mm)	0.4	0.008	0.4	0.01	ns	ns
N-foliar	0.3	0.03	-0.6	0.0002	0.6	0.0002
P-foliar	ns	ns	0.7	<0.0001	-0.6	<0.0001
C:N	0.3	0.05	ns	ns	ns	ns
Cationes intercambiables	ns	ns	0.4	0.04	-0.6	0.0002
Na intercambiable	ns	ns	-0.4	0.01	ns	ns
K intercambiable	ns	ns	0.3	0.03	ns	ns
Ca intercambiable	ns	ns	0.4	0.005	-0.6	0.0002
Ca foliar	ns	ns	ns	ns	ns	ns
VCS Total	0.5	0.002	-0.6	<0.0001	0.6	0.0002
VCS Químicos	0.4	0.008	-0.9	<0.0001	0.4	0.006
VCS Bioquímicos	ns	ns	ns	ns	0.9	<0.0001
Temperatura media anual (°C)	-0.4	0.005	-0.4	0.007	ns	ns
Número de géneros arbóreos	ns	ns	0.4	0.02	ns	ns
Número de especies arbóreas	ns	ns	ns	ns	-0.3	0.03

COS= Carbono orgánico del suelo; CO<sub>2</sub>= respiración del suelo; CBM= Carbono de la biomasa microbiana; VCS= Valor de calidad del suelo; r= coeficiente de correlación; ns= no significativa.

Respecto del cociente CO<sub>2</sub>/CBM, tuvo su valor promedio más alto por arriba de 3500 m snm donde las condiciones ambientales son menos favorables para la biota, mientras que los valores más bajos se ubicaron a menos de 3000 m snm (Figura 18).



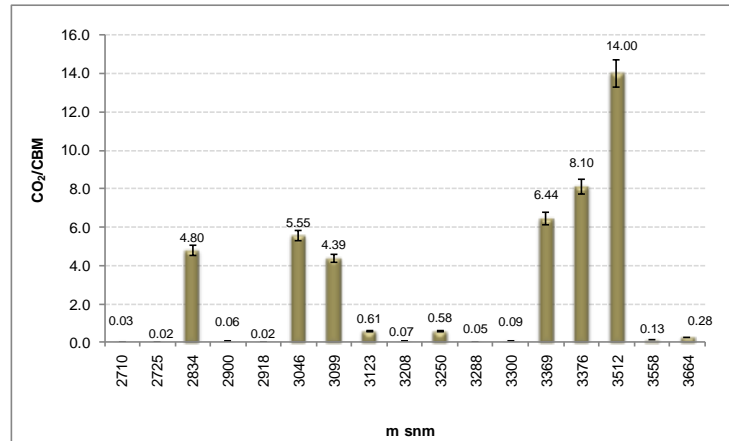


Figura 18. Producción de CO<sub>2</sub>/CBM con la altitud. Barra de error= 0.05.

El C de la fracción lábil del suelo (C-lábil), se encontró de 0.004 a 11.3% con promedio de 1.8%. El C-lábil fue mayor en suelos bajo *P. montezumae* y *P. teocote*, en altitudes menores de 3000 m snm (Figura 19). Del análisis estadístico se observaron correlaciones positivas y significativas ( $p \leq 0.05$ ) entre C-lábil con N-foliar (0.6) y temperatura media anual (0.6), en tanto que, las correlaciones negativas se encontraron con P-foliar (-0.4), altitud y CO<sub>2</sub> del suelo (-0.5).

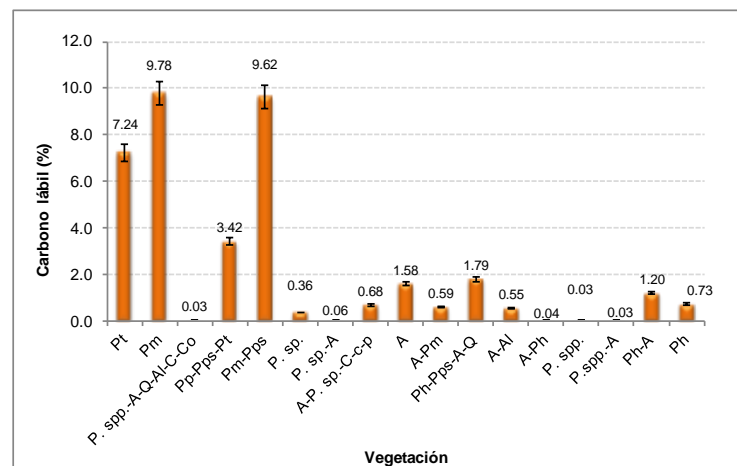


Figura 19. Carbono lábil por tipo de vegetación. Datos ordenados conforme se asciende en altitud. *P. sp*= Una sola especie de pino; *Pm*= *Pinus montezumae*; *Pps*= *Pinus pseudostrobus*; *Pt*= *Pinus teocote*; *Pp*= *Pinus patula*; *Ph*= *Pinus hartwegii*; *P. spp.*= Dos a más especies de pino; *p*= pastizal; *A*= *Abies religiosa*; *Al*= *Alnus sp.*; *C*= *Cupressus lusitanica*; *c*= cultivo; *Co*= *Cornus sp.*; *Q*= *Quercus spp.* Barra de error= 0.05.

## 2.4 Propiedades químicas y calidad del suelo

El Cuadro 12 muestra las propiedades químicas utilizadas en la caracterización de los suelos y en el reconocimiento de las variables más influyentes sobre la vegetación.

**Cuadro 12.** Descripción de propiedades químicas de los suelos del PN IztaPopo.

Nombre	Altitud m snm	N-total	P-disp	COS	MOS	MOS	Na	K	Mg	Ca	BI	pH	
												H <sub>2</sub> O 1:2	KCl 1:2
		Mg ha <sup>-1</sup>				%	cmol kg <sup>-1</sup>						
O 1	3250	4.32	0.92	45.89	73.84	4.40	2.70	0.45	3.88	3.26	10.29	6.67	5.86
F 1	3288	3.32	1.31	65.28	105.06	6.25	2.54	0.22	1.29	0.26	4.31	5.91	4.59
F 5	3522	3.87	0.88	43.83	70.54	4.20	2.54	0.25	0.55	0.23	3.58	5.35	3.90
O 17	2918	3.41	0.48	24.25	39.02	2.32	2.15	0.97	1.84	0.88	5.83	6.37	4.93
O 18	2932	3.74	0.67	33.58	54.03	3.22	1.67	0.57	2.74	2.24	7.22	6.79	5.77
D 11	2965	5.79	1.31	65.28	105.06	6.25	3.34	0.37	3.12	0.85	7.68	6.52	5.19
D 3	2832	1.96	1.12	55.96	90.05	5.36	5.01	0.17	0.92	0.77	6.87	6.38	5.17
Cuilochochitla	2710	1.46	0.63	31.71	51.03	3.04	1.75	1.19	3.87	1.02	7.82	6.18	4.91
Coronilla	3600	5.17	4.76	237.78	382.63	22.78	2.07	0.26	0.88	1.05	4.25	5.36	4.03
O1 3	3398	4.35	1.96	98.15	157.94	9.40	0.56	0.31	1.28	1.47	3.63	6.37	5.16
F 2	3585	4.28	2.39	119.63	192.51	11.46	0.64	0.43	1.34	1.05	3.46	6.03	4.65
D2 4	3228	4.47	3.17	158.55	255.14	15.19	1.75	0.38	2.37	3.12	7.62	6.44	5.70
O 15	3336	5.36	3.72	186.04	299.37	17.82	1.91	0.34	2.29	2.35	6.89	5.99	4.70
O 14	3440	4.20	1.79	89.53	144.08	8.58	1.75	0.61	1.33	1.73	5.41	6.15	5.23
D 5	3390	2.68	1.32	65.92	106.08	6.31	2.15	0.24	1.00	1.11	4.50	6.18	4.99
F 11	3550	4.82	2.53	126.47	203.51	12.11	0.95	0.27	0.81	0.65	2.69	5.40	4.20
O 2	3300	2.25	1.46	72.76	117.08	6.97	0.87	0.37	1.21	2.01	4.47	6.53	5.58
Cruce El 8	3300	7.00	3.72	186.04	299.37	17.82	1.11	1.02	1.96	2.64	6.72	5.91	4.96
Las Anomias	3000	4.09	2.41	120.31	193.60	11.52	1.51	0.49	1.04	1.67	4.72	6.34	4.90
Pasiontitla	2900	4.89	0.73	36.37	58.53	3.48	0.08	0.44	0.51	0.77	1.79	6.34	5.12
Paso de Cortés	3723	4.52	2.74	137.21	220.80	13.14	0.48	0.31	0.90	0.85	2.54	5.96	4.42
O 16	3225	1.26	1.56	78.13	125.72	7.48	0.72	0.40	1.20	1.81	4.13	6.20	4.99
D 14	2800	1.21	0.47	23.44	37.72	2.25	1.03	0.51	0.56	0.37	2.47	6.18	4.61
W de D 14	2650	1.00	0.51	25.39	40.86	2.43	1.15	0.18	0.24	0.29	0.70	6.05	4.31
Pela Gallina	3615	3.74	2.11	58.95	101.63	5.13	0.51	1.06	0.79	4.05	3.47	6.12	4.63
La Venta	3418	4.16	1.66	65.15	112.33	5.67	0.58	0.49	0.81	4.79	4.47	6.16	4.46
Agua Escondida	3333	5.68	2.68	85.32	147.10	7.43	0.84	0.80	1.52	8.69	5.47	5.24	5.05
La Ventana	3127	0.83	1.38	10.86	18.72	0.95	0.60	1.09	0.74	2.28	6.47	5.62	4.72

*N-total y P-disponible= Nitrógeno y Fósforo total del suelo; COS=Carbono orgánico del suelo; MOS= Materia orgánica del suelo; BI= suma de bases intercambiables; DE= Desviación estándar.*

**Cuadro 12 (Continuación).**

Nombre	Altitud _m snm_	N-total	P-disp	COS	MOS	MOS	Na	K	Mg	Ca	BI	pH	
												H <sub>2</sub> O 1:2	KCl 1:2
		Mg ha <sup>-1</sup>		%		cmol kg <sup>-1</sup>							
Barranca Apapaxco	2834	2.49	2.14	97.09	167.40	8.45	0.66	0.81	1.42	12.74	7.47	5.87	5.10
N Barranca Mata Leones	3312	1.94	2.00	95.26	164.25	8.30	0.60	0.67	0.74	3.24	8.47	5.45	4.43
S de El Salto	3099	0.55	2.14	53.13	91.60	4.63	0.56	0.49	1.15	12.23	9.47	6.07	5.27
S Barranca Tlaquecotchcotl 1	3425	4.99	2.00	91.60	157.93	7.98	0.63	0.60	1.29	8.62	10.47	5.69	4.63
SE Barranca Tlaquecotchcotl	3281	1.11	2.00	27.48	47.38	2.39	0.46	0.49	1.01	7.95	11.47	6.28	5.37
S Barranca Tlaquecotchcotl 2	3667	3.88	3.23	97.09	167.40	8.45	0.70	0.63	1.47	11.12	12.47	5.77	4.51
Suroeste Barranca Tlaquecotchcotl	3540	3.66	2.11	115.41	198.99	10.05	0.71	0.65	0.79	6.04	13.47	5.64	4.37
Chalchoapa NE de Tetorre	3696	0.97	2.11	56.30	97.07	4.90	0.46	0.48	0.88	2.87	14.47	5.16	4.19
Tlalcomajada E de Tetorre	3512	2.22	3.23	78.82	135.90	6.86	0.55	0.59	1.15	3.90	15.47	4.86	3.82
La Laguna Xahuehahuatlco	3828	2.77	3.43	84.45	145.60	7.35	0.68	0.72	1.05	3.17	16.47	4.58	3.76
La Papa Acatzi	2964	1.94	3.22	5.63	9.71	0.49	0.77	0.89	1.54	9.21	17.47	4.97	3.64
<b>Mínimo</b>		<b>0.55</b>	<b>0.47</b>	<b>5.63</b>	<b>9.71</b>	<b>0.49</b>	<b>0.08</b>	<b>0.17</b>	<b>0.24</b>	<b>0.23</b>	<b>0.70</b>	<b>4.58</b>	<b>3.64</b>
<b>Promedio</b>		<b>3.34</b>	<b>2.00</b>	<b>80.77</b>	<b>132.99</b>	<b>7.51</b>	<b>1.28</b>	<b>0.54</b>	<b>1.37</b>	<b>3.42</b>	<b>7.09</b>	<b>5.92</b>	<b>4.76</b>
<b>Máximo</b>		<b>7.00</b>	<b>4.76</b>	<b>237.78</b>	<b>382.63</b>	<b>22.78</b>	<b>5.01</b>	<b>1.19</b>	<b>3.88</b>	<b>12.74</b>	<b>17.47</b>	<b>6.79</b>	<b>5.86</b>
<b>DE</b>		<b>1.63</b>	<b>1.04</b>	<b>51.11</b>	<b>82.50</b>	<b>4.90</b>	<b>0.99</b>	<b>0.27</b>	<b>0.84</b>	<b>3.50</b>	<b>4.23</b>	<b>0.52</b>	<b>0.55</b>

*N-total y P-disponible= Nitrógeno y Fósforo total del suelo; COS=Carbono orgánico del suelo; MOS= Materia orgánica del suelo; BI= suma de bases intercambiables; DE= Desviación estándar.*

Del análisis estadístico (Cuadros 13 y 14), de las doce propiedades químicas del suelo, el análisis de componentes principales (ACP) produjo cuatro CP (variables robustas, VR) con varianza acumulada de 84%. Estas VR fueron: MOS (0.45, CP<sub>1</sub>), pH activo (0.48, CP<sub>2</sub>), Mg intercambiable CP<sub>3</sub>, 0.6) y Na intercambiable (CP<sub>4</sub>, 0.7).

**Cuadro 13. Eigenvalores de las propiedades químicas del suelo.**

Eigenvalor	Autovalor	Diferencia	Proporción	Acumulada (%)
1	4.82	1.63	0.37	37
2	3.19	1.39	0.25	61
3	1.81	0.73	0.14	75
4	1.1	0.27	0.08	84
5	0.81	0.32	0.06	90
6	0.5	0.16	0.04	93
7	0.33	0.16	0.03	96
8	0.18	0.03	0.01	98
9	0.15	0.04	0.01	99
10	0.11	0.07	0.008	99
11	0.04	0.04	0.003	100
12	0.00	0.00	0.00	100

**Cuadro 14.** Eigenvectores de las propiedades químicas del suelo.

Variable	CP <sub>1</sub>	CP <sub>2</sub>	CP <sub>3</sub>	CP <sub>4</sub>
N total del suelo	0.32	0.11	0.18	-0.02
P disponible del suelo	0.4	0.20	-0.06	0.05
P total del suelo	0.34	-0.33	0.12	0.03
COS (Mg ha <sup>-1</sup> )	0.446	-0.05	0.04	-0.06
MOS (Mg ha <sup>-1</sup> )	0.442	-0.07	0.05	-0.07
<b>MOS (%)</b>	<b>0.449</b>	-0.02	0.03	-0.05
<b>Na intercambiable</b>	0.04	0.34	0.04	<b>0.7</b>
K intercambiable	-0.13	-0.22	0.4	-0.12
<b>Mg intercambiable</b>	0.015	0.2	<b>0.6</b>	0.32
Ca intercambiable	-0.08	-0.33	0.4	-0.30
Cl	-0.08	-0.4	0.3	0.4
<b>pH activo</b>	-0.05	<b>0.48</b>	0.2	-0.29
pH potencial	-0.04	0.39	0.4	-0.32

Con un procedimiento semejante al aplicado en la obtención del índice de VCSBq, se obtuvo el valor de clase de suelo por parámetros químicos (VCSQ), los cuales se muestran en el cuadro 15.

**Cuadro 15.** Calidad de suelo estimada por sus propiedades químicas.

Sitio	Nombre	Altitud m snm	CP <sub>1</sub>	CP <sub>2</sub>	CP <sub>3</sub>	CP <sub>4</sub>	VCSQ	Clase
31	S de El Salto	3099	-3.23	-8.10	9.45	-8.25	-10.13	MB
29	Barranca Apapaxco	2834	-1.90	<b>-9.11</b>	<b>10.72</b>	<b>-8.73</b>	-9.02	MB
39	La Papa Acatzi	2964	<b>-3.31</b>	-7.63	6.10	-3.11	-7.94	B
33	SE Barranca Tlalquecotchcotl	3281	-2.98	-3.87	4.99	-4.65	-6.50	B
34	S Barranca Tlalquecotchcotl 2	3667	-0.88	-8.07	8.78	-6.29	-6.47	B
32	S Barranca Tlalquecotchcotl 1	3425	-0.62	-5.72	5.96	-4.50	-4.89	B
27	Agua Escondida	3333	-0.42	-5.28	6.23	-4.85	-4.32	B
28	La Ventana	3127	-2.52	0.26	-1.61	0.30	-3.57	B
26	La Venta	3418	-0.62	-1.25	0.69	-2.04	-3.22	B
35	Suroeste Barranca Tlalquecotchcotl	3540	0.27	-4.21	2.87	-1.96	-3.03	B
25	Pela Gallina	3615	-0.82	-0.78	0.62	-1.84	-2.81	B
36	Chalchoapa NE de Tetterre	3696	-0.99	-1.54	-1.49	1.31	-2.71	B
37	Tlalcomajada E de Tetterre	3512	-0.03	-3.01	-0.14	1.02	-2.17	B
30	N Barranca Mata Leones	3312	0.08	-1.34	-0.86	0.01	-2.12	B
24	W de D 14	2650	-1.40	3.25	<b>-5.90</b>	1.99	-2.06	B
23	D 14	2800	-1.67	3.15	-4.69	1.73	-1.48	M
38	La Laguna Xahuehahuatlalco	3828	0.40	-2.77	-0.81	1.93	-1.25	M
20	Pasiontitla	2900	-0.67	3.26	-3.64	0.26	-0.79	M
22	O 16	3225	-0.20	1.85	-2.29	0.46	-0.17	M
17	O 2	3300	-0.29	2.54	-1.46	-0.11	0.68	M
3	F 5	3522	-0.18	2.71	-5.51	3.92	0.95	M
15	D 5	3390	-0.05	3.18	-3.23	2.05	1.94	M
10	O1 3	3398	1.14	2.65	-2.21	0.43	2.02	M

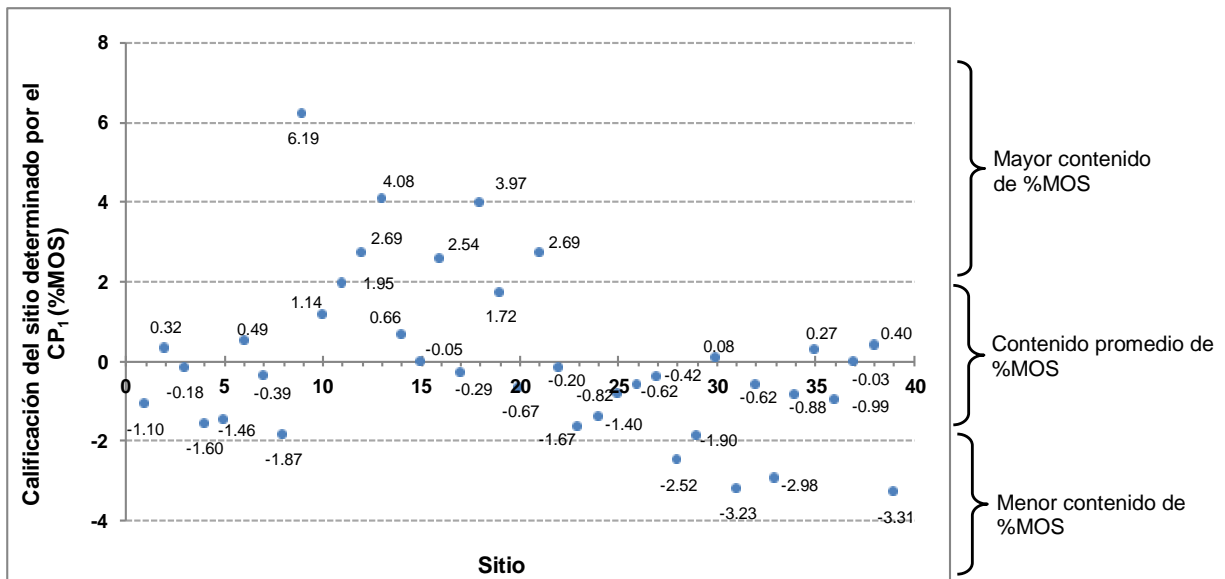
CP= Calificación del componente principal; VCSQ= Valor de Calidad de Suelo por parámetros químicos; MB= Muy bajo; B= Bajo; M= medio; A= alto; MA= muy alto.

**Cuadro 15 (Continuación).**

Sitio	Nombre	Altitud m snm	CP <sub>1</sub>	CP <sub>2</sub>	CP <sub>3</sub>	CP <sub>4</sub>	VCSQ	Clase
4	O 17	2918	-1.60	3.25	-1.72	2.30	2.23	A
16	F 11	3550	2.54	1.87	-4.43	2.27	2.25	A
21	Paso de Cortés	3723	2.69	2.14	-3.78	1.34	2.39	A
11	F 2	3585	1.95	2.23	-2.90	1.30	2.59	A
14	O 14	3440	0.66	2.31	-1.34	1.14	2.76	A
19	Las Anomias	3000	1.72	2.17	-1.94	1.00	2.94	A
5	O 18	2932	-1.46	3.21	0.70	0.70	3.15	A
2	F 1	3288	0.32	3.71	-4.27	3.53	3.29	A
8	Cuiloxochitla	2710	-1.87	2.77	0.06	2.91	3.87	A
7	D 3	2832	-0.39	4.61	-3.36	<b>4.26</b>	5.12	MA
1	O 1	3250	-1.10	2.67	2.83	1.28	5.66	MA
18	Cruce El 8	3300	3.97	0.31	1.04	0.35	5.67	MA
12	D2 4	3228	2.69	1.58	1.38	0.17	5.82	MA
9	Coronilla	3600	<b>6.19</b>	1.15	-3.61	2.93	6.67	MA
13	O 15	3336	4.08	1.24	-0.31	1.69	6.70	MA
6	D 11	2965	0.49	<b>4.62</b>	-0.92	3.75	7.94	MA
	<b>Mínimo</b>		<b>-3.31</b>	<b>-9.11</b>	<b>-5.90</b>	<b>-8.73</b>	<b>-10.13</b>	
	<b>Máximo</b>		<b>6.19</b>	<b>4.62</b>	<b>10.72</b>	<b>4.26</b>	<b>7.94</b>	

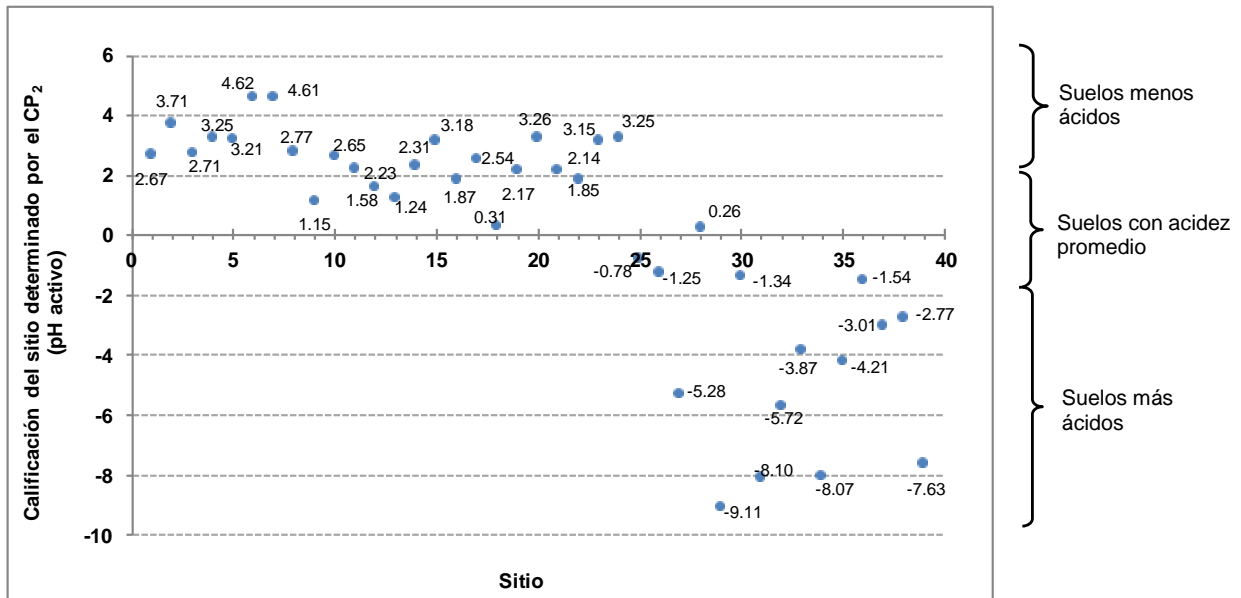
CP= Calificación del componente principal; VCSQ= Valor de Calidad de Suelo por parámetros químicos; MB= Muy bajo; B= Bajo; M= medio; A= alto; MA= muy alto.

El CP<sub>1</sub> mostró que los sitios con porcentajes de MOS entre 2 y 9.4 tuvieron calificación con valores entre -2 y 2. Fuera de este intervalo y hacia valores positivos, el porcentaje de MOS se incrementó (Figura 20).



**Figura 20.** Gráfica de CP<sub>1</sub> por propiedades químicas del suelo. Sitios con calificaciones menores a 0 en el eje de las y presentaron porcentajes de MOS menores al promedio a). El sitio 9 (Coronilla) tuvo el CP más alto y el 39 (La Papa Acatzi) el más bajo. Números a lado de los puntos indican la calificación CP.

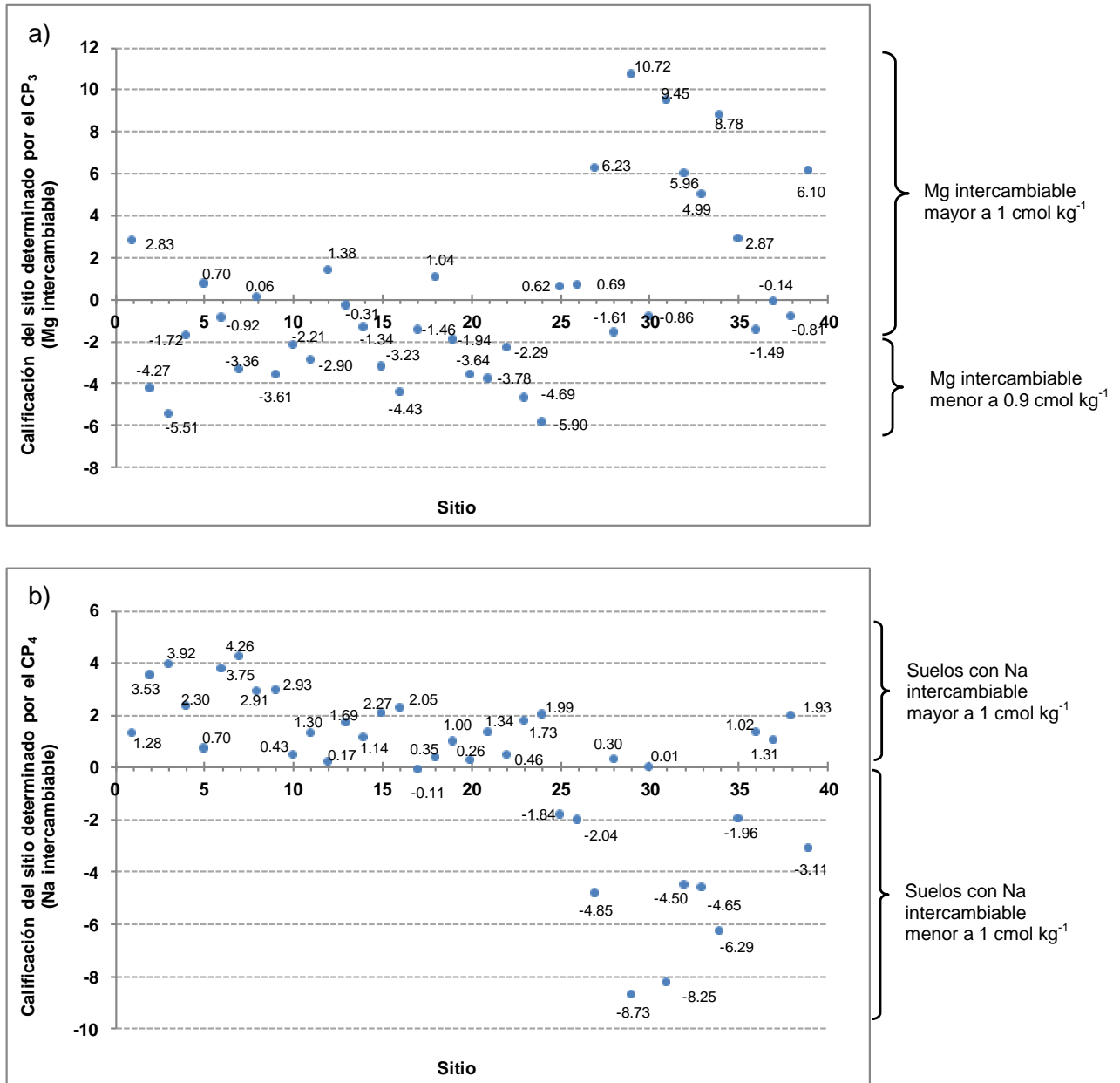
Como muestra la Figura 21, el CP<sub>2</sub> ubicó a sitios con pH activo con valores de 5.1 a 6.5 con calificaciones de -2 a 2. Los suelos con mayor acidez se ubicaron hacia valores negativos con pocas excepciones. Esto justifica por qué los sitios “D 11” y “D 3” (pH mayor al promedio) tuvieron las calificaciones de calidad de suelo más altas derivadas del CP<sub>2</sub>.



**Figura 21.** Gráfica de CP<sub>2</sub> por propiedades químicas. Sitios con valores mayores a 0 en el eje de las y fueron suelos menos ácidos. Números a lado de puntos indican la calificación de CP.

Los suelos con Mg intercambiable menor a 0.9 cmol kg<sup>-1</sup> tuvieron, en general, calificaciones del CP<sub>3</sub>, menores de -2 y los suelos con concentraciones de Mg intercambiable mayor a 1 se ubicaron con calificaciones superiores a -2 (Figura 22a).

Del Na intercambiable, en general, los suelos con cantidades mayores a 1 cmol kg<sup>-1</sup> tuvieron calificaciones del CP<sub>4</sub> mayores de cero. El suelo del sitio D 3 (Na intercambiable igual a 5.01 cmol kg<sup>-1</sup>) tuvo la mayor calificación de CP<sub>4</sub> (4.26) y el suelo del sitio “Barranca Apapaxco” tuvo la calificación más baja (Figura 22b).



**Figura 22.** Gráfica de CP<sub>3</sub> y CP<sub>4</sub> por propiedades químicas del suelo. Sitios ubicados por debajo del 0 en el eje de las y presentaron valores por debajo de sus promedios de Mg y Na intercambiables. Valores a lado de los puntos indican la calificación.

Para obtener la calificación del sitio y derivar el grupo de calidad del suelo por parámetros químicos (VCSQ) de cada sitio se utilizó la siguiente ecuación:

$$\text{VCSQ} = \text{CP}_1 + \text{CP}_2 + \dots + \text{CP}_n \quad \text{Ecuación 7}$$

Al sustituir las calificaciones en cada componente principal en la siguiente expresión:

$$VCSQ = CP_1, \%MOS + CP_2, pH \text{ activo} + CP_3, Mg \text{ intercambiable} + CP_4, Na \text{ intercambiable}$$

Tomando como ejemplo los valores de los sitios “D 11” y “S de El Salto” (calificación más alta y más baja) en la ecuación anterior se tiene que:

$$\text{sitio “D 11” } VCSQ = 0.49 + 4.62 + (-) 0.92 + (3.75) = 7.94$$

$$\text{sitio “S de El Salto” } VCSQ = (-) 3.23 + (-) 8.1 + 9.45 + (-) (8.25) = -10.13$$

Mediante este procedimiento se encontró, con pocas excepciones, que los sitios con valores de MOS, N-total, pH (activo y potencial) y Na y Mg intercambiables mayores a sus promedios tuvieron calificaciones positivas y en consecuencia fueron agrupados en suelos con más alta calidad por parámetros químicos (Cuadro 15). Del análisis de este Cuadro y el del Apéndice 1-Cuadro 6, se encontró que suelos con VCSQ alto corresponden con sitios donde la vegetación arbórea dominante tuvo porcentajes de N-foliar mayor de 1.3 por ciento.

Del ACP y el modelo aditivo se encontró que los sitios con suelos clasificados dentro del grupo de calidad muy baja atribuible a parámetros químicos, cubren 5% de la superficie del PN IztaPopo, poco más de 54% de la superficie del parque tiene suelos de calidad baja a media y 41% mostró un valor de calidad de suelo por parámetros químicos (VCSQ) alto.

Al considerar la vegetación presente en los sitios, se encontró que en aquellos con VCSQ alto, la especie *A. religiosa* dominó el dosel y con el Cuadro 12 y el del Apéndice 1-Cuadro 7, se observó que en suelos bajo *P. hartwegii* la suma de cationes intercambiables fue menor al promedio general, coincidiendo con valores de VCSQ bajos.

Del análisis estadístico, en el Cuadro 16 se desglosan las variables que tuvieron correlación significativa ( $p \leq 0.05$ ) con el VCSQ.

**Cuadro 16.** Coeficientes de correlación para la calidad de suelo por parámetros químicos.

Variable	VCSQ ( $p \leq 0.05$ )
	<u>r</u>
C-lábil	0.7
CBM/COS	0.7
Fosfatasa ácida	0.7
N-foliar	0.7
VCS total	0.7
Na intercambiable	0.6
Porcentaje de MOS	0.5

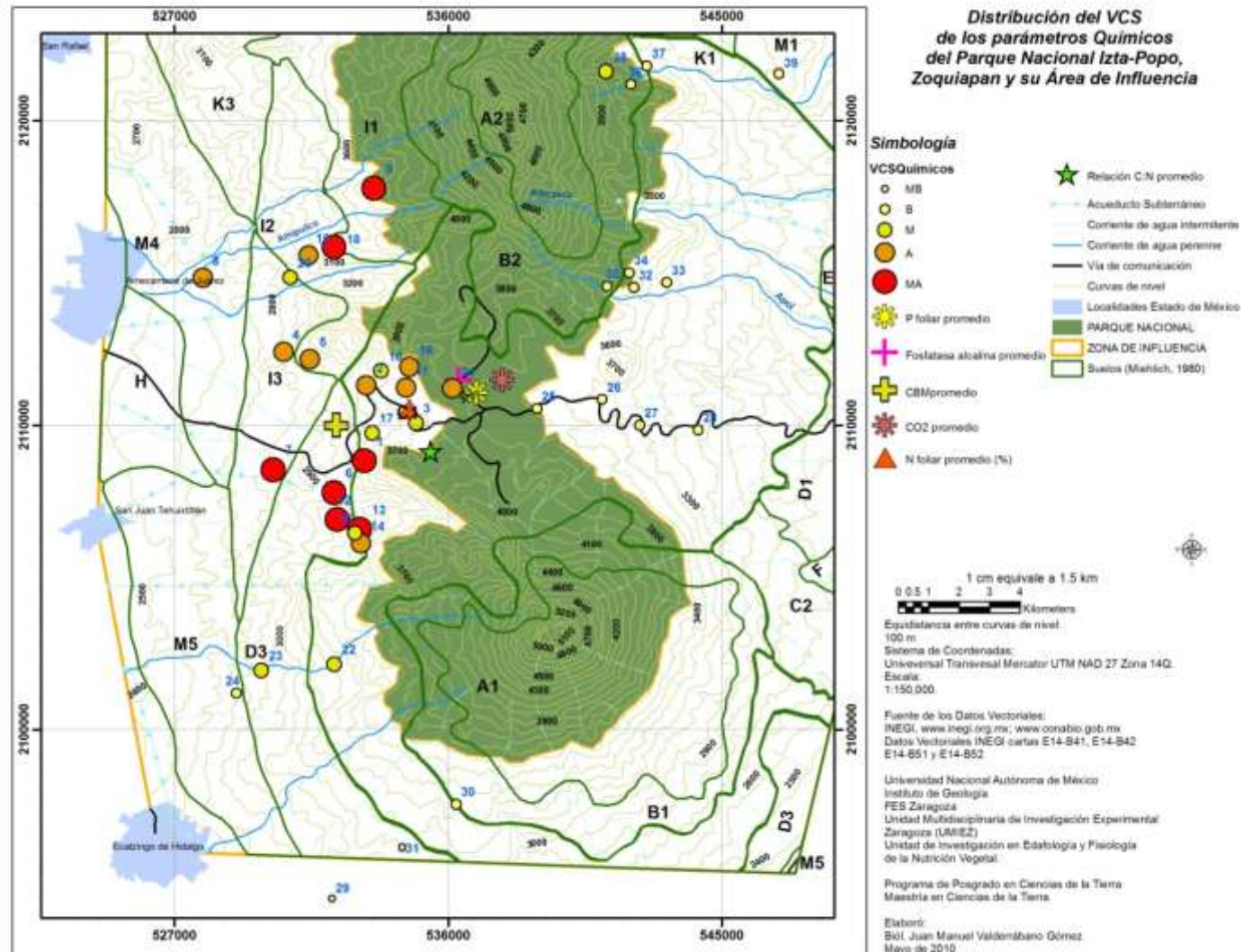


**Cuadro 16 (Continuación).**

Variable	VCSQ ( $p \leq 0.05$ )
	r
N-total	0.5
P-disponible	0.5
Conductividad eléctrica	0.5
VCS Bioquímico	0.5
COS	0.4
CBM	0.4
pH activo	0.4
Mg intercambiable	0.4
Temperatura media anual (°C)	0.3
K intercambiable	-0.3
VCS Físicos	-0.4
Especies arbóreas dominantes	-0.4
Profundidad del suelo	-0.4
CO <sub>2</sub> /CBM	-0.5
Cationes intercambiables	-0.5
P-foliar	-0.7
Ca intercambiable	-0.8
Producción de CO <sub>2</sub> del suelo	-0.9

COS= Carbono orgánico del suelo; CO<sub>2</sub>= respiración del suelo; CBM= Carbono de la biomasa microbiana; VCS= Valor de calidad del suelo; Q= parámetros químicos del suelo; r= coeficiente de correlación.

La distribución espacial del VCSQ observado en la Figura 23, mostró que los suelos con calidad baja por parámetros químicos, se distribuyeron hacia el E, S y SW del PN IztaPopo. Al comparar con el mapa de distribución de calidad de suelos atribuible a parámetros bioquímicos (Figura 15), se encontró alta coincidencia entre grupos de sitios con suelos de calidad baja por ambos grupos de parámetros.



**Figura 23.** Distribución del valor de calidad de suelo por parámetros químicos. Círculos rojos grandes representan los sitios con valores más altos de VCS y círculos azules y amarillos más pequeños a los de valor más bajo. Polígonos delimitados con líneas verdes son las unidades de suelo reportadas por Miehlich (1980). Números azules indican el sitio (Cuadro 15).

## 2.4.1 Contenido de carbono orgánico del suelo (COS)

El carbono orgánico del suelo (COS), expresado en  $\text{Mg ha}^{-1}$  y cuantificado con el porcentaje de materia orgánica del suelo con la ecuación:  $\text{COS} = \text{MOS}/1.724$ , tuvo promedio de  $80.8 \text{ Mg ha}^{-1}$ . El valor mínimo ( $5.6 \text{ Mg ha}^{-1}$ ) estuvo en suelos del sitio “La Papa Acatzi”, dentro del grupo con calidad baja de suelos por parámetros químicos, y la mayor cantidad de COS ( $237.8 \text{ Mg ha}^{-1}$ ) se ubicó en el sitio “Coronilla”, con calidad de suelo muy alta (Cuadro 15).

En general se encontró que el COS aumentó con la altitud (Figura 24) y, según la vegetación el contenido promedio más bajo de COS se encontró en suelos bajo bosques de *Pinus* sp. y el mayor contenido de COS bajo asociación *Abies religiosa*-*Alnus* sp. (Apéndice 1-Cuadros 2 y 3).

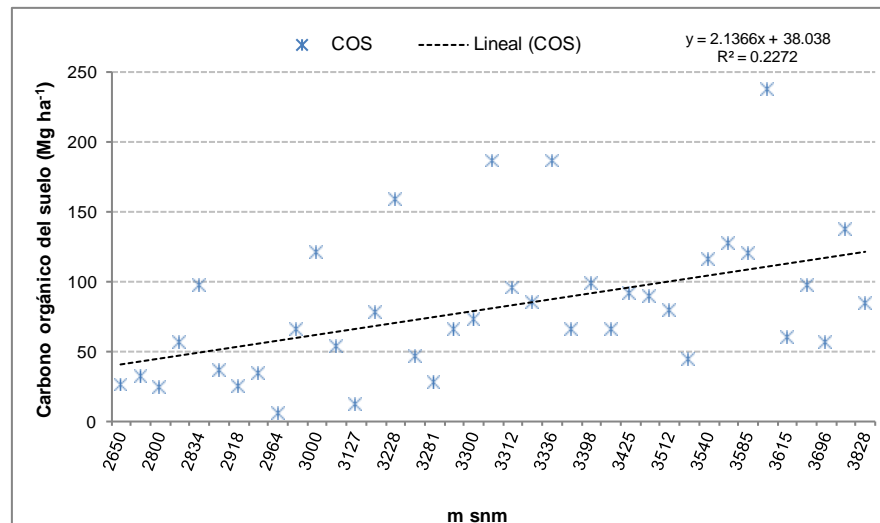


Figura 24. Carbono orgánico del suelo con relación a la altitud. La línea punteada representa la tendencia.

De la relación entre COS y N en tejido foliar, se observó una correlación positiva, infiriéndose que en condiciones de humedad, temperatura, espacio poroso, acidez y actividad microbiana adecuadas se permite que el N-total del suelo mineralizado se movilice hacia la vegetación (Figura 25).

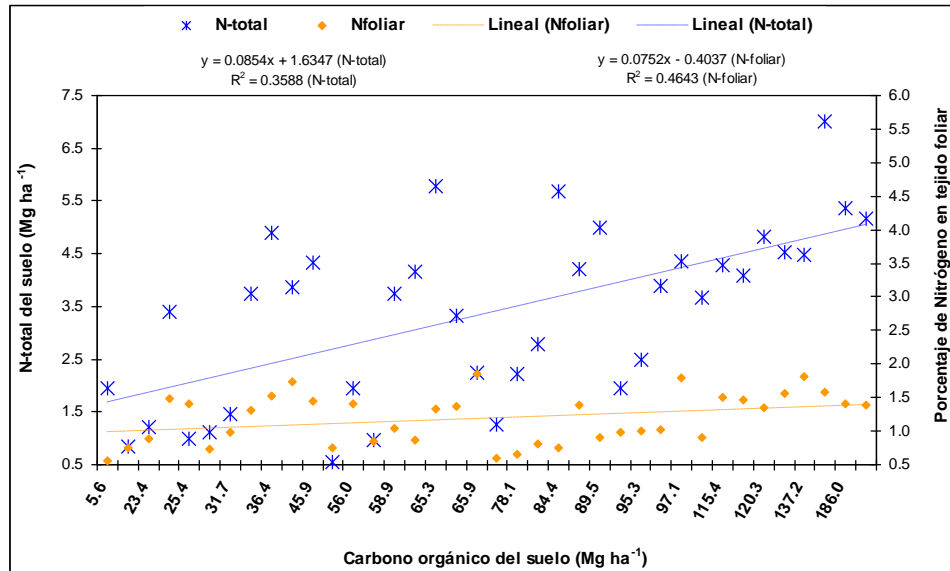


Figura 25. Relación entre carbono orgánico del suelo, N-total y N-foliar. Las líneas punteadas muestran la tendencia entre las variables.

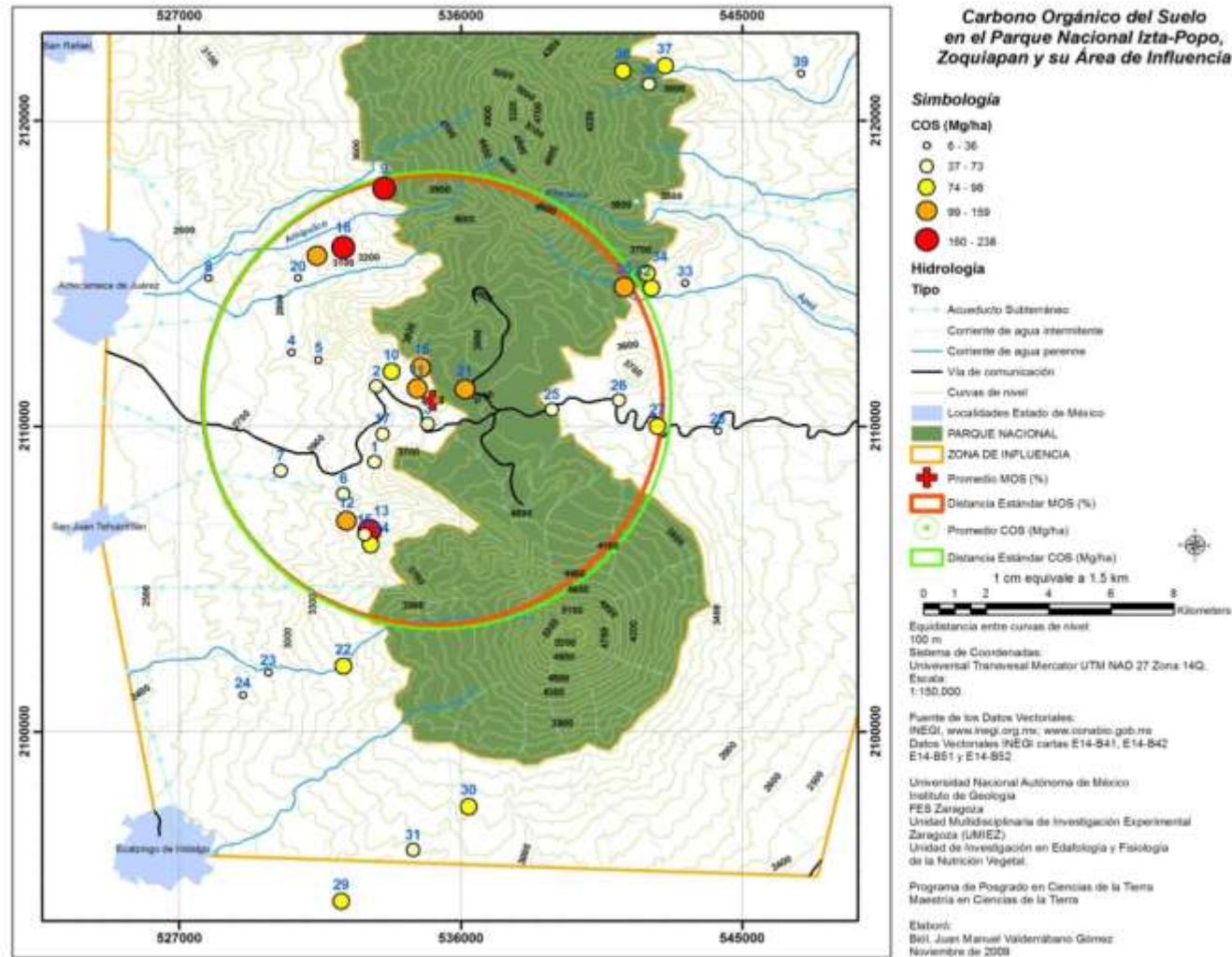
El estudio de las relaciones entre COS con otras propiedades del suelo se presentan en el Cuadro 17 mediante valores de correlación de Pearson.

Cuadro 17. Coeficientes de correlación para el valor de calidad de suelo por parámetros químicos.

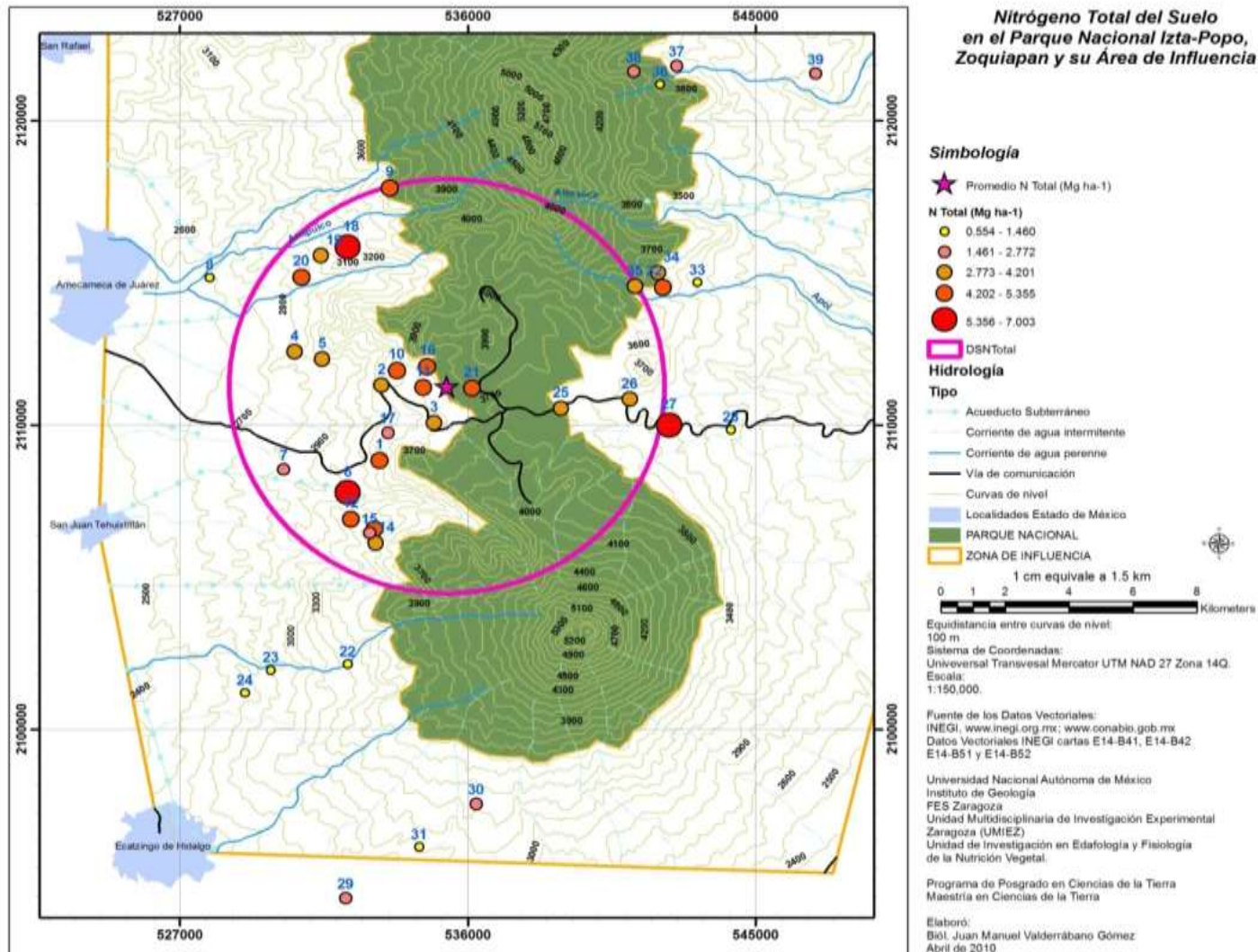
Variable	VCSQ (p≤0.05)
	<u>r</u>
P-disponible	0.8
N-total	0.6
VCS total	0.5
Altitud	0.5
Fosfatasa ácida	0.4
VCS Bioquímico	0.4
Precipitación media anual	0.4
N-foliar	0.3
Temperatura media anual (°C)	-0.4

COS= Carbono orgánico del suelo; CO<sub>2</sub>= respiración del suelo; CBM= Carbono de la biomasa microbiana; VCS= Valor de calidad del suelo; Q= parámetros químicos del suelo; r= coeficiente de correlación con p≤0.05.

Con el análisis en SIG el promedio espacial del COS se ubicó en las coordenadas UTM 535238 y 2110850, entre 3500 y 3600 m snm, en la región con bosques de oyamel y *Pinus hartwegii*. La distancia estándar espacial, que es el grado de dispersión de los sitios en función del contenido de COS, tuvo un radio de 7.5 km y delimitó un área de 17568 ha. En general, los contenidos más altos de COS se distribuyeron a lo largo de la vertiente oeste de la Sierra Nevada (Figura 26).



**Figura 26.** Promedio y distancia estándar espacial del COS. Estrella (detrás de cruz roja) y círculo grande verde son el promedio espacial y distancia estándar espacial del COS. Sitios fuera de este círculo tuvieron menor contenido de COS. El círculo grande rojo es la distancia estándar de la MOS a partir de su promedio espacial (cruz roja). Números azules indican sitios de muestreo.



**Figura 27** Distribución espacial del N-total. Sitios representados por círculos con diferente color y tamaño indican los niveles de N-total. El círculo grande y la estrella color magenta indican la distancia estándar y el promedio espacial. Números azules identifican al sitio de estudio.

## 2.4.2 Nitrógeno total del suelo (N-total)

Como lo mostró el Cuadro 12, el porcentaje de N-total, expresado en  $\text{Mg ha}^{-1}$ , tuvo promedio de  $3.3 \text{ Mg ha}^{-1}$  con intervalo de  $0.6$  a  $7.0 \text{ Mg ha}^{-1}$ . Su distribución, promedio y distancia estándar espaciales muestran que los contenidos más altos están hacia la ladera oeste de la Sierra (Figura 27). El sitio denominado “Cruce El 8”, a  $3300 \text{ m snm}$  con dosel abierto de *A. religiosa* y *Alnus* sp. y repoblamiento natural de *A. religiosa*, tuvo el mayor contenido de N-total y también se correspondió con el grupo de suelos que fueron agrupados en calidad alta (Apéndice 1-Cuadro 4).

El análisis estadístico mostró que el N-total tuvo correlación positiva y significativa ( $p \leq 0.05$ ) con el COS ( $r=0.6$ ), el valor total de calidad de suelo (VTCS), N-foliar ( $r=0.5$ ) y con P-disponible del suelo ( $r=0.4$ ) y correlación negativa con temperatura media anual ( $r=-0.3$ ) y relación C:N ( $r=-0.4$ ). Un análisis de regresión múltiple mostró que el N-total tuvo significancia estadística con la elevación y la precipitación media anual (Figura 28 y Apéndice 3-A).

La relación C:N estuvo entre 3:1 y 96:1 con promedio de 27:1. La relación más alta se encontró en el suelo del sitio “S del Salto”, cuyo VCSQ fue muy bajo y la relación C:N más baja se ubicó en el sitio denominado como “La Papa Acatzi”, con bosque de *Pinus* spp. y donde se tuvo un VCSQ bajo. Especialmente, la relación C:N tuvo distribución dispersa y su promedio espacial estuvo desplazado al sur con respecto al del N-total (Figuras 28 y 30).

En tres zonas con bosques monoespecíficos (uno con *P. montezumae*, otro con *P. teocote*, y otro con *A. religiosa*) y dos con al menos 2 especies (*A. religiosa-Alnus* sp. y *P. hartwegii-A. religiosa*) la relación C:N se situó entre 24:1 y 30:1, pero la mayor relación de C:N (96:1) se encontró en suelos bajo bosque de *P. spp.-A. religiosa* y las relaciones C:N más bajas ( $<10:1$ ) se encontraron en suelos bajo bosques estables de *Pinus* a menos de  $3000 \text{ m snm}$  (Figura 29).

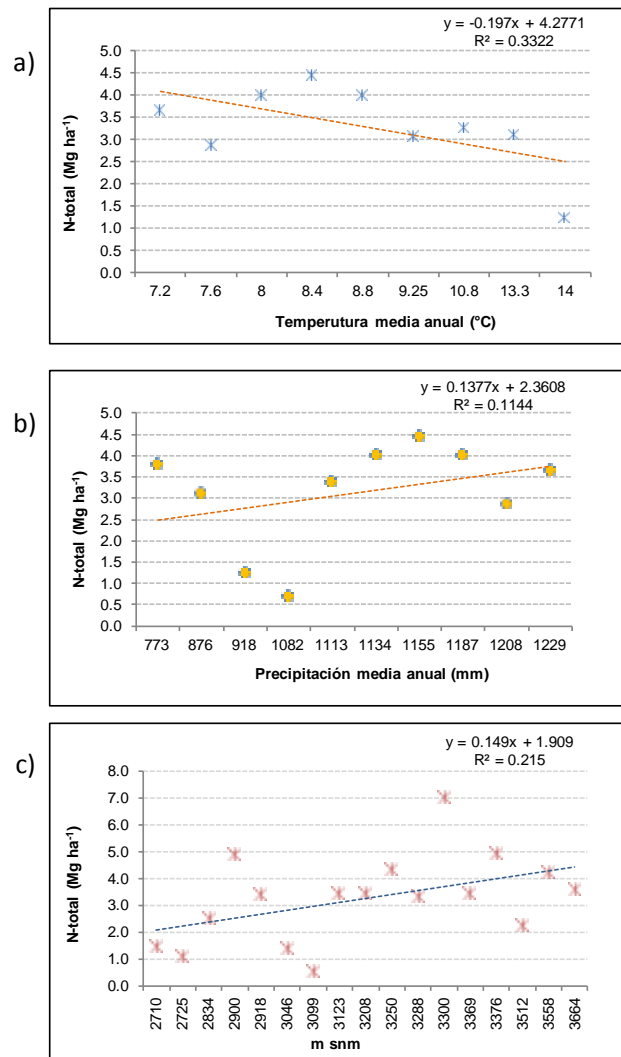


Figura 28. Contenido de N-total en suelo de acuerdo a: (a) temperatura media anual, (b) precipitación media anual y (c) altitud.

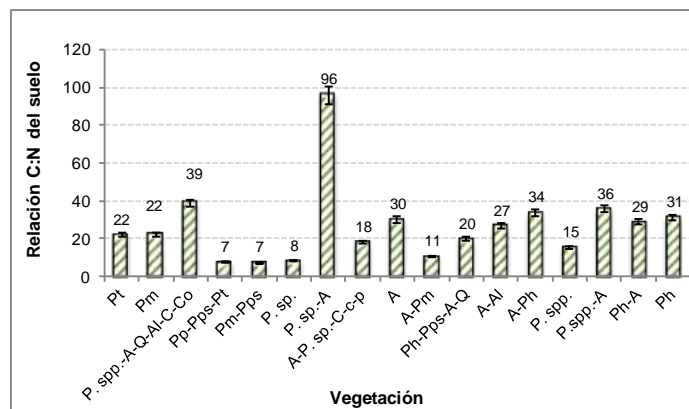
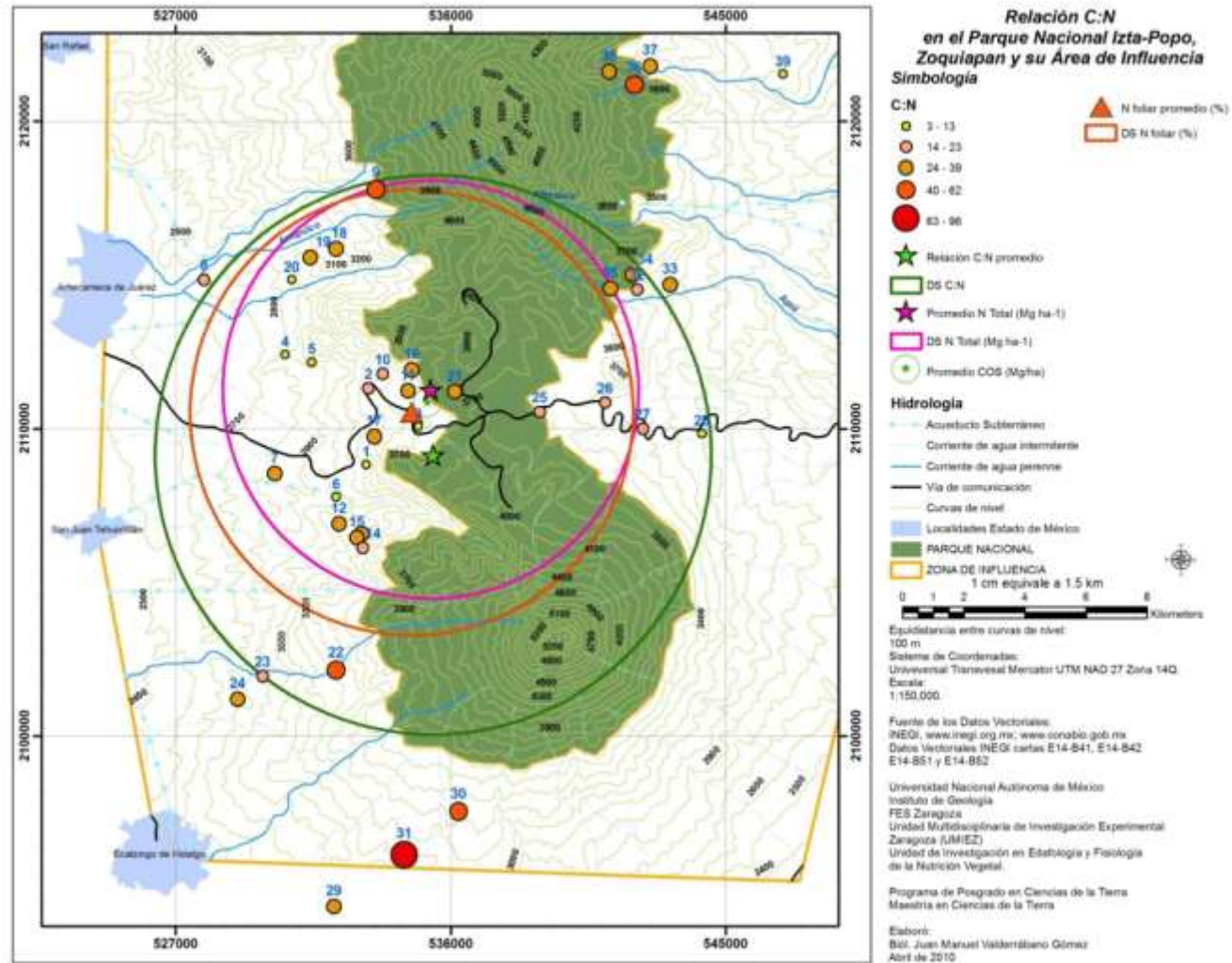


Figura 29. Relación C:N por tipo de vegetación. P. sp= Una sola especie de pino; Pm= Pinus montzuma; Pps= Pinus pseudostrobus; Pt= Pinus teocote; Pp= Pinus patula; Ph= Pinus hartwegii; P. spp.= Dos a más especies de pino; p= pastizal; A= Abies religiosa; Al= Alnus sp.; C= Cupressus lusitanica; c= cultivo; Co= Cornus sp.; Q= Quercus spp. Datos ordenados conforme a la altitud. Barras de error=0.05.





**Figura 30.** Distribución espacial de la relación C:N. Círculos naranja simbolizan sitios con valores cercanos al promedio de C:N. Estrella y círculo verde ubican distancia estándar (DS) y promedio espacial de la relación C:N. Se observan también la DS y promedio espacial de N-total, COS y N-foliar. Números azules señalan el sitio.

En zonas con bosques de *A. religiosa*, la relación C:N del suelo fue mayor de 27:1; excepto donde se asocia con *Alnus* sp., lo que puede influir en una mineralización más lenta comparada con suelos bajo *Pinus* spp. y otros que están bajo *Quercus* con *Pinus* sp. con bajo contenido de COS.

La correlación positiva ( $r = 0.5$ ) entre N-total del suelo y porcentaje de N-foliar indicó que el N mineralizado es incorporado a la estructura de las plantas y corresponde con una baja relación C:N (Figura 31).

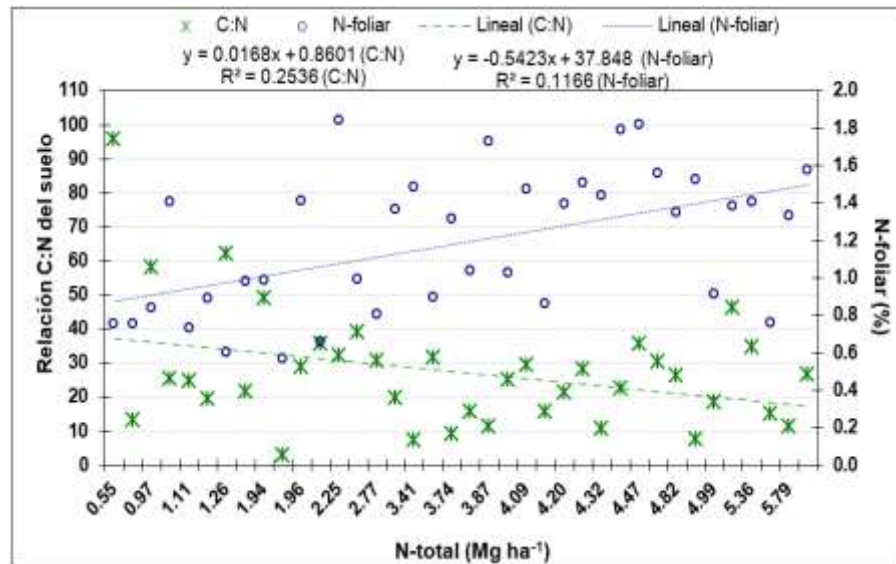


Figura 31. N-total del suelo, porcentaje de N-foliar y relación C:N del suelo.

En la asociación *A. religiosa*-*Alnus* sp. los árboles tuvieron mayor porcentaje de N-foliar, y coincide con una relación C:N de 27:1 (cercano al promedio, 27.2). Se observó que en sitios con relación C:N menor de 30:1, el porcentaje de N-foliar fue mayor a 0.9% y en suelos con relaciones C:N de 96:1 y 36:1 bajo especies de *Pinus* sp. y *P. spp.*-*A. religiosa*, se presentaron los valores promedio más bajos de N-foliar con 0.66% (Apéndice1-Cuadro 6).

### 2.4.3 Fósforo disponible del suelo (P-disponible)

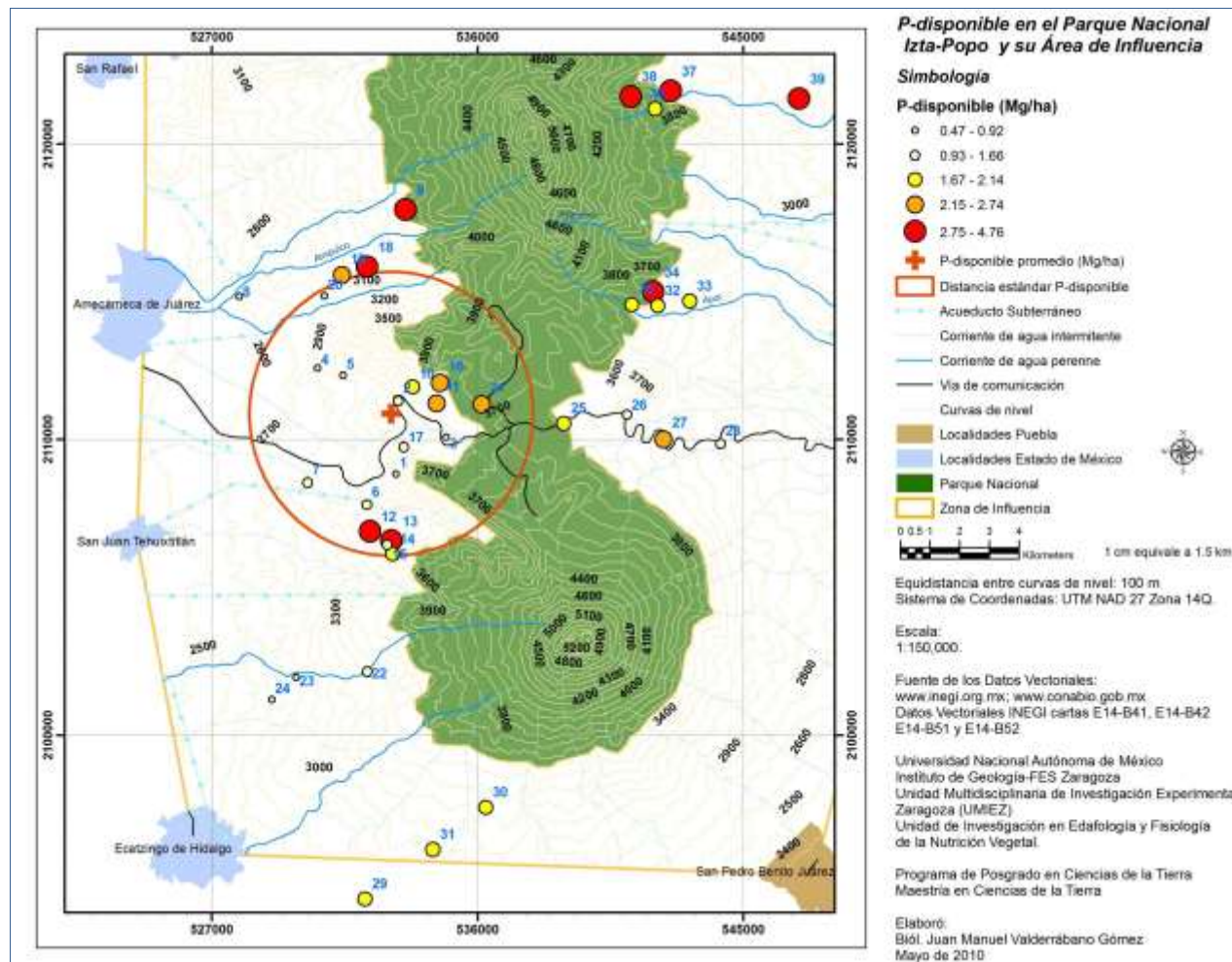
El P-disponible, expresado en Mg ha<sup>-1</sup>, se encontró en un intervalo de 0.47 Mg ha<sup>-1</sup> ( $4.7 \times 10^8$  mg ha<sup>-1</sup>) en el suelo del sitio "D 14" a 4.76 Mg ha<sup>-1</sup> ( $4.76 \times 10^9$  mg ha<sup>-1</sup>) en "Coronilla", con promedio de 2.0 Mg ha<sup>-1</sup>. El suelo con el contenido mínimo de P-disponible

perteneció al grupo con calidad de suelo media y el sitio con la cantidad máxima de P-disponible tuvo muy alta calidad de suelo por parámetros químicos.

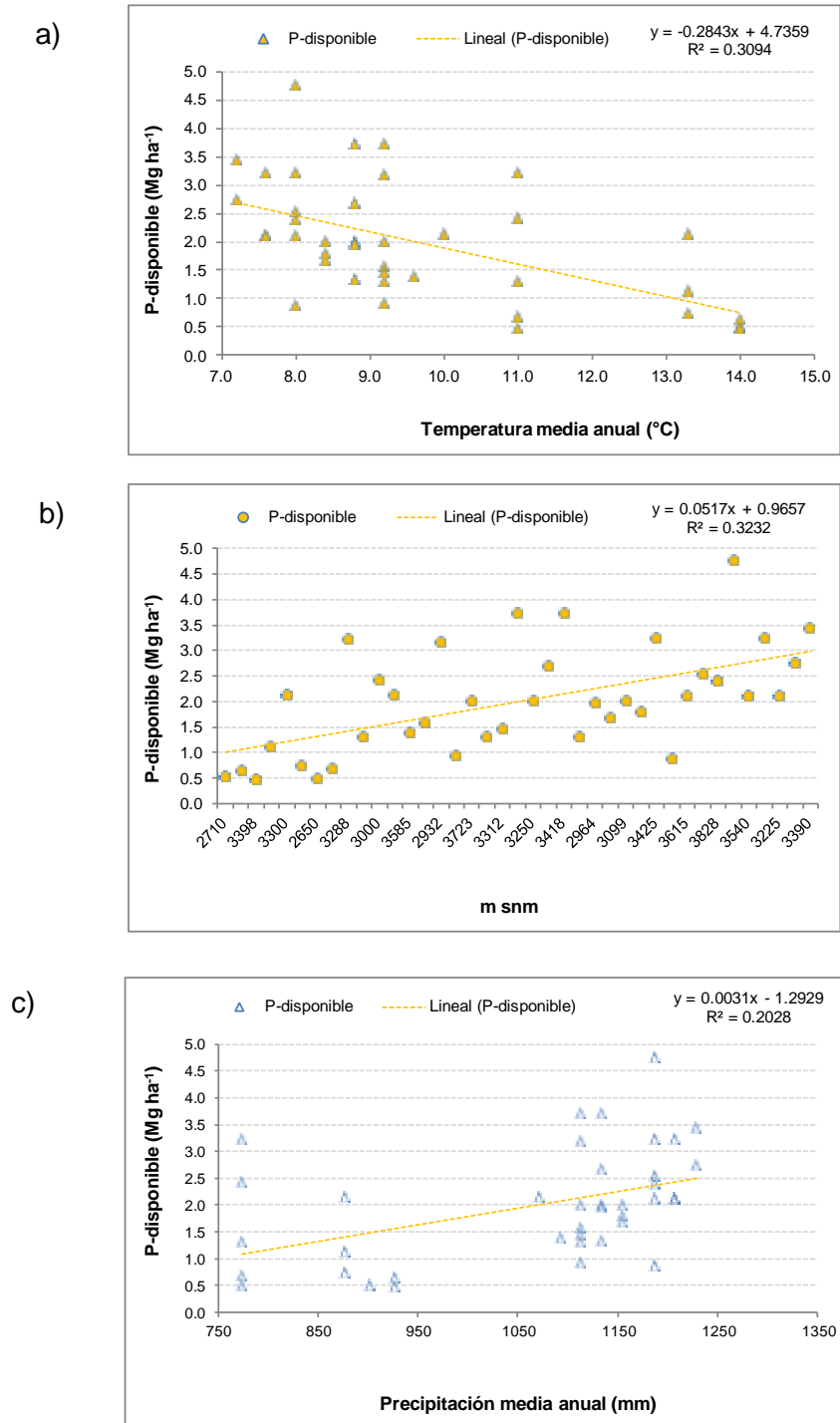
Considerando todo tipo de vegetación, el suelo bajo la asociación *A. religiosa-Alnus* sp. tuvo el mayor contenido promedio de P-disponible ( $3.7 \text{ Mg ha}^{-1}$ ) y la concentración mínima promedio ( $0.48 \text{ Mg ha}^{-1}$ ) se encontró en suelos bajo bosques de *P. montezumae* y *P. pseudostrobus*. En general, el tipo de vegetación donde los suelos tuvieron más P-disponible correspondió a suelos bajo *A. religiosa*, los cuales fueron menos ácidos que los suelos bajo *Pinus* (Apéndice 1-Cuadro 5).

En la Figura 32 se presenta la distribución, promedio y distancia estándar espacial del P-disponible. Las cifras más bajas se distribuyeron al oeste de la Sierra, cercanos a centros de población y actividad agrícola, en tanto que los valores más altos presentaron una distribución dispersa. Del análisis en SIG, el promedio espacial de P-disponible se ubicó en las coordenadas UTM 533068 y 2110873, con un radio de 4.8 km, delimitando una superficie de 2303 ha dentro de la que se localizan los suelos con más P-disponible.

Respecto a parámetros ambientales, en general se encontró que el P-disponible aumentó con la altitud y precipitación media anual, pero disminuyó con mayor temperatura media anual (Figura 33). Del análisis de regresión múltiple y según los datos mostrados en el Apéndice 3b, se encontró significancia estadística ( $p \leq 0.05$ ) entre éstos parámetros.



**Figura 32.** Distribución espacial de P-disponible del suelo. Los sitios representados por colores rojos grandes indican los valores más altos. El círculo grande y la cruz color naranja indican la distancia estándar y el promedio espacial respectivamente. Los números color azul señalan el sitio (Cuadro 15).



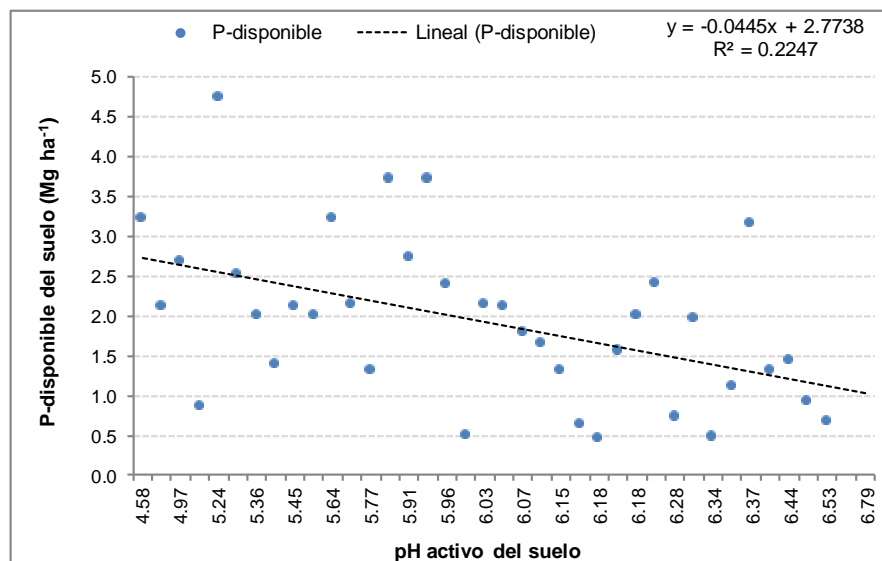
**Figura 33.** P-disponible y su relación con altitud (a), temperatura (b) y precipitación media anual (c).

Del análisis de correlación entre el P-disponible con otros parámetros del suelo se estructuró el Cuadro 18.

**Cuadro 18.** Coeficientes de correlación del P-disponible del suelo.

Variable	Coefficiente de correlación	p≤0.05
Carbono orgánico del suelo	0.8	<0.0001
Altitud	0.6	<0.0001
Precipitación media anual	0.5	0.004
N-total	0.4	0.02
Cationes intercambiables	0.4	0.02
Relación C:N	0.3	0.05
Calcio intercambiable del suelo	0.3	0.05
pH potencial	-0.4	0.02
pH activo	-0.5	0.0004
Producción de CO <sub>2</sub> del suelo	-0.5	0.003
CBM/COS	-0.5	0.0003
C-lábil	-0.6	0.0002
Temperatura media anual	-0.6	0.0002

Según los datos de esta investigación, la relación negativa entre la reacción del suelo y P-disponible mostró que valores altos de este parámetro corresponden con suelos donde el pH fue menor a 5.9 unidades (Figura 34, Apéndice 1-Cuadro 5).



**Figura 34.** Relación entre P-disponible y reacción del suelo.

La relación entre P-disponible y MOS indicó que valores bajos de P-disponible coinciden con bajos porcentajes de MOS y esto se relaciona con el aumento del pH activo del suelo (Figura 35).

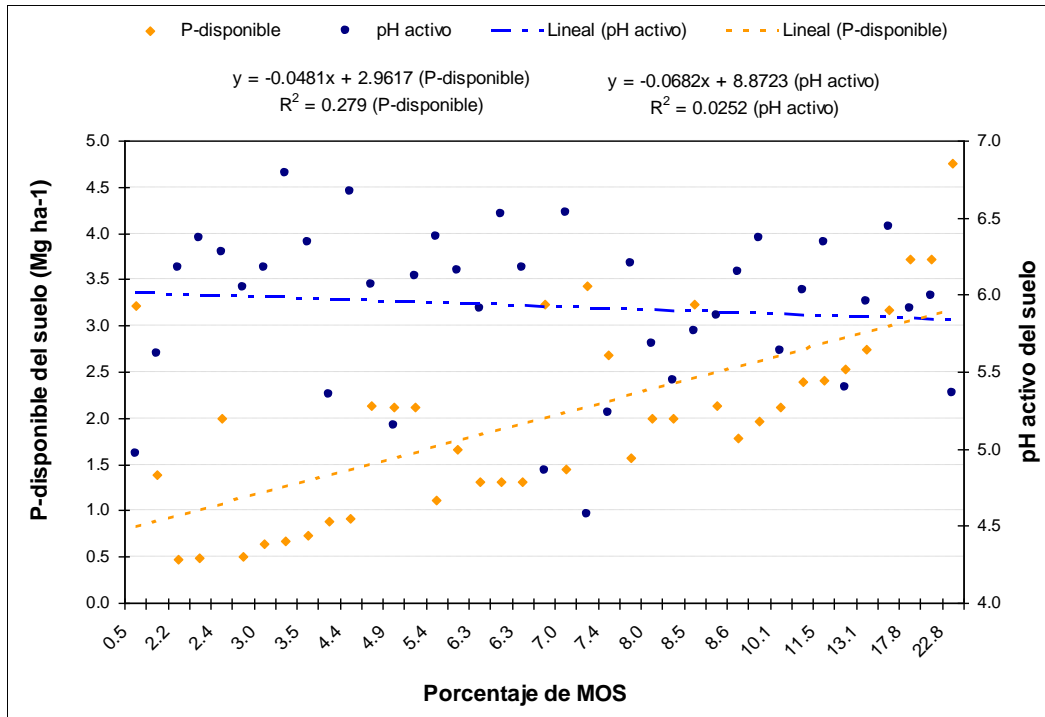


Figura 35. Relación entre P-disponible con porcentaje de materia orgánica y pH activo del suelo.

#### 2.4.4 Bases intercambiables y fertilidad de los suelos

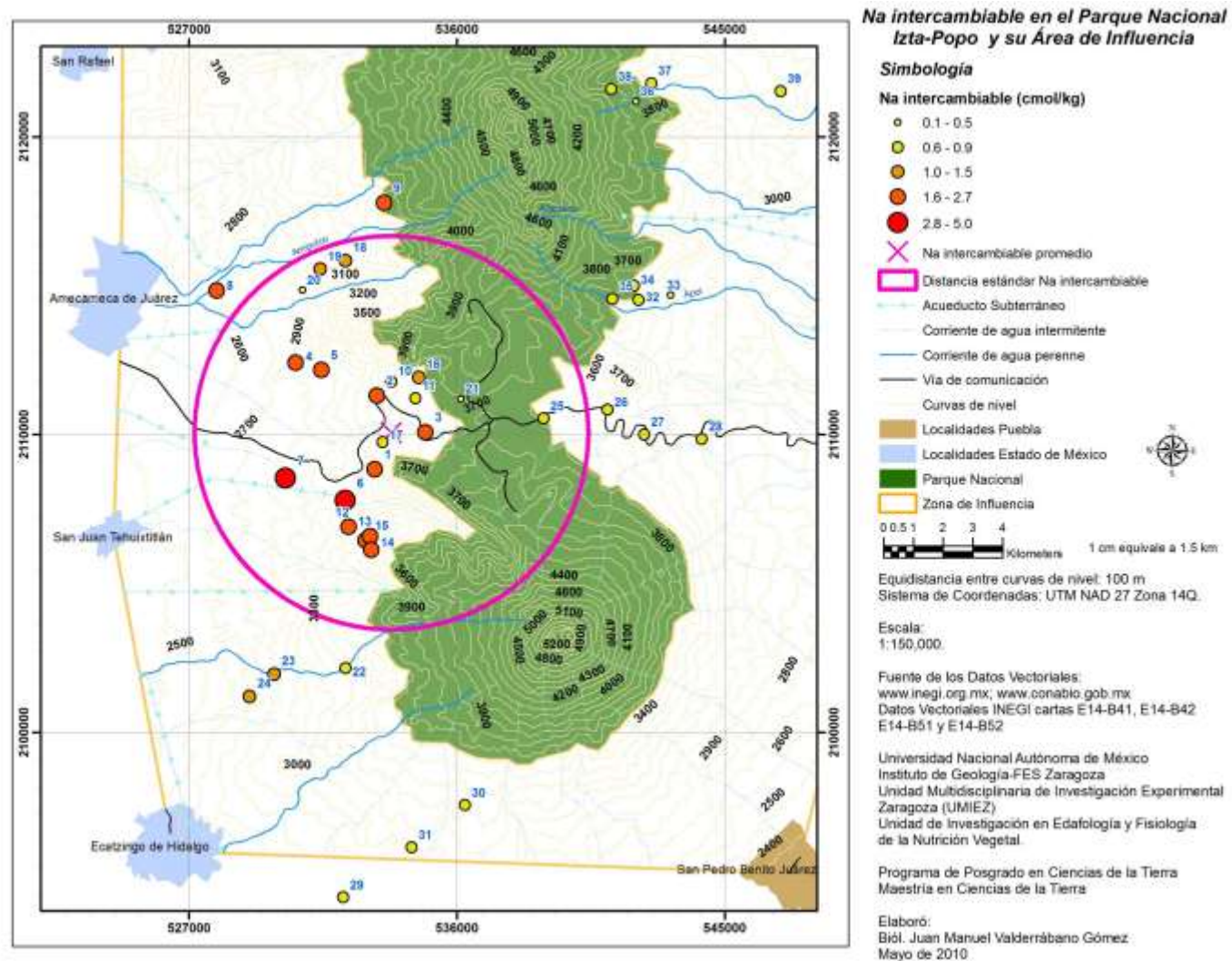
Los cationes intercambiables (Ca, Mg, K y Na) que suelen utilizarse como grupo (porcentaje de bases intercambiables) en sistemas de clasificación de suelos, también son útiles para evaluar su fertilidad pues Ca, Mg y K influyen de manera importante en la nutrición de las plantas. Con el análisis de estos cationes intercambiables, se hace una contribución para evaluar la fertilidad de los suelos del PN IztaPopo, determinada en alto porcentaje por el nivel de las bases intercambiables además de los contenidos de N-total y P-disponible del suelo (Apéndice 1- Cuadros 4-6).

El Na intercambiable (Cuadro 21), se encontró en un promedio de 1.3 cmol kg<sup>-1</sup> e intervalo entre 0.08 y 5.01 (sitios Pasiontitla y D 3). El contenido más bajo en suelos bajo bosque de *P. patula*, *P. pseudostrobus* y *P. teocote* a una altitud de 2900 m snm. Estos suelos fueron clasificados de calidad media entre los parámetros químicos. El contenido más alto de este ion se encontró a 2832 m snm en suelos, bajo bosques de baja densidad de *A. religiosa*, con calidad muy alta con base en sus propiedades químicas.

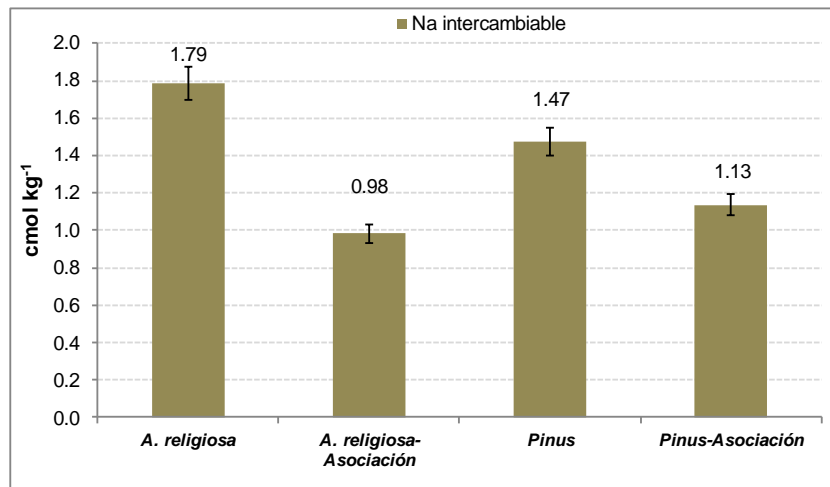
El análisis derivado del SIG mostró que el promedio espacial de Na intercambiable se ubicó en la exposición oeste de los volcanes Iztaccíhuatl y Popocatepetl, en las coordenadas UTM 533793 y 2110060, a 3300 m snm. Según la distancia estándar espacial, la superficie con mayor frecuencia de sitios con aceptable cantidad de Na intercambiable cubrió un área de 13,735 ha. Los sitios con menor contenido de Na intercambiable se ubicaron al suroeste del volcán Popocatepetl y a lo largo de la vertiente este del Iztaccíhuatl (Figura 36).

En general, se encontró que en suelos con bosque monoespecífico (*A. religiosa* o *Pinus* sp.) el Na intercambiable tuvo mayor concentración y disminuyó en suelos bajo bosques asociados (Figura 37).





**Figura 36.** Distribución espacial de Na intercambiable en suelos del PN Izta-Popo. Números azules a lado de puntos en el mapa indican el sitio de muestreo.



**Figura 37.** Na intercambiable por tipo de vegetación. Barras de error= 0.05. n= número de sitios; n de A. religiosa= 10; n de A. religiosa-Asociación= 6; n de Pinus= 14; n de Pinus-Asociación= 9.

Del análisis estadístico, el Na intercambiable tuvo correlación significativa ( $p \leq 0.05$ ) con las variables presentadas en el Cuadro 19.

**Cuadro 19.** Coeficientes de correlación del Na intercambiable del suelo.

Variable	r
VCS Químicos	0.6
VCS Total	0.6
pH activo	0.4
N-foliar	0.4
Fosfatasa ácida	0.4
Mg intercambiable	0.4
Porcentaje de limo	-0.3
Altitud	-0.3
K intercambiable	-0.3
Precipitación media anual	-0.3
VCS Bioquímico	-0.3
Ca intercambiable	-0.4
Número de especies arbóreas dominantes	-0.4
Producción de CO <sub>2</sub> del suelo	-0.4
P-foliar	-0.5

r= coeficiente de correlación con  $p \leq 0.05$ ; VCS= valor de calidad de suelo.

El K intercambiable del suelo tuvo promedio de 0.54 cmol kg<sup>-1</sup>. La concentración más baja (0.17 cmol kg<sup>-1</sup>) se encontró en el sitio “D 3” a 2832 m snm bajo bosque de *A. religiosa*, donde sus suelos fueron agrupados en la clase de calidad muy alta por parámetros químicos en suelo. El contenido más alto de potasio (1.19 cmol kg<sup>-1</sup>) se encontró en suelos del sitio “Cuiloxochitla” a 2710 m snm en suelo con bosque de *P. teocote*, dentro del grupo de suelos con calidad alta atribuida a parámetros químicos.

La Figura 37 muestra que el contenido de K intercambiable tuvo una distribución Espacial dispersa. Según el análisis en SIG, su promedio se ubicó en las coordenadas UTM 536289 y 2111110, a 3700 m snm y cerca del sitio “Paso de Cortés”, donde los suelos se agruparon en la clase alta de calidad de suelo por parámetros químicos. La distancia estándar espacial indicó una superficie de 23,812 ha dentro de la que se concentraron los sitios con mayor contenido de K intercambiable.

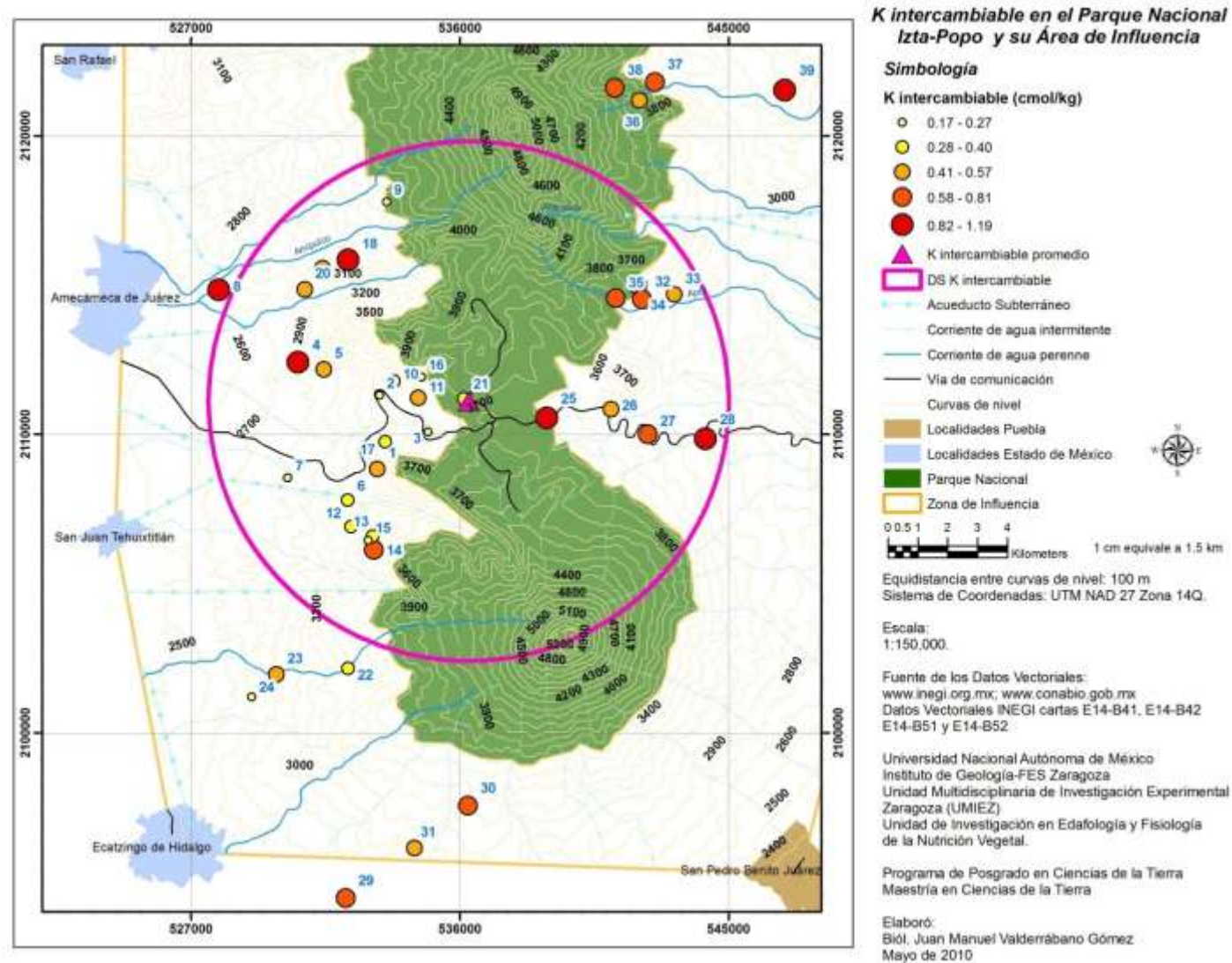
Con el análisis por tipos de vegetación, el K intercambiable fue mayor (0.63 cmol kg<sup>-1</sup>) en suelos con bosque asociado de *Pinus*, *Quercus*, *Alnus* y *Cupressus* y menor (0.39 cmol kg<sup>-1</sup>) en suelos desarrollados bajo *A. religiosa* (Figura 39).

El Cuadro 20 muestra la relación significativa del K intercambiable con otros parámetros del suelo. Este cuadro, destaca la correlación estadística entre Na y K intercambiable, también observada espacialmente al comparar los mapas de las Figuras 36 y 38.

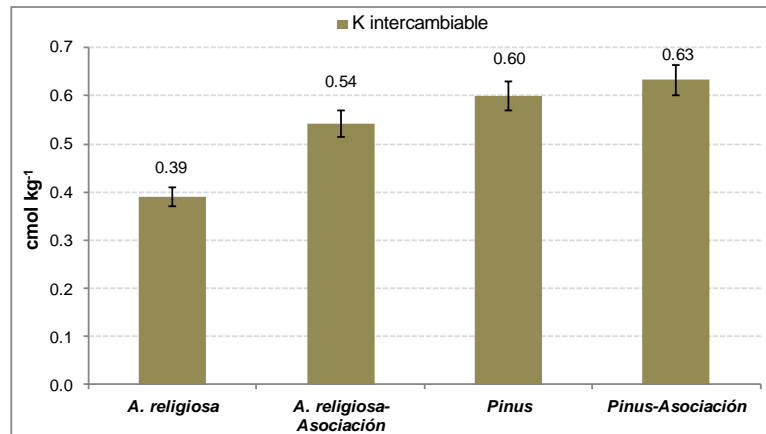
**Cuadro 20.** Coeficientes de correlación del K intercambiable del suelo.

Variable	r
Porcentaje de arcilla	0.4
Ca intercambiable	0.3
Producción de CO <sub>2</sub> del suelo	0.3
Fosfatasa ácida	-0.3
Carbono en biomasa microbiana	-0.3
VCS Químico	-0.4
VCS total	-0.4
Na intercambiable	-0.4

r= coeficiente de correlación con p≤0.05; VCS= valor de calidad de suelo.



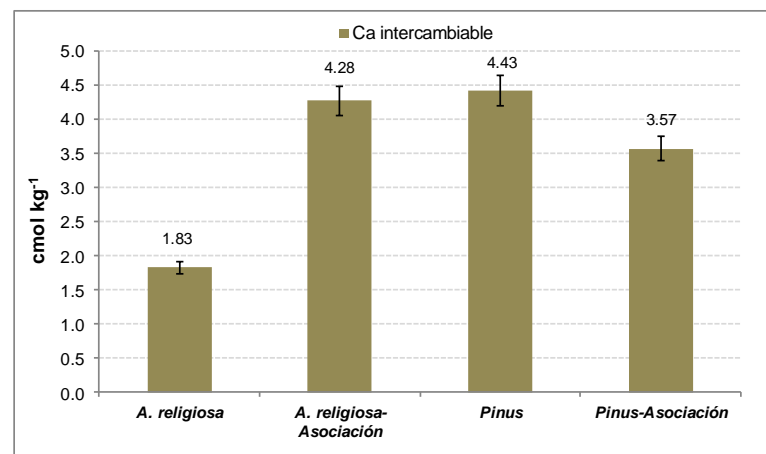
**Figura 38.** Distribución de K intercambiable en suelos del PN Izta-Popo. Los números en azul indican los sitios de estudio (Ver Cuadro 4). De la simbología, DS= distancia estándar espacial.



**Figura 39.** K intercambiable por tipo de vegetación en el PN IztaPopo. Barras de error= 0.05. n de A. religiosa= 10; n de A. religiosa-Asociación= 6; n de Pinus= 14; n de Pinus-Asociación= 9. n= número de sitios.

Del Ca intercambiable, se encontró de 0.2 cmol kg<sup>-1</sup> en el suelo del sitio denominado “F 5” (clasificado en el grupo con calidad de suelo media por parámetros químicos) a 12.7 cmol kg<sup>-1</sup> en el sitio conocido como “Barranca Apapaxco” (grupo de calidad de suelo muy baja), mientras que el contenido promedio de Ca intercambiable fue igual a 3.4 cmol kg<sup>-1</sup>.

El análisis por tipo de vegetación indicó que suelos desarrollados bajo pino tuvieron el promedio de Ca intercambiable más alto (4.4 cmol kg<sup>-1</sup>) y suelos bajo bosque de A. religiosa tuvieron el menor contenido promedio (1.8 cmol kg<sup>-1</sup>). El mismo análisis mostró que suelos bajo A. religiosa y Pinus asociados con especies de hoja ancha contienen mayor concentración de Ca intercambiable (Figura 40).



**Figura 40.** Ca intercambiable por tipo de vegetación en el PN IztaPopo. Barras de error= 0.05; n de A. religiosa= 10; n de A. religiosa-Asociación= 6; n de Pinus= 14; n de Pinus-Asociación= 9. n= número de sitios.

El análisis estadístico, mostró que el Ca intercambiable tuvo correlación significativa ( $p \leq 0.05$ ) con las variables mostradas en el Cuadro 21.

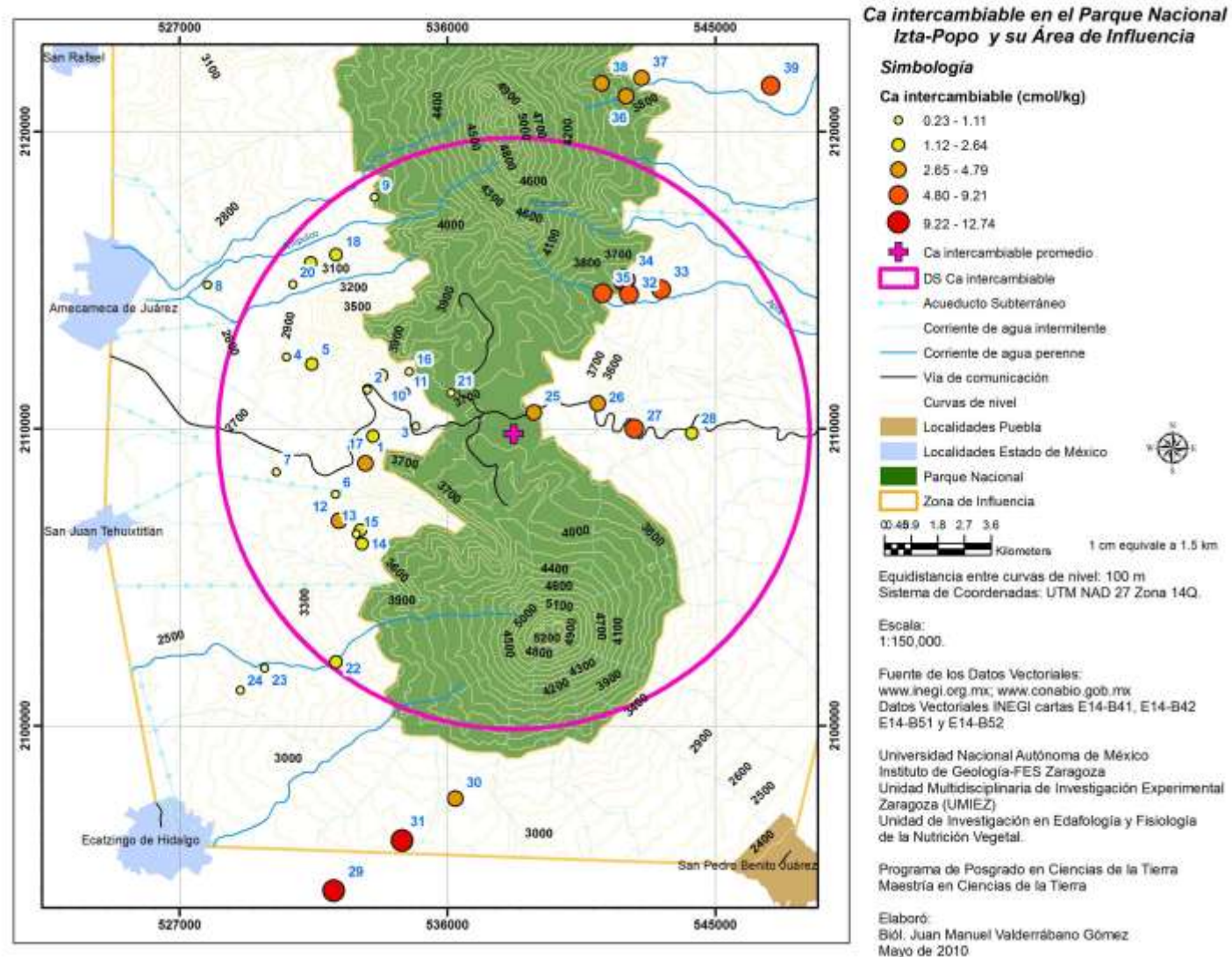
**Cuadro 21.** Coeficientes de correlación del Ca intercambiable del suelo.

Variable	r
Número de especies arbóreas presentes	0.5
Producción de CO <sub>2</sub> del suelo	0.4
P-disponible	0.3
VCS Físicos	0.3
Densidad real	-0.4
CBM/COS	-0.4
C-lábil	-0.4
CBM	-0.6
VCS Químico	-0.6
Fosfatasa ácida	-0.7
VCS total	-0.7

*r* = coeficiente de correlación con  $p \leq 0.05$ ; VCS = valor de calidad de suelo; CBM = Carbono de la biomasa microbiana; COS = Carbono orgánico del suelo.

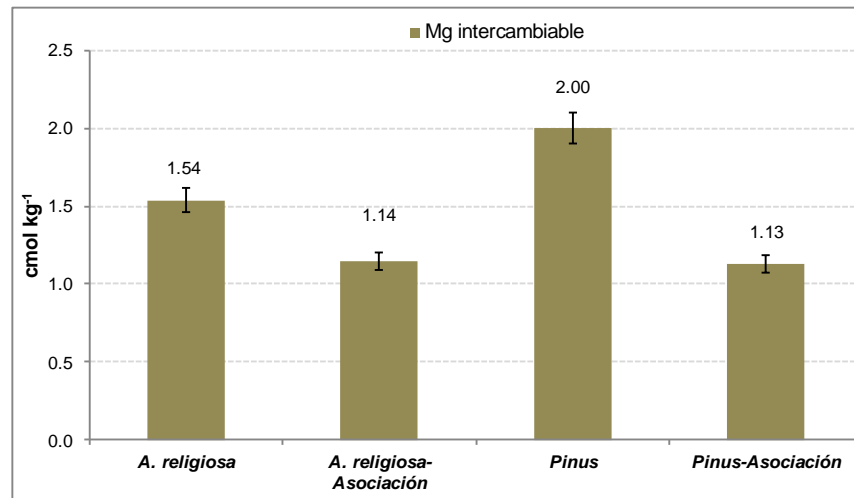
El análisis en SIG ubicó el promedio espacial de Ca intercambiable entre 3600 y 3700 m snm hacia el este de la Sierra (Figura 41). El Ca intercambiable mostró una distribución dispersa que se reflejó con la distancia estándar espacial, cuya superficie fue de 31,081 ha.

El contenido de Mg intercambiable, se encontró de 0.2 cmol kg<sup>-1</sup> (sitio W de D14) a 3.9 cmol kg<sup>-1</sup> (sitio denominado O 1). Entre este intervalo se tuvo un promedio de 1.4 cmol kg<sup>-1</sup>. Los suelos con menos Mg intercambiable se clasificaron en la clase de calidad baja por parámetros químicos, mientras que los suelos con mayor concentración de Mg intercambiable se clasificaron en la clase de calidad muy alta.



**Figura 41.** Distribución espacial de Ca intercambiable del PN IztaPopo. Números azules a lado de puntos en el mapa indican el sitio de muestreo. De la simbología, DS= distancia estándar espacial.

Al comparar entre tipos de vegetación, se encontró que los suelos con el contenido de Mg intercambiable más alto estuvo en sitios con *Pinus* ( $2 \text{ cmol kg}^{-1}$ ) y el menor en suelos con bosques de *A. religiosa* ( $1.54 \text{ cmol kg}^{-1}$ ). En vegetación asociada de *Pinus* o *A. religiosa* con otras especies el contenido de Mg intercambiable disminuyó (Figura 42).

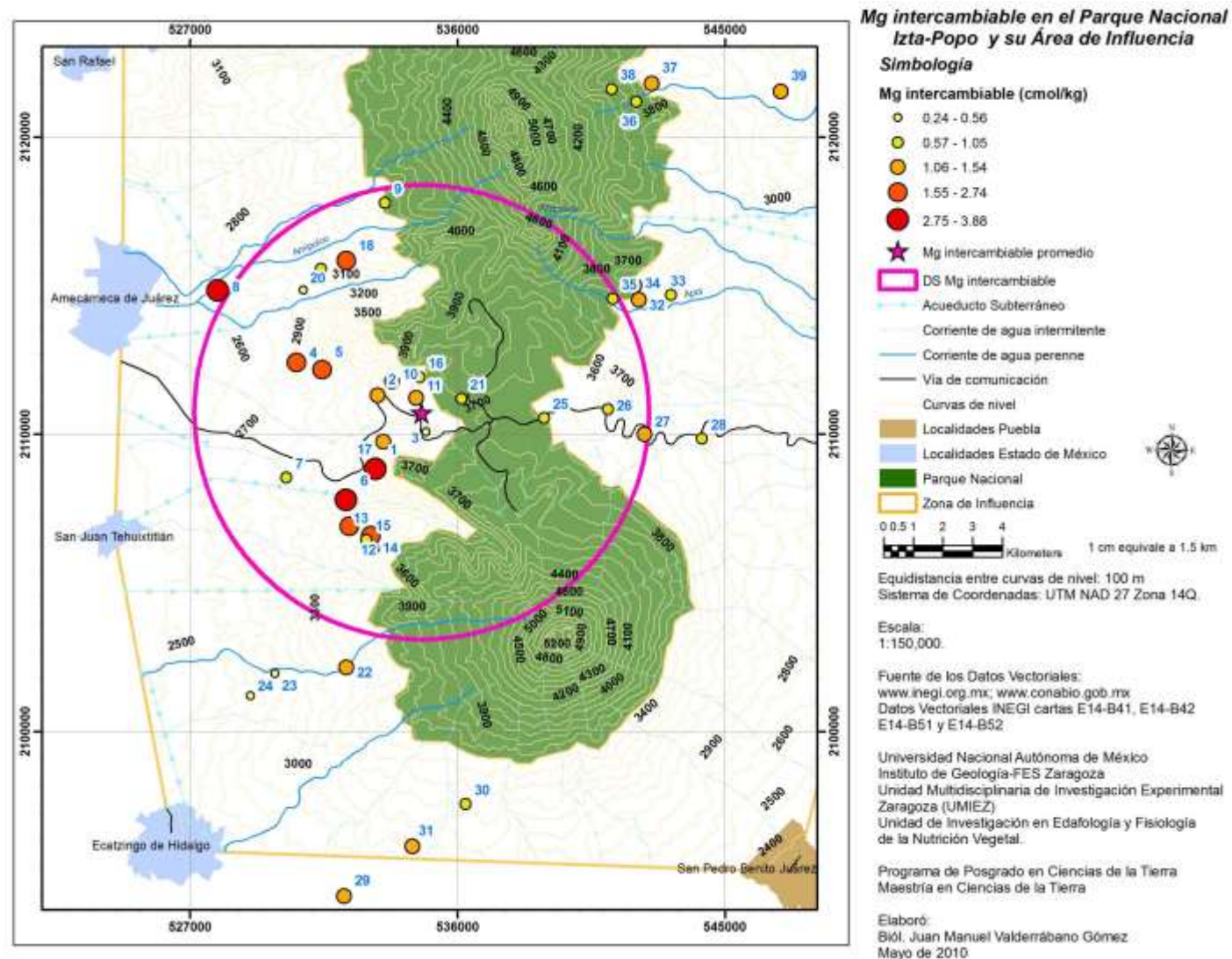


**Figura 42.** Mg intercambiable por tipo de vegetación. Barras de error= 0.05. n de *A. religiosa*= 10; n de *A. religiosa-Asociación*= 6; n de *Pinus*= 14; n de *Pinus-Asociación*= 9. n= número de sitios.

El análisis en SIG ubicó el promedio espacial de Mg intercambiable entre los volcanes Iztaccíhuatl y Popocatepetl (coordenadas UTM 534786 y 2110740), a 3500 m de altitud (Figura 43). Se observó también que suelos con contenidos de Mg intercambiable menores a  $1.5 \text{ cmol kg}^{-1}$  se distribuyeron al este de los volcanes y fuera del área delimitada por la distancia estándar espacial derivada del SIG, cuya superficie fue de 18,363 ha.

Estadísticamente, el Mg intercambiable presentó correlación significativa ( $p \leq 0.05$ ) con la conductividad eléctrica ( $r = 0.7$ ), pH potencial ( $r = 0.5$ ); pH activo, porcentaje de arcillas y Na intercambiable ( $r = 0.4$ ), porcentaje de arena ( $r = -0.4$ ) y densidad aparente ( $-0.3$ ).





**Figura 43.** Distribución espacial de Mg intercambiable en suelos del PN IztaPopo. Números azules a lado de puntos en el mapa indican el sitio de muestreo. De la simbología, DS= distancia estándar espacial.

El nivel de fertilidad edáfica (NFE), se pudo establecer con lo indicado en la NOM-021-RECNAT-2000, y con los datos obtenidos en esta investigación junto con los reportados por Granados-Damián (2003), García-Hernández (2003), Valderrábano-Gómez (2005), Astudillo (2006), Corona (2007), Ramírez-Gutiérrez (2008) y Martínez-Cohetero (2009) en trabajos realizados en suelos bajo bosques de coníferas (Apéndice 2-a). Con los datos de bases intercambiables, N-total y P-disponible reportados por dichos autores se propusieron intervalos de clase de fertilidad para suelos bajo bosques de coníferas (Cuadros 22 al 25).

**Cuadro 22.** Contenidos de bases intercambiables en diferentes zonas de estudio.

Zona	Na			K			Ca			Mg		
	Min	Medio	Max	Min	Medio	Max	Min	Medio	Max	Min	Medio	Max
	<b>cmol kg<sup>-1</sup></b>											
PNIP	0.1	1.3	5	0.17 <sub>MB</sub>	0.5 <sub>M</sub>	1.2 <sub>A</sub>	0.2 <sub>MB</sub>	3.4 <sub>B</sub>	12.7 <sub>A</sub>	0.24 <sub>MB</sub>	1.4 <sub>M</sub>	3.9 <sub>A</sub>
PNZA	0.8	1.03	1.3	0.9 <sub>MB</sub>	2.9 <sub>A</sub>	5.6 <sub>A</sub>	1.4 <sub>MB</sub>	12.03 <sub>A</sub>	38.9 <sub>A</sub>	0.2 <sub>MB</sub>	2.01 <sub>M</sub>	4.7 <sub>A</sub>
SJ	0.007	0.07	0.12	0.02 <sub>MB</sub>	0.06 <sub>MB</sub>	0.2 <sub>B</sub>	0.01 <sub>MB</sub>	1.35 <sub>MB</sub>	4.6 <sub>B</sub>	0.004 <sub>MB</sub>	0.08 <sub>MB</sub>	0.2 <sub>MB</sub>
SM	0.003	0.08	0.2	0.01 <sub>MB</sub>	0.06 <sub>MB</sub>	0.19 <sub>MB</sub>	0.02 <sub>MB</sub>	1.5 <sub>MB</sub>	4.2 <sub>B</sub>	0.002 <sub>MB</sub>	0.04 <sub>MB</sub>	0.16 <sub>MB</sub>
<b>Media</b>	<b>0.27</b>	<b>0.39</b>	<b>0.54</b>	<b>0.31<sub>M</sub></b>	<b>1.0<sub>A</sub></b>	<b>1.99<sub>A</sub></b>	<b>0.48<sub>MB</sub></b>	<b>4.96<sub>B</sub></b>	<b>15.9<sub>A</sub></b>	<b>0.07<sub>MB</sub></b>	<b>0.71<sub>B</sub></b>	<b>1.7<sub>M</sub></b>

La media corresponde a los valores de todas las zonas, excepto el valor del Parque Nacional IztaPopo.

Min= Valor mínimo; Max= Valor máximo; PNIP= Parque Nacional Izta-Popo; PNZA= Parque Nacional Zoquiapan y Anexas; SJ= Sierra Juárez; SM= Sierra de Manantlán.

Las clases referidas en subíndice en cada valor nutrimental se establecen de acuerdo con la NOM-021-RECNAT-2000. MB= muy baja; B= baja; M= media; A= alta. Las clases para Na intercambiable no se refieren de acuerdo con la NOM-021-RECNAT-2000 dado que esta no los reporta.

**Cuadro 23.** Contenido de bases intercambiables, N-total y P-disponible en suelos bajo bosque de coníferas en diferentes zonas de estudio.

Zona	*BI			N-total			P-disponible		
	Min	Medio	Max	Min	Medio	Max	Min	Medio	Max
	<b>cmol kg<sup>-1</sup></b>			<b>Mg ha<sup>-1</sup></b>					
PNIP	0.7 <sub>MB</sub>	6.6 <sub>B</sub>	22.8 <sub>M</sub>	0.6 <sub>A</sub>	3.3 <sub>A</sub>	7 <sub>A</sub>	0.47 <sub>MA</sub>	2 <sub>MA</sub>	4.8 <sub>MA</sub>
PNZA	3.3 <sub>MB</sub>	17.97 <sub>M</sub>	50.5 <sub>MA</sub>	0.03 <sub>M</sub>	5.2 <sub>A</sub>	13.7 <sub>A</sub>	0.1 <sub>A</sub>	0.25 <sub>MA</sub>	0.8 <sub>MA</sub>
SJ	0.041 <sub>MB</sub>	1.56 <sub>MB</sub>	5.12 <sub>B</sub>	0.54 <sub>A</sub>	4.32 <sub>A</sub>	12.6 <sub>A</sub>	0.03 <sub>B</sub>	0.11 <sub>A</sub>	0.35 <sub>MA</sub>
SM	0.035 <sub>MB</sub>	1.68 <sub>MB</sub>	4.75 <sub>MB</sub>	0.28 <sub>A</sub>	5.04 <sub>A</sub>	10.4 <sub>A</sub>	0.02 <sub>B</sub>	0.09 <sub>A</sub>	0.3 <sub>MA</sub>
RBC	----	----	----	1.16 <sub>A</sub>	3.95 <sub>A</sub>	9.66 <sub>A</sub>	0.002 <sub>MB</sub>	0.039 <sub>A</sub>	0.14 <sub>MA</sub>
<b>Media</b>	<b>1.25<sub>MB</sub></b>	<b>7.1<sub>B</sub></b>	<b>20.1<sub>M</sub></b>	<b>0.5<sub>A</sub></b>	<b>4.6<sub>A</sub></b>	<b>11.6<sub>A</sub></b>	<b>0.04<sub>B</sub></b>	<b>0.12<sub>A</sub></b>	<b>0.4<sub>MA</sub></b>

La media corresponde a los valores de todas las zonas, excepto el valor del Parque Nacional IztaPopo. PNIP= Parque Nacional IztaPopo; PNZA= Parque Nacional Zoquiapan y Anexas; RBC= Reserva de la Biosfera El Cielo.

\*BI= Valores mínimo, promedio y máximo de bases intercambiables es la suma de los promedios de Na, K, Ca y Mg. Las clases referidas en subíndice son de acuerdo con la NOM-021-RECNAT-2000. MB= muy baja; B= baja; M= media; A= alta.

**Cuadro 24.** Intervalos de nivel de fertilidad edáfica.

Elemento	Intervalo propuesto				Intervalo NOM-021-RECNAT-2000				
	Bajo	Medio	Alto	Muy Alto	Muy baja	Baja	Media	Alta	Muy alta
	<u>cmol kg<sup>-1</sup></u>				<u>cmol kg<sup>-1</sup></u>				
Na	≤0.3	>0.3-0.4	>0.4-0.5	>0.5	-----	-----	-----	-----	-----
K	≤0.3	>0.3-1	>1-2	>2	<0.2	0.2-0.3	0.3-0.6	>0.6	-----
Ca	≤ 0.5	>0.5-5	>5-16	>16	<2	2-5	5-10	>10	-----
Mg	≤ 0.1	>0.1-0.71	>0.71-1.7	>1.7	<0.5	0.5-1.3	1.3-3	>1.3	-----
BI	≤1.25	<1.25-7.1	>7.1-20.1	>20.1	<5	5-15	15-25	25-40	>40
	<u>Mg ha<sup>-1</sup></u>				<u>*Mg ha<sup>-1</sup></u>				
N-total	≤ 0.5	>0.5-4.6	>4.6-11.6	>11.6	-----	<0.03	0.03-0.06	>0.06	-----
P-disponible	≤0.04	>0.04-0.12	>0.12-0.4	>0.4	<0.02	0.02-0.04	0.04-0.08	0.08-0.13	>0.13

BI= Bases Intercambiables. \*Mg ha<sup>-1</sup>= valores de N-total y P-disponible reportados en la NOM-021-RECNAT-2000 como mg kg<sup>-1</sup>. Las unidades en Mg ha<sup>-1</sup> referidas en este Cuadro se obtuvieron con la densidad aparente promedio (1.1 g cm<sup>-3</sup>) de las zonas de estudio y cuya masa promedio del suelo fue igual a 2132000 kg ha<sup>-1</sup>.

Con lo descrito anteriormente, se estructuró el Cuadro 25, donde se encontró que los promedios de la suma de cationes intercambiables y N-total tuvieron nivel de fertilidad edáfica (NFE) entre media y alta, respecto al P-disponible, se encontró un nivel de fertilidad muy alto. En general, de treinta y nueve sitios estudiados 46.2% de la superficie tuvieron NFE media, 38.5% alta y 15.4% NFE muy alta.

Entre los sitios con NFE alta, se observaron seis con bosques de *A. religiosa* como vegetación dominante, y en sitios con muy alta fertilidad, esta especie formó parte de la vegetación del lugar. En general, se pudo observar que la mayor frecuencia de sitios con NFE alto y muy alto se distribuyó principalmente entre 2700 y 3425 m snm, a mayor altitud la frecuencia de suelos con NFE media aumentó.

**Cuadro 25.** Nivel de fertilidad edáfica propuesto para los suelos del PN IztaPopo. Datos ordenados conforme se asciende en altitud.

Sitio	Altitud msnm	Vegetación	Suelos*	cmol kg <sup>-1</sup>					Mg ha <sup>-1</sup>		NFE
				Na	K	Mg	Ca	BI	N-total	P-disp	
W de D 14	2650	<i>P. montezumae</i>	M5	2.87 <sub>MA</sub>	0.18 <sub>B</sub>	0.24 <sub>M</sub>	0.29 <sub>B</sub>	3.57 <sub>M</sub>	1.00 <sub>M</sub>	0.5 <sub>MA</sub>	M
Cuiloxochitla	2710	<i>P. teocote</i>	M4	1.75 <sub>MA</sub>	1.19 <sub>A</sub>	3.87 <sub>MA</sub>	1.02 <sub>M</sub>	7.82 <sub>A</sub>	1.46 <sub>M</sub>	0.63 <sub>MA</sub>	MA
D 14	2800	<i>P. montezumae</i>	D3	1.03 <sub>A</sub>	0.51 <sub>M</sub>	0.56 <sub>M</sub>	0.37 <sub>B</sub>	2.47 <sub>M</sub>	1.21 <sub>M</sub>	0.47 <sub>MA</sub>	M
D 3	2832	<i>A. religiosa</i>	I3	5.01 <sub>MA</sub>	0.17 <sub>B</sub>	0.92 <sub>A</sub>	0.77 <sub>M</sub>	6.87 <sub>M</sub>	1.96 <sub>M</sub>	1.1 <sub>MA</sub>	A
Barranca Apaxco	2834	<i>Pinus</i> spp. <i>A. religiosa</i> , <i>Quercus</i> sp., <i>Alnus</i> , <i>Cupressus lusitanica</i> , <i>Cornus</i> sp.	M5	0.66 <sub>MA</sub>	0.81 <sub>M</sub>	1.42 <sub>A</sub>	12.74 <sub>MA</sub>	15.64 <sub>A</sub>	2.49 <sub>M</sub>	2.1 <sub>MA</sub>	MA
Pasiontitla	2900	<i>P. patula</i> , <i>P. pseudostrobus</i> , <i>P. Teocote</i>	I3	0.08 <sub>B</sub>	0.44 <sub>M</sub>	0.51 <sub>M</sub>	0.77 <sub>M</sub>	1.79 <sub>M</sub>	4.89 <sub>A</sub>	0.7 <sub>MA</sub>	M
O 17	2918	<i>P. montezumae</i> , <i>P. pseudostrobus</i>	I3	2.15 <sub>MA</sub>	0.97 <sub>M</sub>	1.84 <sub>MA</sub>	0.88 <sub>M</sub>	5.83 <sub>M</sub>	3.41 <sub>M</sub>	0.49 <sub>MA</sub>	M
O 18	2932	<i>A. religiosa</i>	I2	1.67 <sub>MA</sub>	0.57 <sub>M</sub>	2.74 <sub>MA</sub>	2.24 <sub>M</sub>	7.22 <sub>A</sub>	3.74 <sub>M</sub>	0.67 <sub>MA</sub>	MA
La Papa Acatzi	2964	<i>Pinus</i> sp.	M1	0.77 <sub>MA</sub>	0.89 <sub>M</sub>	1.54 <sub>A</sub>	9.21 <sub>A</sub>	12.41 <sub>A</sub>	1.94 <sub>M</sub>	3.2 <sub>MA</sub>	A
D 11	2965	<i>A. religiosa</i> , <i>Pinus</i> sp., <i>Cupressus lusitanica</i>	D3	3.34 <sub>MA</sub>	0.37 <sub>M</sub>	3.12 <sub>MA</sub>	0.85 <sub>M</sub>	7.68 <sub>A</sub>	5.79 <sub>A</sub>	1.3 <sub>MA</sub>	MA
Las Anomias	3000	<i>A. religiosa</i>	I2	1.51 <sub>MA</sub>	0.49 <sub>M</sub>	1.04 <sub>A</sub>	1.67 <sub>M</sub>	4.72 <sub>M</sub>	4.09 <sub>M</sub>	2.4 <sub>MA</sub>	M
S de El Salto	3099	<i>Pinus</i> sp., <i>A. religiosa</i> .	D3	0.56 <sub>MA</sub>	0.49 <sub>M</sub>	1.15 <sub>A</sub>	12.23 <sub>A</sub>	14.42 <sub>A</sub>	0.55 <sub>M</sub>	2.1 <sub>MA</sub>	A
La Ventana	3127	<i>Pinus</i> sp.	C1	0.60 <sub>MA</sub>	1.09 <sub>A</sub>	0.74 <sub>A</sub>	2.28 <sub>M</sub>	4.71 <sub>M</sub>	0.83 <sub>M</sub>	1.4 <sub>MA</sub>	A
O 16	3225	<i>A. religiosa</i>	C1	0.72 <sub>MA</sub>	0.40 <sub>M</sub>	1.20 <sub>A</sub>	1.81 <sub>M</sub>	4.13 <sub>M</sub>	1.26 <sub>M</sub>	1.6 <sub>MA</sub>	M
D2 4	3228	<i>A. religiosa</i>	D3	1.75 <sub>MA</sub>	0.38 <sub>M</sub>	2.37 <sub>MA</sub>	3.12 <sub>M</sub>	7.62 <sub>A</sub>	4.47 <sub>M</sub>	3.27 <sub>MA</sub>	A
O 1	3250	<i>A. religiosa</i> , <i>P. montezumae</i>	C1	2.70 <sub>MA</sub>	0.45 <sub>M</sub>	3.88 <sub>MA</sub>	3.26 <sub>M</sub>	10.29 <sub>A</sub>	4.32 <sub>M</sub>	0.9 <sub>MA</sub>	A
SE Barranca Tlalquecotchcotl	3281	<i>A. religiosa</i> , <i>Pinus</i> sp., <i>Cupressus lusitanica</i> cultivo y pastizal	C1	0.46 <sub>A</sub>	0.49 <sub>M</sub>	1.01 <sub>A</sub>	7.95 <sub>A</sub>	9.90 <sub>A</sub>	1.11 <sub>M</sub>	2.0 <sub>MA</sub>	A
F 1	3288	<i>P. hartwegii</i> , <i>P. pseudostrobus</i> , <i>A. religiosa</i> , <i>Quercus</i> sp.	C1	2.54 <sub>MA</sub>	0.22 <sub>B</sub>	1.29 <sub>A</sub>	0.26 <sub>B</sub>	4.31 <sub>M</sub>	3.32 <sub>M</sub>	1.3 <sub>MA</sub>	M
O 2	3300	<i>A. religiosa</i>	C1	0.87 <sub>MA</sub>	0.37 <sub>M</sub>	1.21 <sub>A</sub>	2.01 <sub>M</sub>	4.47 <sub>M</sub>	2.25 <sub>M</sub>	1.45 <sub>MA</sub>	M
Cruce el 8	3300	<i>A. religiosa</i> , <i>Alnus</i> sp.	I2	1.11 <sub>MA</sub>	1.02 <sub>A</sub>	1.96 <sub>MA</sub>	2.64 <sub>M</sub>	6.72 <sub>M</sub>	7.00 <sub>A</sub>	3.7 <sub>MA</sub>	MA
N Barranca Mata Leones	3312	<i>A. religiosa</i> , <i>P. hartwegii</i>	C1	0.60 <sub>MA</sub>	0.67 <sub>M</sub>	0.74 <sub>A</sub>	3.24 <sub>M</sub>	5.25 <sub>A</sub>	1.94 <sub>M</sub>	2.0 <sub>MA</sub>	A
Agua Escondida	3333	<i>Pinus</i> spp.	C1	0.84 <sub>A</sub>	0.80 <sub>M</sub>	1.52 <sub>A</sub>	8.69 <sub>A</sub>	11.85 <sub>A</sub>	5.68 <sub>A</sub>	2.7 <sub>MA</sub>	A
O 15	3336	<i>A. religiosa</i>	D3	1.91 <sub>MA</sub>	0.34 <sub>M</sub>	2.29 <sub>MA</sub>	2.35 <sub>M</sub>	6.89 <sub>M</sub>	5.36 <sub>A</sub>	3.7 <sub>MA</sub>	MA
D 5	3390	<i>A. religiosa</i>	D3	2.15 <sub>MA</sub>	0.24 <sub>B</sub>	1.00 <sub>A</sub>	1.11 <sub>M</sub>	4.50 <sub>M</sub>	2.68 <sub>M</sub>	1.32 <sub>MA</sub>	M

\* Unidades de suelo reportados por Miehlich (1980) descritas en el Cuadro 2; BI= Suma de bases intercambiables; P-disp= Fósforo disponible del suelo; DE= Desviación estándar. NFE= Nivel de fertilidad edáfica. B= bajo; M= medio; A= alto; MA= muy alto.

**Cuadro 25 (Continuación).**

Sitio	Altitud msnm	Vegetación	Suelos*	Na	K	Mg	Ca	BI	N-total	P-disp	NFE
				cmol Kg <sup>-1</sup>					Mg ha <sup>-1</sup>		
O1 3	3398	<i>A. religiosa</i>	C1	0.56 <sub>MA</sub>	0.31 <sub>M</sub>	1.28 <sub>A</sub>	1.47 <sub>M</sub>	3.63 <sub>M</sub>	4.35 <sub>M</sub>	1.96 <sub>MA</sub>	M
La Venta	3418	<i>Pinus</i> spp.	C1	0.58 <sub>MA</sub>	0.49 <sub>M</sub>	0.81 <sub>A</sub>	4.79 <sub>M</sub>	6.67 <sub>M</sub>	4.16 <sub>M</sub>	1.7 <sub>MA</sub>	M
S Barranca Tlalquecotchcotl 1	3425	<i>A. religiosa</i> , <i>P. hartwegii</i>	C1	0.63 <sub>MA</sub>	0.60 <sub>M</sub>	1.29 <sub>A</sub>	8.62 <sub>A</sub>	11.14 <sub>A</sub>	4.99 <sub>A</sub>	2.0 <sub>MA</sub>	A
O 14	3440	<i>A. religiosa</i>	D3	1.75 <sub>MA</sub>	0.61 <sub>M</sub>	1.33 <sub>A</sub>	1.73 <sub>M</sub>	5.41 <sub>M</sub>	4.20 <sub>M</sub>	1.79 <sub>MA</sub>	M
Tlalcomajada E de Tetterre	3512	<i>Pinus</i> spp., <i>A. religiosa</i>	C1	0.55 <sub>MA</sub>	0.59 <sub>M</sub>	1.15 <sub>A</sub>	3.90 <sub>M</sub>	6.19 <sub>M</sub>	2.22 <sub>M</sub>	3.2 <sub>MA</sub>	M
F 5	3522	<i>P. hartwegii</i>	C1	2.54 <sub>MA</sub>	0.25 <sub>B</sub>	0.55 <sub>M</sub>	0.23 <sub>B</sub>	3.58 <sub>M</sub>	3.87 <sub>M</sub>	0.87 <sub>MA</sub>	M
SW Barranca Tlalquecotchcotl	3540	<i>P. hartwegii</i> , <i>A. religiosa</i>	B2	0.71 <sub>MA</sub>	0.65 <sub>M</sub>	0.79 <sub>A</sub>	6.04 <sub>A</sub>	8.20 <sub>A</sub>	3.66 <sub>M</sub>	2.1 <sub>MA</sub>	A
F 11	3550	<i>P. hartwegii</i> , <i>A. religiosa</i>	C1	0.95 <sub>MA</sub>	0.27 <sub>B</sub>	0.81 <sub>A</sub>	0.65 <sub>M</sub>	2.69 <sub>M</sub>	4.82 <sub>A</sub>	2.5 <sub>MA</sub>	A
F 2	3585	<i>P. hartwegii</i> , <i>A. religiosa</i>	C1	0.64 <sub>MA</sub>	0.43 <sub>M</sub>	1.34 <sub>A</sub>	1.05 <sub>M</sub>	3.46 <sub>M</sub>	4.28 <sub>M</sub>	2.4 <sub>MA</sub>	M
Coronilla	3600	<i>P. hartwegii</i>	I1	2.07 <sub>MA</sub>	0.26 <sub>B</sub>	0.88 <sub>A</sub>	1.05 <sub>M</sub>	4.25 <sub>M</sub>	5.17 <sub>A</sub>	4.76 <sub>MA</sub>	A
Pela Gallina	3615	<i>P. hartwegii</i>	C1	0.51 <sub>MA</sub>	1.06 <sub>A</sub>	0.79 <sub>A</sub>	4.05 <sub>M</sub>	6.41 <sub>M</sub>	3.74 <sub>M</sub>	2.1 <sub>MA</sub>	A
S Barranca Tlalquecotchcotl 2	3667	<i>P. hartwegii</i>	C1	0.70 <sub>MA</sub>	0.63 <sub>M</sub>	1.47 <sub>A</sub>	11.12 <sub>A</sub>	13.92 <sub>A</sub>	3.88 <sub>M</sub>	3.2 <sub>MA</sub>	A
Chalchoapa NE de Tetterre	3696	<i>P. hartwegii</i>	B2	0.46 <sub>MA</sub>	0.48 <sub>M</sub>	0.88 <sub>A</sub>	2.87 <sub>M</sub>	4.70 <sub>M</sub>	0.97 <sub>M</sub>	2.1 <sub>MA</sub>	M
Paso de Cortés	3723	<i>P. hartwegii</i>	C1	0.48 <sub>MA</sub>	0.31 <sub>M</sub>	0.90 <sub>A</sub>	0.85 <sub>M</sub>	2.54 <sub>M</sub>	4.52 <sub>M</sub>	2.7 <sub>MA</sub>	M
La Laguna Xahuehualco	3828	<i>P. hartwegii</i>	B2	0.68 <sub>MA</sub>	0.72 <sub>M</sub>	1.05 <sub>A</sub>	3.17 <sub>M</sub>	5.61 <sub>M</sub>	2.77 <sub>M</sub>	3.4 <sub>MA</sub>	M
<b>Mínimo</b>				<b>0.1<sub>B</sub></b>	<b>0.17<sub>B</sub></b>	<b>0.24<sub>M</sub></b>	<b>0.23<sub>B</sub></b>	<b>1.79<sub>M</sub></b>	<b>0.6<sub>M</sub></b>	<b>0.47<sub>MA</sub></b>	
<b>Promedio</b>				<b>1.3<sub>MA</sub></b>	<b>0.5<sub>M</sub></b>	<b>1.4<sub>A</sub></b>	<b>3.4<sub>M</sub></b>	<b>6.7<sub>M</sub></b>	<b>3.3<sub>M</sub></b>	<b>2.00<sub>MA</sub></b>	<b>M</b>
<b>Máximo</b>				<b>5.0<sub>MA</sub></b>	<b>1.2<sub>A</sub></b>	<b>3.9<sub>MA</sub></b>	<b>12.7<sub>A</sub></b>	<b>15.6<sub>A</sub></b>	<b>7.0<sub>A</sub></b>	<b>4.76<sub>MA</sub></b>	
<b>DE</b>				<b>1.02</b>	<b>0.27</b>	<b>0.84</b>	<b>3.50</b>	<b>3.48</b>	<b>1.63</b>	<b>1.08</b>	

\* Unidades de suelo reportados por Miehlich (1980) descritas en el Cuadro 2; BI= Suma de bases intercambiables; P-disp= Fósforo disponible del suelo; DE= Desviación estándar. NFE= Nivel de fertilidad edáfica. B= bajo; M= medio; A= alto; MA= muy alto.

## 2.5 Propiedades físicas y calidad del suelo

El Cuadro 26 muestra las propiedades físicas que se utilizaron para conocer la calidad del suelo atribuible a estos parámetros.

**Cuadro 26.** Propiedades físicas del suelo.

Sitio	Nombre	Altitud m snm	UTM NAD27		DA	DR	CE	EP	R	L	A
			X	Y	$g\ cm^{-3}$	$dS\ m^{-1}$	% vol	%			
12	D2 4	3228	532351	2106898	0.98	2.51	0.098	61.13	8	20	72
36	Chalchoapa NE de Totorre	3696	542010	2121193	1.07	3.60	0.033	70.35	4	22	74
4	O 17	2918	530582	2112415	0.97	2.62	0.065	62.91	8	16	76
8	Cuiloxochitla	2710	527927	2114839	0.93	2.17	0.061	57.16	16	26	58
6	D 11	2965	532240	2107789	0.92	2.48	0.094	62.70	6	18	76
1	O 1	3250	533236	2108833	0.91	2.20	0.124	58.82	6	22	72
5	O 18	2932	531440	2112175	0.99	2.18	0.095	54.51	10	24	66
3	F 5	3522	534939	2110074	1.03	2.43	0.045	57.65	12	20	68
39	La Papa Acatzi	2964	546875	2121540	1.04	2.49	0.075	58.21	7	18	75
10	O1 3	3398	533785	2111786	1.05	2.29	0.079	54.18	6	18	76
24	W de D 14	2650	529032	2101200	1.33	2.53	0.038	47.49	6	14	80
17	O 2	3300	533500	2109750	1.28	2.46	0.061	47.92	6	22	72
13	O 15	3336	533082	2106584	1.09	2.23	0.080	50.96	6	20	74
11	F 2	3585	534603	2111225	1.00	2.35	0.066	57.27	6	20	74
14	O 14	3440	533121	2106124	1.31	2.23	0.095	41.16	2	20	78
22	O 16	3225	532250	2102150	1.34	2.01	0.092	33.14	4	14	82
19	Las Anomias	3000	531400	2115570	0.93	2.56	0.038	63.70	8	26	66
23	D 14	2800	529850	2101950	1.29	2.56	0.042	49.51	4	20	76
37	Tlalcomajada E de Totorre	3512	542529	2121800	0.91	2.63	0.039	65.20	7	24	69
29	Barranca Apapaxco	2834	532177	2094455	1.02	2.16	0.051	52.29	8	20	72
20	Pasiontitla	2900	530800	2114850	1.11	2.59	0.038	57.03	6	28	66
18	Cruce El 8	3300	532250	2115850	1.06	2.23	0.057	52.36	8	28	64
34	S Barranca Tlalquecotchcotl 2	3667	541942	2115007	1.26	2.32	0.029	61.02	4	26	70
16	F 11	3550	534716	2111918	1.10	2.21	0.053	50.34	6	24	70
15	D 5	3390	532932	2106452	1.04	2.34	0.047	55.43	4	20	76
38	La Laguna Xahuehahuatlaco	3828	541183	2121616	0.84	2.45	0.042	65.69	5	22	73
21	Paso de Cortés	3723	536125	2111200	0.90	2.30	0.051	60.87	4	20	76
25	Pela Gallina	3615	538910	2110546	1.07	1.94	0.054	44.94	6	14	80
7	D 3	2832	530240	2108542	1.25	2.07	0.041	39.63	4	8	88
28	La Ventana	3127	544221	2109851	1.29	2.13	0.028	36.88	7	14	79
2	F 1	3288	533304	2111309	0.96	1.99	0.043	51.72	8	18	74
32	S Barranca Tlalquecotchcotl 1	3425	542103	2114526	1.12	1.50	0.032	54.89	8	16	76
30	N Barranca Mata Leones	3312	536262	2097553	1.13	2.09	0.038	45.09	6	20	74
35	Suroeste Barranca Tlalquecotchcotl	3540	541221	2114562	0.84	2.27	0.025	61.93	7	26	67
9	Coronilla	3600	533552	2117782	0.86	2.05	0.030	58.13	6	20	74
33	SE Barranca Tlalquecotchcotl	3281	543181	2114683	0.81	1.90	0.045	45.66	9	20	71
27	Agua Escondida	3333	542286	2110002	1.08	1.59	0.063	32.07	6	16	78
31	S de El Salto	3099	534478	2096137	1.13	1.50	0.045	24.76	7	22	71
26	La Venta	3418	541056	2110845	1.08	1.35	0.057	20.04	5	18	77
	<b>Mínimo</b>				<b>0.81</b>	<b>1.35</b>	<b>0.025</b>	<b>20.04</b>	<b>2</b>	<b>8</b>	<b>58</b>
	<b>Promedio</b>				<b>1.06</b>	<b>2.24</b>	<b>0.056</b>	<b>51.92</b>	<b>6.5</b>	<b>20.1</b>	<b>73.4</b>
	<b>Máximo</b>				<b>1.34</b>	<b>3.60</b>	<b>0.124</b>	<b>70.35</b>	<b>16</b>	<b>28</b>	<b>88</b>
	<b>DE</b>				<b>0.15</b>	<b>0.39</b>	<b>0.024</b>	<b>11.33</b>	<b>2.4</b>	<b>4.3</b>	<b>5.5</b>

DA y DR= Densidad aparente y Densidad real; CE= Conductividad eléctrica; EP= Espacio poroso (porcentaje en volumen); R= Arcilla; L= Limo; A= Arena; DE= Desviación estándar. Datos ordenados conforme al gradiente altitudinal.

Del ACP para las propiedades físicas utilizadas para conocer la calidad del suelo, se obtuvieron tres CP para tres variables robustas (VR) con autovalor mayor a uno y varianza acumulada de 78% (Cuadro 27).

**Cuadro 27.** Eigenvalores para las propiedades físicas del suelo.

Eigenvalor	Autovalor	Diferencia	Proporción	Acumulada (%)
1	3.03	1.59	0.43	43
2	1.43	0.42	0.20	64
3	1.02	0.22	0.15	78
4	0.80	0.22	0.11	90
5	0.58	0.46	0.08	98
6	0.13	0.13	0.02	100
7	0.00	0.00	0.00	100

Las VR que definieron los tres CP fueron las del valor absoluto más alto en el Cuadro 28. El CP<sub>1</sub> fue determinado por el porcentaje de arena (-0.52), el CP<sub>2</sub> por la DR (0.68) y la CE fue la VR en el CP<sub>3</sub>.

**Cuadro 28.** Eigenvectores para las propiedades físicas del suelo.

Variable	CP <sub>1</sub>	CP <sub>2</sub>	CP <sub>3</sub>
Densidad aparente (DA)	-0.38	0.14	-0.21
<b>Densidad real (DR)</b>	0.26	<b>-0.68</b>	0.02
Espacio poroso (EP)	0.43	0.45	0.09
<b>Conductividad eléctrica</b>	-0.02	-0.04	<b>-0.95</b>
Arcilla (R)	0.33	-0.48	0.05
Limo (L)	0.47	-0.06	-0.16
<b>Arena (A)</b>	<b>-0.52</b>	0.26	0.10

Con el desarrollo de las ecuaciones ya señaladas se obtuvieron las calificaciones de los sitios y derivado de esto los grupos de calidad del suelo por parámetros físicos:

$$y_i = a_i \left( \frac{x_i - \bar{x}}{\sqrt{\sigma}} \right) = CP_i = a_i \left( \frac{x_i - \bar{x}}{\sqrt{\sigma}} \right) \quad \text{Ecuación 3}$$

$$VCSF = CP_1 + CP_2 + \dots + CP_n \quad \text{Ecuación 6}$$

Como ejemplo, al sustituir los CP de las VR en la ecuación 6:

$$VCSF = CP_{1, \text{Arena}} + CP_{2, \text{DR}} + CP_{3, \text{CE}}$$

Se encontró, con pocas excepciones, que los suelos de los sitios con porcentaje de arena, densidad real y conductividad eléctrica mayores al valor promedio tuvieron

calificaciones negativas, distribuyéndose en valores negativos sobre el eje de las ordenadas del CP correspondiente (Figuras 44 a 46). Debe deducirse que el valor negativo de las CP representa condiciones desfavorables al suelo.

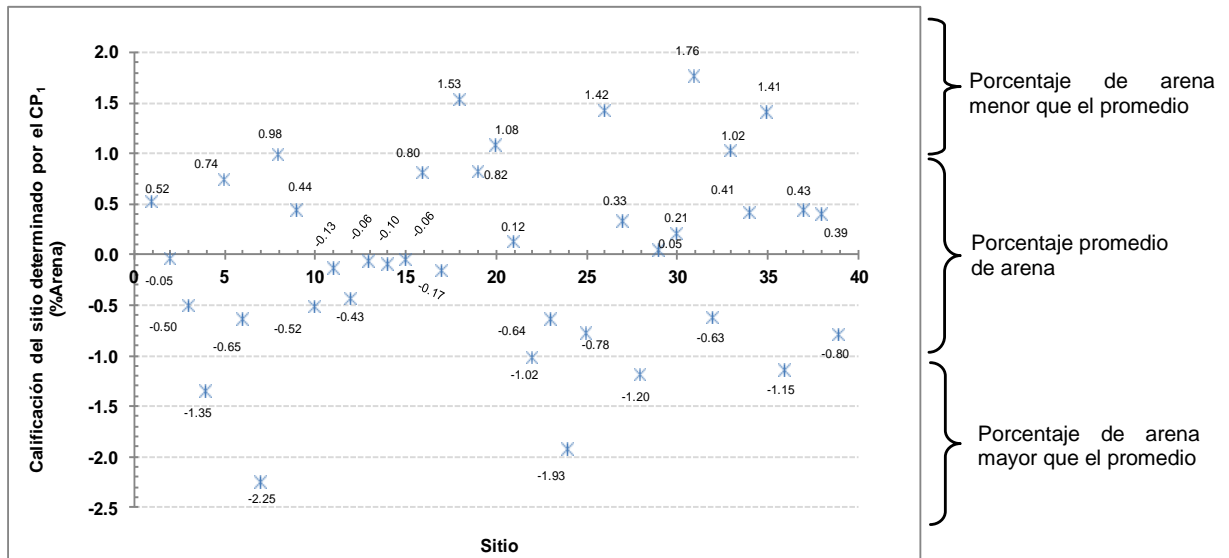


Figura 44. Calificación de  $CP_1$  por parámetros físicos del suelo. Valores a lado de asteriscos la calificación.

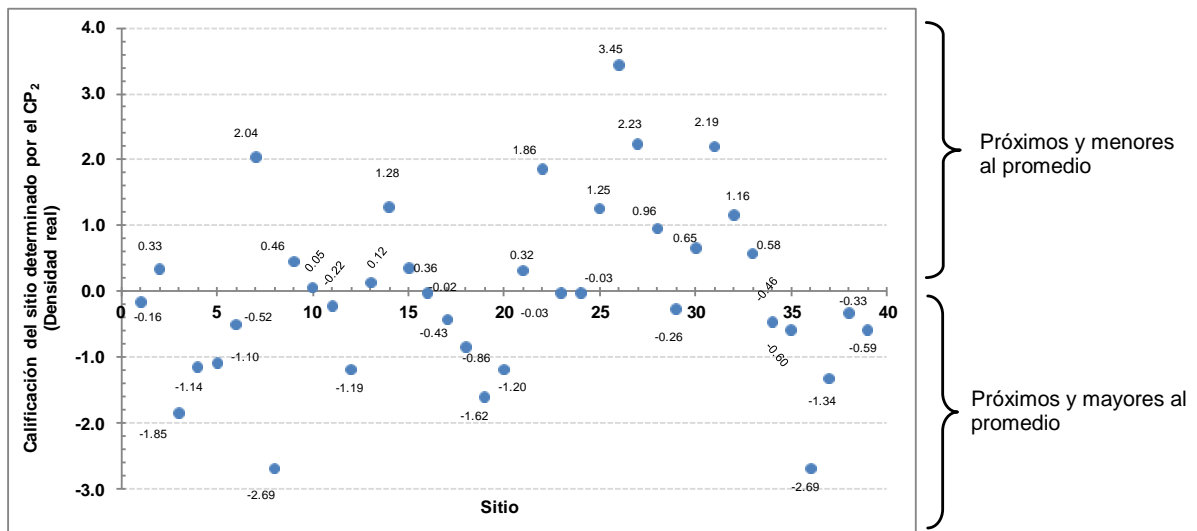
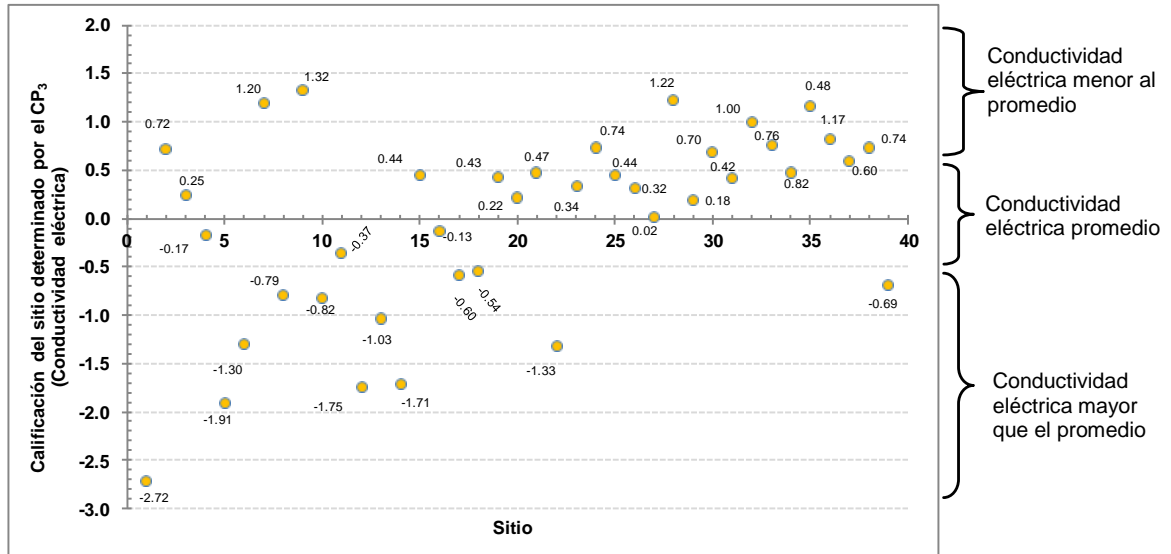


Figura 45. Calificación de  $CP_2$  por parámetros físicos del suelo. Números a lado de puntos indican la calificación.





**Figura 46.** Calificación de CP<sub>3</sub> por parámetros físicos del suelo. Números a lado de puntos indican la calificación.

Con el desarrollo de la suma para los sitios “La Venta” y “D2 4” (más alto y más bajo) se derivó:

$$\text{Sitio “La Venta” VCSF} = 1.42 + 3.45 + 0.32 = 5.18$$

$$\text{Sitio “D2 4” VCSF} = (-) 0.43 + (-) 1.19 + (-) 1.75 = -3.37$$

Al aplicar el modelo aditivo a los CP para todos los sitios, se encontró que los suelos con mejores condiciones para la biota se ubicaron hacia valores positivos agrupándose en una clase de suelos de buena calidad (Cuadro 29).

**Cuadro 29.** Valor de Calidad de suelo estimada por sus propiedades físicas.

Sitio	Nombre	Altitud m snm	UTM NAD27		DA g cm <sup>-3</sup>	DR g cm <sup>-3</sup>	CE dS m <sup>-1</sup>	EP % vol	R %	L %	A %	CP <sub>1</sub>	CP <sub>2</sub>	CP <sub>3</sub>	VCSF	Clase	Vegetación	US
			X	Y														
12	D2 4	3228	532351	2106898	0.98	2.51	0.098	61.13	8	20	72	-0.43	-1.19	-1.75	-3.37	MB	<i>Abies religiosa</i>	D3
36	Chalchoapa NE de Tectorre	3696	542010	2121193	1.07	3.60	0.033	70.35	4	22	74	-1.15	-2.69	0.82	-3.02	MB	<i>Pinus hartwegii</i>	B2
4	O 17	2918	530582	2112415	0.97	2.62	0.065	62.91	8	16	76	-1.35	-1.14	-0.17	-2.67	B	<i>Pinus montezumae, Pinus pseudostrobus</i>	I3
8	Cuioxochitla	2710	527927	2114839	0.93	2.17	0.061	57.16	16	26	58	0.98	-2.69	-0.79	-2.49	B	<i>Pinus teocote</i>	M4
6	D 11	2965	532240	2107789	0.92	2.48	0.094	62.70	6	18	76	-0.65	-0.52	-1.30	-2.46	B	<i>Abies religiosa, Pinus sp., Cupressus lusitanica</i>	D3
1	O 1	3250	533236	2108833	0.91	2.20	0.124	58.82	6	22	72	0.52	-0.16	-2.72	-2.36	B	<i>Abies religiosa, Pinus montezumae</i>	C1
5	O 18	2932	531440	2112175	0.99	2.18	0.095	54.51	10	24	66	0.74	-1.10	-1.91	-2.27	B	<i>Abies religiosa</i>	I2
3	F 5	3522	534939	2110074	1.03	2.43	0.045	57.65	12	20	68	-0.50	-1.85	0.25	-2.11	B	<i>Pinus hartwegii</i>	C1
39	La Papa Acatzi	2964	546875	2121540	1.04	2.49	0.075	58.21	7	18	75	-0.80	-0.59	-0.69	-2.07	B	<i>Pinus sp.</i>	M1
10	O1 3	3398	533785	2111786	1.05	2.29	0.079	54.18	6	18	76	-0.52	0.05	-0.82	-1.29	B	<i>Abies religiosa</i>	C1
24	W de D 14	2650	529032	2101200	1.33	2.53	0.038	47.49	6	14	80	-1.93	-0.03	0.74	-1.21	B	<i>Pinus montezumae</i>	M5
17	O 2	3300	533500	2109750	1.28	2.46	0.061	47.92	6	22	72	-0.17	-0.43	-0.60	-1.20	B	<i>Abies religiosa</i>	C1
13	O 15	3336	533082	2106584	1.09	2.23	0.080	50.96	6	20	74	-0.06	0.12	-1.03	-0.97	M	<i>Abies religiosa</i>	D3
11	F 2	3585	534603	2111225	1.00	2.35	0.066	57.27	6	20	74	-0.13	-0.22	-0.37	-0.72	M	<i>Pinus hartwegii, Abies religiosa</i>	C1
14	O 14	3440	533121	2106124	1.31	2.23	0.095	41.16	2	20	78	-0.10	1.28	-1.71	-0.53	M	<i>Abies religiosa</i>	D3
22	O 16	3225	532250	2102150	1.34	2.01	0.092	33.14	4	14	82	-1.02	1.86	-1.33	-0.50	M	<i>Abies religiosa</i>	C1
19	Las Anornias	3000	531400	2115570	0.93	2.56	0.038	63.70	8	26	66	0.82	-1.62	0.43	-0.37	M	<i>Abies religiosa</i>	I2
23	D 14	2800	529850	2101950	1.29	2.56	0.042	49.51	4	20	76	-0.64	-0.03	0.34	-0.34	M	<i>Pinus montezumae</i>	D3
37	Tlalcomajada E de Tectorre	3512	542529	2121800	0.91	2.63	0.039	65.20	7	24	69	0.43	-1.34	0.60	-0.31	M	<i>Pinus spp., Abies religiosa</i>	C1
29	Barranca Apapaxco	2834	532177	2094455	1.02	2.16	0.051	52.29	8	20	72	0.05	-0.26	0.18	-0.03	M	<i>Pinus spp., Abies religiosa, Quercus sp., Aile, Cupressus lusitanica, Cornus sp.</i>	M5
20	Pasionitla	2900	530800	2114850	1.11	2.59	0.038	57.03	6	28	66	1.08	-1.20	0.22	0.09	M	<i>Pinus patula, Pinus pseudostrobus, Pinus Teocote</i>	I3
18	Cruce El 8	3300	532250	2115850	1.06	2.23	0.057	52.36	8	28	64	1.53	-0.86	-0.54	0.13	M	<i>Abies religiosa, Alnus sp.</i>	I2
34	S Barranca Tlaquecotchtotl 2	3667	541942	2115007	1.26	2.32	0.029	61.02	4	26	70	0.41	-0.46	0.48	0.43	M	<i>Pinus hartwegii</i>	C1
16	F 11	3550	534716	2111918	1.10	2.21	0.053	50.34	6	24	70	0.80	-0.02	-0.13	0.64	M	<i>Pinus hartwegii, Abies religiosa</i>	C1
15	D 5	3390	532932	2106452	1.04	2.34	0.047	55.43	4	20	76	-0.06	0.36	0.44	0.74	M	<i>Abies religiosa</i>	D3
38	La Laguna Xahuehualco	3828	541183	2121616	0.84	2.45	0.042	65.69	5	22	73	0.39	-0.33	0.74	0.81	M	<i>Pinus hartwegii</i>	B2
21	Paso de Cortés	3723	536125	2111200	0.90	2.30	0.051	60.87	4	20	76	0.12	0.32	0.47	0.91	M	<i>Pinus hartwegii</i>	C1
25	Pela Gallina	3615	538910	2110546	1.07	1.94	0.054	44.94	6	14	80	-0.78	1.25	0.44	0.91	M	<i>Pinus hartwegii</i>	C1
7	D 3	2832	530240	2108542	1.25	2.07	0.041	39.63	4	8	88	-2.25	2.04	1.20	0.98	M	<i>Abies religiosa</i>	I3
28	La Ventana	3127	544221	2109851	1.29	2.13	0.028	36.88	7	14	79	-1.20	0.96	1.22	0.98	M	<i>Pinus sp.</i>	C1
2	F 1	3288	533304	2111309	0.96	1.99	0.043	51.72	8	18	74	-0.05	0.33	0.72	1.00	A	<i>Pinus hartwegii, Pinus pseudostrobus, Abies religiosa, Quercus sp.</i>	C1
32	S Barranca Tlaquecotchtotl 1	3425	542103	2114526	1.12	1.50	0.032	54.89	8	16	76	-0.63	1.16	1.00	1.52	A	<i>Abies religiosa, Pinus hartwegii</i>	C1
30	N Barranca Mata Leones	3312	536262	2097553	1.13	2.09	0.038	45.09	6	20	74	0.21	0.65	0.70	1.55	A	<i>Abies religiosa, Pinus hartwegii</i>	C1
35	Suroeste Barranca Tlaquecotchtotl	3540	541221	2114562	0.84	2.27	0.025	61.93	7	26	67	1.41	-0.60	1.17	1.98	A	<i>Pinus hartwegii, Abies religiosa</i>	B2
9	Coronilla	3600	533552	2117782	0.86	2.05	0.030	58.13	6	20	74	0.44	0.46	1.32	2.22	A	<i>Pinus hartwegii</i>	I1
33	SE Barranca Tlaquecotchtotl	3281	543181	2114683	0.81	1.90	0.045	45.66	9	20	71	1.02	0.58	0.76	2.36	A	<i>Abies religiosa, Pinus sp., Cupressus lusitanica, cultivo y pastizal</i>	C1
27	Agua Escondida	3333	542286	2110002	1.08	1.59	0.063	32.07	6	16	78	0.33	2.23	0.02	2.57	A	<i>Pinus spp.</i>	C1
31	S de El Salto	3099	534478	2096137	1.13	1.50	0.045	24.76	7	22	71	1.76	2.19	0.42	4.37	MA	<i>Pinus sp., Abies religiosa.</i>	D3
26	La Venta	3418	541056	2110845	1.08	1.35	0.057	20.04	5	18	77	1.42	3.45	0.32	5.18	MA	<i>Pinus spp.</i>	C1
	<b>Mínimo</b>				<b>0.81</b>	<b>1.35</b>	<b>0.025</b>	<b>20.04</b>	<b>2</b>	<b>8</b>	<b>58</b>							
	<b>Promedio</b>				<b>1.06</b>	<b>2.24</b>	<b>0.056</b>	<b>51.92</b>	<b>6.5</b>	<b>20.1</b>	<b>73.4</b>							
	<b>Máximo</b>				<b>1.34</b>	<b>3.60</b>	<b>0.124</b>	<b>70.35</b>	<b>16</b>	<b>28</b>	<b>88</b>							
	<b>DE</b>				<b>0.15</b>	<b>0.39</b>	<b>0.024</b>	<b>11.33</b>	<b>2.4</b>	<b>4.3</b>	<b>5.5</b>							

CP= Calificación del componente principal; VCSF= Valor de Calidad de Suelo de los parámetros físicos; CE= conductividad eléctrica; EP= espacio poroso (porcentaje en volumen); DA= densidad aparente; DR= densidad real; R= arcilla; L= limo; A= arena; MB= Muy bajo; B= Bajo; M= medio; A= alto; MA= muy alto. US= unidades de suelo reportadas por Miehlich (1980). Datos ordenados conforme al VCSF.

El grupo de sitios con suelos de calidad muy baja por parámetros físicos (VCSF), tuvo valores de DR y EP mayores que los suelos con calidad muy alta (Cuadro 30). En general, se encontró una tendencia negativa entre el VCSF con la CE, DR y porcentaje de EP.

**Cuadro 30.** Comparación de propiedades físicas en sitios con calificación máxima y mínima.

Sitio	Nombre	Altitud msnm	UTM NAD27		DA g cm <sup>-3</sup>	DR	CE dS m <sup>-1</sup>	EP	A	L	R	VCS Físicos	Clase
			X	Y									
12	D2 4	3228	532351	2106898	0.98	2.51	0.098	61.13	8	20	72	-3.37	MB
36	Chalchoapa NE de Totorre	3696	542010	2121193	1.07	3.60	0.033	70.35	4	22	74	-3.02	MB
31	S de El Salto	3099	534478	2096137	1.13	1.50	0.045	24.76	7	22	71	4.37	MA
26	La Venta	3418	541056	2110845	1.08	1.35	0.057	20.04	5	18	77	5.18	MA

MB= Muy bajo; MA= muy alto; CE= Conductividad eléctrica, EP= Espacio poroso, A= Arena, L= Limo, R= arcilla; VCS= Valor de calidad de suelo.

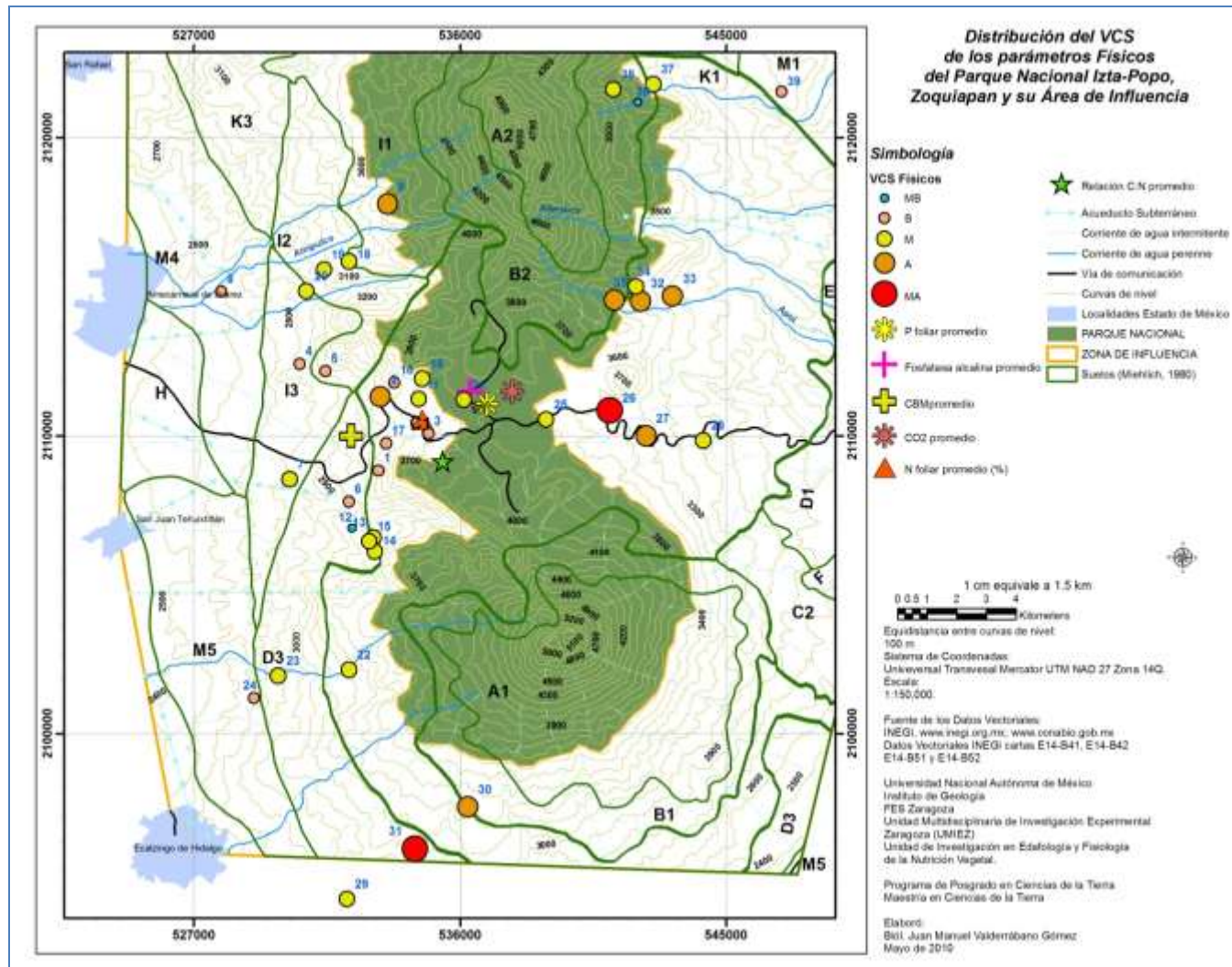
Según los porcentajes de limo, arcilla y arena, con algunas excepciones, (Cuiloxochitla, O 16, W de D 14 y D3), la clase textural de los suelos estudiados fue franco-arcillo-arenosa. Pritchett (1991) reporta que los suelos con texturas de este tipo se corresponden con lo ya conocido de éstos, pues al incrementarse el porcentaje de MOS incrementa la CE y disminuye la densidad aparente.

De acuerdo al VCSF, se encontró que 5% de la superficie estudiada (3.9 ha) se agrupó en clase de calidad muy baja de suelo (MB), alrededor de 72% de la superficie estudiada mostró calidad del suelo de baja a media y, apenas poco más de 23% tuvo calidad de suelo alta a muy alta.

De acuerdo al tipo de vegetación, se observó que bosques con *A. religiosa* como vegetación dominante fueron más frecuentes sobre suelos con VCSF medio.

El análisis estadístico mostró correlación positiva y significativa ( $p \leq 0.05$ ) del VCSF con la precipitación media anual y Ca intercambiable ( $r=0.4$ ), pero negativa con DR ( $r=-0.7$ ), porcentaje de EP ( $r=-0.6$ ); CE y Mg intercambiable ( $r=-0.5$ ); VCSQ, relación CBM/COS y N-foliar ( $r=-0.4$ ), además de fosfatasa ácida ( $r=-0.3$ ).

La distribución espacial del VCSF; en comparación con los parámetros bioquímicos y químicos, presentó un patrón disperso (Figura 47) dado que los valores de cada clase se encontraron ampliamente distribuidos.



**Figura 47.** Distribución espacial del valor de calidad de suelo por parámetros físicos. Los círculos grandes rojos representan los valores más altos y los círculos color azul y rosa más pequeños a los más bajos. Los polígonos verdes indican las unidades de suelo reportadas por Mielich (1980) y los números en color azul señalan los sitios de estudio.

## 2.6 Valor total de calidad del suelo

En el Cuadro 31 se muestran las variables robustas (VR) obtenidas del análisis de componentes principales (ACP) por grupo de parámetros que en promedio explicaron 80% de la variabilidad total.

**Cuadro 31.** Variables robustas de las propiedades de los suelos del PN IztaPopo.

Propiedad del Suelo	Variables Robustas	
	CP	Variable
Bioquímicas	1	Producción de CO <sub>2</sub> del suelo
	2	Fosfatasa alcalina
Químicas	1	MOS (%)
	2	pH activo
	3	Mg intercambiable
	4	Na intercambiable
Físicas	1	Arena (%)
	2	Densidad real
	3	Conductividad eléctrica

CP= Componente principal del Análisis de Componentes Principales.

La ecuación 8 se utilizó como modelo aditivo para integrar las VR y sus valores de calidad de suelo de todos los grupos de parámetros bioquímicos, químicos y físicos para definir un índice general o valor total de calidad del suelo (VTCS):

$$VCST = VCSBq + VCSQ + VCSF \quad \text{Ecuación 8}$$

Si se toman como ejemplo los sitios “La Papa Acatzi” y “Coronilla” (Cuadro 32) y se sustituyen los VCS de cada propiedad del suelo en la ecuación 8 se tiene:

$$\text{Sitio “La Papa Acatzi”}; VTCS = (-) 0.394 + (-) 7.94 + (-) 2.07 = -10.406$$

$$\text{Sitio “Coronilla”}; VTCS = 2.469 + 6.67 + 2.22 = 11.36$$

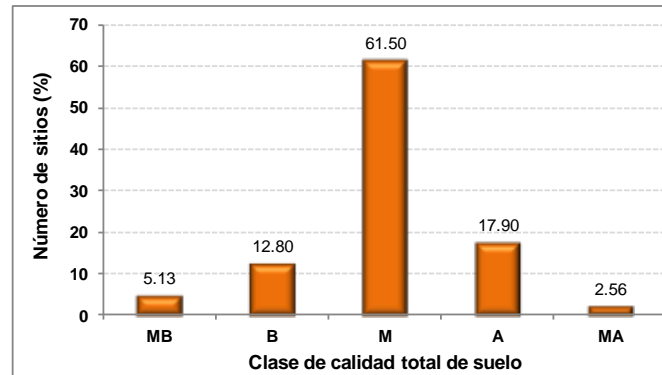
El desarrollo de la ecuación para cada sitio sugiere que valores negativos en algún parámetro del suelo, restan calidad y por consecuencia se obtienen bajos valores de VTCS. Los sitios con VTCS menores de -10 se agruparon dentro de suelos con calidad muy baja (MB), valores de -10 a -5 se agrupan en calidad baja (B), de -5 a 5 calidad media (M), entre 5 y 10 calidad alta (A) y mayores a 10 calidad muy alta (MA).

**Cuadro 32.** Valor total de calidad de suelo para el PN IztaPopo.

Sitio	Nombre	Altitud _m snm_	UTM NAD27		VCSBq	VCSQ	VCSF	VTCS	Clase
			_X_	_Y_					
39	La Papa Acatzi	2964	546875	2121540	-0.394	-7.94	-2.07	-10.406	MB
29	Barranca Apapaxco	2834	532177	2094455	-1.127	-9.02	-0.03	-10.179	MB
36	Chalchoapa NE de Tettere	3696	542010	2121193	-2.517	-2.71	-3.02	-8.244	B
34	S Barranca Tlalquecotchcotl 2	3667	541942	2115007	-1.651	-6.47	0.43	-7.693	B
31	S de El salto	3099	534478	2096137	-1.299	-10.13	4.37	-7.058	B
33	SE Barranca Tlalquecotchcotl	3281	543181	2114683	-1.470	-6.50	2.36	-5.611	B
25	Pela Gallina	3615	538910	2110546	-3.400	-2.81	0.91	-5.301	B
28	La Ventana	3127	544221	2109851	-2.199	-3.57	0.98	-4.787	M
35	SW Barranca Tlalquecotchcotl	3540	541221	2114562	-2.416	-3.03	1.98	-3.468	M
27	Agua Escondida	3333	542286	2110002	-1.699	-4.32	2.57	-3.446	M
37	Tlalcomajada E de Tettere	3512	542529	2121800	-0.805	-2.17	-0.31	-3.279	M
32	S Barranca Tlalquecotchcotl 1	3425	542103	2114526	1.135	-4.89	1.52	-2.231	M
30	N Barranca Mata Leones	3312	536262	2097553	-1.578	-2.12	1.55	-2.145	M
22	O 16	3225	532250	2102150	-0.651	-0.17	-0.50	-1.318	M
23	D 14	2800	529850	2101950	1.315	-1.48	-0.34	-0.502	M
24	W de D 14	2650	529032	2101200	2.952	-2.06	-1.21	-0.317	M
38	La Laguna Xahuehahuatenco	3828	541183	2121616	0.170	-1.25	0.81	-0.268	M
3	F 5	3522	534939	2110074	1.303	0.95	-2.11	0.142	M
20	Pasientitla	2900	530800	2114850	0.852	-0.79	0.09	0.156	M
5	O 18	2932	531440	2112175	-0.278	3.15	-2.27	0.596	M
26	La Venta	3418	541056	2110845	-0.732	-3.22	5.18	1.224	M
10	O1 3	3398	533785	2111786	0.683	2.02	-1.29	1.417	M
4	O 17	2918	530582	2112415	1.933	2.23	-2.67	1.495	M
1	O 1	3250	533236	2108833	-1.011	5.66	-2.36	2.292	M
12	D2 4	3228	532351	2106898	0.061	5.82	-3.37	2.508	M
11	F 2	3585	534603	2111225	1.095	2.59	-0.72	2.956	M
17	O 2	3300	533500	2109750	3.526	0.68	-1.20	3.013	M
14	O 14	3440	533121	2106124	1.027	2.76	-0.53	3.263	M
8	Cuilochochitla	2710	527927	2114839	2.229	3.87	-2.49	3.609	M
21	Paso de Cortés	3723	536125	2111200	0.797	2.39	0.91	4.095	M
2	F 1	3288	533304	2111309	0.481	3.29	1.00	4.778	M
15	D 5	3390	532932	2106452	2.413	1.94	0.74	5.101	A
16	F 11	3550	534716	2111918	2.256	2.25	0.64	5.152	A
19	Las Anomias	3000	531400	2115570	2.726	2.94	-0.37	5.300	A
6	D 11	2965	532240	2107789	0.671	7.94	-2.46	6.154	A
13	O 15	3336	533082	2106584	0.527	6.70	-0.97	6.258	A
18	Cruce el 8	3300	532250	2115850	0.820	5.67	0.13	6.629	A
7	D 3	2832	530240	2108542	1.228	5.12	0.98	7.326	A
9	Coronilla	3600	533552	2117782	2.469	6.67	2.22	11.358	MA

VCS= Valor de calidad del suelo. Bq= parámetros Bioquímicos; Q= parámetros Químicos; F= parámetros Físicos; T= Total; MB= Muy bajo; B= Bajo; M= Medio; A= Alto; MA= Muy alto. Datos ordenados conforme al valor de calidad de suelo.

La Figura 48 muestra que 18% de la superficie del PN IztaPopo y área de influencia, tuvo suelos agrupados en las clases de calidad baja a muy baja; alrededor de 61% fueron suelos con VTCS media y poco más de 21% de alto a muy alto VTCS.



**Figura 48.** Porcentaje de sitios y valor de calidad de suelos total. MB= Muy baja; B= Baja; M= Media; A= Alta; MA= Muy alta.

En el Cuadro 33 se muestra que en general, suelos con VTCS muy bajo tuvieron mayor producción de CO<sub>2</sub> del suelo, más actividad de la enzima fosfatasa alcalina, menor porcentaje de MOS en referencia al promedio general y pH fuertemente ácido según la NOM-021-SEMARNAT-2000.

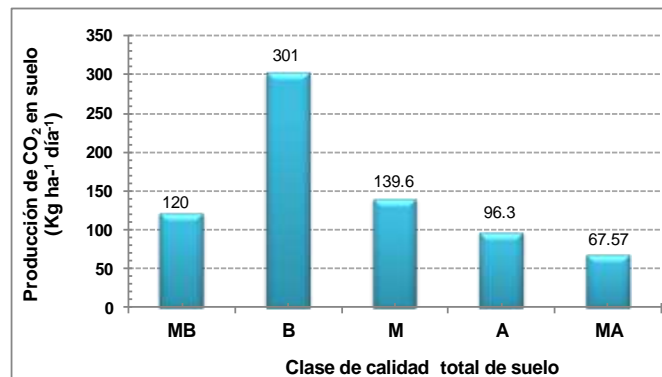
**Cuadro 33.** Comparación de valores extremos de calidad de suelo.

Sitio	Nombre	PBq		PQ				PF			VCST	Clase
		CO <sub>2</sub>	Falc	MOS	pH	Mg	Na	Arena	DR	CE		
		kg ha <sup>-1</sup> día <sup>-1</sup>	µg p-NP g <sup>-1</sup> h <sup>-1</sup>	%	H <sub>2</sub> O 1:2	cmol kg <sup>-1</sup>		%	g cm <sup>-3</sup>	dS m <sup>-1</sup>		
39	La Papa Acatzi	100.00	0.018	0.49	4.97	1.54	0.77	75	2.49	0.075	-10.4	MB
29	Barranca Apapaxco	140.00	0.015	8.45	5.87	1.42	0.66	72	2.16	0.051	-10.2	MB
36	Chalchoapa NE de Tectorre	415.00	0.021	4.90	5.16	0.88	0.46	74	3.60	0.033	-8.2	B
38	La Laguna Xahuehahuatlalco	155.00	0.018	7.35	4.58	1.05	0.68	73	2.45	0.042	-0.3	M
3	F 5	37.75	0.014	4.20	5.35	0.55	2.54	68	2.43	0.045	0.1	M
20	Pasiontitla	72.74	0.017	3.48	6.34	0.51	0.08	66	2.59	0.038	0.2	M
5	O 18	145.01	0.014	3.22	6.79	2.74	1.67	66	2.18	0.095	0.6	M
7	D 3	62.02	0.013	5.36	6.38	0.92	5.01	88	2.07	0.041	7.3	A
9	Coronilla	67.57	0.015	22.78	5.36	0.88	2.07	74	2.05	0.030	11.4	MA
<b>Promedio general (39 sitios)</b>		<b>149.7</b>	<b>0.017</b>	<b>7.51</b>	<b>5.9</b>	<b>1.37</b>	<b>1.28</b>	<b>73.4</b>	<b>2.2</b>	<b>0.06</b>		

PBq= Parámetros bioquímicos del suelo; PQ= Parámetros químicos del suelo; PF= Parámetros físicos del suelo; VCST= Valor de calidad de suelo total; Falc= Fosfatasa alcalina del suelo; Mg y Na= Magnesio y sodio intercambiables del suelo; DR= Densidad real del suelo; CE= Conductividad eléctrica del suelo. Datos ordenados conforme al Valor de Calidad de Suelo.

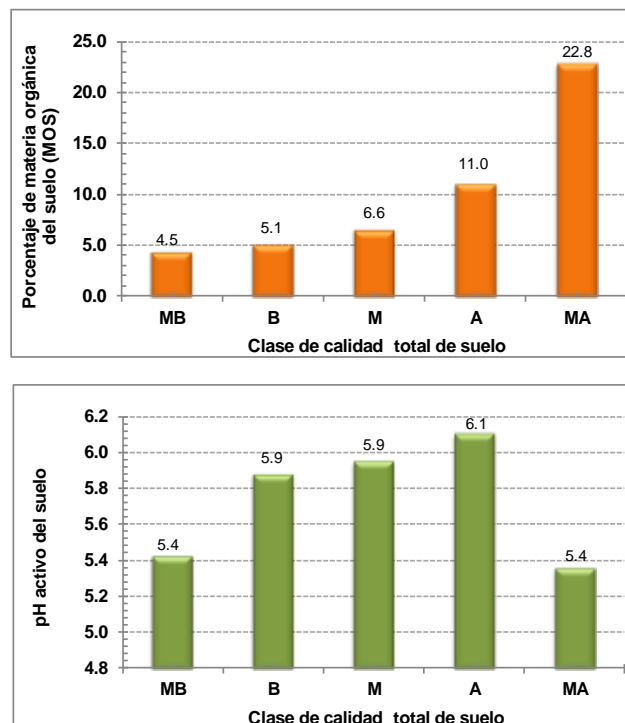
Con el análisis estadístico, se encontró una correlación negativa ( $p \leq 0.05$ ) entre VTCS y producción de CO<sub>2</sub> del suelo ( $r = -0.6$ ). Se confirma que alta liberación de CO<sub>2</sub>

(mayor a  $149 \text{ kg ha}^{-1} \text{ día}^{-1}$ ) disminuye el VTCS, ratificando lo encontrado en el análisis de calidad de suelo por grupo de parámetros (Figura 49).



**Figura 49.** Clases de calidad total de suelo y producción de CO<sub>2</sub> del suelo. MB= Muy baja; B= Baja; M= Media; A= Alta; MA= Muy alta.

El VTCS fue alto cuando el promedio de MOS fue igual o superior a 10 por ciento y el pH activo cercano a 6.0 (Figura 50).



**Figura 50.** Variables robustas y clases de calidad total de suelos.



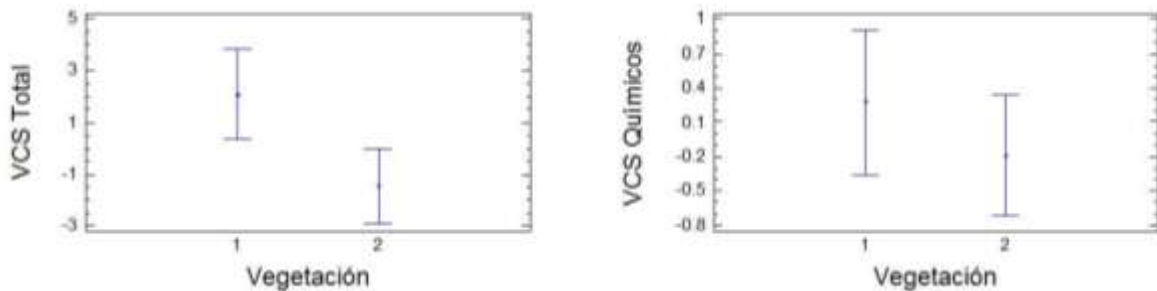
La calidad del suelo fue alta cuando la calidad atribuible a los parámetros bioquímicos y químicos también lo fue (Apéndice 1-Cuadro 8) y ratifica lo observado con correlación positiva encontrada entre VTCS y VCSQ (Cuadro 34).

**Cuadro 34.** Análisis de correlación del valor total de calidad del suelo.

Variable	r	p≤0.05
<b>VCSQ</b>	<b>0.9</b>	<b>&lt;0.0001</b>
VCSBq	0.7	0.005
N-foliar	0.7	<0.0001
Fosfatasa ácida	0.7	<0.0001
Na intercambiable	0.6	<0.0001
CBM	0.6	0.0002
N-total	0.5	0.001
COS	0.5	0.001
MOS	0.5	0.0006
pH activo	0.3	0.03
Número de especies arbóreas	-0.4	0.01
Suma de cationes intercambiables	-0.5	0.0009
<b>Producción de CO<sub>2</sub> del suelo</b>	<b>-0.6</b>	<b>&lt;0.0001</b>
<b>P-foliar</b>	<b>-0.7</b>	<b>&lt;0.0001</b>
K intercambiable	-0.4	0.007
CO <sub>2</sub> /CBM	-0.4	0.007
<b>Ca intercambiable</b>	<b>-0.7</b>	<b>&lt;0.0001</b>

VCS= Valor de Calidad del Suelo; CBM= Carbono en biomasa microbiana; COS= Carbono orgánico del suelo; MOS= Materia orgánica del suelo; CO<sub>2</sub>= Respiración del suelo; CO<sub>2</sub>/CBM= Coeficiente metabólico (proporción de CO<sub>2</sub> con respecto al CBM). Datos ordenados conforme disminuye el coeficiente de correlación.

Al analizar la vegetación, se observó que de siete sitios con suelos de calidad alta (VTCS A), en seis se desarrolla con éxito *A. religiosa* como vegetación dominante. El análisis de varianza ( $p \leq 0.05$ ) también muestra que la calidad de los suelos, atribuida a parámetros químicos del suelo y total es mejor bajo *A. religiosa* que bajo *Pinus* (Figura 51).



**Figura 51.** Análisis de varianza entre tipo de vegetación, valor total de calidad de suelos y valor de calidad de suelo por parámetros químicos. 1= *Abies religiosa*; 2= *Pinus*; VCS= Valor de calidad de suelo.

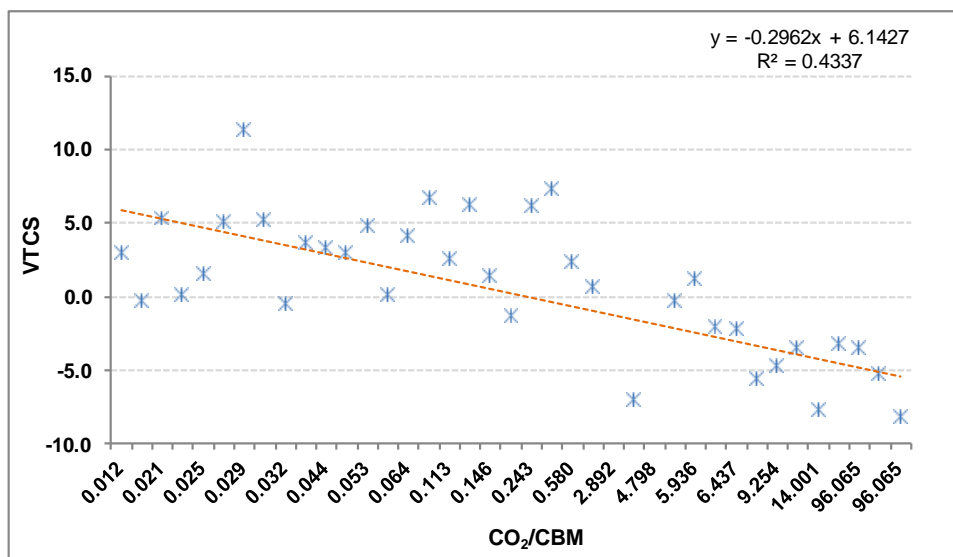
En los suelos bajo bosques de oyamel clasificados con alta calidad se tuvo un cociente CO<sub>2</sub>/CBM bajo.

En el Cuadro 35 se muestra que los suelos con VTCS alto tuvieron mayores contenidos de N-total, COS, CBM, P-disponible, N-foliar y relación CBM/COS que los suelos de calidad baja. La Figura 52 muestra que al aumentar el cociente CO<sub>2</sub>/CBM, disminuye el VTCS.

**Cuadro 35.** Valor de calidad de suelo en bosques de *Pinus* y de *Abies religiosa*.

Sitio	Nombre	Vegetación	N-total	COS	CBM	CO <sub>2</sub>	P-disp	Falc	P-foliar	N-foliar	CBM/COS	CO <sub>2</sub> /CBM	pH	VCST
			Mg ha <sup>-1</sup>					μg p-NP g <sup>-1</sup> h <sup>-1</sup>		%				
33	SE Barranca Tlaquecochoct	<i>Abies religiosa</i> , <i>Pinus</i> sp., <i>Cupressus lusitanica</i> cultivo y pastizal	1.11	27.48	0.04	240	2.00	0.02	0.15	0.73	0.001	6.437	8.3	-5.8
7	D 3	<i>Abies religiosa</i>	1.96	55.96	0.15	82.02	1.12	0.01	0.05	1.41	0.003	0.42	8.4	7.3
39	La Papa Acatzi	<i>Pinus</i> sp.	1.9	5.6	0.03	100	3.2	0.018	0.13	0.6	0.006	2.9	5.0	-10
9	Coronilla	<i>Pinus hartwegii</i>	5.2	237.8	2.4	87.6	4.8	0.015	0.08	1.4	0.010	0.03	5.4	11.4

*N-total*= Nitrógeno total del suelo; *COS*= Carbono orgánico del suelo; *CBM*= Carbono de la biomasa microbiana; *P-disponible*= Fósforo disponible del suelo; *Falc*= Fosfatasa alcalina; *N* y *P-foliar*= Nitrógeno y fósforo en tejido foliar; *CO<sub>2</sub>*= Producción de CO<sub>2</sub> del suelo; *VCST*= Valor total de calidad del suelo.



**Figura 52.** Relación CO<sub>2</sub>/CBM y valor de calidad total de suelo.

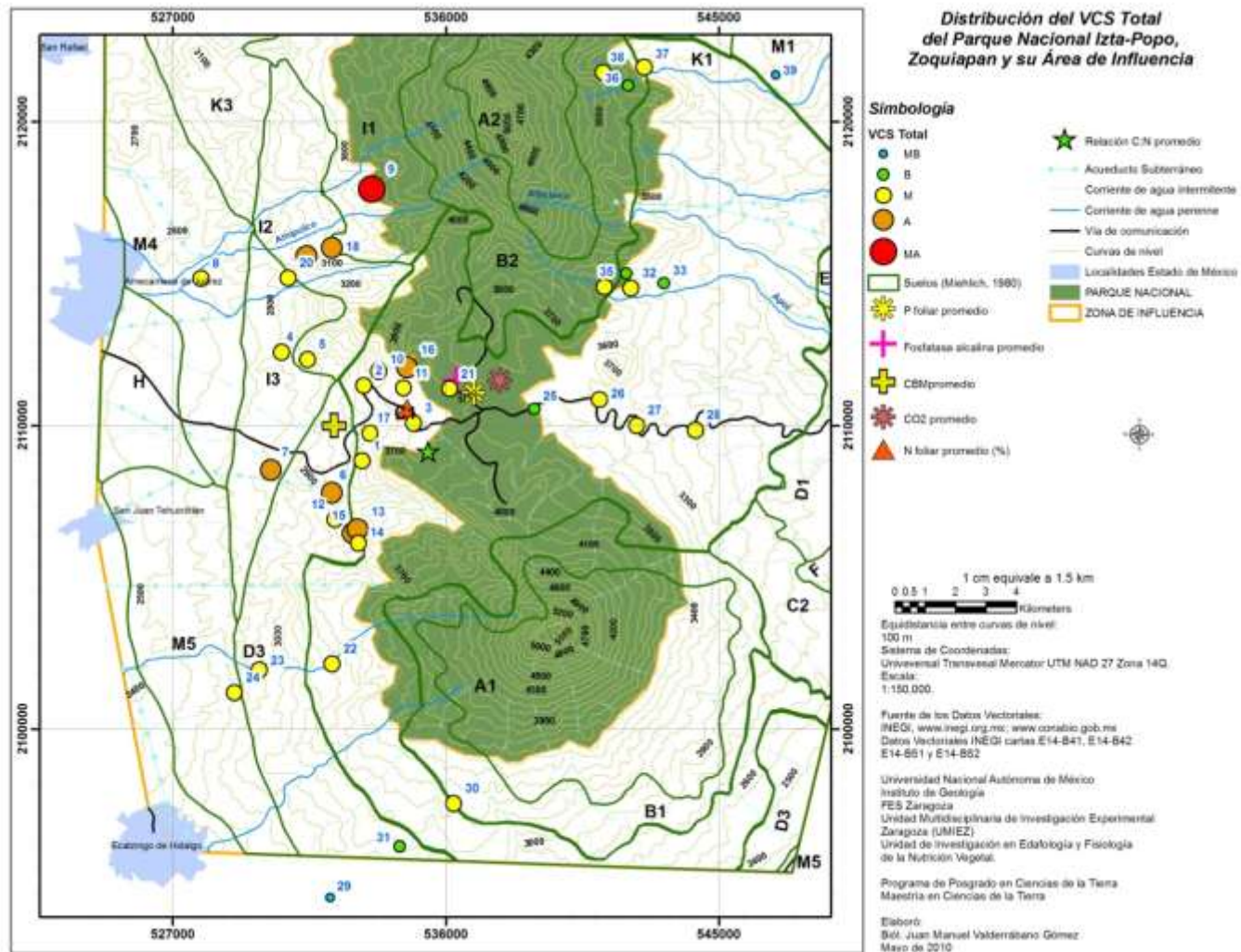
De la distribución espacial del VTCS (Figura 53) se encontró que los suelos con calidad alta fueron más frecuentes en la vertiente occidental del PN IztaPopo, y estuvieron concentrados principalmente hacia el NW del volcán Popocatepetl. Los suelos agrupados

como calidad baja fueron más frecuentes en la vertiente este de la Sierra Nevada y los de calidad media, presentaron distribución dispersa.

### **2.6.1. Calidad total de suelo y su relación con la productividad forestal y contenidos de N y P en tejido foliar**

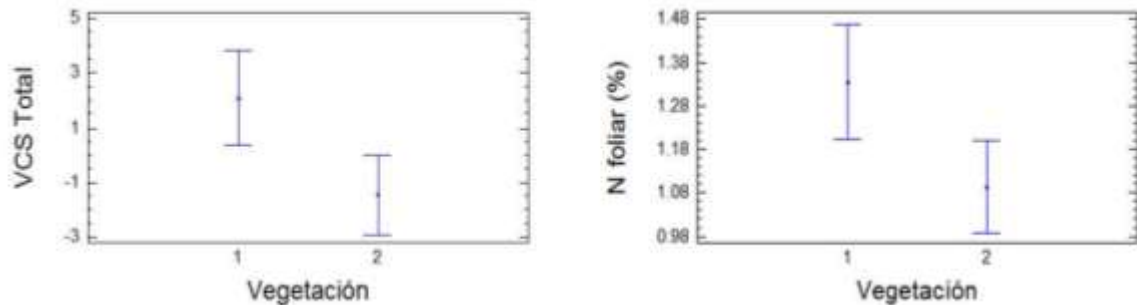
Por su relevancia como nutrimentos, se consideró importante conocer la relación entre el VTCS con la productividad forestal (volumen maderable) y los porcentajes de N y P en tejido foliar.

Se encontró que el N-foliar tuvo una media de 1.18% y valores extremos de 0.57 y 1.84%. El P-foliar estuvo de 0.045 a 0.18%, con promedio de 0.10 (Apéndice 1-Cuadro 6). Ambos porcentajes de N y P fueron más bajos que los reportados por Valderrábano-Gómez (2005) en el PN Zoquiapan y Anexas, cuyos porcentajes fueron mayores (Apéndice 1-Cuadros 9 al 11).



**Figura 53.** Distribución espacial del valor total de calidad de suelo (VCS). El círculo rojo grande indica sitios con el valor más alto, anaranjado sitios con valor alto, amarillo valor medio, verde valor bajo y azul sitios con valor muy bajo.

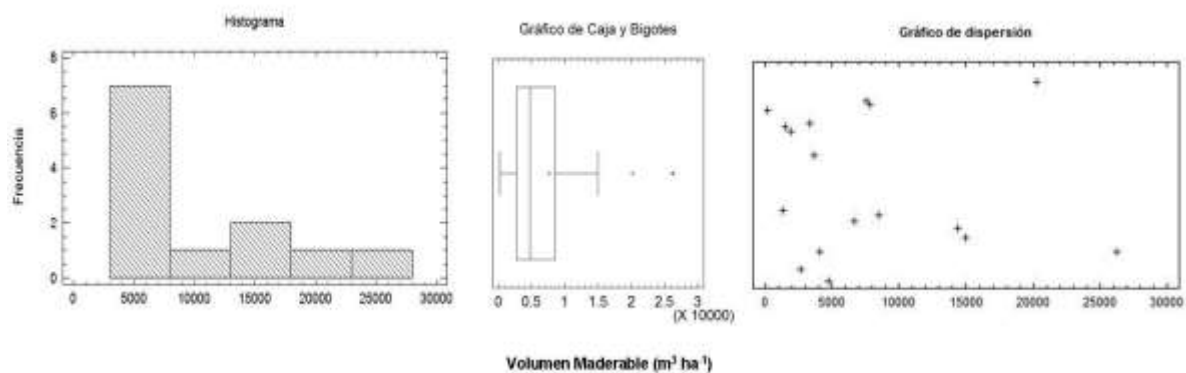
El porcentaje de N-foliar en individuos de *A. religiosa* fue mayor que en las acículas de los del género *Pinus* con diferencia significativa  $p \leq 0.05$  (Figura 53).



**Figura 53.** Análisis de varianza entre *Pinus* y *A. religiosa* con valor de calidad de suelos total y N-foliar de la zona IztaPopo. 1= *Abies religiosa*; 2= *Pinus*; VCS= Valor de calidad de suelo.

Respecto a los porcentajes de P-foliar, se encontró que cuando hubo *P. hartwegii* como vegetación dominante y porcentajes de P-foliar mayor a 0.10, la probabilidad de tener suelos con calidad baja y muy baja aumentó.

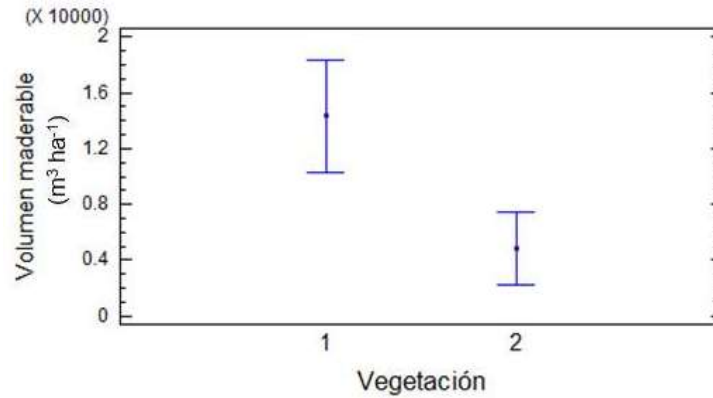
De la productividad forestal, el intervalo de volumen maderable encontrado estuvo entre  $202 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$  y  $26,219 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ , con promedio de  $7,643 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$  (Figura 55). El volumen maderable total fue igual a  $129,931 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ , de los cuales,  $53,705 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$  se obtuvieron en bosques con *A. religiosa* como vegetación dominante (Cuadro 36).



**Figura 55.** Volumen maderable en la zona IztaPopo. Como puede apreciarse en los tres gráficos, el valor de la productividad forestal se concentró en valores de entre 2,000 y 10,000  $\text{m}^3 \text{ ha}^{-1}$ .

La productividad más baja se encontró en bosques de *P. hartwegii* y en ellos su calidad de suelo fue baja. La productividad más alta se encontró en bosques de *A. religiosa* sobre suelos con calidad media. El análisis de varianza demostró diferencias

significativas ( $p \leq 0.05$ ) de volumen maderable entre sitios con bosques de *A. religiosa* respecto de los bosques de *Pinus* (Figura 56, Cuadro 36).



**Figura 56.** Análisis de varianza de volumen maderable entre *Abies religiosa* y *Pinus* spp. de la zona IztaPopo. 1= *Abies religiosa*; 2= *Pinus*.

**Cuadro 36.** Productividad forestal en el PN IztaPopo.

Sitio	Nombre	Altitud _m snm_	VM _m³ ha⁻¹_	VCST	VCST _Clase_	Vegetación
6	D 11	2965	6684.5	6.15	A	<i>Abies religiosa</i> , <i>Pinus</i> sp., <i>Cupressus lusitanica</i>
16	F 11	3550	1386.7	5.15	A	<i>P. hartwegii</i> , <i>A. religiosa</i>
33	SE Barranca Tlalquecotchcotl	3281	4099.6	-5.61	B	<i>Abies religiosa</i> , <i>Pinus</i> sp., <i>Cupressus lusitanica</i> cultivo y pastizal
36	Chalchoapa NE de Tectorre	3696	202.7	-8.24	B	<i>P. hartwegii</i>
25	Pela Gallina	3615	1486.8	-5.30	B	<i>P. hartwegii</i>
34	S Barranca Tlalquecotchcotl 2	3667	4744.3	-7.69	B	<i>Pinus hartwegii</i>
22	O 16	3225	26218.8	-1.32	M	<i>Abies religiosa</i>
5	O 18	2932	20297.6	0.6	M	<i>Abies religiosa</i>
32	S Barranca Tlalquecotchcotl 1	3425	14404.6	-2.23	M	<i>Abies religiosa</i> , <i>Pinus hartwegii</i>
35	SW Barranca Tlalquecotchcotl	3540	2662.1	-3.47	M	<i>P. hartwegii</i> , <i>A. religiosa</i>
27	Agua Escondida	3333	1929.2	-3.45	M	<i>P. spp.</i>
3	F 5	3522	8463.7	0.14	M	<i>Pinus hartwegii</i>
28	La Ventana	3127	3645.5	-4.79	M	<i>Pinus</i> sp.
26	La Venta	3418	7791.5	1.22	M	<i>Pinus</i> spp.
38	La Laguna Xahuehahuatlco	3828	14960.1	-0.26	M	<i>Pinus</i> spp.
37	Tlalcomajada E de Tectorre	3512	7593.2	-3.28	M	<i>Pinus</i> spp., <i>Abies religiosa</i>
29	Barranca Apapaxco	2834	3360.5	-10.18	MB	<i>Pinus</i> spp., <i>Abies religiosa</i> , <i>Quercus</i> sp., <i>Aile</i> , <i>Cupressus lusitanica</i> , <i>Cornus</i> sp.
<b>Total</b>			<b>129931.4</b>			

VCS= Valor de calidad del suelo; T= Total; VM= Volumen maderable; DE= Desviación estándar. Datos ordenados conforme al VCST.

Con los datos del Cuadro 36 se pudo observar una alta variabilidad entre el VTCS y el volumen de madera; sin embargo, este último presentó correlación significativa ( $r=0.5$ ,  $p\leq 0.05$ ) con conductividad eléctrica (Apéndice 3c). Además, se observó que ocho sitios con volumen maderable mayor de  $5000 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$  tuvieron calidad alta de suelo.

Con los datos del Cuadros 37 y los de los Cuadros 12 y 13 del Apéndice 1, se encontró, tanto en bosques de *Pinus* como en los de *Abies religiosa*, que al disminuir la producción de  $\text{CO}_2$  del suelo y en consecuencia la relación  $\text{CO}_2/\text{CBM}$ , los sitios tuvieron mayor volumen de madera y coincidieron con suelos agrupados en VTCS medio (M), según se observa en la Figura 57.

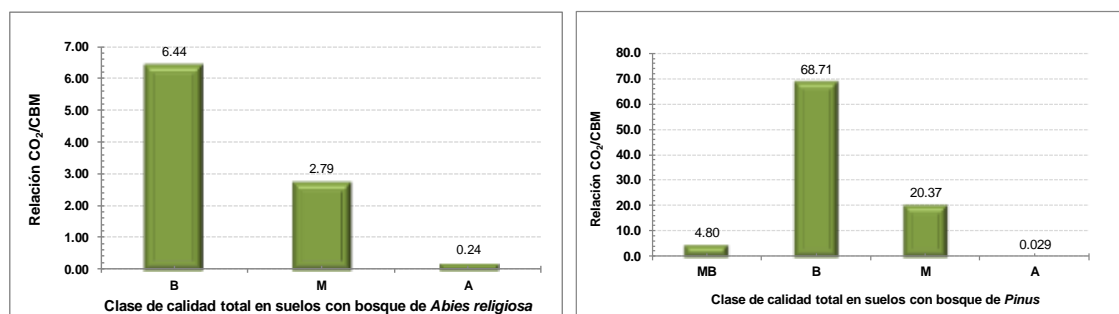


Figura 57. Relación entre  $\text{CO}_2/\text{CBM}$  con el valor total de calidad de suelos y el volumen maderable en suelos bajo *Abies religiosa* y *Pinus*.

Cuadro 37. Productividad forestal máxima y mínima en suelos con *Abies religiosa* y *Pinus*.

Sitio	Nombre	Vegetación	VM	CO <sub>2</sub>	CBM	COS	N-total	Falc	CBM/COS	CO <sub>2</sub> /CBM	VCST	Clase
			$\text{m}^3 \text{ ha}^{-1}$	$\text{Mg ha}^{-1}$	$\text{Mg ha}^{-1}$	$\text{Mg ha}^{-1}$	$\mu\text{g p-NP g}^{-1} \text{ h}^{-1}$					
33	SE Barranca Tlatquecochcotl	<i>Abies religiosa</i> , <i>Pinus</i> sp., <i>Cupressus lusitanica</i> cultivo y pastizal	4099.6	240	0.037	27.5	1.108	0.022	0.0014	6.437	-5.610	B
22	O 18	<i>Abies religiosa</i>	26218.6	185.5	0.860	78.1	1.259	0.012	0.0110	0.216	-1.321	M
36	Chalchoapa NE de Tetorre	<i>Pinus hartwegii</i>	202.7	415.0	0.004	56.3	0.970	0.021	0.0001	96.06	-8.24	B
36	La Laguna Xahuehualtalcó	<i>Pinus hartwegii</i>	14960.1	155	0.028	84.4	2.772	0.018	0.0003	5.570	-0.27	M

VM= volumen maderable; N-total= Nitrógeno total del suelo; COS= Carbono orgánico del suelo; CBM= Carbono de la biomasa microbiana; Falc= Fosfatasa alcalina; CO<sub>2</sub>= Producción de CO<sub>2</sub> del suelo; VCST= Valor de calidad del suelo total.

Bosques de *A. religiosa* con mayor volumen de madera tuvieron más contenido de COS, N-total y CBM, no así en sitios con *Pinus* con mayor productividad, donde el COS fue más bajo. En general, los bosques de *Pinus* con mayor producción de madera se distribuyeron principalmente al este de la Sierra Nevada y los de *A. religiosa* al oeste.

Del ACP y del modelo aditivo propuesto, se encontró que las propiedades bioquímicas y químicas tienen mayor influencia en la productividad forestal y la calidad de los suelos. Entre las variables más favorables, el carbono en biomasa microbiana resultó ser un buen indicador, dado que un contenido alto incide en un mayor volumen de madera.

El Cuadro 38 presenta las VR y sus valores experimentales junto con los coeficientes de correlación establecidos con el VTCS. En este Cuadro, se ven los intervalos en los que se cumplen las tendencias observadas, fuera de éstos, es necesario un diseño experimental diferente para conocer su comportamiento.

**Cuadro 38.** Intervalos de valores experimentales de las variables robustas, productividad forestal y valor de calidad de suelo total.

Propiedad del suelo	Variable Robusta	Valor			Correlación	
		min	medio	max	VTCS	VM m <sup>3</sup>
Bioquímicas	CO <sub>2</sub> (kg ha <sup>-1</sup> día <sup>-1</sup> )	37.7	149.7	415	-0.6**	-0.4
	Fosfatasa alcalina (µg p-NPP g <sup>-1</sup> h <sup>-1</sup> )	0.01	0.017	0.053	-0.2*	0.1
Químicas	MOS (%)	0.49	7.5	22.8	0.5*	-0.1
	pH activo	4.6	5.9	6.8	0.3*	0.3
	Mg intercambiable (cmol kg <sup>-1</sup> )	0.2	1.4	3.9	0.2	0.3
	Na intercambiable (cmol kg <sup>-1</sup> )	0.08	1.3	5.01	0.6**	0.1
Físicas	Arena (%)	2	6.5	16	-0.02	0.1
	Densidad Real (g cm <sup>-3</sup> )	1.4	2.2	3.6	-0.02	-0.2
	Conductividad eléctrica (dS m <sup>-1</sup> )	0.025	0.056	0.12	0.2	0.5*

min= mínimo; max= máximo; VTCS= Valor total de calidad del suelo; VM= Volumen maderable; \*=significativo (p≤0.05); \*\*= altamente significativo (p≤0.0001). Datos ordenados conforme al volumen maderable.



## 2.7 Análisis y discusión de resultados

De la descripción de las especies de *Pinus* observadas en el desarrollo de esta investigación, se encontró que los resultados concuerdan con lo citado por Farjon *et al.*, (1997) quienes reportaron a *P. montezumae* en altitudes de 2000 a 3500 m snm, a *P. pseudostrobus* desde 1900 a 3200 m, *P. hartwegii* de 2500 a 4300 m y *P. patula* de 1800 a 3300 m snm. En una investigación en diferentes áreas naturales protegidas Cruz-Flores y Etchevers-Barra (2011), reportaron para el Parque Nacional Izta-Popo y Zoquiapan varias de las especies encontradas en este estudio. La mayor presencia y dominancia de este género, en comparación con el de *Abies*, puede atribuirse a que las especies de *Pinus* prefieren suelos arenosos y sueltos con menor contenido de humedad y de carbono orgánico (Cruz-Flores y Etchevers-Barra, 2011) y se regenera con relativa rapidez tras las perturbaciones naturales y antropogénicas y algunas de sus especies como *Pinus patula* pueden considerarse resistentes a perturbaciones por influencia humana (Challenger, 1998, Rzedowski, 2006). Un grupo de suelo que domina en la Zona junto a los andosoles, derivados de ceniza volcánica, son los cambisoles, característicos de clima templado o tropical, en terrenos montañosos, regularmente bajo bosques de *Pinus*, *Pinus-Abies* y *Pinus-Quercus*. Con frecuencia presentan pérdida de bases que migran al subsuelo e inicia el desarrollo de un horizonte B (B cámbico) con aumento en la proporción de arcillas. En comparación a los Andosoles, los cambisoles son de color oscuro, densidad aparente menor de  $0.85 \text{ g cm}^{-3}$  con una alta capacidad de almacenamiento de humedad (Duchaufour, 1984; Sommer y Cram, 1998; WRB, 2006).

La distribución de los bosques de *A. religiosa* coinciden con los reportes de Sánchez-Velázquez y Pineda-López (1991) y Rzedowski (2006), quienes indicaron que éstos se distribuyen de 2400 a 3600 m snm, en zonas con precipitación media anual superior a 1000 mm anuales y no haya más de cuatro meses con sequía (Valenzuela *et al.*, 2004). La mayor extensión de los bosques de *A. religiosa* está en la Faja Volcánica Transmexicana, en terrenos con pendientes fuertes, protegidos del viento y de una intensa radiación solar. Se desarrollan sobre sustrato geológico a base de andesitas y basaltos principalmente; además de encontrarse sobre suelos profundos, bien drenados pero con buen contenido de humedad todo el año cuya duración de humedad en el suelo oscila entre 10 meses (INEGI, 2009b) y según Miehllich (1980) se encuentran Andosoles vítricos y húmicos. Los bosques de oyamel mejor conservados en la zona IztaPopo se

encontraron dentro de cañadas con difícil acceso, donde existió una mejor estructura de la vegetación, generalmente con bosques maduros con árboles de hasta 50 m de altura y una humedad que favorece el establecimiento de musgos, hongos y helechos.

El menor contenido de COS en suelos bajo bosques de *Pinus* sp. y mayor bajo la asociación *Abies religiosa*-*Alnus* sp., se atribuye al establecimiento de individuos del género *Alnus* (árbol de hoja ancha) que asociado con organismos fijadores de nitrógeno contribuye a fijar este elemento esencial, lo cual explica el alto contenido de N-total en suelos donde se establece esta especie, que con frecuencia es uno de los primeros colonizadores después de disturbios. También Cruz-Flores y Etchevers-Barra (2011), reportaron la presencia de *Abies religiosa* en suelos de cañadas húmedas y con mayores contenidos de C y N, elementos íntimamente relacionados. Estas características coinciden con lo observado en sitios con un dosel abierto con individuos juveniles de *Abies religiosa* y algunos maduros de *Alnus* que puede aportar anualmente cantidades significativas de N; así, estos sitios mantienen una capacidad de resiliencia, porque los árboles de hoja ancha aportan al suelo materia orgánica con enlaces sencillos entre carbonos más digeribles para los organismos del suelo (Sánchez-González *et al.*, 2005; Rzedowski, 2006). Esta es una razón por la que esos sitios tuvieron un VTCS alto. Estos resultados son similares a los reportados por Gutiérrez-Guzmán *et al.*, (2005), quienes encontraron, bajo condiciones de invernadero, que la influencia de la especie *Alnus firmiflora* fue positiva en el establecimiento de plántulas de *Pinus patula*. Por su parte, Lara-González *et al.*, (2009) encontraron que la especie *Abies religiosa* tuvo una mayor regeneración en bosques donde se presentaron claros, lo que permitió una mayor densidad de plántulas en comparación con zonas donde se establece también sotobosque.

Al considerar las condiciones del suelo, se encontró que respecto a la correlación positiva entre contenido de COS con altitud sobre el nivel del mar y la precipitación, pero negativa con la temperatura media anual, los resultados de esta investigación coincidieron con lo encontrado por Sánchez *et al.*, (2005), quienes reportaron que a mayor altitud la temperatura, disponibilidad de oxígeno y reacciones bioquímicas disminuyen, incidiendo directa y negativamente sobre la actividad y diversidad de organismos que mineralizan el C de la materia orgánica. Se ha demostrado que un ciclo sencillo de congelamiento-descongelamiento del suelo puede abatir aproximadamente 50% de la biomasa microbiana (Kurganova *et al.*, 2007). Respecto a la precipitación, en aquellos sitios de

mayor altitud y más alta precipitación, el agua ocupa mayor proporción de los poros del suelo, se desplaza al aire de éstos y puede acidificarse el suelo por reacción entre CO<sub>2</sub> y H<sub>2</sub>O, ocasionando una lenta mineralización del COS. Otro factor de acidificación del suelo de debe a la presencia de *P. hartwegii*, dominante por arriba de 3500 msnm y que se sabe que su follaje acidifica el suelo al incorporarse a éste.

Lo descrito es congruente con la tendencia positiva encontrada entre producción de CO<sub>2</sub> del suelo y altitud que se estudio hasta 3700 m snm. En lugares más altos, donde aumenta el número de días con heladas, la disminución de la producción de CO<sub>2</sub> del suelo se atribuye a las condiciones ambientales adversas que reducen la actividad microbiana y sus reacciones bioquímicas. Según Kurganova *et al.*, (2007), a temperaturas inferiores a 10 °C, la producción de CO<sub>2</sub> del suelo disminuye, pero la aceleración de sus emisiones son causadas por procesos de liberación de nutrientes sobre el suelo congelado, actividad biológica que ocurre en películas de agua descongelada y de la respiración de microflora adaptada al frío que mantienen una baja producción de CO<sub>2</sub> del suelo. Estos mismos autores, señalaron que en suelos forestales la aceleración de la producción de CO<sub>2</sub> del suelo se debe principalmente a hongos y liberación de C en la materia orgánica congelada. En otra investigación, Wei *et al.*, (2010) encontraron que la respiración del suelo forestal se incrementa linealmente con la temperatura y que un promedio de precipitación mayor de 813 mm anuales disminuye la respiración del suelo.

El contenido promedio de CO<sub>2</sub> producido por el suelo (149.7 kg ha<sup>-1</sup> día<sup>-1</sup>) en el PN IztaPopo se encontró 10 veces mayor del reportado por Killham (1994), quien indicó un contenido de 15.1 kg ha<sup>-1</sup> día<sup>-1</sup> en bosques templados, por lo que varios sitios del PN IztaPopo con producción de CO<sub>2</sub> mayor al promedio encontrado en la presente investigación, pueden considerarse como emisores de C y puede plantearse la hipótesis de que los menores a ese promedio son sumideros de C, prestando así un importante servicio ambiental en cuanto a captura de carbono. Sin embargo, para comprobar esta hipótesis, es necesario calcular un balance de C.

La relación inversa entre evolución de CO<sub>2</sub> del suelo y carbono de la biomasa microbiana se considera como una medida de la actividad microbiana del suelo que puede expresar la velocidad de mineralización de la materia orgánica (Tremont y Cuevas, 2004; Janvier *et al.*, 2007).

La correlación positiva entre producción de CO<sub>2</sub> y porcentaje de P-foliar de las especies de *Pinus* y de *A. religiosa*, puede explicarse por una mayor mineralización de materia orgánica para liberar P que es absorbido por las plantas. Esto tiene relación con la correlación positiva entre P-foliar y actividad de la fosfatasa alcalina ( $r= 0.4$ ). Se sabe que la actividad de las enzimas del suelo es mayor cuando falta algún nutriente que es demandado por la biota edáfica, lo que genera condiciones de estrés. Si se atiende lo ya mencionado entre la reacción de CO<sub>2</sub> y H<sub>2</sub>O en sitios con mayor humedad, se espera entonces un ambiente estresante al acidificarse el medio y fijarse el P (Doran y Parkin, 1994; Verchot y Borelli, 2005; Kurganova *et al.*, 2007). En condiciones de campo la enzima debe operar cerca de las raíces de las plantas, porque en razón de una mayor liberación hidrolítica de fosfatos a partir del P-orgánico, existe una mayor concentración de P-foliar en las especies arbóreas, disminuyendo en la solución del suelo (Marschner, 1995; Cruz-Flores, 2006), lo cual puede explicar la correlación entre CO<sub>2</sub> del suelo y P-disponible ( $r= -0.5$ ), observando que en sitios con VCSBq alto, la producción de CO<sub>2</sub> del suelo y la actividad de la enzima fosfatasa alcalina fue baja.

La tendencia negativa entre producción de CO<sub>2</sub> del suelo y pH activo ( $r= -0.3$ ) se relaciona con la otra vía de solubilización del fósforo en el suelo, que es nuevamente a través de la reacción entre CO<sub>2</sub> y H<sub>2</sub>O que forma H<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>, la cual acidifica ligeramente el suelo y solubiliza el P-inorgánico. Esta relación entre CO<sub>2</sub> y pH activo también explica la correlación positiva entre producción de CO<sub>2</sub> del suelo con la suma de bases intercambiables y particularmente entre CO<sub>2</sub> del suelo con Ca y K intercambiables, dado que conforme aumenta la concentración de bases intercambiables en la solución del suelo, el pH aumenta (Pritchett, 1991; Davet, 2004). Puede suponerse que, el Ca y K se combinan con el ión CO<sub>3</sub><sup>-</sup> para formar sales que amortiguan el pH del suelo y que también podrían ser lavadas con el agua de lluvia. Se observó una correlación significativa entre CO<sub>2</sub> del suelo y precipitación media anual ( $r= 0.4$ ), que da elementos para proponer a la producción de CO<sub>2</sub> del suelo como un indicador de su calidad, dando respaldo a los resultados del análisis de componentes principales que consideró a la producción de CO<sub>2</sub> del suelo, junto con la fosfatasa alcalina como variables robustas. Johansson *et al.*, (2009) encontraron que una exposición elevada a CO<sub>2</sub> provoca que las ectomicorrizas incrementen el exudado de ácidos orgánicos de bajo peso molecular (oxalato, citrato y acetato), así como de aminoácidos, monosacáridos y carbono orgánico disueltos. El incremento en la excreción de ácidos orgánicos acidifica el suelo, y explica porque los

sitios con clase media a baja de VTCS y pH activo menor de 5.9 tuvieron producción alta de CO<sub>2</sub>.

Los valores de N-total encontrados en los suelos concuerdan con los indicados por Pritchett (1991), quien señala que el N-total encontrado principalmente en las capas de humus del horizonte A<sub>1</sub> y que proviene de las raíces en descomposición y de los restos de microorganismos, va de 2 a 10 Mg ha<sup>-1</sup> de N en la superficie de los suelos forestales, pero puede variar entre 1 a 30 Mg ha<sup>-1</sup> en suelos arenosos y otros de bosque boreal con acumulación de humus. Killham (1994), reportó cantidades hasta de 20 Mg ha<sup>-1</sup> de N-total en suelos de bosques de coníferas. Dada su importancia como nutrimento esencial para la biota, a pesar de que el ACP no lo encontró como variable robusta, es necesario considerarlo como un indicador de la calidad del suelo, ya que en el grupo de sitios con VTCS alto, el contenido de N-total en suelos y tejido foliar también fue alto.

Respecto de la relación C:N promedio encontrada en el PN IztaPopo y que fue igual a 27, se conoce que está relacionada con la tasa de descomposición de la materia orgánica y su calidad. En suelos forestales la mineralización es lenta por la acidez y solo en relaciones menores de 20:1, el N queda disponible en corto plazo. Como tales relaciones son poco comunes en suelos forestales ácidos, los compuestos orgánicos y el amonio pueden ser la fuente principal de N disponible para la biota. La tasa de mineralización en suelos ácidos es baja en bosques no perturbados y una alteración del suelo aumenta la descomposición de la materia orgánica y la liberación de N (Pritchett, 1991; Tate III, 1995). Con base en ello, la relación C:N menor de 20:1 encontrada en 36% de la superficie total estudiada (Apéndice 1-Cuadro 1) coincide con los suelos con VTCS de medio a muy bajo. La calidad media y baja del suelo está relacionada con la cantidad de C en mantillo y suelo, humedad y pH del suelo, los cuales son factores que influyen sobre el aporte de nutrimentos, población microbiana del suelo, crecimiento de árboles y la misma relación C:N (Kennedy y Pitman, 2004). Las especies de hojas anchas tienen mayor cantidad de N, P, K, Ca y Mg con una tasa de retorno de nutrimentos más rápida que las coníferas. Pritchett (1991) señala que en el Abeto Douglas los suelos presentan la tasa de retorno de N más baja, porque se absorben del suelo 39 kg ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup> y regresan al suelo 15 kg ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup>; los *Pinus* toman 40.3 kg ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup> y regresan 31.3 kg ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup> mientras el Roble rojo europeo absorbe 123 kg ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup> pero retorna 79 kg ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup>.

Respecto al bajo contenido de P-disponible encontrado en suelos que Mielich (1980) reportó como Andosoles vítricos se atribuye a la naturaleza de estos suelos, que según WRB (2006), tienen una retención de fosfatos del 25% o más. El mayor contenido de P-disponible encontrado en bosques con *Alnus* y *Abies religiosa*, comparado con la baja cantidad en suelos bajo bosques de *Pinus*, puede atribuirse a la mayor acidez de los suelos encontrada bajo este género (Apéndice 1, Cuadro 5). Lo anterior se confirma con lo reportado por Buckman y Brady (1991) y Wisawapipat, *et al.*, (2009), quienes han mencionado que la solubilización del P en el suelo está en función del pH, Ca asimilable, materia orgánica, actividad microbiana, mineralogía y contenido de Fe, Al y Mn y su aprovechamiento está determinado por su forma iónica; a pH muy ácido se encuentra solamente  $\text{H}_2\text{PO}_4^{1-}$  y si el pH aumenta predomina primero  $\text{HPO}_4^{2-}$  y finalmente  $\text{PO}_4^{3-}$ . En general, a pH 6.0 se muestran conjuntamente los dos primeros, pero  $\text{H}_2\text{PO}_4^-$  es más aprovechable para las plantas (Cruz-Flores, 2006). En este sentido, el pH activo del suelo encontrado en la zona IztaPopo estuvo entre 4.6 y 6.8 con promedio de 5.9 y, según la NOM-021-SEMARNAT-2000, se clasifican de fuertemente ácidos a neutros, y en general el valor de pH promedio clasifica a los suelos como moderadamente ácidos. Así, a pH ácido el P es fijado por minerales de bajo orden estructural (alófano y ferrihidrita).

Buckman y Brady (1991) indican que el pH del suelo cuando está cercano a la neutralidad influye favorablemente en la disponibilidad de nutrientes para la biota edáfica, y como está íntimamente relacionado con la conductividad eléctrica (CE), esto puede explicar la relación positiva encontrada entre CE con el VTCS. Según la escala propuesta por la *United States Salinity Laboratory* de Riverside (Doering *et al.*, 1964), los suelos de la zona IztaPopo con valores de CE en el intervalo de  $>0$  a  $2 \text{ dS m}^{-1}$  (suelos normales), tienen efectos despreciables de salinidad, esperada por la naturaleza de los suelos de la zona.

De la relación negativa encontrada entre el VTCS y la suma de cationes intercambiables, ésta puede atribuirse a la textura de los suelos estudiados, puesto que éstos tuvieron mayor porcentaje de arena; que a diferencia de las arcillas, retienen en menor proporción a los cationes, que finalmente son lixiviados (Cuadro 31).

A pesar de que Na y Mg intercambiables están relacionados con la salinidad de los suelos, la naturaleza acidificante, tanto de las hojas de las coníferas, como la de los suelos amortiguan su potencial salino. La humedad atmosférica capturada en los suelos

hacen que ésta reaccione con el CO<sub>2</sub> del ambiente edáfico para formar carbonatos que producen sales solubles que se lavan o son tomadas por la biota, por lo que el resultado de la salinidad tiene un efecto despreciable en estos suelos.

El menor contenido de K, Ca, y Mg intercambiables en suelos bajo *Abies religiosa* se atribuye; por un lado, a la formación de estas sales solubles que son lixiviadas mayormente en los suelos más húmedos bajo *A. religiosa* que en los suelos bajo *Pinus* (Rzedowski, 1978) y por otro a que el K, Ca y Mg tienen mayor demanda por la biota que el Na (catión menos activo en forma intercambiable). Al respecto, es bien conocido el antagonismo entre Na y K y explica la correlación inversa entre estos dos cationes encontrada en esta investigación. Según Salisbury y Ross (2000), el K es el ión más abundante en el citoplasma, por lo que tiene una mayor contribución al potencial osmótico de las células, cumpliendo una función fundamental en la estabilización del pH en la célula. Este elemento activa más de 60 enzimas en el tejido meristemático, aumenta la resistencia de las plantas a plagas y enfermedades y hace que el hierro sea más móvil en la planta. El Ca, que es el catión más activo de forma intercambiable y el de mayor pérdida por lixiviación (Buckman y Brady, 1991), se encuentra como pectato de calcio en las paredes celulares, es necesario para formar enzimas como amilasa y algunas nucleasas, además de regular el pH celular, fomentar una estabilidad estructural y proporcionar material básico para neutralizar ácidos orgánicos. El Mg es esencial en la molécula de clorofila, encontrándose en mayor concentración en los cloroplastos, activa enzimas en el metabolismo de carbohidratos y síntesis de ácidos nucleicos, ayuda a la absorción del P participando en la formación de ésteres de ácido fosfórico de complejos orgánicos, y es ingerido en menores cantidades que el K y Ca. Finalmente, del Na no considerado como un elemento esencial, solo se ha demostrado una función esencial en plantas con fotosíntesis tipo C-4, que se relaciona con el transporte del piruvato (Marschner, 1995, Salisbury y Ross, 2000), por ello, la correlación negativa encontrada entre Na intercambiable del suelo con la altitud indica que este elemento tiene mayor concentración donde la humedad disminuye y evita que sea lixiviado o en lugares cercanos a donde la actividad agrícola ha ganado terreno al suelo forestal. Así, el aumento de Ca y K cuando *A. religiosa* y las especies de *Pinus* se asocian con árboles de hoja ancha, nuevamente se debe a que estos árboles aportan materia orgánica al suelo a una tasa más rápida y con mayor concentración de bases intercambiables que en los bosques de coníferas (Pritchett, 1991; Wisawapipat *et al.*, 2009).

En cuanto a los indicadores metabólicos (CBM/COS y  $\text{CO}_2/\text{CBM}$ ), éstos son parámetros que muestran eficiencia de la mineralización del sustrato orgánico e indican la calidad y salud del suelo mediante la relación de la actividad microbiana produciendo  $\text{CO}_2$  y la cantidad de biomasa microbiana por unidad de tiempo (Acuña *et al.*, 2006). Los suelos con relación de  $\text{CO}_2/\text{CBM}$  alta muestran un medio edáfico inmaduro o estresado, donde la materia orgánica puede acumularse bajo condiciones limitantes para el desarrollo de biomasa microbiana donde ésta destinará menos energía a procesos de biosíntesis, gastando una porción importante en el mantenimiento de sus células que finalmente se perderá como  $\text{CO}_2$  (Zagal y Córdova, 2005). Kurganova *et al.*, (2007) demostraron que la producción de  $\text{CO}_2$  en suelo cultivado seco es mayor que en suelo húmedo. Así mismo, señalaron que en suelos forestales la actividad respiratoria aumenta cuando la temperatura disminuye. Al respecto, los coeficientes metabólicos con los valores más bajos correspondieron con los sitios donde el VTCS y el volumen maderable fueron altos.

En sitios de mayor altitud o alterados y donde la actividad metabólica no es adecuada, el C proveniente de la mineralización de la materia orgánica no es aprovechado por los microorganismos como aporte de energía, por lo que no pueden abastecer a las plantas de nutrimentos para que éstas sinteticen apropiadamente los carbohidratos que incrementan su biomasa; lo cual concuerda con la tendencia observada entre volumen maderable y relación CBM/COS, que demuestran que a mayor cantidad de C en la biomasa microbiana (fracción lábil de C en el suelo) la productividad forestal es mayor.

La textura de un suelo forestal tiene un efecto indirecto en la productividad y ésta aumenta con la proporción de arcillas y limo, por lo que los suelos francos y arcillosos por lo común sostienen árboles con alta demanda de humedad y nutrientes como los tsugas, abetos, arces de azúcar y tilos en climas húmedos y fríos. Así, se conoce que en cualquier entorno, el contenido de COS aumenta a medida que la textura del suelo se vuelve más fina, protegiéndolo de una alta mineralización biológica y formando macro y microagregados (Gami *et al.*, 2009).

Referente a la densidad aparente de los suelos en el PN IztaPopo, ésta se encontró dentro de lo referido por Pritchett (1991) y la NOM-021-SEMARNAT-2000. El primero señala que en suelos forestales la densidad aparente varía de 0.2 a 0.9  $\text{g cm}^{-3}$  y el



segundo que va de 1.2 a 1.32 g cm<sup>-3</sup>. Así, los suelos sueltos y porosos con alto contenido de materia orgánica tienen menores densidades aparentes en comparación con suelos compactados, lo cual coincide con la tendencia positiva encontrada entre el porcentaje de materia orgánica del suelo y la densidad aparente del presente estudio y negativa entre ésta con el espacio poroso del suelo. Los suelos de textura gruesa tienen poros grandes pero su espacio poroso total es menor que el de los suelos de textura fina, por lo que éstos poseen una densidad aparente más baja.

La densidad real (segunda variable robusta en el análisis de componentes principales), con pocas excepciones, estuvo dentro del intervalo reportado por Buckman y Brady (1991), quienes indican que la mayor parte de los suelos tienen una densidad de partículas de 2.6 a 2.75 g cm<sup>-3</sup> debido al cuarzo, feldespato y silicatos coloides cuya densidad está dentro de estas cifras. No obstante, cuando están presentes cantidades anormales de minerales pesados como magnetita, epidota, zircón, granate, turmalina y hornblenda, la densidad puede exceder de 2.75 g cm<sup>-3</sup>.

La baja correlación no significativa entre el VTCS con los parámetros físicos y el VCSF se debe a que las propiedades físicas del suelo son más estables en el tiempo que las bioquímicas y químicas, que son más sensibles a cambios ambientales (Zornoza *et al.*, 2007).

La tendencia negativa entre P-foliar y VTCS se atribuye al pH del suelo, pues si éste se acidifica demasiado, las plantas y en general la biota bajan su actividad, por lo que las plantas retienen en sus tejidos al P y gracias a su movilidad, éste es transportado de los tejidos viejos a los jóvenes (Salisbury y Ross, 2000), lo cual justifica la correlación entre P-foliar y pH activo del suelo ( $r = -0.3$ ). Esto se relaciona a su vez con el mayor contenido de P-foliar en hojas de *Pinus hartwegii*, que se encuentran a altitudes de hasta 4100 m snm, donde las condiciones ambientales son menos favorables.

Con respecto a la materia orgánica del suelo, actividad microbiana y Mg intercambiables como variables robustas obtenidas del análisis de componentes principales (ACP), éstas coinciden con los resultados de Velásquez *et al.*, (2007) quienes mediante este modelo encontraron en suelos con diferente uso de Colombia y Nicaragua a estos parámetros junto con fósforo total, Ca intercambiables del suelo, porcentaje de humedad y espacio poroso como variables robustas con las que propusieron un modelo de calidad edáfica. Por su parte, Torres *et al.*, (2006) también encontraron con este

modelo estadístico en un estudio de calidad bajo suelo tipo Ultisol, que de 21 variables evaluadas, 13 tuvieron el mayor peso en el análisis (MOS, Ca-disponible, N-total, coeficiente de escorrentía, densidad aparente y porcentaje total de espacio poroso del suelo).

Lo anterior justifica porqué los suelos bajo bosques de *Abies religiosa* tuvieron los valores de calidad de suelo (VCS) atribuidos a parámetros bioquímicos, químicos y total más altos que los suelos bajo *Pinus*. Esto se debe a los requerimientos ecológicos del oyamel. Sitios con mayor humedad, generan nichos con condiciones favorables para la actividad de la biota. Como ya se mencionó, en general, los Andosoles se caracterizan por su alta capacidad de retención de agua, lo que implica condiciones de solubilidad de nutrimentos disponibles por más tiempo, producto de una adecuada tasa de mineralización de la MOS provocada por una buena actividad microbiana en suelos bajo *Abies religiosa*. Además, en las diversas etapas de degradación la MOS funciona como coloide natural que aglomera las partículas del suelo, generando buena estructura y reduciendo su degradación. Así, al haber una cantidad adecuada de MOS existe una estructura del suelo apropiada, el espacio poroso es suficiente para que exista una buena aireación y a su vez, buena retención de nutrimentos y agua, coincidiendo con los sitios donde los coeficientes metabólicos fueron bajos, el N-foliar alto y el volumen maderable mayor que sitios con bosque de *Pinus*. Según Hernández-Hernández *et al.*, (2008), los bosques de pino presentan valores más altos de CO<sub>2</sub>/CBM y CBM/NBM, lo cual puede reflejar una mayor proporción de hongos en la biomasa microbiana; además, la hojarasca de pino contiene más compuestos fenólicos que disminuyen la diversidad catabólica de la comunidad microbiana. Estos autores demostraron que los pinos tuvieron la estabilidad de agregados más baja en bosque húmedo y sabana seca debido a la reducción del carbono orgánico total donde se establecieron. Por otra parte, López-López (2010) demostró que la especie *A. religiosa*, en comparación con *Pinus*, contribuye a regular el pH de la lluvia que interactúa con su dosel, debido a una mayor cantidad de Ca y Mg en su follaje, lo cual ocasiona que el pH del suelo sea menos ácido que en suelos bajo bosques de *Pinus* (Gómez-Rey y Calvo de Anta, 2002).

Según lo discutido en párrafos anteriores y una vez reconocidas mediante ACP las variables robustas de los grupos de propiedades físicas, químicas y bioquímicas se

encontró que, con el uso del modelo aditivo propuesto para evaluar la calidad de los suelos forestales del PN IztaPopo se tuvo una separación de sitios, juntando en un grupo (designado como valor de calidad edáfica media) a las unidades ambientales con valor de calidad de suelo cercano al promedio y otros dos grupos que tuvieron cifras alejadas de éste (outliers, según Johnson, 2000), los de mayor y menor valor (denominados como VTCS alta y baja respectivamente).

El contraste de los resultados encontrados en esta investigación muestra una falta de correspondencia con la hipótesis de que a mayor volumen maderable y más alta concentración foliar de N y P en las especies que el suelo sustenta, se asocia con alta calidad del suelo. La baja correlación de los valores de calidad de suelo alta con los de mayores volúmenes maderables pueden atribuirse principalmente al diseño, selección de los sitios y momento de muestreo ya que el volumen maderable y concentraciones foliares de N y P fueron parámetros evaluados en lugares heterogéneos cuya vegetación e historia de manejo no son las mismas; por lo que, para validar el modelo de calidad de suelo, se recomienda formar y comparar unidades ecológicas homogéneas tanto en tipo de vegetación, como estado de conservación y atributos del relieve (exposición y porcentaje de pendiente).

En la determinación del volumen maderable sólo se consideró el crecimiento (ancho del fuste y altura del árbol). Este elemento de productividad, elegido aquí como variable de respuesta, no resultó suficiente para validar el modelo de calidad del suelo porque sobre la productividad forestal, también influyen la edad e historia de desarrollo de la comunidad forestal. Lo anterior es base para recomendar, junto con la evaluación de la calidad del suelo forestal, la realización de un estudio dendrocronológico que permita conocer la historia y edad de los individuos en cada uno de los sitios, analizando los anillos de crecimiento de los árboles y relacionar la duración, intensidad y frecuencia de los eventos secos y húmedos, conocer las fluctuaciones hidroclimáticas en el tiempo y la historia de manejo (Tomazello *et al.*, 2009; INIFAP, 2010).

Además de lo anterior, se recomienda establecer previamente a la investigación, tanto los individuos de la comunidad arbórea que serán sujetos de estudio en cada sitio como un tiempo inicial para monitorear y conocer la dinámica del sitio en diferentes momentos de una escala temporal. Los intervalos de esa escala de tiempo propuestos son el principio y final de cada estación del año.

Con el análisis de componentes principales (ACP), se disminuyó la dimensionalidad de las variables del suelo estudiadas e identificaron las que pueden considerarse más importantes para proponerlas como indicadoras de su calidad. Este análisis, sin embargo, debe ser reforzado con otros análisis multivariados como la regresión múltiple o correlaciones canónicas que pueden reflejar una mejor correlación entre productividad forestal, contenido nutrimental y valor de calidad de suelo. En ambos análisis se identifican nuevas variables para resumir cualquier relación existente entre grupos y señalan si pueden usarse las variables de un grupo para predecir las variables del otro (Johnson, 2000).

Aunque esta investigación no aportó todos los elementos para aceptar la hipótesis propuesta, se encontró del ACP que las variables robustas de las propiedades físicas, químicas y bioquímicas del suelo tienen importancia en la evaluación de la fertilidad y por lo tanto de la calidad del suelo forestal del PN Izta-Popo.

### 3. Conclusiones

Las variables importantes para evaluar la calidad del suelo fueron la evolución de  $\text{CO}_2$ , actividad de la fosfatasa alcalina, MOS, pH activo, Mg y Na intercambiables, porcentaje de Arena, DR y CE. Estas resultaron del análisis de componentes principales.

Los grupos de suelos de calidad alta a muy alta calidad se extienden en 20% de la superficie del Parque Nacional y ZI mientras que 62% del área de la región estudiada tiene suelos de calidad media y 18% de los suelos tienen calidad de baja a muy baja. Los suelos con calidad alta se encontraron al occidente de la Sierra y al NE del Popocatepetl, los de calidad media tuvieron distribución dispersa y los de calidad baja y muy baja se localizaron al oriente del Iztaccíhuatl y SW del Popocatepetl.

Los suelos con calidad alta tuvieron baja producción de  $\text{CO}_2$  del suelo (menos de  $150 \text{ kg ha}^{-1} \text{ día}^{-1}$ ) y menor relación  $\text{CO}_2/\text{CBM}$ .

La fertilidad edáfica del PN IztaPopo y ZI tuvo nivel de medio a muy alto. Sitios con fertilidad alta se relacionaron con bosques de *A. religiosa*, esta especie tuvo mayor porcentaje de N-foliar que las especies de *Pinus*, aunque en ambas especies, los altos porcentajes de N-foliar se relacionaron con mejores valores de calidad del suelo.

Bosques de *A. religiosa* tuvieron mayor volumen maderable respecto a sitios con bosques de *Pinus*. Bosques de *A. religiosa* con mayor productividad se correspondieron con suelos de calidad media. Comportamiento similar se encontró en bosques de *Pinus*.

Con los resultados de la investigación, en el PN IztaPopo y su zona de influencia, no se encontraron elementos para aceptar la hipótesis de que un mayor volumen maderable y más alta concentración foliar de N y P en las especies, se corresponden con suelos de alta calidad del suelo.

Aunque esta investigación no aportó todos los elementos para aceptar la hipótesis propuesta, se encontró del ACP que las variables robustas de las propiedades físicas, químicas y bioquímicas del suelo tienen importancia en la evaluación de la fertilidad y por lo tanto de la calidad del suelo forestal del PN Izta-Popo.

## **4. Literatura citada**

- (1) <http://www.monografias.com/trabajos11/ciclobio/ciclobio.shtml>.
- (2) [http://gis.esri.com/library/userconf/latinproc00/colombia/aproximacion\\_metodologica.pdf](http://gis.esri.com/library/userconf/latinproc00/colombia/aproximacion_metodologica.pdf)
- Acosta C. 2007. El Suelo Agrícola, un ser vivo. *Inventio*, No. 5. pp 55-60.
- Acuña O., W. Peña, Serrano, E., Pocasangre, L., Rosales, F., Delgado, E., Trejos, J., Segura, A. 2006. La importancia de los microorganismos en la calidad y salud de los suelos. XVII Reunión Internacional da Associação para a Cooperação nas Pesquisas sobre Banana no Caribe e na America Tropical. Santa Catarina Brasil.
- Adl S. M. 2003. *The Ecology of Soil Decomposition*. CABI Publishing. USA. 335 pp.
- Alexander, M. 1980. *Introducción a la microbiología del suelo*. AGT Editor. México. 489 pp.
- Allan J. 1971. *The preparation of agricultural samples for analysis by atomic absorption spectroscopy*. Varian Techtron, Walnut Creek, California. U. S. A.
- Astudillo B. 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. México. 131 pp.
- Bishop, J. y Landell-Mills, N. 2003. *La venta de servicios ambientales forestales*. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, Instituto Nacional de Ecología, Comisión Nacional Forestal. México. 464 pp.
- Board on Agriculture. 1993. *Soil and water quality. Committee on Long-Range soil and water conservation-National Research Council*. National Academy Press. U. S. A. 187-235 pp.
- Bremner J. 1965. Total nitrogen. *Methods of soil analysis. Part 2, Agronomy 9*. American Society of Agronomy. U. S. A. 1149-1178 pp.
- Brownlow, A. H. 1996. *Geochemistry*. Prentice-Hall. U. S. A. 580 pp.
- Buckman H. O. y Brady N. C. 1991. *Naturaleza y Propiedades de los Suelos, texto de edafología para enseñanza*. Editorial LIMUSA. México. 590 pp.

- Cantú, M., A. Becker, Bedano J. Schiavo H. 2007. Evaluación de la calidad de suelos mediante el uso de indicadores e índices. *Ciencia del Suelo*. Vol. 25. No. 2. Argentina.
- Calderón de Rzedowski, G. y J. Rzedowski. 2001. *Flora Fanerogámica del Valle de México*. 2ª Edición. Instituto de Ecología. México. 1406 pp.
- Celis, R. 2003. Seminario de Servicios Ambientales: Oportunidades de Negocios y Requerimiento de Políticas, organizado por SEMARNAT-IICA-SIDE Marzo 2003. <http://www.semarnat.gob.mx>.
- Challenger, A. 1998. Utilización y Conservación de los Ecosistemas Terrestres de México, pasado, presente y futuro. UNAM, Instituto de Biología, Comisión Nacional para el Conocimiento y uso de la Biodiversidad (CONABIO), Sierra Madre A. C. México. 847 pp.
- Comisión Nacional Forestal. 2004-2010. Inventario Nacional Forestal y de Suelos, manual y procedimientos para el muestreo de campo, remuestreo 2010. México. 140 pp.
- CONABIO, 2009. Portal de geoinformación. Sistema nacional de información sobre biodiversidad. <http://www.conabio.gob.mx/informacion/gis/>.
- CONAFOR, 2007. Protección, Restauración y conservación de Suelos Forestales, manual de obras y prácticas. 3ª edición. Comisión Nacional Forestal. México. 70 pp.
- CONANP, 2007. Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas. Parque Nacional Izta-Popo. <http://iztapopo.conanp.gob.mx>.
- CONANP, 2007a. Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas. Parque Nacional Izta-Popo. <http://iztapopo.conanp.gob.mx/geologia.php>.
- CONANP, 2007b. Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas. Parque Nacional Izta-Popo. <http://iztapopo.conanp.gob.mx/edafologia.php>.
- CONANP, 2007c. Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas. Parque Nacional Izta-Popo. <http://iztapopo.conanp.gob.mx/climatologia.php>.
- CONANP, 2007d. Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas. Parque Nacional Izta-Popo. <http://iztapopo.conanp.gob.mx/vegetacion.php>.

- Corona R. A. 2007. Actividad ureasa del suelo y dinámica de C y N en bosques templados de México. Tesis de Licenciatura. FES Zaragoza, UNAM. México. 87 pp.
- Cruz-Flores G. 2006. Ecología del suelo, un enfoque hacia la nutrición mineral de las plantas superiores. FES Zaragoza-UNAM. México. 106 pp.
- Cruz-Flores G. y Etchevers-Barra J. D. 2011. Contenidos de carbono orgánico de suelos someros en pinares y abetales de áreas protegidas de México. Agrociencia. No. 45. 849-862 pp.
- Curtis H y Barnes N. 2000. Biología. Editorial Médica Panamericana. 6a edición. Madrid España. 1491 pp.
- Chapingo. 2001. Programa de la materia de producción forestal. Universidad Autónoma de Chapingo. México. 1-25 pp.
- Davet, P. 2004. Microbial Ecology of the Soil and Plant Growth. Science Publisher. USA. 392 pp.
- Doering E. J., R. C. Reeve & Stockinger K. R. 1964. Salt Accumulation and Salt Distribution As An Indicator of Evaporation From Fallow Soils. United States Salinity Laboratory Riverside.
- [http://journals.lww.com/soilsci/Citation/1964/05000/Salt\\_Accumulation\\_and\\_Salt\\_Distribution\\_As\\_An.4.aspx](http://journals.lww.com/soilsci/Citation/1964/05000/Salt_Accumulation_and_Salt_Distribution_As_An.4.aspx). Consultado en febrero 2010.
- Domínguez-Bernal, B. 2011. Levantamiento nutricional en *Abies religiosa* a lo largo de un ciclo anual en el Parque Nacional Izta-Popo. Tesis de Licenciatura FES Zaragoza-UNAM. México. 105 pp.
- Doran, J. W. y T. B. Parkin. 1994. Defining and Assessing Soil Quality. pp. 3-22. In: Doran J., Coleman D, Bezdicek D. y Stewart B. (Ed.). SSSA Special Publication no. 35. Wisconsin, U.S.A.
- Douglas, L. K., C. A. Ditzler, S. S. Andrews. 2003. Soil quality: Why and How?. Elsevier-Geoderma. No. 114. 145-146 pp.
- Duchaufour Ph. 1984. Edafología 1, Edafogénesis y Clasificación. Editorial MASSON. España. 493 pp.



- Duarte, J. 2006. Episodio 07 GPL-Percepción Remota, Sensores Remotos. Entrevista Ing. Jaime Duarte (Colombia), 27 de mayo de 2006. Publicación página web, 29 de mayo de 2006. <http://podespacial.com/>.
- Elliott, E. T., J. W. Heil, E. F. Kelly, and H. C. Monger. 1999. Soil structural and other physical properties. In: Standard Soil Methods for Long-Term Ecological Research. Robertson, G. P., D. C. Coleman, C. S. Bledsoe, and P. Sollins (eds). Oxford University Press, New York. pp: 74-85.
- Enkerlin E., Cano G., Garza R., y Vogel E. 1997. Ciencia ambiental y Desarrollo Sostenible. Internacional Thomson Editores. México. 690 pp.
- Etchevers, J. D., M. A. Bautista y M. A. Vergara. 2000. Calidad del suelo, indicadores de calidad y captura de carbono. Pp.507-520. In: R. Quintero - Lizaola, T. Reyna - Trujillo, L. Corlay Chee. A. Ibañez - Huerta y N. E. García - Calderón. (Ed). La Edafología y sus perspectivas al siglo XXI. Tomo II. Colegio de Postgraduados, UNAM, UACH. México.
- ESRI. 2002. Working with ArcGis Spatial Analyst (for ArcView 8, ArcEditor 8 and ArcInfo 8) Exercises. ESRI. United States of América.
- FAO-ISRIC-ISSS, 1999. Base Referencial Mundial del Recurso Suelo. 90 pp.
- Farjon, A., J. A. Pérez y B. T. Styles. 1997. Guía de campo de los Pinos de México y América Central. Instituto Forestal de Oxford, Universidad de Oxford-Royal Botanic Gardens, Kew. Unión Europea-Bélgica.
- Franzluebbers, A. J. 2002. Soil organic matter stratification ratio as an indicator of soil quality. Soil and Tillage Res. 66: 95-106.
- Fu, X., M. Shao, X. Wei, R. Horton. 2010. Soil organic carbon and total nitrogen as affected y vegetation types in Northern Loess Plateau of China. Elsevier-Geoderma. Vol. 155. 31-35 pp.
- Gami, S. K., J. G. Lauren, J. M. Duxbury. 2009. Influence of soil texture and cultivation on carbon and nitrogen levels in soils of the eastern Indo-Gangetic Plains. Elsevier-Geoderma. No. 153. 304-311 pp.

- García-Hernández, M. S. 2003. Indicadores de calidad del suelo y estado nutrimental de *Abies religiosa* (H. B. K.) Schl. et Cham. en la exposición occidente de los volcanes Iztaccíhuatl y Popocatepetl. Tesis de Licenciatura. FES Zaragoza-UNAM. 84 pp.
- Giménez de Azcárate J., M. Escamilla, L. Almeida. 2009. Datos sobre la vegetación higrófila altimontana del volcán Iztaccíhuatl (México). Lazaroa. Vol. 30. 109-118 pp.
- Gómez-Rey, M. X. y R. Calvo-de Anta. 2002. Datos para el desarrollo de una red integrada de seguimiento de la calidad de suelos en Galicia (N.O. de España): Balances geoquímicos en suelos forestales (*Pinus radiata*). 1. Aportes de elementos por deposición atmosférica y hojarasca. Edafología. Vol. 9. No. 2. 181-196 pp.
- González-Molina, F., J. Etchevers-Barra, C. Hidalgo-Moreno. 2008. Carbono en suelos de ladera: Factores que deben considerarse para determinar su cambio en el tiempo. Agrociencia. Vol. 42. 741-751 pp.
- Granados-Damián M. R. 2003. Calidad del suelo y estado nutrimental del género *Pinus* en la vertiente occidental del Iztaccíhuatl y Popocatepetl. Tesis de Licenciatura. FES Zaragoza-UNAM.102 pp.
- Gutiérrez-Guzmán, B., J. D. Etchevers-Barra, A. Velázquez-Martínez y J. Almáraz-Suárez. 2005. Influencia del Aile (*Alnus firmifolia*) en el crecimiento de plantas de *Pinus patula*. Redalyc-Terra Latinoamericana. Vol. 23. No. 1. 89-96 pp.
- Hancock, G., D. Murphy, K. Evans. 2010. Hillslope and catchment scale soil organic carbon concentration: An assessment of the role of geomorphology and soil erosion in an undisturbed environment. Elsevier-Geoderma. Vol. 155. 36-45 pp.
- Hernández-Hernández R. M., E. Ramírez, I. Castro y S. Cano. 2008. Cambios en indicadores de calidad de suelos de ladera reforestados con pino (*Pinus caribea*) y eucalipto (*Eucalyptus robusta*). Agrociencia.
- INEGI. 2009. Conjunto de datos vectoriales de la serie topográfica y de recursos naturales escala 1:1 000 000, capas disponibles para su descarga gratuita. <http://www.inegi.org.mx/geo/contenidos.aspx>.

- INEGI. 2009a. Conjunto de datos vectoriales de la serie topográfica y de recursos naturales escala 1:1 000 000, capas disponibles para su descarga gratuita. Recursos naturales. Suelos. <http://www.inegi.org.mx/geo/contenidos/topografia/InfoEscala.aspx>.
- INEGI. 2009b. Conjunto de datos vectoriales de la serie topográfica y de recursos naturales escala 1:1 000 000, capas disponibles para su descarga gratuita. Climas. Humedad del Suelo. <http://www.inegi.org.mx/geo/contenidos/topografia/InfoEscala.aspx>.
- INEGI. 2009c. Conjunto de datos vectoriales de la serie topográfica y de recursos naturales escala 1:1 000 000, capas disponibles para su descarga gratuita. Localidades. <http://www.inegi.org.mx/geo/contenidos/>.
- INIFAP. 2010. [http://www.inifap.gob.mx/transferencia\\_tec/lab\\_dendro.html](http://www.inifap.gob.mx/transferencia_tec/lab_dendro.html).
- IPCC. 1995. Intergovernmental Panel on Climate Change. Climate Change 1995. The Supplementary Report to the IPCC. Scientific Assessment. Cambridge University Press, Cambridge. 12: 1032-1046.
- Instituto Mexicano del Transporte, 2008. Secretaría de Comunicaciones y Transportes. <http://www.imt.mx/siget/SIG.htm>.
- Inventario Nacional Forestal y de Suelos. 2004-2010. SEMARNAT-CONAFOR. México. 140 pp.
- Jackson M. L. 1964. Análisis químico de suelos. Editorial Omega. España.
- Janvier, E., F. Villeneuve, C. Alabouvette, V. Edel-Herman, T. Manteille, C. Steinberg. 2007. Soil health through soil disease suppression: Wich strategy from descriptors to indicators?. Elsevier-Soil Biology & Biochemistry.
- Jarrell, W. M., D. E. Armstrong, D. F. Grigal, E. F. Kelly, H. C. Monger, and D. A. Wedin. 1999. Soil water and temperature status. In: Standard Soil Methods for Long-Term Ecological Research. Robertson, G. P., D. C. Coleman, C. S. Bledsoe, and P. Sollins (eds). Oxford University Press, New York. pp: 55-73.
- Jay, L. y W. S. D. Wong. 2001. Statistical Analysis With ArcView GIS. John Wiley & Sons Inc. Canadá. 192 pp.

- Jenkinson, D., P. C. Brookes y D. S. Powlson. 2004. Measuring soil microbial biomass. Elsevier-Soil Biology & Biochemistry. Vol. 36, 5-7 pp.
- Johansson, E. M., P. Fransson, R. D. Finlay, P. A. W. van Hess. 2009. Quantitative analysis of soluble exudates produced by ectomycorrhizal roots as a response to ambient and elevated CO<sub>2</sub>. Elsevier-Soil Biology and Biochemistry. No. 41. 1111-1116 pp.
- Johnson, D. 2000. Métodos Multivariados Aplicados al Análisis de Datos. International Thomson Editores. México. 561 pp.
- Kennedy F y Pitman R. 2004. Factors affecting the nitrogen status of soils and ground flora in Beech woodlands. Elsevier-Forest ecology and management. Vol. 198. 1-14 pp.
- Killham, K. 1994. Soil ecology. Cambridge University Press. United Kingdom. 242 pp.
- Kleinbaum D. y Kupper L. 1978. Applied Regression Analysis and Other Multivariable Methods. Duxbury Press. USA. 556 pp.
- Kurganova, I., R. Teepe y N. Lofffield. 2007. Influencia de los eventos de congelamiento-descongelamiento sobre emisiones de CO<sub>2</sub> del suelo en diferentes usos de suelo y humedad. Carbon Balance and Management.
- Lantada Zarzosa, N. y Núñez Andrés M. A. 2006. Sistemas de Información Geográfica, prácticas con ArcView. Ediciones Alfaomega. México. 226 pp.
- Lajtha K., C. T. Driscoll, W. M. Jarrell, and E. T. Elliott. 1999. Soil phosphorus: characterization and total element analysis. In: Standard Soil Methods for Long-Term Ecological Research. Robertson, G. P., D. C. Coleman, C. S. Bledsoe, and P. Sollins (eds). Oxford University Press, New York. pp: 115-142.
- Lara-González R., L. R. Sánchez-Velázquez y J. Corral-Aguirre. 2009. Agrociencia. Vol. 43. 739-747 pp.
- Lee, J. y D. W. S. Wong. 2001. Statistical analysis with ArcView GIS. John Wiley and Sons. U. S. A. 192 pp.
- López-López, A. B. 2010. Variación edl pH de agua de lluvia en bosques templados húmedos. Tesis de Licenciatura. FES Zaragoza-UNAM. 64 pp.

- López-Pérez, H. 2002. Sucesión de la comunidad bacteriana en suelos salinos enmendados con paja de maíz y glucosa. Tesis de Maestría en Ciencias. Universidad de Colima. México. 164 pp.
- Luselli, C. 2003. Seminario de Servicios Ambientales: Oportunidades de Negocios y Requerimiento de Políticas, organizado por SEMARNAT-IICA-SIDE Marzo 2003. <http://www.semarnat.gob.mx>.
- Macías J. L. 2005. Geología e historia eruptiva de algunos de los grandes volcanes activos de México. Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana, volumen conmemorativo del centenario, temas selectos de la geología mexicana. Tomo LVII, Vol. 3. 379-424 pp.
- MapInfo Corporation. 2004. MapInfo Profesional versión 7.5/7.8, Supplement. Minfo Corpotation. Troy, New York. 266 pp.
- Marchsner, H. 1995. Mineral nutrition of higher plants. 2ª edición. Academic Press Limited. Great Britain. 889 pp.
- Márquez de Cantú, M. 1991. Probabilidad y Estadística, para Ciencias Químico-Biológicas. McGraw-Hill. México. 657 pp.
- Martínez Cohetero, 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. México. 78 pp.
- Miehlich, G. 1980. Los suelos de la Sierra Nevada. Suplemento comunicaciones. Fundación alemana para la investigación científica. México. 211 pp.
- Montecinos, C. 1997. Manejo biológico del fósforo en el suelo. Agroecología y desarrollo-CLADES. Número especial Nov. 8/9.
- Moscovich, F. A. y D. A. Brena. 2006. Comprobación de cinco métodos de muestreo forestal en un bosque nativo de *Araucaria angustifolia* Bert. O. Ktze. Quebracho. No. 13. 7-16 pp.
- Narváez, N. 2001. Determinación de la sintomatología visual y producción de biomasa ante la carencia de N, P, K, Ca, Mg y S en el cultivo de maíz. Tesis de Licenciatura. UNAM.

- Norma Oficial Mexicana NOM-021-RECNAT-2000. Que establece las especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de suelos. Estudio, muestreo y análisis. Norlex Internacional. Edición electrónica de leyes. 71 pp.
- Ordóñez J. 1999. Captura de Carbono en un Bosque Templado. El caso de San Juan Nuevo Michoacán. Instituto Nacional de Ecología-SEMARNAP. México. 72 pp.
- Pagano M y K. Gauvreau. 2001. Fundamentos de bioestadística. Thomson-Learning. México. 525 pp.
- Pajares-Moreno S., J. Gallardo-Lancho, S. Marinari, J. Etchevers-Barra. 2010. Indicadores bioquímicos de calidad en tepetates cultivados del Eje Neovolcánico Mexicano. *Agrociencia*. Vol. 44. 121-134 pp.
- Paul, E. A., D. Harris, M. J. Klug, and R. W. Ruess. 1999. The determination of microbial biomass. In: *Standard Soil Methods for Long-Term Ecological Research*. Robertson, G. P., D. C. Coleman, C. S. Bledsoe, and P. Sollins (eds). Oxford University Press. New York. pp: 291-317.
- Pearce, D. W. y C. G. Pearce, 2001. The value of Forest Ecosystems. Report to the Secretariat of the United Nations Convention on Biological Diversity. Montreal Canadá. London: CSLRGL.
- Pritchett, W. 1991. Suelos forestales, propiedades, conservación y mejoramiento. Editorial Limusa-Grupo Noriega Editores. México. 634 pp.
- Richards, L. A. 1990. Diagnóstico y rehabilitación de suelos salinos y sódicos. 6ª edición. Departamento de Agricultura de los Estados Unidos de América. LIMUSA. México.
- Ramírez Gutiérrez, A. 2008. Densidad de la fauna edáfica como indicador de calidad del suelo en bosques templados y zonas adyacentes en México. Tesis de Licenciatura. FES Zaragoza-UNAM. México. 89 pp.
- Robertson, G. P., P. Sollins, B. G. Ellis, and K. Lajtha. 1999. Exchangeable ions, pH, and cation exchange capacity. In: *Standard Soil Methods for Long-Term Ecological Research*. Robertson, G. P., D. C. Coleman, C. S. Bledsoe, and P. Sollins (eds). Oxford University Press New York. pp: 106-114.

- Romeu, E. 1995. Los pinos mexicanos, récord mundial de biodiversidad. *Biodiversitas*. Vol.1(2):11-14 pp.
- Rzedowski, J. 2006. Vegetación de México. 1ra. Edición digital, Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad, México, 504 pp.
- Salisbury F. B. y C. W. Ross. 2000. Fisiología de las Plantas. Paraninfo-Thomson Learning. España. 988 pp.
- Sánchez, B., M. Ruíz, y M. M. Ríos. 2005. Materia orgánica y actividad biológica del suelo en relación con la altitud, en la cuenca del río Maracay, estado Aragua. *Agronomía tropical*. Vol. 55. No. 4. 507-534 pp.
- Sánchez-González, A., L. López-Mata, D. Granados-Sánchez. 2005. Semejanza florística entre los bosques de *Abies religiosa* (H.B.K.) Cham. & Schltdl. de la Faja Volcánica Transmexicana. *Investigaciones Geográficas, Boletín del Instituto de Geografía, UNAM*. Núm 56: 62-76 pp.
- Sánchez-Velázquez, R. L. y M. R. Pineda-López. Distribución y estructura de la población de *Abies religiosa* (H. B. K.) Schl. et. Cham en el Cofre de Peróte, estado de Veracruz, México. *Acta botánica mexicana*. Vol. 16. 45-55 pp.
- Schoenholtz, S. H., Miegroet Van., J. A. Burguer. 2000. A review of chemical and physical properties as indicators of forest soil quality: challenges and oportunities. *For. Ecol. Manage.* 138: 335-356.
- SEMARNAT. 2002. Indicadores para la evaluación del desempeño ambiental. Secretaría de medio ambiente y recursos naturales. Reporte 2000. México, D. F.  
[http://carpetas.semarnat.gob.mx/estadisticas\\_2000/informe\\_2000/index.shtml](http://carpetas.semarnat.gob.mx/estadisticas_2000/informe_2000/index.shtml).
- SEMARNAT. 2005. Informe de la Situación del Medio Ambiente en México. Compendio de Estadísticas Ambientales.  
[http://148.223.105.188:2222/snif\\_portal/secciones/demas/compendio2005/Reportes/D3\\_FORESTAL/D3\\_RFORESTA08/D3\\_RFORESTA08\\_01.htm](http://148.223.105.188:2222/snif_portal/secciones/demas/compendio2005/Reportes/D3_FORESTAL/D3_RFORESTA08/D3_RFORESTA08_01.htm).
- Sienko, M. y R. Plane. 1990. Química, principios y aplicaciones. McGraw-Hill. México. 762 pp.

- Sollins, P., C. Glassman, E. A. Paul, C. Swanston, K. Lajtha, J. W. Heil, and E. T. Elliott. 1999. Soil carbon and nitrogen: pools and fractions. In: Standard Soil Methods for Long-Term Ecological Research. Robertson, G. P., D. C. Coleman, C. S. Bledsoe, and P. Sollins (eds). Oxford University Press. New York. pp: 89-105.
- Sommer, I. y S. Cram. 1998. La guía ambiental. Unión de Grupos ambientalistas. <http://www.union.org.mx/guia.html>.
- SSSA, 1996. Methods of soil Analysis, part 3, chemical methods. Soil Society of America-American Society of Agronomy. 961-1068 pp.
- Tate III, R. 1995. Soil Micobiology. John Wiley & Sons. U. S. A. 398 pp.
- Tabatabai, M. 1994. Soil Enzymes. in R.W. Weavwe, J.S. Angle and P.S. Bottomley. 1994. Methods of Soil Analysis. Part 2 Microbiological and Biochemical Properties. Soil Science of America. U.S.A.
- Tisdale, S. y W. Nelson, 1991. Fertilidad de los suelos y fertilizantes. Editorial LIMUSA. México.
- Tomazello M., F. A. Roig y P. A. Zevallos. 2009. Dendrocronología y dendroecología tropical: Marco histórico y experiencias exitosas en los países de América Latina. Ecología en Bolivia. No. 44. Vol. 2. 73-82 pp.
- Torres, D., A. Florentino y López M. 2006. Indicadores e índices de calidad del suelo en un ultisol bajo diferentes prácticas de manejo conservacionista en Guárico, Venezuela. Bioagro. Vol. 18. No. 2. 83-91 pp.
- Valderrábano-Gómez J. M. 2005. Calidad del suelo y estado nutrimental de la vegetación forestal del parque nacional Zoquiapan y Anexas. Tesis de Licenciatura. FES Zaragoza-UNAM. México. 130 pp.
- Valenzuela, R., T. Raymundo y M. R. Palacios. 2004. Macromicetes que crecen sobre Abies religiosa en el Eje Neovolcánico Transversal. Polibotánica. No. 18. 33-51 pp.



- Velázquez, A., J. F. Mas, R. Mayorga-Saucedo, J. R. Díaz, C. Alcántara, R. Castro, T. Fernández, J. L. Palacio, G. Bocco, G. Gómez-Rodríguez L., Luna-González, I. Trejo, J. López-García, M. Palma, A. Peralta J. Prado-Molina y F. González-Medrano. 2001. Estado Actual y Dinámica de los Recursos Forestales de México. Instituto de Geografía, Instituto de Ecología, Instituto de Biología, UNAM.
- Velásquez, E. P. Lavelle y M. Andrade. 2007. GISQ, a multifuncional indicator of soil quality. Elsevier-Soil Biology and Biochemistry. No. 39. 3066-3080 pp.
- Verchot, L. y T. Borelli. 2005. Application of para-nitrophenol (pNP) enzyme assays in degraded tropical soils. Elsevier-Soil Biology & Biochemistry (37). 625-633 pp.
- Wisawapipat, W., Kheoruenromne I., Suddhiprakarn A. y Gilkes R. J. 2009. Phosphate sorption and desorption by Thai upland soils. Elsevier-Geoderma. Vol. 153. 408–415 pp.
- Wei, W., Ch. Weile. y W. Shaopeng. Forest soil respiration and its heterotrophic and autotrophic components: Global patterns and responses to temperature and precipitation. 2010. Elsevier-Soil Biology and Biochemistry. No. 42. 1236-1244 pp.
- WRB. 2006. World reference base for soils resources, a framework for international classification, correlation and communication. FAO. Italy. 128 pp.
- Zagal, E. y C. Córdova. 2005. Indicadores de calidad de la materia orgánica del suelo en un andisol cultivado. Agricultura Técnica. 65(2). Página consultada en septiembre de 2010. <http://www.inia.cl/at>.
- Zornoza, R., J. Mataix-Solera, C. Guerrero, V. Arcenegui, F. García-Orenes, J. Mataix-Beneyto, A. Morugán. 2007. Evaluation of soil quality using multiple lineal regression based on physical, chemical and biochemical properties. Elsevier-Science Direct. 233-237 pp.

## Apéndice 1

**Cuadro 1.** Propiedades químicas del suelo utilizadas o propuestas como indicadores de calidad del suelo.

Indicador	Referencia	Comentarios
P-extractable	Reganold y Palmer, 1995	Propiedad usada para evaluar diferencias en SQ en diferentes manejo de praderas
P-Bray	Harris <i>et al.</i> , 1996 Aune y Lal, 1997 Granados-Damián, 2003 García, 2003	Relacionado con disponibilidad del nutrimento y productividad de las plantas Relacionado con la disponibilidad de P en diferentes suelos tropicales Relacionado con la disponibilidad del nutrimento para <i>Pinus</i> sp. (P-limitante)
P-adsorción	Valderrábano, 2005 Larson y Pierce, 1994	Relacionado con la disponibilidad del nutrimento para <i>Pinus</i> sp. y <i>Abies</i> (P-limitante) Calculado como función de pedotransferencia (oxalato de Fe y Al extractable)
S-Extractable	Reganold y Palmer, 1995	Propiedad usada para evaluar diferencias en SQ en diferentes manejo de praderas
CIC	Papendick, 1991, (citado en Karlen y Stott, 1994) Larson y Pierce, 1994. USDA NRCS (citado en Karlen y Stott, 1994) Reganold y Palmer, 1995	Sugerido como indicador químico de primer orden Calculado como función de pedotransferencia (CO y contenido de arcilla) Propuesto como indicador químico Propiedad usada para evaluar diferencias en SQ en diferentes manejo de praderas
K-intercambiable	Doran y Parkin, 1994 Harris <i>et al.</i> , 1996 Aune y Lal, 1997	Indicador básico de SQ Relacionado con disponibilidad del nutrimento y productividad de las plantas Relacionado con la disponibilidad de K en diferentes suelos tropicales
K, Ca y Mg-Extractables	Reganold y Palmer, 1995 Granados-Damián, 2003 García, 2003 Valderrábano, 2005	Propiedad usada para evaluar diferencias en SQ en diferentes manejo de pradera Usados para evaluar SQ en bosques bajo <i>Pinus</i> sp (Mg-limitante) Usados para evaluar SQ en bosques bajo <i>Pinus</i> sp (Mg-limitante)
Conductividad eléctrica	Papendick, 1991, (citado en Karlen y Stott, 1994) Kiniry <i>et al.</i> , 1983 Larson y Pierce, 1994. Doran y Parkin, 1994; Burguer <i>et al.</i> , 1994	Sugerido como indicador básico de SQ Función en pedotransferencia relacionado con productividad vegetal Relacionado como indicador de salinidad de suelos (productividad vegetal) Propiedad química relacionada con SQ
Saturación de Aluminio	Aune y Lal, 1997	Considerado como el mejor indicador de acidez en suelos tropicales

**Cuadro 1 (Continuación).** Propiedades químicas del suelo utilizadas o propuestas como indicadores de calidad del suelo.

Indicador	Referencia	Comentarios
pH	Kiniry <i>et al.</i> , 1983	Asociado al potencial iónico suelos con pH < a 4.4 muy ácidos
	Papendick, 1991, (citado en Karlen y Stott, 1994)	Sugerido como indicador químico de primer orden
	Gale <i>et al.</i> , 1991	Utilizado en trébol blanco (pH óptimo 5.7, lím. inf. 3.0; lím. sup. 8.0)
	Larson y Pierce, 1994	Calculado como función de pedotransferencia, asociado a prof. de enraizamiento
	Doran y Parkin, 1994	Indicador básico de SQ
	Burguer <i>et al.</i> , 1994	Indicador básico de SQ (curvas de suficiencia de pH, con óptimo en 5.6)
	Reganold y Palmer, 1995	Propiedad usada para evaluar diferencias en SQ en diferentes manejo de praderas
	Harris <i>et al.</i> , 1996	Disponibilidad de nutrimentos (productividad vegetal y calidad ambiental)
	Romig <i>et al.</i> , 1996	"Salud química" de suelos agrícolas (pH subóptimo debajo de 6.0)
	Aune y Lal, 1997	Relación positiva con productividad en diferentes suelos tropicales
Carbono y materia orgánica	Granados-Damián, 2003	Indicador de SQ en suelos forestales bajo <i>Pinus</i> sp. y <i>Abies religiosa</i>
	García, 2003	
	Valderrábano, 2005	
	Larson y Pierce, 1994	Asociado a CIC, densidad aparente y retención de agua
	Doran y Parkin, 1994	Indicador básico de SQ
	Reganold y Palmer, 1995	Indicado de calidad biológico de calidad del suelo en diferentes manejo de praderas
	Manley <i>et al.</i> , 1995	Cambio en la reserva de carbono por pastoreo
	Harris <i>et al.</i> , 1996	Disponibilidad de nutrimentos, productividad vegetal y calidad ambiental
	Aune y Lal, 1997	Correlacionado positivamente con rendimiento de cultivos
	Papendick, 1991, (citado en Karlen y Stott, 1994)	Sugerido como indicador químico de primer orden
N-total, N-orgánico y mineralizable	Soil Conservation Service, (citado en Karlen y Stott, 1994)	Propuesto como indicador químico de SQ
	Romig <i>et al.</i> , 1996	Propuesto como indicador de "salud química" de suelos agrícolas
	Brejda <i>et al.</i> , 2000	Propuesto como indicador químico de SQ
	Perie C. and Munson A.2000.	Carbono orgánico como indicador de SQ después de aplicación de plaguicidas
	Granados-Damián, 2003	Usados para evaluar SQ en bosques bajo <i>Pinus</i> sp. y <i>Abies religiosa</i>
	Valderrábano, 2005	
	Reganold y Palmer, 1995	Propuesto como indicador de "salud química" de suelos agrícolas
	Doran y Parkin, 1994	Indicador básico de SQ
	Manley <i>et al.</i> , 1995	Cambio en reserva de N por pastoreo. Indicador de biodisponibilidad de NH <sub>4</sub>
	Harris <i>et al.</i> , 1996	Productividad vegetal y calidad ambiental
Powers <i>et al.</i> , 1998	Indicador de calidad de suelo	
	Perie C. and Munson A.2000.	Nitrógeno orgánico como indicador de SQ después de aplicación de plaguicidas
	Giardina <i>et al.</i> , 2001. P C., G. Ryan M. M. Hubbard and Binkley	Tasas de mineralización de N en suelos de diferente textura
	Granados-Damián, 2003	N-Total, usados para evaluar SQ en bosques bajo <i>Pinus</i> sp. y <i>Abies religiosa</i>
	García, 2003	
	Valderrábano, 2005	

Modificado de Schoenholtz *et al.*, 2000. SQ= Soil Quality= Calidad del Suelo

**Cuadro 2. Contenido de carbono y coeficientes metabólicos.**

Sitio	Nombre	Coordenadas UTM NAD 27		Altitud msnm	TMA °C	PpMA mm	MOS %	CO <sub>2</sub> kg ha <sup>-1</sup> día <sup>-1</sup>	COS Mg ha <sup>-1</sup>	CBM Mg ha <sup>-1</sup>	C:N Mg ha <sup>-1</sup>	C-lábil %	CBM/COS Mg ha <sup>-1</sup>	Vegetación	Tipo de Suelo Miehlich-FAO (1980)
		X	Y												
24	W de D 14	529032	2101200	2650	14	901	2.43	38.34	25.39	3.227	25	11.27	0.1271	<i>Pinus montezumae</i>	Th+To+Tm+Re+Tv
8	Cuilochochitla	527927	2114839	2710	14	927	3.04	80.23	31.71	2.477	22	7.24	0.0781	<i>Pinus teocote</i>	Th+To+Tm+Tv+Be/D
23	D 14	529850	2101950	2800	14	927	2.25	65.75	23.44	2.065	19	8.10	0.0881	<i>Pinus montezumae</i>	Tv+J
7	D 3	530240	2108542	2832	13.3	876	5.36	62.02	55.96	0.149	29	0.27	0.0027	<i>Abies religiosa</i>	Th+To+Tv
29	Barranca Apapaxco	532177	2094455	2834	13.3	876	8.45	140.00	97.09	0.029	39	0.03	0.0003	<i>Pinus spp., Abies religiosa, Quercus sp., Aile, Cupressus lusitanica, Cornus sp.</i>	Th+To+Tm+Re+Tv
20	Pasiontilla	530800	2114850	2900	13.3	876	3.48	72.74	36.37	1.287	7	3.42	0.0354	<i>Pinus patula, Pinus pseudostrabus, Pinus Teocote</i>	Th+To+Tv
4	O 17	530582	2112415	2918	11	773	2.32	63.44	24.25	2.582	7	9.62	0.1065	<i>Pinus montezumae, Pinus pseudostrabus</i>	Th+To+Tv
5	O 18	531440	2112175	2932	11	773	3.22	145.01	33.58	0.085	9	0.25	0.0025	<i>Abies religiosa</i>	Th+Bd+Tv
39	La Papa Acatzi	546875	2121540	2964	11	773	0.49	100.00	5.63	0.035	3	0.61	0.0061	<i>Pinus sp.</i>	Tm+Th+To+Tv
6	D 11	532240	2107789	2965	11	773	6.25	145.59	65.28	0.599	11	0.91	0.0092	<i>Abies religiosa, Pinus sp., Cupressus lusitanica</i>	Tv+J
19	Las Anomias	531400	2115570	3000	11	773	11.52	60.80	120.31	2.887	29	2.34	0.0240	<i>Abies religiosa</i>	Th+Bd+Tv
31	S de El salto	534478	2096137	3099	10	1071	4.63	140.00	53.13	0.032	96	0.06	0.0006	<i>Pinus sp., Abies religiosa.</i>	Tv+J
28	La Ventana	544221	2109851	3127	9.6	1092	0.95	230.00	10.86	0.025	13	0.23	0.0023	<i>Pinus sp.</i>	Tv+J+Th+Tv
22	O 16	532250	2102150	3225	9.2	1113	7.48	185.52	78.13	0.860	62	1.09	0.0110	<i>Abies religiosa</i>	Tv+J+Th+Tv
12	D2 4	532351	2106898	3228	9.2	1113	15.19	140.03	158.55	1.242	35	0.78	0.0078	<i>Abies religiosa</i>	Tv+J
1	O 1	533236	2108833	3250	9.2	1113	4.40	158.36	45.89	0.273	11	0.59	0.0059	<i>Abies religiosa, Pinus montezumae</i>	Tv+J+Th+Tv
33	SE Barranca Tlalquecotchocti	543181	2114683	3281	9.2	1113	2.39	240.00	27.48	0.037	25	0.14	0.0014	<i>Abies religiosa, Pinus sp., Cupressus lusitanica</i> cultivo y pastizal	Tv+J+Th+Tv
2	F 1	533304	2111309	3288	9.2	1113	6.25	62.83	65.28	1.190	20	1.79	0.0182	<i>Pinus hartwegii, Pinus pseudostrabus, Abies religiosa, Quercus sp.</i>	Tv+J+Th+Tv
17	O 2	533500	2109750	3300	9.2	1113	6.97	50.43	72.76	4.375	32	5.67	0.0601	<i>Abies religiosa</i>	Th+J+Th+Tv
18	Cruce el 8	532250	2115850	3300	9.2	1113	17.82	94.97	186.04	1.028	27	0.55	0.0055	<i>Abies religiosa, Alnus sp.</i>	Th+Bd+Tv
30	N Barranca Mata Leones	536262	2097553	3312	8.8	1134	8.30	240.00	95.26	0.037	49	0.04	0.0004	<i>Abies religiosa, Pinus hartwegii</i>	Tv+J+Th+Tv
27	Agua Escondida	542286	2110002	3333	8.8	1134	7.43	200.00	85.32	0.017	15	0.02	0.0002	<i>Pinus spp.</i>	Tv+J+Th+Tv
13	O 15	533082	2106584	3336	8.8	1134	17.82	153.56	186.04	1.149	35	0.61	0.0062	<i>Abies religiosa</i>	Tv+J
15	D 5	532932	2106452	3390	8.8	1134	6.31	70.74	65.92	2.566	25	3.75	0.0389	<i>Abies religiosa</i>	Tv+J
10	O1 3	533785	2111786	3398	8.8	1134	9.40	101.71	98.15	0.697	23	0.70	0.0071	<i>Abies religiosa</i>	Tv+J+Th+Tv
26	La Venta	541056	2110845	3418	8.4	1155	5.67	170.00	65.15	0.029	16	0.04	0.0004	<i>Pinus spp.</i>	Tv+J+Th+Tv
32	S Barranca Tlalquecotchocti	542103	2114526	3425	8.4	1155	7.98	240.00	91.60	0.037	18	0.04	0.0004	<i>Abies religiosa, Pinus hartwegii</i>	Tv+J+Th+Tv
14	O 14	533121	2106124	3440	8.4	1155	8.58	61.89	89.53	1.413	21	1.55	0.0158	<i>Abies religiosa</i>	Tv+J
37	Tlalcomajada E de Tettere	542529	2121800	3512	8	1187	6.86	295.00	78.82	0.021	36	0.03	0.0003	<i>Pinus spp., Abies religiosa</i>	Tv+J+Th+Tv
3	F 5	534939	2110074	3522	8	1187	4.20	37.75	43.83	1.656	11	3.64	0.0378	<i>Pinus hartwegii</i>	Tv+J+Th+Tv
35	SW Barranca Tlalquecotchocti	541221	2114562	3540	8	1187	10.05	415.00	115.41	0.004	32	0.00	0.00004	<i>Pinus hartwegii, Abies religiosa</i>	Tv+Th+Rd
16	F 11	534716	2111918	3550	8	1187	12.11	86.52	126.47	2.974	26	2.30	0.0235	<i>Pinus hartwegii, Abies religiosa</i>	Tv+J+Th+Tv
11	F 2	534603	2111225	3585	8	1187	11.46	65.53	119.63	1.407	28	1.16	0.0118	<i>Pinus hartwegii, Abies religiosa</i>	Tv+J+Th+Tv
9	Coronilla	533552	2117782	3600	8	1187	22.78	67.57	237.78	2.358	46	0.98	0.0099	<i>Pinus hartwegii</i>	Th+L
25	Pela Gallina	538910	2110546	3615	7.6	1208	5.13	415.00	58.95	0.004	16	0.01	0.0001	<i>Pinus hartwegii</i>	Tv+J+Th+Tv
34	S Barranca Tlalquecotchocti	541942	2115007	3667	7.6	1208	8.45	295.00	97.09	0.021	25	0.02	0.0002	<i>Pinus hartwegii</i>	Tv+J+Th+Tv
36	Chalchoapa NE de Tettere	542010	2121193	3696	7.6	1208	4.90	415.00	56.30	0.004	58	0.01	0.0001	<i>Pinus hartwegii</i>	Tv+Th+Rd
21	Paso de Cortés	536125	2111200	3723	7.2	1229	13.14	75.49	137.21	1.171	30	0.85	0.0085	<i>Pinus hartwegii</i>	Tv+J+Th+Tv
38	La Laguna Xahuehahuatlalco	541183	2121616	3828	7.2	1229	7.35	155.00	84.45	0.028	30	0.03	0.0003	<i>Pinus hartwegii</i>	Tv+Th+Rd
	<b>Mínimo</b>			<b>2650</b>	<b>7.2</b>	<b>773</b>	<b>0.49</b>	<b>37.7</b>	<b>5.6</b>	<b>0.004</b>	<b>2.9</b>	<b>0.0037</b>	<b>0.00004</b>		
	<b>Promedio</b>			<b>3269</b>	<b>9.62</b>	<b>1065</b>	<b>7.5</b>	<b>149.66</b>	<b>80.77</b>	<b>1.03</b>	<b>27.20</b>	<b>1.81</b>	<b>0.019</b>		
	<b>Máximo</b>			<b>3828</b>	<b>14</b>	<b>1229</b>	<b>22.8</b>	<b>415</b>	<b>237.8</b>	<b>4.4</b>	<b>95.8</b>	<b>11.3</b>	<b>0.127</b>		

TMA= Temperatura media anual; PpMa= Precipitación media anual; MOS= Materia Orgánica del Suelo; COS= Carbono Orgánico del Suelo; CBM= Carbono en Biomasa Microbiana. Sitios ordenados de acuerdo con la altitud en forma ascendente.

**Cuadro 3.** Contenido promedio de carbono del suelo y coeficientes metabólicos por tipo de vegetación.

CO <sub>2</sub>	CBM	COS	C-lábil	CBM/COS	CO <sub>2</sub> /CBM	Vegetación
<u>kg ha<sup>-1</sup> día<sup>-1</sup></u>	<u>Mg ha<sup>-1</sup></u>		<u>%</u>			
80.2	2.5	31.7	7.2	0.08	0.03	<i>Pinus teocote</i>
52	2.7	24.4	9.8	0.11	0.02	<i>Pinus montezumae</i>
140	0.03	97.19	0.03	0.0003	4.8	<i>Pinus</i> spp. <i>Abies religiosa</i> , <i>Quercus</i> sp., <i>Aile</i> , <i>Cupressus lusitanica</i> , <i>Cornus</i> sp.
72.7	1.3	36.4	3.4	0.04	0.06	<i>Pinus patula</i> , <i>Pinus pseudostrobus</i> , <i>Pinus Teocote</i>
63.4	2.6	24.3	9.6	0.11	0.03	<i>Pinus montezumae</i> , <i>Pinus pseudostrobus</i>
165	0.03	8.2	0.4	0.004	5.6	<i>Pinus</i> sp.
140	0.03	53.1	0.06	0.001	4.4	<i>Pinus</i> sp., <i>Abies religiosa</i> .
192.8	0.32	46.4	0.7	0.007	0.6	<i>Abies religiosa</i> , <i>Pinus</i> sp., <i>Cupressus lusitanica</i> , cultivo y pastizal
103.2	1.5	95.9	1.6	0.02	0.07	<i>Abies religiosa</i>
158.4	0.27	45.9	0.6	0.006	0.6	<i>Abies religiosa</i> , <i>Pinus montezumae</i>
62.8	1.2	65.3	1.8	0.02	0.05	<i>Pinus hartwegii</i> , <i>Pinus pseudostrobus</i> , <i>Abies religiosa</i> , <i>Quercus</i> sp.
94.97	1.03	186	0.6	0.006	0.09	<i>Abies religiosa</i> , <i>Alnus</i> sp.
240	0.04	93.4	0.04	0.0004	6.4	<i>Abies religiosa</i> , <i>Pinus hartwegii</i>
185	0.02	75.2	0.03	0.0003	8.1	<i>Pinus</i> spp.
295	0.02	78.8	0.03	0.0003	14	<i>Pinus</i> spp., <i>Abies religiosa</i>
189	1.5	120.5	1.2	0.012	0.13	<i>Pinus hartwegii</i> , <i>Abies religiosa</i>
208.7	0.75	102.2	0.7	0.007	0.28	<i>Pinus hartwegii</i>

CO<sub>2</sub>= Carbono de la respiración del suelo; CBM= Carbono de la biomasa microbiana; COS= Carbono orgánico del suelo; C-lábil= Carbono de la fracción lábil del suelo; CO<sub>2</sub>/CBM y CBM/COS= Coeficientes metabólicos del suelo. Datos promedio obtenidos y ordenados de acuerdo con el gradiente altitudinal.

**Cuadro 4.** Nitrógeno en suelo, relación C:N y porcentaje de nitrógeno foliar en especies arbóreas dominantes.

Sitio	Nombre	Altitud	N-total	C:N	N-foliar	Vegetación
		m snm	Mg ha <sup>-1</sup>		%	
24	W de D 14	2650	1.00	25	1.40	<i>Pinus montezumae</i>
8	Cuiloxochitla	2710	1.46	22	0.98	<i>Pinus teocote</i>
23	D 14	2800	1.21	19	0.89	<i>Pinus montezumae</i>
7	D 3	2832	1.96	29	1.41	<i>Abies religiosa</i>
29	Barranca Apapaxco	2834	2.5	39	0.99	<i>Pinus</i> spp. <i>Abies religiosa</i> , <i>Quercus</i> sp., <i>Aile</i> , <i>Cupressus lusitanica</i> , <i>Cornus</i> spp.
20	Pasiontitla	2900	4.89	7	1.52	<i>Pinus patula</i> , <i>Pinus pseudostrobus</i> , <i>Pinus Teocote</i>
4	O 17	2918	3.41	7	1.48	<i>Pinus montezumae</i> , <i>Pinus pseudostrobus</i>
5	O 18	2932	3.74	9	1.32	<i>Abies religiosa</i>
39	La Papa Acatzi	2964	1.94	3	0.57	<i>Pinus</i> spp.
6	D 11	2965	5.79	11	1.33	<i>Abies religiosa</i> , <i>Pinus</i> sp., <i>Cupressus lusitanica</i>
19	Las Anomias	3000	4.09	29	1.47	<i>Abies religiosa</i>
31	S de El salto	3099	0.55	96	0.75	<i>Pinus</i> sp. <i>Abies religiosa</i> .
28	La Ventana	3127	0.83	13	0.76	<i>Pinus</i> spp.
22	O 16	3225	1.26	62	0.60	<i>Abies religiosa</i>
12	D2 4	3228	4.47	35	1.82	<i>Abies religiosa</i>
1	O 1	3250	4.32	11	1.44	<i>Abies religiosa</i> , <i>Pinus montezumae</i>
33	SE Barranca Tlalquecotchcotl	3281	1.11	25	0.73	<i>Abies religiosa</i> , <i>Pinus</i> sp., <i>Cupressus lusitanica</i> cultivo y pastizal
2	F 1	3288	3.32	20	1.37	<i>Pinus hartwegii</i> , <i>Pinus pseudostrobus</i> , <i>Abies religiosa</i> , <i>Quercus</i> spp.
17	O 2	3300	2.25	32	1.84	<i>Abies religiosa</i>
18	Cruce el 8	3300	7.00	27	1.57	<i>Abies religiosa</i> , <i>Alnus</i> spp.
30	N Barranca Mata Leones	3312	1.94	49	0.99	<i>Abies religiosa</i> , <i>Pinus hartwegii</i>
27	Agua Escondida	3333	5.68	15	0.76	<i>Pinus</i> spp.
13	O 15	3336	5.36	35	1.41	<i>Abies religiosa</i>
15	D 5	3390	2.68	25	.	<i>Abies religiosa</i>
10	O1 3	3398	4.35	23	1.79	<i>Abies religiosa</i>

Datos ordenados conforme asciende la altitud.

**Cuadro 4 (Continuación).** Nitrógeno en suelo, relación C:N y porcentaje de nitrógeno foliar en especies arbóreas dominantes.

Sitio	Nombre	Altitud	N-total	C:N	N-foliar	Vegetación
		_m snm_	_Mg ha <sup>-1</sup> _		_%_	
26	La Venta	3418	4.16	16	0.86	<i>Pinus</i> spp.
32	S Barranca Tlalquecotchcotl 1	3425	4.99	18	0.91	<i>Abies religiosa</i> , <i>Pinus hartwegii</i>
14	O 14	3440	4.20	21	1.39	<i>Abies religiosa</i>
37	Tlalcomajada E de Tectorre	3512	2.22	36	0.66	<i>Pinus</i> spp., <i>Abies religiosa</i>
3	F 5	3522	3.87	11	1.73	<i>Pinus hartwegii</i>
35	SW Barranca Tlalquecotchcotl	3540	3.66	32	0.90	<i>Pinus hartwegii</i> , <i>Abies religiosa</i>
16	F 11	3550	4.82	26	1.35	<i>Pinus hartwegii</i> , <i>Abies religiosa</i>
11	F 2	3585	4.28	28	1.51	<i>Pinus hartwegii</i> , <i>Abies religiosa</i>
9	Coronilla	3600	5.17	46	1.38	<i>Pinus hartwegii</i>
25	Pela Gallina	3615	3.74	16	1.04	<i>Pinus hartwegii</i>
34	S Barranca Tlalquecotchcotl 2	3667	3.88	25	1.03	<i>Pinus hartwegii</i>
36	Chalchoapa NE de Tectorre	3696	0.97	58	0.84	<i>Pinus hartwegii</i>
21	Paso de Cortés	3723	4.52	30	1.56	<i>Pinus hartwegii</i>
38	La Laguna Xahuehahuatjalco	3828	2.77	30	0.81	<i>Pinus hartwegii</i>
	<b>mínimo</b>		<b>0.6</b>	<b>3</b>	<b>0.57</b>	
	<b>promedio</b>		<b>3.34</b>	<b>27.2</b>	<b>1.19</b>	
	<b>máximo</b>		<b>7.0</b>	<b>96</b>	<b>1.843</b>	
	<b>DE</b>		<b>1.63</b>	<b>17.42</b>	<b>0.37</b>	

*N-total= Nitrógeno Total del Suelo; C:N= Relación Carbono-Nitrógeno del Suelo; N-foliar= Nitrógeno del Tejido Foliar; DE= Desviación estándar. Datos ordenados conforme asciende la altitud.*

**Cuadro 5.** P-disponible, carbono y materia orgánica del suelo y pH activo.

Sitio	Nombre	Altitud	P-disp	COS	MOS	pH	Vegetación	Tipo de suelo
			<u>Mg ha<sup>-1</sup></u>	<u>%</u>	<u>H<sub>2</sub>O 1:2</u>			
		<u>m snm</u>					<b>Miehlich-FAO (1980)</b>	
23	D 14	2800	0.47	23.4	2.2	6.2	<i>Pinus montezumae</i>	Tv+J
4	O 17	2918	0.48	24.2	2.3	6.4	<i>Pinus montezumae</i> , <i>Pinus pseudostrobus</i>	Th+To+Tv
24	W de D 14	2650	0.51	25.4	2.4	6.1	<i>Pinus montezumae</i>	Th+To+Tm+Re+Tv
8	Cuilochochitla	2710	0.63	31.7	3.0	6.2	<i>Pinus teocote</i>	Th+To+Tm+Tv+Be/D
5	O 18	2932	0.67	33.6	3.2	6.8	<i>Abies religiosa</i>	Th-Bd-Tv
20	Pasiontitla	2900	0.73	36.4	3.5	6.3	<i>Pinus patula</i> , <i>Pinus pseudostrobus</i> , <i>Pinus Teocote</i>	Th+To+Tv
3	F 5	3522	0.88	43.8	4.2	5.4	<i>Pinus hartwegii</i>	Tv+J+Th+Tv
1	O 1	3250	0.92	45.9	4.4	6.7	<i>Abies religiosa</i> , <i>Pinus montezumae</i>	Tv+J+Th+Tv
7	D 3	2832	1.12	56.0	5.4	6.4	<i>Abies religiosa</i>	Th+To+Tv
2	F 1	3288	1.31	65.3	6.3	5.9	<i>Pinus hartwegii</i> , <i>Pinus pseudostrobus</i> , <i>Abies religiosa</i> , <i>Quercus</i> sp.	Tv+J+Th+Tv
6	D 11	2965	1.31	65.3	6.3	6.5	<i>Abies religiosa</i> , <i>Pinus</i> sp., <i>Cupressus lusitanica</i>	Tv+J
15	D 5	3390	1.32	65.9	6.3	6.2	<i>Abies religiosa</i>	Tv+J
28	La Ventana	3127	1.38	10.9	0.9	5.6	<i>Pinus</i> sp.	Tv+J+Th+Tv
17	O 2	3300	1.46	72.8	7.0	6.5	<i>Abies religiosa</i>	Tv+J+Th+Tv
22	O 16	3225	1.56	78.1	7.5	6.2	<i>Abies religiosa</i>	Tv+J+Th+Tv
26	La Venta	3418	1.66	65.2	5.7	6.2	<i>Pinus</i> spp.	Tv+J+Th+Tv
14	O 14	3440	1.79	89.5	8.6	6.2	<i>Abies religiosa</i>	Tv+J
10	O1 3	3398	1.96	98.1	9.4	6.4	<i>Abies religiosa</i>	Tv+J+Th+Tv
30	N Barranca Mata Leones	3312	2.00	95.3	8.3	5.4	<i>Abies religiosa</i> , <i>Pinus hartwegii</i>	Tv+J+Th+Tv
32	S Barranca Tlalquecotchcotl 1	3425	2.00	91.6	8.0	5.7	<i>Abies religiosa</i> , <i>Pinus hartwegii</i>	Tv+J+Th+Tv
33	SE Barranca Tlalquecotchcotl	3281	2.00	27.5	2.4	6.3	<i>Abies religiosa</i> , <i>Pinus</i> sp., <i>Cupressus lusitanica</i> cultivo y pastizal	Tv+J+Th+Tv
25	Pela Gallina	3615	2.11	58.9	5.1	6.1	<i>Pinus hartwegii</i>	Tv+J+Th+Tv
35	SW Barranca Tlalquecotchcotl	3540	2.11	115.4	10.1	5.6	<i>Pinus hartwegii</i> , <i>Abies religiosa</i>	Tv+Th+Rd



**Cuadro 5 (Continuación).** P-disponible, Carbono y materia orgánica del suelo y pH activo.

Sitio	Nombre	Altitud	P-disp	COS	MOS	pH	Vegetación	Tipo de suelo
		<u>m snm</u>	<u>Mg ha<sup>-1</sup></u>	<u>%</u>	<u>H<sub>2</sub>O 2:1</u>	<b>Miehlich-FAO (1980)</b>		
36	Chalchoapa NE de Tectorre	3696	2.11	56.3	4.9	5.2	<i>Pinus hartwegii</i>	Tv+Th+Rd
29	Barranca Apapaxco	2834	2.14	97.1	8.5	5.9	<i>Pinus</i> spp. <i>Abies religiosa</i> , <i>Quercus</i> sp., <i>Aile</i> , <i>Cupressus lusitanica</i> , <i>Cornus</i> sp.	Th+To+Tm+Re+Tv
31	S de El salto	3099	2.14	53.1	4.6	6.1	<i>Pinus</i> sp., <i>Abies religiosa</i> .	Tv+J
11	F 2	3585	2.39	119.6	11.5	6.0	<i>Pinus hartwegii</i> , <i>Abies religiosa</i>	Tv+J+Th+Tv
19	Las Anomias	3000	2.41	120.3	11.5	6.3	<i>Abies religiosa</i>	Th+Bd+Tv
16	F 11	3550	2.53	126.5	12.1	5.4	<i>Pinus hartwegii</i> , <i>Abies religiosa</i>	Tv+J+Th+Tv
27	Agua Escondida	3333	2.68	85.3	7.4	5.2	<i>Pinus</i> spp.	Tv+J+Th+Tv
21	Paso de Cortés	3723	2.74	137.2	13.1	6.0	<i>Pinus hartwegii</i>	Tv+J+Th+Tv
12	D2 4	3228	3.17	158.5	15.2	6.4	<i>Abies religiosa</i>	Tv+J
39	La Papa Acatzi	2964	3.22	5.6	0.5	5.0	<i>Pinus</i> sp.	Tm+Th+To+Tv
34	S Barranca Tlalquecotchcotl 2	3667	3.23	97.1	8.5	5.8	<i>Pinus hartwegii</i>	Tv+J+Th+Tv
37	Tlalcomajada E de Tectorre	3512	3.23	78.8	6.9	4.9	<i>Pinus</i> spp., <i>Abies religiosa</i>	Tv+J+Th+Tv
38	La Laguna Xahuehahuatlalco	3828	3.43	84.4	7.4	4.6	<i>Pinus hartwegii</i>	Tv+Th+Rd
18	Cruce el 8	3300	3.72	186.0	17.8	5.9	<i>Abies religiosa</i> , <i>Alnus</i> sp.	Th+ Tv +Bd
13	O 15	3336	3.72	186.0	17.8	6.0	<i>Abies religiosa</i>	Tv+J
9	Coronilla	3600	4.76	237.8	22.8	5.4	<i>Pinus hartwegii</i>	Th+L
	<b>Mínimo</b>	<b>2650</b>	<b>0.47</b>	<b>5.6</b>	<b>0.49</b>	<b>4.6</b>		
	<b>Promedio</b>	<b>3269</b>	<b>2.00</b>	<b>80.8</b>	<b>7.51</b>	<b>5.9</b>		
	<b>Máximo</b>	<b>3828</b>	<b>4.76</b>	<b>237.8</b>	<b>22.78</b>	<b>6.8</b>		
	<b>DE</b>	<b>306</b>	<b>1.08</b>	<b>51.1</b>	<b>4.9</b>	<b>0.52</b>		

P-disp= Fósforo disponible del suelo; COS= Carbono orgánico del suelo; MOS= Materia orgánica del suelo. DE= Desviación estándar. Datos ordenados conforme asciende el P-disponible. Datos ordenados conforme asciende el P-disponible.

**Cuadro 6.** Porcentajes de N y P en tejido foliar y su relación con la fertilidad del suelo y valor de calidad de suelo.

Sitio	Nombre	Altitud _m snm_	UTM NAD27		VCSBq	VCSQ	VCSF	VCST	NFE	N-foliar	P-foliar	C-lábil	CO <sub>2</sub> /CBM	C:N	Vegetación	US	HS
			X	Y													
39	La Papa Acatzi	2964	546875	2121540	M	B	B	MB	A	0.57	0.13	0.61	2.89	3	<i>Pinus</i> sp.	M1	10
29	Barranca Apaxco	2834	532177	2094455	B	MB	M	MB	MA	0.99	0.15	0.03	4.80	39	<i>Pinus</i> spp., <i>Abies religiosa</i> , <i>Quercus</i> sp., <i>Alle</i> , <i>Cupressus lusitanica</i> , <i>Cornus</i> sp.	M5	10
36	Chalchoapa NE de Tettere	3696	542010	2121193	B	B	MB	B	M	0.84	0.16	0.01	96.06	58	<i>Pinus hartwegii</i>	B2	12
34	S Barranca Tlalquecotchcotti 2	3667	541942	2115007	B	B	M	B	A	1.03	0.18	0.02	14.00	25	<i>Pinus hartwegii</i>	C1	11
31	S de El salto	3099	534478	2096137	B	MB	MA	B	A	0.75	0.13	0.06	4.39	96	<i>Pinus</i> sp., <i>Abies religiosa</i> .	D3	10
33	SE Barranca Tlalquecotchcotti	3281	543181	2114683	B	B	A	B	A	0.73	0.15	0.14	6.44	25	<i>Abies religiosa</i> , <i>Pinus</i> sp., <i>Cupressus lusitanica</i> cultivo y pastizal	C1	11
25	Pela Gallina	3615	538910	2110546	MB	B	M	B	A	1.04	0.15	0.01	96.06	16	<i>Pinus hartwegii</i>	C1	12
28	La Ventana	3127	544221	2109851	B	B	M	M	A	0.76	0.14	0.23	9.25	13	<i>Pinus</i> sp.	C1	10
35	SW Barranca Tlalquecotchcotti	3540	541221	2114562	B	B	A	M	A	0.90	0.17	0.00	96.06	32	<i>Pinus hartwegii</i> , <i>Abies religiosa</i>	B2	12
27	Agua Escondida	3333	542286	2110002	B	B	A	M	A	0.76	0.12	0.02	11.75	15	<i>Pinus</i> spp.	C1	11
37	Tlalcomajada E de Tettere	3512	542529	2121800	M	B	M	M	M	0.66	0.13	0.03	14.00	36	<i>Pinus</i> spp., <i>Abies religiosa</i>	C1	12
32	S Barranca Tlalquecotchcotti 1	3425	542103	2114526	A	B	A	M	A	0.91	0.15	0.04	6.44	18	<i>Abies religiosa</i> , <i>Pinus hartwegii</i>	C1	11
30	N Barranca Mata Leones	3312	536262	2097553	B	B	A	M	A	0.99	0.09	0.04	6.44	49	<i>Abies religiosa</i> , <i>Pinus hartwegii</i>	C1	10
22	O 16	3225	532250	2102150	M	M	M	M	M	0.60	0.18	1.09	0.22	62	<i>Abies religiosa</i>	C1	10
23	D 14	2800	529850	2101950	A	M	M	M	M	0.89	0.07	8.10	0.03	19	<i>Pinus montezumae</i>	D3	10
24	W de D 14	2650	529032	2101200	A	B	B	M	M	1.40	0.06	11.27	0.01	25	<i>Pinus montezumae</i>	M5	10
38	La Laguna Xahuehualtaco	3828	541183	2121616	M	M	M	M	M	0.81	0.16	0.03	5.57	30	<i>Pinus hartwegii</i>	B2	12
3	F 5	3522	534939	2110074	A	M	B	M	M	1.73	0.07	3.64	0.02	11	<i>Pinus hartwegii</i>	C1	11
20	Pasiontitla	2900	530800	2114850	M	M	M	M	M	1.52	0.17	3.42	0.06	7	<i>Pinus patula</i> , <i>Pinus pseudostrabus</i> , <i>Pinus Teocote</i>	I3	10
5	O 18	2932	531440	2112175	M	A	B	M	MA	1.32	0.07	0.25	1.71	9	<i>Abies religiosa</i>	I2	10
26	La Venta	3418	541056	2110845	M	B	MA	M	M	0.86	0.11	0.04	5.94	16	<i>Pinus</i> spp.	C1	11
10	O1 3	3398	533785	2111786	M	M	B	M	M	1.79	0.05	0.70	0.15	23	<i>Abies religiosa</i>	C1	10
4	O 17	2918	530582	2112415	A	A	B	M	M	1.48	0.09	9.62	0.02	7	<i>Pinus montezumae</i> , <i>Pinus pseudostrabus</i>	I3	10
1	O 1	3250	533236	2108833	B	MA	B	M	A	1.44	0.10	0.59	0.58	11	<i>Abies religiosa</i> , <i>Pinus montezumae</i>	C1	10
12	D2 4	3228	532351	2106898	M	MA	MB	M	A	1.82	0.06	0.78	0.11	35	<i>Abies religiosa</i>	D3	10
11	F 2	3585	534603	2111225	A	A	M	M	M	1.51	0.07	1.16	0.05	28	<i>Pinus hartwegii</i> , <i>Abies religiosa</i>	C1	11
17	O 2	3300	533500	2109750	MA	M	B	M	M	1.84	0.05	5.67	0.01	32	<i>Abies religiosa</i>	C1	10
14	O 14	3440	533121	2106124	A	A	M	M	M	1.39	0.06	1.55	0.04	21	<i>Abies religiosa</i>	D3	10
8	Cuixochitla	2710	527927	2114839	A	A	B	M	MA	0.98	0.05	7.24	0.03	22	<i>Pinus teocote</i>	M4	10
21	Paso de Cortés	3723	536125	2111200	M	A	M	M	M	1.56	0.08	0.85	0.06	30	<i>Pinus hartwegii</i>	C1	11
2	F 1	3288	533304	2111309	M	A	A	M	M	1.37	0.06	1.79	0.05	20	<i>Pinus hartwegii</i> , <i>Pinus pseudostrabus</i> , <i>Abies religiosa</i> , <i>Quercus</i> sp.	C1	10
15	D 5	3390	532932	2106452	A	M	M	A	M			3.75	0.03	25	<i>Abies religiosa</i>	D3	10
16	F 11	3550	534716	2111918	A	A	M	A	A	1.35	0.07	2.30	0.03	26	<i>Pinus hartwegii</i> , <i>Abies religiosa</i>	C1	11
19	Las Anomias	3000	531400	2115570	A	A	M	A	M	1.47	0.07	2.34	0.02	29	<i>Abies religiosa</i>	I2	10
6	D 11	2965	532240	2107789	M	MA	B	A	MA	1.33	0.10	0.91	0.24	11	<i>Abies religiosa</i> , <i>Pinus</i> sp., <i>Cupressus lusitanica</i>	D3	10
13	O 15	3336	533082	2106584	M	MA	M	A	MA	1.41	0.06	0.61	0.13	35	<i>Abies religiosa</i>	D3	10
18	Cruce el 8	3300	532250	2115850	M	MA	M	A	MA	1.57	0.06	0.55	0.09	27	<i>Abies religiosa</i> , <i>Alnus</i> sp.	I2	10
7	D 3	2832	530240	2108542	A	MA	M	A	A	1.41	0.05	0.27	0.42	29	<i>Abies religiosa</i>	I3	10
9	Coronilla	3600	533552	2117782	A	MA	A	MA	A	1.38	0.08	0.98	0.03	46	<i>Pinus hartwegii</i>	I1	11
	<b>Mínimo</b>									<b>0.6</b>	<b>0.045</b>	<b>0.004</b>	<b>0.012</b>	<b>2.9</b>			
	<b>Promedio</b>									<b>1.2</b>	<b>0.1</b>	<b>1.8</b>	<b>9.9</b>	<b>27.2</b>			
	<b>Máximo</b>									<b>1.8</b>	<b>0.2</b>	<b>11.3</b>	<b>96.1</b>	<b>95.8</b>			
	<b>DE</b>									<b>0.4</b>	<b>0.04</b>	<b>2.8</b>	<b>25.5</b>	<b>17.4</b>			

VCS= Valor de Calidad del Suelo; Bq= de parámetro bioquímicos; Q= de parámetros químicos; F= de parámetros físicos; T= Total; CO<sub>2</sub>/CBM= relación de la producción de CO<sub>2</sub> del suelo y carbono de la biomasa microbiana del suelo; C:N= relación carbono-nitrógeno del suelo; Nf y Pf= Nitrógeno y Fósforo en tejido foliar; . = Sin determinar; US= Unidad de suelo reportada por Miehlich (1980) (Cuadro 2); HS= humedad del suelo reportada por INEGI; DE= desviación estándar; MB= Muy bajo; B= Bajo; M= Medio; A= Alto; MA= Muy alto.

**Cuadro 7.** Calidad del suelo por parámetros químicos y características del sitio.

Sitio	Nombre	Altitud	Vegetación	US	HS	VCSQ	Clase
		<u>m snm</u>			<u>meses</u>		
31	S de El Salto	3099	<i>P. sp.</i> , <i>A. religiosa</i> .	D3	10	-10.13	MB
29	Barranca Apapaxco	2834	<i>P. spp.</i> , <i>A. religiosa</i> , <i>Quercus sp.</i> , <i>Alnus sp.</i> , <i>Cupressus lusitanica</i> , <i>Cornus sp.</i>	M5	10	-9.02	MB
39	La Papa Acatzi	2964	<i>Pinus sp.</i>	M1	10	-7.94	B
33	SE Barranca Tlalquecotchcotl	3281	<i>A. religiosa</i> , <i>P. sp.</i> , <i>Cupressus lusitanica</i> cultivo y pastizal	C1	11	-6.50	B
34	S Barranca Tlalquecotchcotl 2	3667	<i>P. hartwegii</i>	C1	11	-6.47	B
32	S Barranca Tlalquecotchcotl 1	3425	<i>A. religiosa</i> , <i>P. hartwegii</i>	C1	11	-4.89	B
27	Agua escondida	3333	<i>P. spp.</i>	C1	11	-4.32	B
28	La ventana	3127	<i>P. sp.</i>	C1	10	-3.57	B
26	La venta	3418	<i>P. spp.</i>	C1	11	-3.22	B
35	Suroeste barranca Tlalquecotchcotl	3540	<i>P. hartwegii</i> , <i>Abies religiosa</i>	B2	12	-3.03	B
25	Pela gallina	3615	<i>P. hartwegii</i>	C1	12	-2.81	B
36	Chalchoapa NE de Tectorre	3696	<i>P. hartwegii</i>	B2	12	-2.71	B
37	Tlalcomajada E de Tectorre	3512	<i>P. spp.</i> , <i>A. religiosa</i>	C1	12	-2.17	B
30	N Barranca Mata Leones	3312	<i>A. religiosa</i> , <i>P. hartwegii</i>	C1	10	-2.12	B
24	W de D 14	2650	<i>P. montezumae</i>	M5	10	-2.06	B
23	D 14	2800	<i>P. montezumae</i>	D3	10	-1.48	M
38	La Laguna Xahuehahuatualco	3828	<i>P. hartwegii</i>	B2	12	-1.25	M

VCSQ= Valor de calidad del suelo de las propiedades químicas; US= unidad de suelo reportada por Miehlich (1980), HS= duración de la humedad del suelo (INEGI, 2009b), VCS= valor de calidad de suelo de los parámetros químicos. MB= muy bajo; B= bajo; M= medio; A= alto; MA= muy alto. Datos ordenados conforme a la calidad.

**Cuadro 7 (Continuación).** Calidad del suelo por parámetros químicos y características del sitio.

Sitio	Nombre	Altitud	Vegetación	US	HS	VCSQ	Clase
		<u>_m snm_</u>			<u>_meses_</u>		
20	Pasiontitla	2900	<i>P. patula</i> , <i>P. pseudostrobus</i> , <i>P. teocote</i>	I3	10	-0.79	M
22	O 16	3225	<i>A. religiosa</i>	C1	10	-0.17	M
17	O 2	3300	<i>A. religiosa</i>	C1	10	0.68	M
3	F 5	3522	<i>P. hartwegii</i>	C1	11	0.95	M
15	D 5	3390	<i>A. religiosa</i>	D3	10	1.94	M
10	O1 3	3398	<i>A. religiosa</i>	C1	10	2.02	M
4	O 17	2918	<i>P. montezumae</i> , <i>P. pseudostrobus</i>	I3	10	2.23	A
16	F 11	3550	<i>P. hartwegii</i> , <i>A. religiosa</i>	C1	11	2.25	A
21	Paso de Cortés	3723	<i>P. hartwegii</i>	C1	11	2.39	A
11	F 2	3585	<i>P. hartwegii</i> , <i>A. religiosa</i>	C1	11	2.59	A
14	O 14	3440	<i>A. religiosa</i>	D3	10	2.76	A
19	Las Anomias	3000	<i>A. religiosa</i>	I2	10	2.94	A
5	O 18	2932	<i>A. religiosa</i>	I2	10	3.15	A
2	F 1	3288	<i>P. hartwegii</i> , <i>P. pseudostrobus</i> , <i>A. religiosa</i> , <i>Quercus</i> sp.	C1	10	3.29	A
8	Cuilochochitla	2710	<i>P. teocote</i>	M4	10	3.87	A
7	D 3	2832	<i>A. religiosa</i>	I3	10	5.12	MA
1	O 1	3250	<i>A. religiosa</i> , <i>P. montezumae</i>	C1	10	5.66	MA
18	Cruce El 8	3300	<i>A. religiosa</i> , <i>Alnus</i> sp.	I2	10	5.67	MA
12	D2 4	3228	<i>A. religiosa</i>	D3	10	5.82	MA
9	Coronilla	3600	<i>P. hartwegii</i>	I1	11	6.67	MA
13	O 15	3336	<i>A. religiosa</i>	D3	10	6.70	MA
6	D 11	2965	<i>A. religiosa</i> , <i>P. sp.</i> , <i>Cupressus lusitanica</i>	D3	10	7.94	MA

VCSQ= Valor de calidad del suelo de las propiedades químicas; US= unidad de suelo reportada por Miehlich (1980), HS= duración de la humedad del suelo (INEGI, 2009b), VCS= valor de calidad de suelo de los parámetros químicos. MB= muy bajo; B= bajo; M= medio; A= alto; MA= muy alto. Datos ordenados conforme a la calidad.

**Cuadro 8.** Cuadro resumen de los valores de calidad del suelo por parámetros bioquímicos, químicos, físicos y total del PN IztaPopo.

Sitio	Nombre	Altitud m snm	UTM NAD27		VCSBq	VCSQ	VCSF	VCST	Vegetación	US
			X	Y						
39	La Papa Acatzi	2964	546875	2121540	M	B	B	MB	<i>Pinus</i> sp.	M1
29	Barranca Apapaxco	2834	532177	2094455	B	MB	M	MB	<i>Pinus</i> spp., <i>Abies religiosa</i> , <i>Quercus</i> sp., <i>Aile</i> , <i>Cupressus lusitanica</i> , <i>Cornus</i> sp.	M5
36	Chalchoapa NE de Totorre	3696	542010	2121193	B	B	MB	B	<i>Pinus hartwegii</i>	B2
34	S Barranca Tlalquecotchcotl 2	3667	541942	2115007	B	B	M	B	<i>Pinus hartwegii</i>	C1
31	S de El salto	3099	534478	2096137	B	MB	MA	B	<i>Pinus</i> sp., <i>Abies religiosa</i> .	D3
33	SE Barranca Tlalquecotchcotl	3281	543181	2114683	B	B	A	B	<i>Abies religiosa</i> , <i>Pinus</i> sp., <i>Cupressus lusitanica</i> cultivo y pastizal	C1
25	Pela Gallina	3615	538910	2110546	MB	B	M	B	<i>Pinus hartwegii</i>	C1
28	La Ventana	3127	544221	2109851	B	B	M	M	<i>Pinus</i> sp.	C1
35	SW Barranca Tlalquecotchcotl	3540	541221	2114562	B	B	A	M	<i>Pinus hartwegii</i> , <i>Abies religiosa</i>	B2
27	Agua Escondida	3333	542286	2110002	B	B	A	M	<i>Pinus</i> spp.	C1
37	Tlalcomajada E de Totorre	3512	542529	2121800	M	B	M	M	<i>Pinus</i> spp., <i>Abies religiosa</i>	C1
32	S Barranca Tlalquecotchcotl 1	3425	542103	2114526	A	B	A	M	<i>Abies religiosa</i> , <i>Pinus hartwegii</i>	C1
30	N Barranca Mata Leones	3312	536262	2097553	B	B	A	M	<i>Abies religiosa</i> , <i>Pinus hartwegii</i>	C1
22	O 16	3225	532250	2102150	M	M	M	M	<i>Abies religiosa</i>	C1
23	D 14	2800	529850	2101950	A	M	M	M	<i>Pinus montezumae</i>	D3
24	W de D 14	2650	529032	2101200	A	B	B	M	<i>Pinus montezumae</i>	M5
38	La Laguna Xahuehahuatlaco	3828	541183	2121616	M	M	M	M	<i>Pinus hartwegii</i>	B2
3	F 5	3522	534939	2110074	A	M	B	M	<i>Pinus hartwegii</i>	C1
20	Pasiontitla	2900	530800	2114850	M	M	M	M	<i>Pinus patula</i> , <i>Pinus pseudostrobus</i> , <i>Pinus Teocote</i>	I3
5	O 18	2932	531440	2112175	M	A	B	M	<i>Abies religiosa</i>	I2
26	La Venta	3418	541056	2110845	M	B	MA	M	<i>Pinus</i> spp.	C1
10	O1 3	3398	533785	2111786	M	M	B	M	<i>Abies religiosa</i>	C1
4	O 17	2918	530582	2112415	A	A	B	M	<i>Pinus montezumae</i> , <i>Pinus pseudostrobus</i>	I3
1	O 1	3250	533236	2108833	B	MA	B	M	<i>Abies religiosa</i> , <i>Pinus montezumae</i>	C1
12	D2 4	3228	532351	2106898	M	MA	MB	M	<i>Abies religiosa</i>	D3
11	F 2	3585	534603	2111225	A	A	M	M	<i>Pinus hartwegii</i> , <i>Abies religiosa</i>	C1
17	O 2	3300	533500	2109750	MA	M	B	M	<i>Abies religiosa</i>	C1
14	O 14	3440	533121	2106124	A	A	M	M	<i>Abies religiosa</i>	D3
8	Cuilochochitla	2710	527927	2114839	A	A	B	M	<i>Pinus teocote</i>	M4
21	Paso de Cortés	3723	536125	2111200	M	A	M	M	<i>Pinus hartwegii</i>	C1
2	F 1	3288	533304	2111309	M	A	A	M	<i>Pinus hartwegii</i> , <i>Pinus pseudostrobus</i> , <i>Abies religiosa</i> , <i>Quercus</i> sp.	C1
15	D 5	3390	532932	2106452	A	M	M	A	<i>Abies religiosa</i>	D3
16	F 11	3550	534716	2111918	A	A	M	A	<i>Pinus hartwegii</i> , <i>Abies religiosa</i>	C1
19	Las Anomias	3000	531400	2115570	A	A	M	A	<i>Abies religiosa</i>	I2
6	D 11	2965	532240	2107789	M	MA	B	A	<i>Abies religiosa</i> , <i>Pinus</i> sp., <i>Cupressus lusitanica</i>	D3
13	O 15	3336	533082	2106584	M	MA	M	A	<i>Abies religiosa</i>	D3
18	Cruce el 8	3300	532250	2115850	M	MA	M	A	<i>Abies religiosa</i> , <i>Alnus</i> sp.	I2
7	D 3	2832	530240	2108542	A	MA	M	A	<i>Abies religiosa</i>	I3
9	Coronilla	3600	533552	2117782	A	MA	A	MA	<i>Pinus hartwegii</i>	I1

VCS=Valor de Calidad de suelo; Bq= De parámetros bioquímicos; Q= De parámetros químicos; F= De parámetros físicos; US= Unidad de suelo (Miehlich, 1980). Datos ordenados conforme aumenta el VCS total.

**Cuadro 9.** Intervalos de estadio nutrimental propuestos para las especies de *Pinus* y *Abies religiosa* del Parque Nacional Zoquiapan y Anexas.

<i>Pinus</i>					<i>Abies religiosa</i>			
Elemento	Nivel Nutrimental				Elemento	Nivel Nutrimental		
	Muy Bajo	Bajo	Suficiente	Alto		Bajo	Suficiente	Alto
	%					%		
P	≤0.06	>0.06-0.09	>0.09-0.13	>0.13-0.262	P	≤0.093	>0.093 a 0.203	>0.203 a 0.262
N	≤0.8	>0.8-1.2	>1.2-1.5	>1.5-2.2	N	≤1.340	>1.340 a 1.583	>1.583 a 2.033
Ca	≤ 0.02	>0.02-0.05	>0.05-0.091	>0.091-0.562	Ca	≤0.283	>0.283 a 0.720	>0.720 a 1.673
K	≤ 0.3	>0.3-0.5	>0.5-1.20	>1.20-2.80	K	≤1.044	>1.044 a 2.489	>2.489 a 2.791
Mg	≤ 0.05	> 0.05-0.09	> 0.09-0.20	> 0.20-1.145	Mg	≤0.112	>0.112 a 0.965	>0.965 a 1.291

Cuadro tomado de Valderrábano-Gómez (2005)

**Cuadro 10.** Contenido nutrimental de N y P en tejido foliar en sitios con *Abies religiosa* en el PN IztaPopo.

Sitio	Nombre	N-foliar	P-foliar	Vegetación
22	O 16	0.60 <sub>B</sub>	0.179 <sub>S</sub>	<i>Abies religiosa</i>
33	SE Barranca Tlalquecotchtotl	0.73 <sub>B</sub>	0.151 <sub>S</sub>	<i>Abies religiosa</i> , <i>Pinus</i> sp., <i>Cupressus lusitanica</i> cultivo y pastizal
32	S Barranca Tlalquecotchtotl 1	0.91 <sub>B</sub>	0.146 <sub>S</sub>	<i>Abies religiosa</i> , <i>Pinus hartwegii</i>
30	N Barranca Mata Leones	0.99 <sub>B</sub>	0.089 <sub>B</sub>	<i>Abies religiosa</i> , <i>Pinus hartwegii</i>
5	O 18	1.32 <sub>B</sub>	0.074 <sub>B</sub>	<i>Abies religiosa</i>
6	D 11	1.33 <sub>B</sub>	0.103 <sub>S</sub>	<i>Abies religiosa</i> , <i>Pinus</i> sp., <i>Cupressus lusitanica</i>
14	O 14	1.39 <sub>S</sub>	0.056 <sub>B</sub>	<i>Abies religiosa</i>
13	O 15	1.41 <sub>S</sub>	0.061 <sub>B</sub>	<i>Abies religiosa</i>
7	D 3	1.41 <sub>S</sub>	0.053 <sub>B</sub>	<i>Abies religiosa</i>
1	O 1	1.44 <sub>S</sub>	0.097 <sub>S</sub>	<i>Abies religiosa</i> , <i>Pinus montezumae</i>
19	Las Anomias	1.47 <sub>S</sub>	0.065 <sub>B</sub>	<i>Abies religiosa</i>
18	Cruce el 8	1.57 <sub>S</sub>	0.056 <sub>B</sub>	<i>Abies religiosa</i> , <i>Alnus</i> sp.
10	O1 3	1.79 <sub>A</sub>	0.048 <sub>B</sub>	<i>Abies religiosa</i>
12	D2 4	1.82 <sub>A</sub>	0.064 <sub>B</sub>	<i>Abies religiosa</i>
17	O 2	1.84 <sub>A</sub>	0.048 <sub>B</sub>	<i>Abies religiosa</i>
15	D 5	.	.	<i>Abies religiosa</i>
	<b>Promedio</b>	<b>1.33</b>	<b>0.09</b>	
	<b>Máximo</b>	<b>1.84</b>	<b>0.18</b>	
	<b>DE</b>	<b>0.38</b>	<b>0.04</b>	

N y P- foliar= nitrógeno y fósforo en el tejido foliar; DE= desviación estándar. Datos ordenados conforme al N-foliar; B= bajo; S= suficiente; A= Alto.

**Cuadro 11.** Contenido nutrimental de N y P en tejido foliar en sitios con especies de *Pinus* en el PN IztaPopo.

Sitio	Nombre	%		Vegetación
		N-foliar	P-foliar	
37	Tlalcomajada E de Tetorre	0.66 <sub>MB</sub>	0.131 <sub>A</sub>	<i>Pinus</i> spp., <i>Abies religiosa</i>
31	S de El salto	0.75 <sub>MB</sub>	0.135 <sub>A</sub>	<i>Pinus</i> sp., <i>Abies religiosa</i> .
28	La Ventana	0.76 <sub>MB</sub>	0.137 <sub>A</sub>	<i>Pinus</i> sp.
27	Agua Escondida	0.76 <sub>MB</sub>	0.122 <sub>S</sub>	<i>Pinus</i> spp.
38	La Laguna Xahuehahuatlalco	0.81 <sub>B</sub>	0.156 <sub>A</sub>	<i>Pinus hartwegii</i>
36	Chalchoapa NE de Tetorre	0.84 <sub>B</sub>	0.158 <sub>A</sub>	<i>Pinus hartwegii</i>
26	La Venta	0.86 <sub>B</sub>	0.112 <sub>S</sub>	<i>Pinus</i> spp.
23	D 14	0.89 <sub>B</sub>	0.074 <sub>B</sub>	<i>Pinus montezumae</i>
35	SW Barranca Tlalquecotchcotl	0.90 <sub>B</sub>	0.165 <sub>A</sub>	<i>Pinus hartwegii</i> , <i>Abies religiosa</i>
8	Cuilochochitla	0.98 <sub>B</sub>	0.045 <sub>MB</sub>	<i>Pinus teocote</i>
29	Barranca Apapaxco	0.99 <sub>B</sub>	0.147 <sub>A</sub>	<i>Pinus</i> spp. <i>Abies religiosa</i> , <i>Quercus</i> sp., <i>Aile</i> , <i>Cupressus lusitanica</i> , <i>Cornus</i> sp.
34	S Barranca Tlalquecotchcotl 2	1.03 <sub>B</sub>	0.184 <sub>A</sub>	<i>Pinus hartwegii</i>
25	Pela Gallina	1.04 <sub>B</sub>	0.150 <sub>A</sub>	<i>Pinus hartwegii</i>
16	F 11	1.35 <sub>S</sub>	0.068 <sub>B</sub>	<i>Pinus hartwegii</i> , <i>Abies religiosa</i>
2	F 1	1.37 <sub>S</sub>	0.064 <sub>B</sub>	<i>Pinus hartwegii</i> , <i>Pinus pseudostrobus</i> , <i>Abies religiosa</i> , <i>Quercus</i> sp.
9	Coronilla	1.38 <sub>S</sub>	0.082 <sub>B</sub>	<i>Pinus hartwegii</i>
24	W de D 14	1.40 <sub>S</sub>	0.058 <sub>MB</sub>	<i>Pinus montezumae</i>
4	O 17	1.48 <sub>S</sub>	0.090 <sub>B</sub>	<i>Pinus montezumae</i> , <i>Pinus pseudostrobus</i>
11	F 2	1.51 <sub>A</sub>	0.070 <sub>B</sub>	<i>Pinus hartwegii</i> , <i>Abies religiosa</i>
20	Pasiontitla	1.52 <sub>A</sub>	0.169 <sub>A</sub>	<i>Pinus patula</i> , <i>Pinus pseudostrobus</i> , <i>Pinus Teocote</i>
21	Paso de Cortés	1.56 <sub>A</sub>	0.077 <sub>B</sub>	<i>Pinus hartwegii</i>
3	F 5	1.73 <sub>A</sub>	0.074 <sub>B</sub>	<i>Pinus hartwegii</i>
	<b>Mínimo</b>	<b>0.66</b>	<b>0.05</b>	
	<b>Promedio</b>	<b>1.12</b>	<b>0.11</b>	
	<b>Máximo</b>	<b>1.73</b>	<b>0.18</b>	
	<b>DE</b>	<b>0.33</b>	<b>0.04</b>	

N y P- foliar= nitrógeno y fósforo en el tejido foliar; DE= desviación estándar. Datos ordenados conforme al N-foliar; MB= muy bajo; B= bajo; S= suficiente; A= Alto.



**Cuadro 12.** Volumen maderable en bosques de Pinus del PN IztaPopo.

Sitio	Nombre	DR	DA	A	pH	Mg	Na	CO <sub>2</sub>	CBM	Nt	COS	Pd	CBM:COS	Clábil	CO <sub>2</sub> :CBM	C:N	Nf	Pf	Clase de calidad de suelo	Volmad m <sup>3</sup> ha <sup>-1</sup>
		g cm <sup>-3</sup>	%			cmol kg <sup>-1</sup>	kg ha <sup>-1</sup> día <sup>-1</sup>		Mg ha <sup>-1</sup>					%		%				
36	Chalchoapa NE de Tetorre	3.60	1.07	73.64	5.2	0.882	0.462	415	0.004	0.970	56.	2.115	0.0001	0.008	96.1	58	0.84	0.158	B	202.7
16	*F 11	2.21	1.10	70.00	5.4	0.812	0.954	86.5	2.974	4.824	126.5	2.529	0.0235	2.298	0.029	26	1.35	0.068	A	1386.7
25	Pela Gallina	1.94	1.07	79.64	6.1	0.787	0.514	415	0.004	3.742	58.91	2.115	0.0001	0.007	96.1	16	1.04	0.150	B	1486.8
27	Agua Escondida	1.59	1.08	77.64	5.2	1.515	0.844	200	0.017	5.683	85.3	2.677	0.0002	0.020	11.8	15	0.76	0.122	M	1929.2
35	SW Barranca Tlalquecotchtotl	2.27	0.84	67.28	5.6	0.790	0.714	415	0.004	3.659	115.4	2.115	0.00004	0.004	96.1	32	0.90	0.165	M	2662.09
29	Barranca Apapaxco	2.16	1.02	71.64	5.9	1.422	0.663	140	0.029	2.495	97.1	2.137	0.0003	0.030	4.8	39	0.99	0.147	MB	3360.5
28	La Ventana	2.13	1.29	79.28	5.6	0.738	0.602	230	0.025	0.832	10.9	1.384	0.0023	0.228	9.3	13	0.76	0.137	M	3645.5
34	S Barranca Tlalquecotchtotl 2	2.32	1.26	69.64	5.8	1.473	0.695	295	0.021	3.881	97.1	3.229	0.0002	0.022	14.0	25	1.03	0.184	B	4744.3
37	Tlalcomajada E de Tetorre	2.63	0.91	69.28	4.9	1.145	0.551	295	0.021	2.218	78.9	3.229	0.0003	0.027	14.0	36	0.66	0.131	M	7593.2
26	La Venta	1.35	1.08	77.42	6.2	0.810	0.584	170	0.029	4.158	65.2	1.665	0.0004	0.044	5.9	16	0.86	0.112	M	7791.5
3	F 5	2.43	1.03	68.00	5.4	0.554	2.544	37.75	1.656	3.869	43.8	0.877	0.0378	3.640	0.023	11	1.73	0.074	M	8463.7
38	La Laguna Xahuehahuatitlco	2.45	0.84	73.42	4.6	1.049	0.677	155	0.028	2.772	84.5	3.431	0.0003	0.033	5.6	30	0.81	0.156	M	<b>14960.1</b>

DR= densidad real; DA= densidad aparente; A= arena; pH= pH activo; CO<sub>2</sub>= producción de CO<sub>2</sub> del suelo; CBM= carbono de la biomasa microbiana; Nt= nitrógeno total del suelo; COS= carbono orgánico del suelo; Pd= fósforo disponible; CBM:COS= relación carbono de la biomasa microbiana y carbono orgánico del suelo; Clábil= carbono lábil del suelo; CO<sub>2</sub>:CBM= relación de producción de CO<sub>2</sub> del suelo y carbono en biomasa microbiana; C:N= relación carbono-nitrógeno; Nf y Pf= nitrógeno y fósforo del tejido foliar; Volmad= volumen maderable; B= baja; M= media; A= alta.

Cuadro ordenado de acuerdo con el volumen maderable.

\*El sitio F 11 está ubicado en los márgenes de zonas de cultivo y pastizal con grandes claros, lo que explica la baja productividad forestal.

**Cuadro 13.** Volumen maderable en bosques de *Abies religiosa*.

Sitio	Nombre	DR	DA	Are	pH	Mg	Na	CO <sub>2</sub>	CBM	Nt	COS	Pd	CBM: COS	Clábil	CO <sub>2</sub> :CBM	C:N	Nf	Pf	Clase de calidad de suelo	Volmad
		<u>g cm<sup>-3</sup></u>	<u>%</u>			<u>cmol kg<sup>-1</sup></u>		<u>kg ha<sup>-1</sup> día<sup>-1</sup></u>	<u>Mg ha<sup>-1</sup></u>					<u>%</u>			<u>%</u>			<u>m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup></u>
33	*SE Barranca Tlalquecotchcotl	1.90	0.81	71.28	6.3	1.007	0.458	240	0.037	1.109	27.5	2.002	0.0014	0.135	6.437	25	0.73	0.151	B	4099.6
6	*D 11	2.48	0.92	76.00	6.5	3.122	3.338	145.6	0.599	5.791	65.3	1.306	0.0092	0.910	0.243	11	1.33	0.103	A	6684.5
32	S Barranca Tlalquecotchcotl 1	1.50	1.12	76.36	5.7	1.292	0.625	240	0.037	4.990	91.6	2.002	0.0004	0.041	6.437	18	0.91	0.146	M	14404.6
5	O 18	2.18	0.99	66.00	6.8	2.740	1.669	145	0.085	3.738	33.6	0.672	0.0025	0.252	1.710	9	1.32	0.074	M	20297.6
22	O 16	2.01	1.34	82.00	6.2	1.203	0.715	185.5	0.860	1.259	78.1	1.563	0.0110	1.089	0.216	62	0.60	0.179	M	<b>26218.8</b>

DR= densidad real; DA= densidad aparente; A= arena; pH= pH activo; CO<sub>2</sub>= producción de CO<sub>2</sub> del suelo; CBM= carbono de la biomasa microbiana; Nt= nitrógeno total del suelo; COS= carbono orgánico del suelo; Pd= fósforo disponible; CBM: COS= relación carbono de la biomasa microbiana y carbono orgánico del suelo; Clábil= carbono lábil del suelo; CO<sub>2</sub>:CBM= relación de producción de CO<sub>2</sub> del suelo y carbono en biomasa microbiana; C:N= relación carbono-nitrógeno; Nf y Pf= nitrógeno y fósforo del tejido foliar; Volmad= volumen maderable; B= baja; M= media.

Cuadro ordenado de acuerdo con el volumen maderable.

\*Sitios en zonas limítrofes de pastizal con grandes claros, lo que explica la baja productividad forestal.

## Apéndice 2

- a) Procedimiento para obtener el nivel de fertilidad edáfica.- Los intervalos del nivel de fertilidad edáfica (NFE) referidos en el apartado 2.4.4 se establecieron al comparar los contenidos nutrimentales mínimo, medio y máximo de algunas zonas del país con bosque de coníferas y con los valores encontrados en esta investigación. Si el valor del nutrimento en el suelo del PN IztaPopo fue menor al mínimo de todas las zonas se clasificó como bajo (B), la clase de fertilidad media (M) propuesta se estableció cuando los valores del nutrimento en suelos del PN IztaPopo se encontraron entre el mínimo y la media de todas las zonas. La clase alta (A) se determinó cuando el valor nutrimental del PN IztaPopo fue del valor medio al máximo de todas las zonas; y finalmente, la clase muy alta (MA) se constituyó cuando el nutrimento del suelo en el PN IztaPopo fue mayor del contenido máximo promedio de todas las zonas (Cuadros 24 y 25). A manera de ejemplo, los sitios que tuvieron Na intercambiable menor o igual a  $0.27 \text{ cmol kg}^{-1}$  se clasificaron con fertilidad B, mayor de  $0.27$  a  $0.4 \text{ cmol kg}^{-1}$  M, mayor de  $0.4$  a  $0.5 \text{ cmol kg}^{-1}$  A y mayor a  $0.5 \text{ cmol kg}^{-1}$  MA.

## Apéndice 3

### A. Análisis de regresión múltiple para N-total, altitud, precipitación y temperatura media anual.

Análisis de Regresión Múltiple

-----  
Variable dependiente: Ntots  
-----

Parámetro	Estimación	Error estándar	Estadístico T	P-Valor
CONSTANTE	2.43021	12.5874	0.193068	0.8480
msnm	0.00290053	0.00312964	0.926794	0.3604
ppmm	-0.00610356	0.00343997	-1.7743	0.0847
TempC	-0.214944	0.402113	-0.534536	0.5964

Análisis de Varianza

Fuente	Suma de cuadrados	GL	Cuadrado medio	Cociente-F	P-Valor
Modelo	17.724	3	5.90801	2.50	0.0754
Residuo	82.6666	35	2.3619		
Total (Corr.)	100.391	38			

R-cuadrado = 17.6551 porcentaje

R-cuadrado (ajustado para g.l.) = 10.5969 porcentaje

Error estándar de est. = 1.53685

Error absoluto medio = 1.13636

Estadístico de Durbin-Watson = 1.65449 (P=0.1313)

Autocorrelación residual en Lag 1 = 0.137325

El StatAdvisor

-----  
La salida muestra los resultados del ajuste a un modelo de regresión lineal múltiple para describir la relación entre Ntots y 3 variables independientes. La ecuación del modelo ajustado es

$Ntots = 2.43021 + 0.00290053 * msnm - 0.00610356 * ppmm - 0.214944 * TempC$

Dado que el p-valor en la tabla ANOVA es inferior a 0.10, existe relación estadísticamente significativa entre las variables para un nivel de confianza del 90%.

El estadístico R-cuadrado indica que el modelo explica un 17.6551% de la variabilidad en Ntots. El estadístico R-cuadrado ajustado, que es más conveniente para comparar modelos con diferente números de variables independientes, es 10.5969%. El error estándar de la estimación muestra la desviación típica de los residuos que es 1.53685. Este valor puede usarse para construir los límites de predicción para las nuevas observaciones seleccionando la opción Informes del menú del texto. El error absoluto medio (MAE) de 1.13636

es el valor medio de los residuos. El estadístico Durbin-Watson (DW) examina los residuos para determinar si hay alguna correlación significativa basada en el orden en el que se han introducido los datos en el fichero. Dado que el p-valor es superior a 0.05, no hay indicio de autocorrelación serial en los residuos.

Para decidir la simplificación del modelo, tenga en cuenta que el p-valor más alto en las variables independientes es 0.5964, perteneciendo a TempC. Puesto que el p-valor es superior o igual a 0.10, este término no es estadísticamente significativo para un nivel de confianza del 90% o superior. Por tanto, debería considerar quitar TempC del modelo.

## B. Análisis de regresión múltiple para P-disponible, pH activo, altitud, precipitación y temperatura media anual.

### Análisis de Regresión Múltiple

Variable dependiente: Pdisp

Parámetro	Estimación	Error estándar	Estadístico T	P-Valor
CONSTANTE	5.88931	7.87104	0.748226	0.4595
msnm	0.000977829	0.00177772	0.550048	0.5859
pHac	-0.70702	0.302629	-2.33626	0.0255
ppmm	-0.0013359	0.00185167	-0.721457	0.4756
TempC	-0.153171	0.221046	-0.692936	0.4931

### Análisis de Varianza

Fuente	Suma de cuadrados	GL	Cuadrado medio	Cociente-F	P-Valor
Modelo	17.6876	4	4.42189	6.47	0.0006
Residuo	23.2195	34	0.682927		
Total (Corr.)	40.9071	38			

R-cuadrado = 43.2384 porcentaje

R-cuadrado (ajustado para g.l.) = 36.5606 porcentaje

Error estándar de est. = 0.826394

Error absoluto medio = 0.577388

Estadístico de Durbin-Watson = 1.61663 (P=0.0966)

Autocorrelación residual en Lag 1 = 0.108823

El StatAdvisor

-----

La salida muestra los resultados del ajuste a un modelo de regresión lineal múltiple para describir la relación entre Pdisp y 4 variables independientes. La ecuación del modelo ajustado es

$$Pdisp = 5.88931 + 0.000977829*msnm - 0.70702*pHac - 0.0013359*ppmm - 0.153171*TempC$$

Dado que el p-valor en la tabla ANOVA es inferior a 0.01, existe relación estadísticamente significativa entre las variables para un nivel de confianza del 99%.

El estadístico R-cuadrado indica que el modelo explica un 43.2384% de la variabilidad en Pdisp. El estadístico R-cuadrado ajustado, que es más conveniente para comparar modelos con diferente números de variables independientes, es 36.5606%. El error estándar de la estimación muestra la desviación típica de los residuos que es 0.826394. Este valor puede usarse para construir los límites de predicción para las nuevas observaciones seleccionando la opción Informes del menú del texto. El error absoluto medio (MAE) de 0.577388 es el valor medio de los residuos. El estadístico Durbin-Watson (DW) examina los residuos para determinar si hay alguna correlación significativa basada en el orden en el que se han introducido los datos en el fichero. Dado que el p-valor es superior a 0.05, no hay indicio de autocorrelación serial en los residuos.

Para decidir la simplificación del modelo, tenga en cuenta que el p-valor más alto en las variables independientes es 0.5859, perteneciendo a msnm. Puesto que el p-valor es superior o igual a 0.10, este término no es estadísticamente significativo para un nivel

### C. Análisis de regresión múltiple para del volumen maderable, conductividad eléctrica y valor total de calidad de suelo.

Análisis de Regresión Múltiple

-----  
Variable dependiente: VolMad  
-----

Parámetro	Estimación	Error estándar	Estadístico T	P-Valor
CONSTANTE	-639.261	5301.03	-0.120592	0.9057
CE	164057.0	85025.0	1.92951	0.0742
VCSTotal	75.3207	437.002	0.172358	0.8656

-----  
Análisis de Varianza  
-----

Fuente	Suma de cuadrados	GL	Cuadrado medio	Cociente-F	P-Valor
Modelo	2.46539E8	2	1.23269E8	2.85	0.0913
Residuo	6.04671E8	14	4.31908E7		
Total (Corr.)	8.51209E8	16			

R-cuadrado = 28.9633 porcentaje

R-cuadrado (ajustado para g.l.) = 18.8152 porcentaje

Error estándar de est. = 6571.97

Error absoluto medio = 4789.54

Estadístico de Durbin-Watson = 2.42541 (P=0.1584)

Autocorrelación residual en Lag 1 = -0.277414

El StatAdvisor

-----  
La salida muestra los resultados del ajuste a un modelo de regresión lineal múltiple para describir la relación entre VolMad y 2 variables independientes. La ecuación del modelo ajustado es

$$\text{VolMad} = -639.261 + 164057.0 * \text{CE} + 75.3207 * \text{VCSTotal}$$

Dado que el p-valor en la tabla ANOVA es inferior a 0.10, existe relación estadísticamente significativa entre las variables para un nivel de confianza del 90%.

El estadístico R-cuadrado indica que el modelo explica un 28.9633% de la variabilidad en VolMad. El estadístico R-cuadrado ajustado, que es más conveniente para comparar modelos con diferente número de variables independientes, es 18.8152%. El error estándar de la estimación muestra la desviación típica de los residuos que es 6571.97. Este valor puede usarse para construir los límites de predicción para las nuevas observaciones seleccionando la opción Informes del menú del texto. El error absoluto medio (MAE) de 4789.54 es el valor medio de los residuos. El estadístico Durbin-Watson (DW) examina los residuos para determinar si hay alguna correlación significativa basada en el orden en el que se han introducido los datos en el fichero. Dado que el p-valor es superior a 0.05, no hay indicio de autocorrelación serial en los residuos.

Para decidir la simplificación del modelo, tenga en cuenta que el p-valor más alto en las variables independientes es 0.8656, perteneciendo a VCSTotal. Puesto que el p-valor es superior o igual a 0.10, este término no es estadísticamente significativo para un nivel de confianza del 90% o superior. Por tanto, debería considerarse quitar VCSTotal del modelo.