Universidad Nacional Autónoma de México

Facultad de Estudios Superiores Zaragoza

Estimación del contenido de C en suelos de bosques templados y su relación con la calidad del suelo

Laboratorio de Edafología y Nutrición Vegetal

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

B I Ó L O G O

PRESENTA:

Héctor Maurilio León Maciel

Director de Tesis: Dr. Gerardo Cruz Flores

(FES Zaragoza, UNAM)

Proyecto financiado por DGAPA PAPIIT IN-228403

México, D.F. Marzo 2007

Easy PDF Creator is professional software to create PDF. If you wish to remove this line, buy it now.

Universidad Nacional Autónoma de México
UNAM
Biblioteca Central
Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

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 mis padres Maurilio Alfonso León Pérez e Isabel Maciel Castillo, por otorgarme de manera sublime, años de apoyo constante, cariño, dedicación y comprensión, lo que me permitió terminar mis estudios profesionales que constituyen uno de los legados más grandes que se pueden recibir, por lo que les viviré eternamente agradecido.

A mis hermanas Gaby, Laura y Silvia por su cariño y apoyo, ustedes son parte de todos mis logros, se que siempre estarán para apoyarme y espero que sepan que yo estaré siempre para ustedes, las quiero mucho.

A Dana Karen (mi angel) por ser mi inspiración y enseñarme lo especial y maravilloso que es ser tu padre, el cuidarte y el tratar de ser tu ejemplo, te amo. Karina Aguilar, sin tu apoyo y motivación no hubiera podido terminar mi carrera, te admiro por tu dedicación en tus proyectos y por cuidar con tanto coraje a nuestra hija; el objetivo logrado también es tuyo y debes de saber que la fuerza que me ayudo a conseguirlo fue tu apoyo.

A la Familia Aguilar Benítez por ser parte de mi familia, por sus consejos y apoyarme en momentos difíciles.

La graduación es el canto de victoria por todo lo que encierra y significa, es el final de una meta trazada y el logro de un sueño deseado. Es motivo de celebración pero a la vez, es un momento de reflexión para reanudar nuestro compromiso, ahora como profesionales en el campo laboral. Tenemos valores éticos y morales que se harán presentes en nuestra vida profesional si queremos sentirnos satisfechos; igualmente la honestidad, la amistad, la honradez y la responsabilidad, para experimentar en profundidad el verdadero sentido humano, ya que al decir del famoso Rebelais "ciencia sin conciencia es la ruina del alma".

(Héctor León, 2005).

Easy PDF Creator is professional software to create PDF. If you wish to remove this line, buy it now.

Agradecimientos

A la Facultad de Estudios Superiores Zaragoza, por ser la institución que me permitió recibir una educación superior con satisfacción y orgullo.

A la Universidad Nacional Autónoma de México por permitirme ser parte de ella, por permitirme sentirme orgulloso, afortunado y al mismo tiempo comprometido a convertirme en ciudadano ejemplar, comprometido a ser un elemento útil al bienestar social.

A todos los integrantes del laboratorio de Edafología y Nutrición Vegetal.

Al Dr. Gerardo Cruz Flores por ser mi profesor, director de tesis y un buen amigo.

A Ulises García Méndez por ser mi amigo a lo largo de toda la carrera y permitirme ser tu compadre, te aprecio de verdad.

A Yanet Astudillo, gracias por tu gran amistad y tu responsabilidad en cada uno de los proyectos en los que trabajamos juntos.

A Alejandra Corona y Rosario Granados por su amistad y apoyo en estos casi tres años de trabajo juntos.

A mi gran familia, León Pérez y Maciel Castillo, gracias a los miembros de estas grandes familias por los momentos felices y por su amistad.

A todos mis amigos de la FES Zaragoza, y mis amigos de la Vicente Guerrero.

A todos los profesores que durante la carrera ayudaron a mi formación.

A la M en C Lourdes Castillo Granada por su gran apoyo y asesoramiento en la técnica de extracción de ácidos húmicos y fúlvicos, así como la elaboración e interpretación de los espectros de infrarrojo (FT-IR) de estos ácidos.

A los profesores M en C Ramiro Ríos Gómez, la Dra. Esther Matiana García Amador, el M en C Efraín Ángeles Cervantes y a la M en C María de Jesús Sánchez Colín por sus consejos y comentarios para el mejoramiento del presente trabajo.

Easy PDF Creator is professional software to create PDF. If you wish to remove this line, buy it now.

ÍNDICE TEMÁTICO

	Página
Índice de Figuras	iii
Índice de Cuadros	v
1. RESUMEN	1
2. ABSTRACT	2
3. INTRODUCCIÓN	3
4. MARCO TEÓRICO	5
4.1 Concepto de suelo	5
4.2 Suelos forestales	7
4.3 Funciones del suelo	8
4.4 Calidad Edáfica	8
4.5 Indicadores de Calidad Edáfica	9
4.6 Propiedades Edáficas	11
4.6.1 Propiedades físicas	11
4.6.2 Propiedades químicas	14
4.6.3 Propiedades bioquímicas	23
4.7 Componentes orgánicos del suelo	24
4.7.1 Ciclo del Carbono	29
4.7.2 Ácidos orgánicos	31
4.8 Muestreo y análisis del suelo	32
4.9 Análisis estadístico	33
5. ANTECEDENTES Y JUSTIFICACIÓN	34
5.1 Antecedentes	
5.2 Justificación	34
	35
6. HIPÓTESIS	36
7. OBJETIVOS	36
8. ZONAS DE ESTUDIO	37
8.1 Parques Nacionales Izta-Popo y Zoquiapan y Anexas	37
8.2 Reserva de la Biosfera El Cielo	40
9. MATERIALES Y MÉTODOS	43
9.1 Zonas de estudio y toma de muestras	43
9.2 Análisis de Laboratorio	50
9.2.1 Análisis físicos de suelo	50
9.2.2 Análisis químicos de suelo	50
9.2.3 Análisis bioquímico de suelo	51
9.2.4 Análisis estadístico multivariado	51
9.3 Diagrama de Flujo	52
10. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	53
10.1 Condiciones fisiográficas	53

Easy PDF Creator is professional software to create PDF. If you wish to remove this line, buy it now.

a) Parque Nacional Izta-Popo 53
b) Parque Nacional Zoquiapan y Anexas 55
c) Reserva de la Biosfera El Cielo 56
10.2 Indicadores físicos 58
a) Parque Nacional Izta-Popo 58
b) Parque Nacional Zoquiapan y Anexas 59
c) Reserva de la Biosfera El Cielo 61
10.3 Indicadores químicos 63
a) Parque Nacional Izta-Popo 63
b) Parque Nacional Zoquiapan y Anexas 66
c) Reserva de la Biosfera El Cielo 68
10.4 Indicadores orgánicos y bioquímicos 72
a) Parque Nacional Izta-Popo 72
b) Parque Nacional Zoquiapan y Anexas 75
c) Reserva de la Biosfera El Cielo 77
10.5 Análisis de componentes principales 88

11. CONCLUSIONES 89
12. LITERATURA CITADA 91
13. ANEXOS 99
14. APÉNDICE 103

Easy PDF Creator is professional software to create PDF. If you wish to remove this line, buy it now.

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura	Página
1. Perfil de suelo y sus horizontes característicos	6
2. Composición en volumen de un suelo superficial	7
3. Interacción entre factores físicos y procesos biológicos en y sobre el suelo	10
4. Influencia del pH sobre la disponibilidad de nutrimentos para las plantas	15
5. Intercambio de cationes, complejo coloidal, solución del suelo y raíces	17
6. Transferencia anual de carbono entre litosfera, hidrosfera y atmósfera	28
7. Ciclo del carbono	30
8. Beneficios sociales de los servicios forestales	34
9. Mapa de El Parque Nacional Iztaccihuatl-Popocatepetl y Zoquiapan y Anexas	38
10. Mapa de la Reserva de la Biosfera El Cielo	40
11. Puntos de trabajo dentro de los Parques Nacionales Izta-Popo y Zoquiapan y Anexas	45
12. Puntos de trabajo dentro de la Reserva de la Biosfera El Cielo	46
13. Recorridos en campo para la determinación de sitios representativos	47
14. Tipos de suelos dominantes en las zonas de estudio	48
15. Descripción fisiográfica de los puntos de trabajo	48
16. Toma de muestras de suelo y mantillo	49
17. Almacenamiento de muestras de suelo, foliares y de mantillo	49
18. Extracción de Ácidos Húmicos y Fúlvicos	50
19. Determinación de C de Biomasa Microbiana mediante la evaluación de producción de CO_2	51
20. Suelos del Parque Nacional Iztaccihuatl-Popocatepetl	53
21. Suelo Leptosol y Luvisol de la RB El Cielo	56
22. Cantidades de N total en los suelos del Parque Nacional Izta-Popo	64

Easy PDF Creator is professional software to create PDF. If you wish to remove this line, buy it now.

23. Relación C:P y P disponible a lo largo del gradiante altitudinal del Parque Nacional Izta-Popo 66

24. Cantidades de N y COS en el gradiante altitudinal de Parque Nacional Zoquiapan y Anexas 67

25. Razón C:N y su relación con la cantidad de N total en el suelo de la Reserva de la Biosfera el Cielo 70

26. Fracciones de C en suelos del Parque Nacional Izta-Popo 73

27. Contenidos de C Orgánico del Suelo, C de Biomasa Microbiana y producción de CO_2 en el suelo del Parque Nacional IztaPopo 73

28. Proporciones de ácidos húmicos y fúlvicos en los suelos del Parque Nacional Izta-Popo 74

29. Fracciones de C Orgánico del Suelo en el Parque Nacional Zoquiapan y Anexas 76

30. Contenido de Ácidos Húmicos y Fúlvicos en suelos del Parque Nacional Zoquiapan y A 77

31. Fracciones de Carbono en suelos de la Reserva de la Biosfera El Cielo 78

32. Contenido de C de Biomasa Microbiana y liberación de CO_2 en el suelo de la Reserva de la Biosfera El Cielo 79

33. Contenido de Ácidos húmicos y fúlvicos de suelos de la Reserva de la Biosfera El Cielo 80

34. Contenidos de C total en cada Área Natural Protegida 81

35. Cantidades de C Orgánico del Suelo y C de mantillo en los suelos de las tres Áreas Naturales Protegidas 82

36. Evolución de CO_2 promedio en el suelo de cada Área Natural Protegida 83

37. Cantidades de C de Biomasa Microbiana en el suelo de cada Área Natural 84

38. Contenidos de A. Húmicos y Fúlvicos de la MOS en cada ANP 85

39. Espectros de los ácidos húmicos del PN Izta-Popo en pisos altitudinales 124

40. Espectros de los ácidos húmicos de la RB El Cielo en pisos altitudinales 125

41. Espectros de los ácidos Fúlvicos del PN Izta-Popo en pisos altitudinales 126

42. Espectros de los ácidos Fúlvicos de la RB El Cielo en pisos altitudinales 127

Easy PDF Creator is professional software to create PDF. If you wish to remove this line, buy it now.

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro	Página
1. Términos usuales para describir los intervalos de pH en el suelo	16
2. Elementos esenciales para el desarrollo de las plantas	20
3. Formas en que se presentan los macronutrimentos en suelos minerales	21
4. Cantidades medidas de materiales orgánicos en el suelo de pradera	25
5. Condiciones fisiográficas de los sitios de trabajo en el Parque Nacional Izta-Popo	54
6. Condiciones fisiográficas de los sitios de trabajo del Parque Nacional Zoquiapan	56
7. Condiciones fisiográficas de los sitios de trabajo en la Reserva de la Biosfera El Cielo	57
8. Propiedades físicas del suelo muestreado en el Parque Nacional Izta-Popo	59
9. Propiedades físicas del suelo muestreado en el Parque Nacional Zoquiapan y A.	60
10. Propiedades físicas del suelo muestreado en la Reserva de la Biosfera El Cielo	61
11. Propiedades físicas del suelo por Área Natural Protegida	62
12. Propiedades químicas del suelo del Parque Nacional Izta-Popo	64
13. Propiedades químicas del suelo del Parque Nacional Zoquiapan y A.	67
14. Propiedades químicas del suelo de la Reserva de la Biosfera El Cielo	69
15. Propiedades químicas del suelo por Área Natural Protegida	71
16.Componentes orgánicos y propiedades bioquímicas del suelo en el Parque Nacional Izta-Popo	72
17.Componentes orgánicos y propiedades bioquímicas del suelo en el Parque Nacional Zoquiapan y Anexas.	75
18.Componentes orgánicos y propiedades bioquímicas de la Reserva de la Biosfera El Cielo	78
19. Propiedades orgánicas y bioquímicas del suelo promedio de las tres Áreas Naturales Protegidas	81
20. Cantidades de Carbono, en suelos bajo géneros arbóreos dominantes	87

Easy PDF Creator is professional software to create PDF. If you wish to remove this line, buy it now.

1. RESUMEN

Se estimó la cantidad de carbono orgánico del suelo (COS) de bosques templados y la relación existente con la calidad del suelo (CS). El presente estudio se realizó de septiembre de 2004 a marzo de 2006 en los Parques Nacionales (PN) Izta-Popo y Zoquiapan y Anexas en el Eje Neovolcánico y la Reserva de la Biosfera El Cielo (RB El Cielo), en la Sierra Madre Oriental que son zonas con suelos de diferente origen geológico. En un gradiente altitudinal entre 1316 y 4100 m, se definieron unidades de muestreo colectando suelo de 0 a 10 y 0 a 20 cm, muestras de mantillo y foliares de las especies arbóreas dominantes. Para evaluar la CS, se determinaron contenidos de COS (Walkley y Black, 1934, citado en Jackson, 1964), C en mantillo (López-Rita y López-Mélida, 1990), de ácidos húmicos y fúlvicos (Celli, 1997), evolución de CO_2 y determinación de C de Biomasa Microbiana (CBM) (Powlson *et al.,* 1987) y en la definición de CS se usó el análisis de componentes principales (ACP). *Pinus, Abies y Quercus* son los géneros arbóreos dominantes en estas zonas. Los tipos de suelo representativos de PN Izta-Popo y de Zoquiapan fueron Andosoles y Regosoles y en la RB El Cielo Leptosoles y Rendzinas. La Conductividad Eléctrica se encontró entre 0.04 y 0.1 dS m^{-1} para las tres áreas naturales protegidas (ANP), con pH entre 4.5 y 5.5 y el grupo textural arenoso-migajonoso es el más frecuente. Los contenidos de C en mantillo y COS fueron mayores en la RB El Cielo debido al alto aporte de MO por la vegetación. La actividad microbiana, expresada como producción de CO_2 fue mayor en suelos de la RB con valores de hasta 415 kg ha^{-1} d^{-1}. Se encontró mayor cantidad de CBM en el PN Izta-Popo por una baja actividad microbiana en estos suelos, mientras en los de la RB esta actividad fue mayor. Los contenidos de C total son muy similares en los PN Izta-Popo y Zoquiapan, mientras que en la RB El Cielo fueron mayores. En los PN Izta-Popo y Zoquiapan, los procesos de descomposición de la materia orgánica del suelo generan humus más resistente a la degradación lo que puede atribuirse a una menor actividad microbiana reflejada en altos contenidos de CBM y que los productos carbonatados en suelos de la RB contribuyen favorablemente a la descomposición de la MOS. El diagnóstico realizado señala que, en los primeros 20 cm de profundidad, el promedio de captura o secuestro de carbono en las zonas estudiadas fue de 188.27 Mg ha^{-1}. Mediante el ACP se determinó que de 23 variables originales, existen 11 robustas, entre las que se encontraron la relación C:N, cantidad de ácidos fúlvicos, C total, evolución de CO_2 y C de mantillo, con lo que se confirma que la determinación de contenidos de COS en sus distintas fracciones y el grado de humificación de la MOS son una herramienta útil para definir la calidad edáfica.

Palabras clave: Carbono del suelo, ácidos húmicos y fúlvicos, bosques de Pinus y Abies, calidad del suelo.

Easy PDF Creator is professional software to create PDF. If you wish to remove this line, buy it now.

2. ABSTRACT

In this research was evaluated the soil organic carbon (SOC) content of temperate forests and relationships with the soil quality (SQ). The study was made between september 2004 and march of 2006 in Izta-Popo and Zoquiapan and Anexas National Parks (NP) on the Eje Neovolcánico and Biosphere Reserve "El Cielo" (BR El Cielo), on the Eastern Sierra Madre that are zones with soils of different geologic origin. In altitudinal gradient between 1316 and 4100 m, units sampling were defined collecting soils from 0 to 10 and 0 to 20 cm, litter and foliages samples of dominant arboreal species. In order to evaluate SQ, the SOC, carbon in litter and humics and fulvics acids contents, CO_2 production and determination of microbial biomass carbon (MBC) were determined, and in the SQ definition, the principal components analysis (PCA) was used. The dominant arboreal genus in these zones are *Pinus*, *Abies* and *Quercus*. The representative soils Izta-Popo and Zoquiapan NP was Andosols and Regosols and BR El Cielo Leptosols and Rendzines.The electrical conductivity was found of 0,04 to 0,1 dS m^{-1} in the three zones, with soil pH between 4.5 and 5.5 and textural group more frequent was sandy-loam. The litter C contents and SOC were greater in BR El Cielo due to the high contribution of soil organic matter (SOM). The microbial activity, expressed as CO_2 production were greater in soils of BR with values up to 415 kg ha^{-1} d^{-1}. Was greater amount MBC in Izta-Popo NP by low microbial activity in these soils, while in those of BR, this activity was greater. The total-C contents are very similar in the Izta-Popo and Zoquiapan NP, whereas in the BR were greater. In Izta-Popo and Zoquiapan NP, the decomposition processes of SOM generate humus more resistant to the degradation which can be attributed to a smaller microbial activity in high MBC contents and to that soil carbonated products of the BR contribute favorably to SOM decomposition. The results indicate that to the depth of 20 cm in the studied zones, the carbon capture was of 188,27 Mg ha^{-1}.

By means of the PCA it was determined that of 23 original variables, 11 is robust (rate C:N, fulvic acids contents, CO_2 production, C-total, and litter C), with which it is confirmed that the determination of SOC contents of in their different fractions and the degree from humificación of the SOM are a useful tool to define soil quality.

Key words: *Soil carbon, humic and fulvic acids, Pinus and Abies forests and soil quality.*

Easy PDF Creator is professional software to create PDF. If you wish to remove this line, buy it now.

3. INTRODUCCIÓN.

Si se considera que el suelo es uno de los recursos naturales más importantes para la nación (SEMARNAT, 2000) porque en cualquier ecosistema terrestre cumple con tres funciones básicas: (1) Proporcionar un medio para el desarrollo de la vegetación, la cual es base de las redes tróficas, (2) Regular y dividir el flujo de agua a través del ambiente y (3) Servir como un sistema amortiguador ambiental (Etchevers *et al*., 2000), entonces una buena calidad edáfica debe estar relacionada con un adecuado suministro de nutrimentos, el cual es un factor importante que contribuye al aumento en rendimientos y producción de la biomasa vegetal.

A diferencia del agua y del aire, los cuales poseen estándares de calidad bien definidos, la calidad del suelo es difícil de cuantificar y de definir por lo que, una secuencia de cómo evaluar la calidad del suelo es:

- Definir las funciones del suelo estudiado
- Identificar los procesos edáficos específicos asociados a sus funciones
- Identificar propiedades del suelo e indicadores que sean suficientemente sensibles para detectar cambios en las funciones o procesos del suelo estudiado (Carter *et al*., 1997 en USDA, NRCS, 1998).

Con los resultados del estudio de los contendidos del carbono orgánico del suelo (COS) y de las fracciones húmicas de la MOS, se han asignado valores de calidad del suelo. El COS se encuentra en el orden de 1500 Pg (Petagramo, 10^{15} g), poco más de 2 veces el C que se encuentra en reserva de la atmósfera y puede contener hasta tres veces más de la cantidad presente en la vegetación (C en suelo 1580 Giga toneladas (Gt), mientras que en la vegetación puede ser de 610 Gt de C (Schlesinger, 1997 citado en Bhatti *et al*., 2002).

Además el secuestro de C en la materia orgánica del suelo (MOS) es un aspecto de considerable importancia que aumenta la calidad del suelo al mejorar su fertilidad, su estructura y participar en los ciclos de nutrimentos y como centro de demanda de C para ayudar a mitigar los efectos de gas invernadero debido al CO_2 en la atmósfera (Swift 2001; Six *et al.,* 2002; Conant *et al.,* 2003). De acuerdo con este marco, ha sido reconocida la alta capacidad de los ecosistemas forestales para la retención (captura o secuestro) de carbono (Dixon *et al*., 1994 y Sedjo, 1992 citados en Bhatti *et al*., 2002). El contenido de carbono en el suelo, también tiene influencia sobre los procesos químicos y biológicos de otros

Easy PDF Creator is professional software to create PDF. If you wish to remove this line, buy it now.

nutrimentos contenidos en la MOS (Bundt *et al.,* 2001; Giardina *et al*., 2001), y sobre la productividad de los bosques en diferentes estados serales (Giese *et al.,* 2003).

El suelo forestal manifiesta características peculiares adquiridas bajo la influencia de tres factores que son poco comunes en otro tipo de suelo; hojarasca o humus, raíces de árboles y organismos específicos, cuya existencia depende de la presencia de vegetación forestal (Bockheim, 1991). Los bosques de coníferas, son frecuentes en las zonas de clima templado y frío del hemisferio boreal. Según Flores *et al* (1971) citados en Rzedowski (1978), el conjunto de bosques de coníferas ocupa cerca de 15% del territorio del país y más de 9/10 de esta superficie corresponde a los de *Pinus* o de *Pinus* y *Quercus.* Les siguen en importancia, en cuanto a la extensión, los bosques de *Juniperus* y los de *Abies*, siendo los restantes de distribución muy restringida y localizada (Rzedowski, 1978). Los bosques mixtos templados del país son de gran importancia ya que, poseen gran biodiversidad, así como un alto porcentaje de endemismos (Rzedowski y Toledo 1978 citados por Ángeles, 1998).

Los bosques prestan bienes y servicios ambientales para las comunidades humanas, por lo que el estudio de alguno de sus componentes como el suelo, es de importancia para mantenerlos, manejarlos y obtener mayores rendimientos o beneficios. El manejo inapropiado de ellos ha inducido en una perdida de los bienes que proporcionan estos ecosistemas, debido a la degradación de los suelos, así como pérdida genética (pérdida de especies endémicas), también se alteran los ciclos biogeoquímicos y aumenta el calentamiento global debido a las alteraciones climáticas provocadas por la disminución en la “captura” de carbono (Velásquez *et al.,* 2002).

El suelo es un importante receptor de carbono atmosférico, por lo tanto su estudio es de gran importancia, no solo para determinar índices de calidad edáfica, sino, también para contribuir en los estudios de captura de CO_2 y calentamiento global, además de la relación que guarda su ciclo biogeoquímico con la disponibilidad de otros elementos para las plantas.

Por lo mencionado anteriormente, estimar el contenido de carbono orgánico del suelo, conocer la composición de cada una de las fracciones de la materia orgánica, la dinámica de los componentes orgánicos en el suelo, el suministro de nutrimentos para sostener el potencial productivo de los suelos y la salud de los ecosistemas forestales, así como su relación con la calidad de suelos de bosques templados, son los temas de investigación en el presente trabajo.

Easy PDF Creator is professional software to create PDF. If you wish to remove this line, buy it now.

4. MARCO TEÓRICO.

4.1 CONCEPTO DE SUELO.

El suelo ha sido definido como el material mineral u orgánico no consolidado, que yace sobre la superficie de la tierra que ha sido sometido e influenciado, con acción sostenida durante el tiempo, por el material parental, clima, macro y microorganismos y topografía, y que difiere en sus propiedades físicas, químicas, biológicas y morfológicas del material del cual se derivó. Un nuevo concepto funcional, considera al suelo como un sistema vivo y dinámico entre cuyas funciones principales están las de mantener la productividad de las especies vegetales, contribuir en el mantenimiento de la biodiversidad, calidad del aire y agua así como la salud humana y el hábitat (Sojka y Upchurch, 1999; Etchevers *et al.*, 2000).

El suelo se forma a una tasa de 1cm por cada 100 a 400 años por interacciones de clima, topografía, biota y material parental (Doran & Parkin, 1994). Por el tiempo que toma su formación se le considera un recurso no renovable en la escala humana de tiempo.

En el desarrollo tanto del suelo como de la vegetación intervinieron factores relativamente independientes, pero tal vez ninguno de ellos es más importante que el clima. Éste, además de la vegetación y el suelo forman un complejo dinámico e interrelacionado, y cuando un miembro de este complejo se altera, los demás cambian de manera similar y se establece un nuevo equilibrio.
El suelo, como el clima, desempeña un papel esencial en el crecimiento y desarrollo de los bosques. Proporciona el agua, los nutrimentos y un medio de sostén para los árboles y para el resto de la vegetación forestal. Los suelos se derivan de material parental de composición mineral heterogénea, y estos materiales determinan en gran parte las proporciones de las fracciones del suelo, que a su vez influyen tanto en la composición de la vegetación forestal como en el ritmo del crecimiento de los árboles. A medida que la roca madre se intemperiza, se desarrolla el perfil del suelo, influenciado no solamente por los factores físicos del medio ambiente, sino por la biota de la región que contribuye al intemperismo mineral y al contenido de materia orgánica (Pritchett, 1991).

Debido a que el proceso físico de formación del suelo está sometido a la acción de la gravedad, un perfil de suelo en equilibrio (con diversos factores actuando en su formación) usualmente exhibirá diferencias verticales identificables en capas llamados horizontes, (Figura 1).

Easy PDF Creator is professional software to create PDF. If you wish to remove this line, buy it now.

El horizonte A es la capa más cercana a la superficie del terreno en la cual la actividad de las plantas y animales es mayor. En este horizonte tienen gran influencia los organismos vivos. Esta capa esta sujeta a lixiviación.

El horizonte B esta por debajo del horizonte A, en él penetran todas las raíces de las plantas y se acumulan los materiales solubles lixiviados.

El horizonte C está formado por rocas parcialmente descompuestas (cuando el perfil ha sido originado en ese sitio) o de otro material (si el perfil ha sido originado en una región transformada o si se ha desarrollado a partir de escombros transportados) (Cepeda, 1991; USDA, 1999).

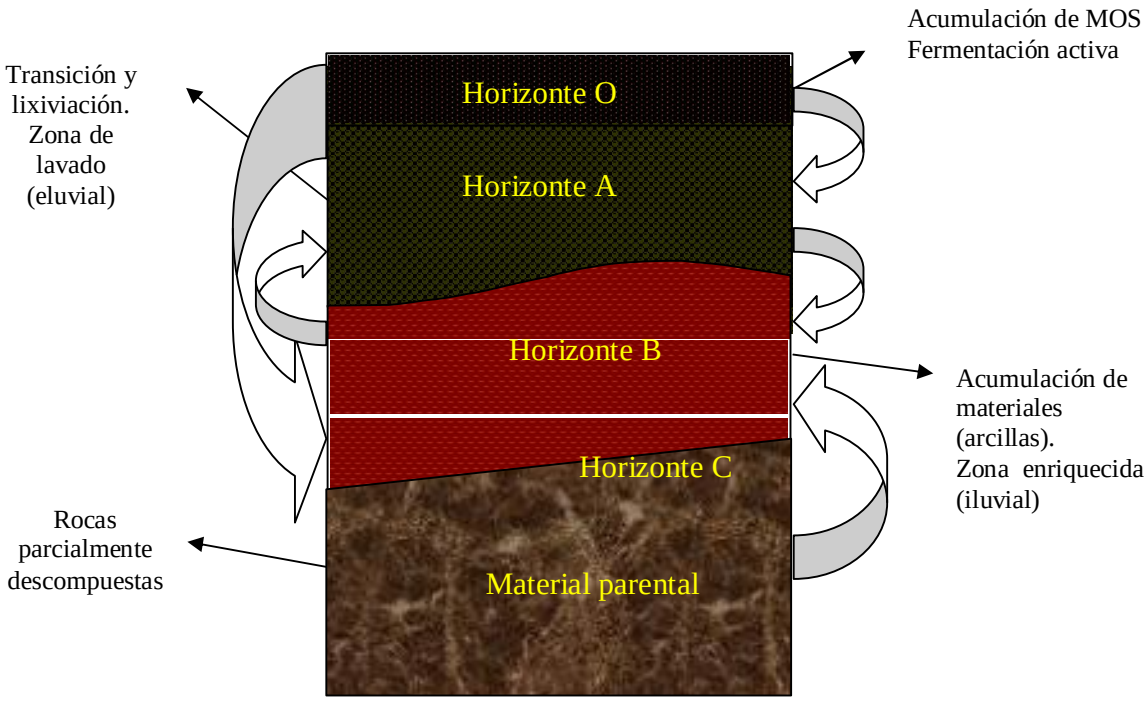


Figura 1. Típico perfil de suelo, mostrando sus horizontes con características particulares (Cepeda, 1991).

El suelo es un sistema muy complejo. Un volumen determinado de suelo está compuesto de materia sólida, líquida y gaseosa. La fase sólida es aproximadamente constante mientras que las fases líquida y gaseosa tienen una variación inversamente proporcional pues con la entrada de agua se desaloja el aire y cuando el agua se pierde del suelo, por drenaje o evaporación, su espacio es ocupado por aire (atmósfera del suelo). La fase sólida puede ser mineral u orgánica. La

Easy PDF Creator is professional software to create PDF. If you wish to remove this line, buy it now.

porción mineral consiste en partículas de varios tamaños, formas y composiciones químicas. La fracción orgánica incluye residuos en diferentes etapas de descomposición y organismos en estado de vida activa. La fase líquida es el agua del suelo, que llena una parte o la totalidad de los espacios vacíos entre las partículas sólidas y que varía en su composición química y en la libertad con que se mueve. La fase gaseosa ocupa aquella parte del espacio de poros entre las partículas del suelo que no está llena de agua; su composición puede variar en intervalos de tiempo cortos (Baver *et al.*, 1980, Cruz, 2006).

El estado ideal del sistema suelo se considera en 50% de material sólido (45% de partículas minerales y 5% de materia orgánica), el 25% de agua y 25% de gas (Sumner, 2000), (Figura 2).

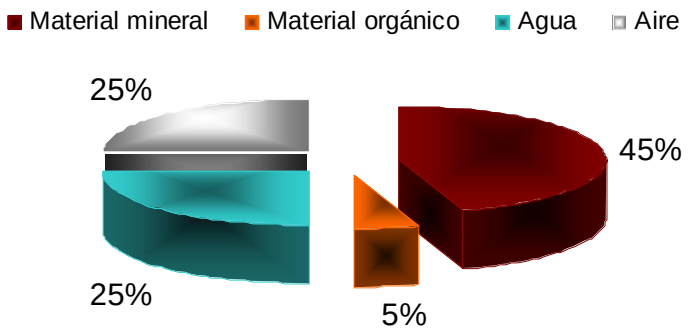


Figura 2. Composición porcentual en volumen de un suelo superficial en condiciones ideales para el crecimiento vegetal (Sumner, 2000).

4.2 SUELOS FORESTALES

Los suelos forestales sirven como medio para el sustento de la vegetación forestal, los cuales a su vez, son los ecosistemas mas ricos en número de taxa (Lindenmayer, 1999). Son cuerpos naturales que constan de materia mineral y orgánica en equilibrio dinámico con variables cantidades de agua y aire y que están habitados por diversos organismos. Estos suelos presentan características especiales que provienen de la influencia de la hojarasca o humus forestal, raíces de árboles y una amplia gama de organismos específicos, cuya distribución y abundancia depende de la presencia de vegetación forestal (Bockheim, 1991).

Easy PDF Creator is professional software to create PDF. If you wish to remove this line, buy it now.

4.3 FUNCIONES DEL SUELO

Desde el punto de vista ecológico, el suelo es un subsistema de los ecosistemas terrestres en donde se realiza principalmente el proceso de descomposición, fundamental para la reobtención y reciclado de nutrimentos que aseguren el otro gran proceso vital: la producción primaria neta.

Tanto para la vegetación arbórea, como para todos los tipos de vegetación de plantas superiores, los suelos forestales son importantes porque:

- Ofrecen soporte mecánico
- Retienen y transmiten el agua y los gases
- Sirven como hábitat para los macro y microorganismos
- Retienen, intercambian y fijan las sustancias nutritivas
- Además de su papel en el ecosistema en el que participa como componente fundamental de los factores físicos del ambiente con interacción estrecha con la hidrosfera, la atmósfera y la litosfera (Figura 3).

4.4 CALIDAD EDÁFICA.

El concepto de calidad edáfica tiene como base dos factores: 1) sus propiedades inherentes y dinámicas y, 2) la evaluación de los procesos físicos, químicos, biológicos y sus interacciones (Douglas *et al.,* 2003).

Para los ecosistemas forestales, el concepto de calidad del suelo, es un componente de la sustentabilidad forestal que requiere además de un conjunto de factores climáticos, geológicos y topográficos que definan la calidad del sitio, y por definición, la calidad del suelo (como parte del sitio) se expresa en términos de producción de biomasa, lo que es una de las muchas funciones del suelo (Schoenholtz *et al.,* 2000).

Los aspectos que se deben de tomar en cuenta dentro de la definición de calidad del suelo, son:

- Productividad: capacidad de un suelo para mantener la producción vegetal y biológica.
- Calidad ambiental: la disposición del suelo para atenuar los efectos de los contaminantes y patógenos en el ambiente.
- Relación que existe entre la calidad de un suelo y la salud de flora y fauna (Doran y Parkin, 1994).

Easy PDF Creator is professional software to create PDF. If you wish to remove this line, buy it now.

De esta manera Doran y Parkin (1994), proponen la siguiente definición: la calidad del suelo es la capacidad del mismo para funcionar dentro de un ecosistema, sostener la productividad biológica, mantener la calidad ambiental y promover la salud de la flora, la fauna y del propio hombre.

4.5 INDICADORES DE CALIDAD EDÁFICA.

Un indicador de calidad edáfica requiere cumplir con algunos de los siguientes criterios:

- Describir procesos que ocurren en el ecosistema
- Integrar propiedades y procesos físicos, químicos y biológicos
- Ser accesibles a muchos usuarios y aplicable a condiciones de campo
- Reflejar aquellos atributos de sustentabilidad que se quieren medir
- Ser sensibles a variaciones de clima y manejo del suelo
- Que su medición pueda ser reproducible.

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

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

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

Los índices permiten tener a los indicadores en un formato común, sin por ello perder la información original aunque las relaciones existentes entre indicadores pueden ser bastante complejas, de tipo sinérgico, antagónico o mixto. Masera *et al.*, (2000), consideran que la construcción del índice debe servir para proporcionar un dictamen de calidad, pero además para depurar los indicadores utilizados, dejando aquellos que presenten mayor robustez, en el sentido

Easy PDF Creator is professional software to create PDF. If you wish to remove this line, buy it now.

de que sean sensibles a la condición que se desea medir y que influyan de manera crítica en la evaluación de calidad.

El estudio de los ciclos de nutrimentos, como sustento del conocimiento de la capacidad de un suelo para suministrar en cantidad y balance adecuado los elementos que las plantas requieren para su crecimiento y desarrollo, contribuye al conocimiento de la calidad de un suelo.

En la Figura 3 se muestra la intrincada red de interacciones presentes entre los factores bióticos y abióticos que controlan procesos de tipo físico, químico, biológico y bioquímico realizados en el suelo, ofrece un panorama que indica lo complicado que resulta evaluar la calidad de un suelo y su relación con la disponibilidad de nutrimentos para las plantas superiores.

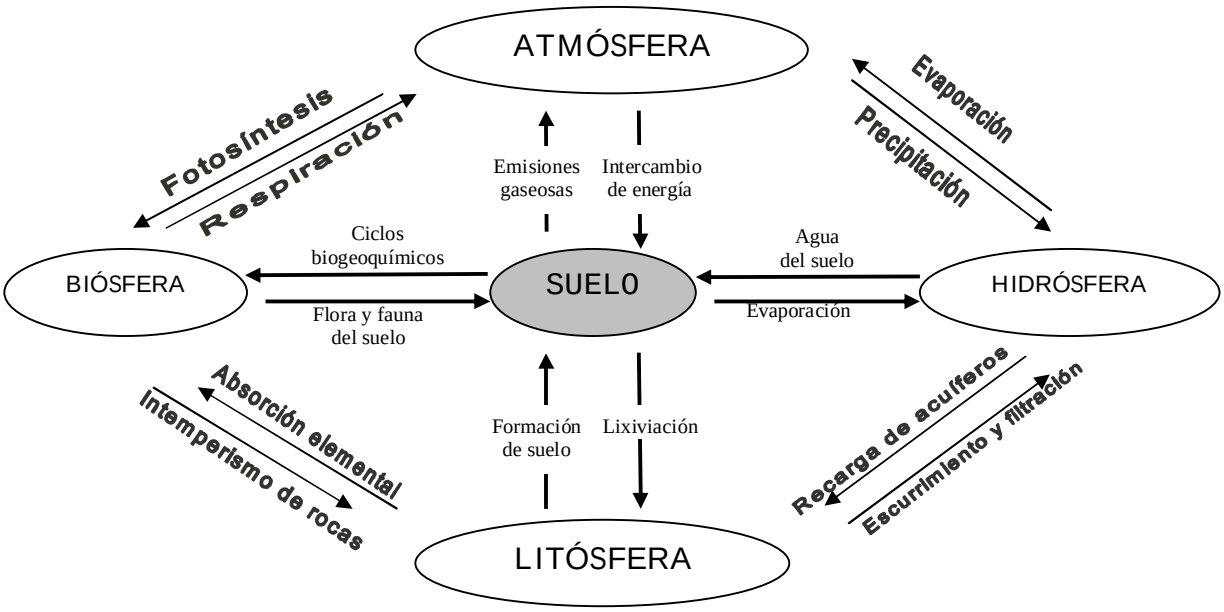


Figura 3. Interacción entre factores físicos y procesos biológicos en y sobre el suelo. (Tomado de Cruz, 2006).

Los indicadores de calidad edáfica son las propiedades físicas, químicas y biológicas o aquellos procesos y características que pueden ser utilizadas para determinar el estado del suelo (USDA-NRCS, 1996; Seybold *et al.*, 1997).

El estatus cambiante de la calidad de un suelo, puede ser inferido a través de los cambios que ocurren en espacio y tiempo en sus propiedades físicas, químicas y bioquímicas (Sánchez-Marañon *et al.*, 2002).

Easy PDF Creator is professional software to create PDF. If you wish to remove this line, buy it now.

Por lo anterior es de gran importancia conocer todas y cada una de las propiedades indicadoras de calidad de un suelo para entender los efectos que provocan en el desarrollo de la vegetación que sostiene.

4.6 PROPIEDADES EDÁFICAS

Las propiedades físicas, junto con las químicas, biológicas, bioquímicas y mineralógicas, determinan, entre otras, la productividad de los suelos.

4.6.1 Propiedades físicas

El conocimiento de las propiedades físicas permite conocer mejor las actividades agrícolas y forestales, como el laboreo, la fertilización, el drenaje, la irrigación, la conservación de suelos y el agua y el manejo de los residuos orgánicos.

El sistema suelo, muestra como característica fundamental, un dinamismo intenso, determinado por los efectos que provocan agentes tales como la temperatura, la luz, la presión total, el agua, los solutos y los organismos.

Por lo que la física de suelos se encarga del estudio de grupos de factores y procesos físicos que tienen lugar dentro del suelo y en su superficie (Gavande, 1979).

Color. El color del suelo se utiliza para obtener información acerca del contenido de MOS, condiciones de drenaje y de aireación, la presencia de ciertos minerales y su estado de hidratación.

Los principales componentes del suelo que le dan su color característico son, el humus, algunos compuestos minerales como los óxidos, sulfuros, sulfatos y carbonatos (Gaucher, 1971).

El color del suelo tiene importancia para su balance térmico, ya que favorece o dificulta la absorción de energía solar.

Conductividad eléctrica. La medida de la conductividad eléctrica de las aguas naturales o de los extractos obtenidos de los suelos, permite establecer una estimación aproximadamente cuantitativa de la cantidad de sales que contienen. Dependerá del número, carga y movilidad de los iones presentes y del medio en el que estos se mueven (Jackson, 1982).

Easy PDF Creator is professional software to create PDF. If you wish to remove this line, buy it now.

Densidad. La densidad corresponde al peso por volumen de una sustancia. La densidad aparente es un método para expresar el peso de un suelo. En este caso se calcula el volumen total del suelo (espacio ocupado sólidos y los espacios de los poros juntamente). La densidad de volumen se define como la masa (o peso) de una unidad de volumen de suelo seco. Este volumen puede incluir desde luego, tanto los sólidos como los poros (Buckman y Brady, 1991). Los suelos superficiales de textura gruesa estarán entre 1.3 y 1.8 g cm^{-3}. Los horizontes superiores por lo general tienen baja densidad aparente o densidad de volumen. La acumulación de arcillas en los horizontes inferiores ocasiona que los espacios porosos sean llenados haciendo al suelo más denso. Los suelos orgánicos tienen muy baja densidad aparente en comparación con los suelos minerales (Foth y Turk, 1981).

La densidad real también llamada densidad de partícula, considera únicamente a las partículas sólidas (Foth y Turk, 1981). Depende de las densidades acumulativas de los constituyentes individuales orgánicos e inorgánicos del suelo.

Porosidad. Corresponde a la porción de un volumen dado de suelo no ocupado por sólidos, sino, por agua y/o por aire. La porosidad influye directamente en la infiltración y la retención de agua, aireación, penetración radical, entre otros (Honorato, 2000). El espacio poroso es importante ya que los poros del suelo están totalmente llenos de aire y agua. El agua y el aire, también se mueven a través de estos espacios.

Así pues la provisión de agua y de oxígeno para el crecimiento de las plantas y la tasa de movimiento del agua en el suelo están relacionados con la cantidad y el tamaño de los poros del mismo (Foth y Turk, 1981).

Textura. La textura del suelo se refiere a la proporción relativa de las diversas partículas minerales, como arena, limo y arcilla (Young, 1991). Esta propiedad ayuda a determinar no sólo la facilidad de abastecimiento de nutrimentos, sino también agua y aire, tan importantes para la vida de las plantas. No puede alterarse y, de esta forma, se le considera propiedad fundamental del suelo que determina, en alto grado, su valor económico (Gavande, 1979).

Estructura. Se refiere a la forma en que las partículas están distribuidas en mezclas o grupos de materias. La estructura influye en el grado en que el agua y el aire penetran y se

Easy PDF Creator is professional software to create PDF. If you wish to remove this line, buy it now.

mueven en el suelo. Asimismo, afecta en cuanto a la penetración de la raíz y en la disponibilidad de los elementos nutritivos.

La estructura del suelo favorece la formación de agregados individuales; reduce la agregación global del suelo; disminuye la plasticidad del mismo (Fassbender y Bornemisza, 1987).

Agua del suelo. El agua es uno de los constituyentes más variables del suelo. El agua es retenida dentro de los poros con grados variables de intensidad, según la cantidad de agua presente, y junto con sus sales disueltas, el agua del suelo forma la llamada solución del suelo, tan importante como medio para abastecer de principios nutritivos a las plantas que en él se desarrollan. Además de servir a las necesidades metabólicas de la planta, el agua desempeña muchas otras funciones en el suelo. Es disolvente y medio de transporte para los nutrimentos de las plantas, fuente de hidrógeno, moderador de la temperatura del suelo y de la aireación, así como de agente de disolución de sustancias tóxicas de los suelos (Pritchett, 1991). Diferentes suelos tienen distintas capacidades de retención de agua (Palmer y Truoch, 1980). La capacidad del suelo para retener el agua está influida por las fuerzas adhesivas y cohesivas relacionadas con la matriz del suelo y por la atracción de las moléculas de agua para iones producidos por sales solubles en el suelo. El agua disponible en el suelo es la porción que las plantas pueden absorber con facilidad (Young, 1991).

Aire del suelo. El aire del suelo difiere del de la atmósfera en varios aspectos. El aire del suelo no es continuo, pues esta localizado en el laberinto de los poros, separados por los sólidos del suelo. Además la humedad de este aíre es más alta que la de la atmósfera, siendo su humedad relativa próxima al 100% cuando es optima. El contenido de anhídrido carbónico es generalmente más alto y el de oxígeno más bajo que los hallados en la atmósfera. El anhídrido carbónico es, a menudo, varios centenares de veces más concentrado que el de 0.03% comúnmente hallado para la atmósfera. Siendo una mezcla de gases, el aire se mueve meramente dentro de los poros del suelo no ocupados por el agua. Cuando a cesado la lluvia, los poros que primeramente se vacían del agua del suelo son los grandes y luego los medianos, a medida que el agua se va por evaporación y por el uso que de ella hacen las plantas.

Esto explica la tendencia que tienen los suelos de alta proporción de poros finos a ser aireados pobremente.

Easy PDF Creator is professional software to create PDF. If you wish to remove this line, buy it now.

4.6.2 Propiedades químicas

El suelo es un sistema formado por partículas sólidas, aire, agua y microorganismos. Estos elementos conocidos como fases, gozan de gran interacción debida a la enorme cantidad de reacciones químicas que sufren, por ejemplo: agua y aire intemperizan las partículas sólidas, y los microorganismos se encargan de catalizar muchas de estas reacciones.

La ciencia que estudia las propiedades químicas del suelo y sus componentes orgánicos e inorgánicos, así como los fenómenos a que da lugar la mezcla de estos, se define como química de suelos (Cepeda, 1991).

Reacción del suelo o pH. La reacción del suelo es el concepto que se refiere a las relaciones da acidez y basicidad del mismo; se trata de una propiedad que influye tanto en sus características químicas como físicas, además de tener considerable impacto sobre la vida microbiana (Fassbender y Bornemisza 1987). Con frecuencia sucede, en la práctica agrícola, que uno de los factores limitantes para obtener la cosecha máxima de los cultivos es la reacción del suelo (pH), el exceso de acidez, la alcalinidad o la salinidad. Así por su reacción los suelos se dividen en:

a) Suelos ácidos
b) Suelos neutros
c) Suelos alcalinos o básicos
d) Suelos halomórficos o salinos

Expresión del pH. Cuando un ácido se disuelve en agua, este libera iones hidrógeno, dando a la solución un carácter ácido. En forma similar, cuando una base se disuelve en agua produce iones OH^- que hacen alcalina la solución (Cepeda, 1991).

El pH es de gran importancia en los suelos, ya que influye en la distribución y cantidad de la población microbiana del suelo, la disponibilidad de fósforo, calcio, magnesio y elementos residuales, así como en la tasa de nitrificación (Figura 4).

Easy PDF Creator is professional software to create PDF. If you wish to remove this line, buy it now.

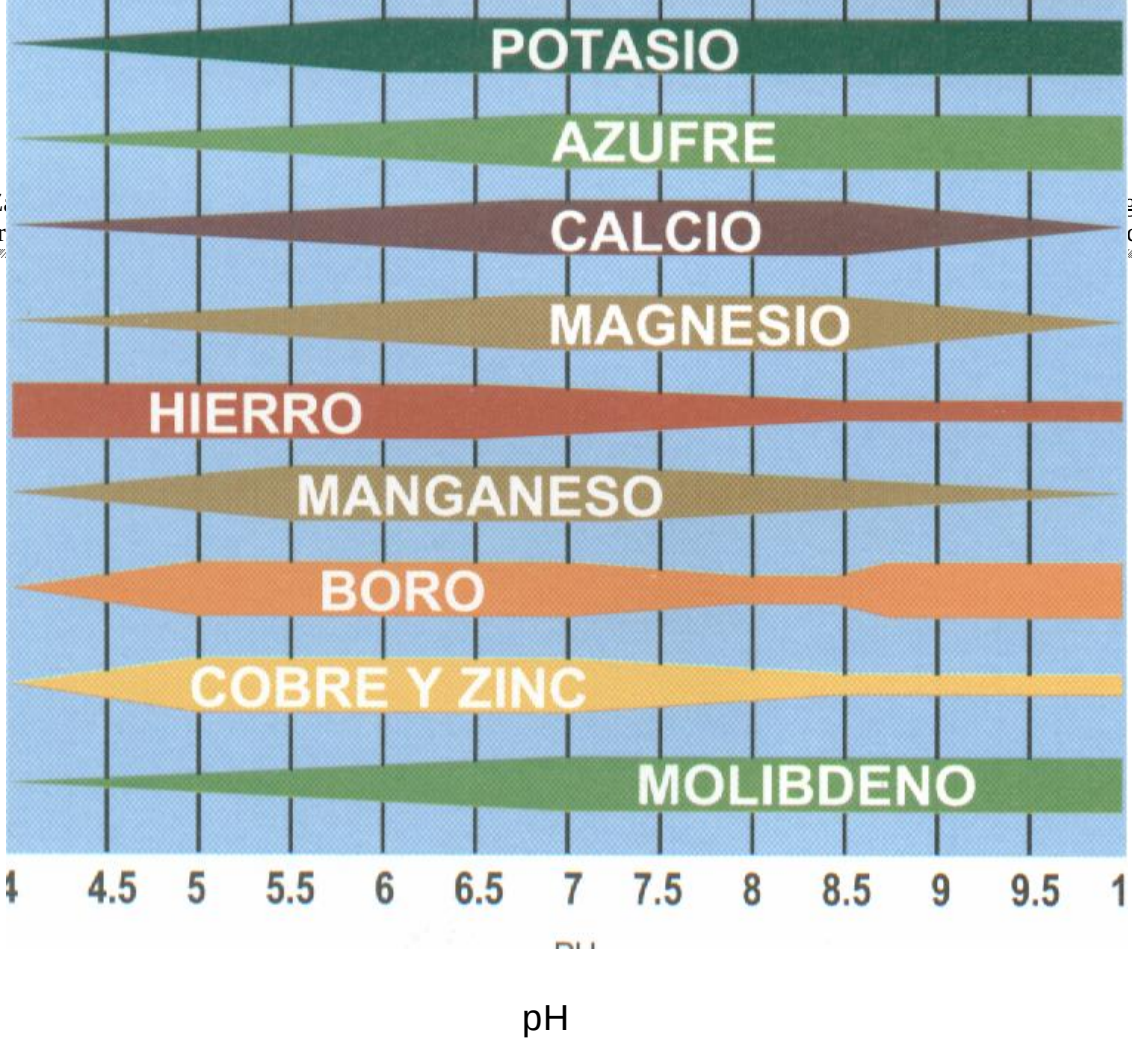


Figura 4. Influencia del pH sobre la disponibilidad de nutrimentos para las plantas en el suelo (Buckman y Brady, 1991).

El pH en los suelos forestales va de moderada a extremadamente ácidos como resultado de la liberación ácidos orgánicos durante la descomposición de la materia orgánica (Young, 1991; Pritchett, 1991).

El pH del suelo depende de diversos factores: la estación del año, las prácticas de cultivo, el horizonte muestreado, el contenido hídrico en el momento del muestreo, la técnica para determinar el pH, incluyendo los factores que influyen en la formación del suelo. En el Cuadro 1 se muestra una evaluación del pH en términos descriptivos.

Easy PDF Creator is professional software to create PDF. If you wish to remove this line, buy it now.

Cuadro 1. Términos usuales para describir los intervalos de pH en el suelo (Tomado de Cepeda 1991).

Acidez o alcalinidad	pH del suelo
Excesivamente ácido	< 4
Fuertemente ácido	4 – 5
Moderadamente ácido	5 – 6
Ligeramente ácido	6 – 6.5
Neutro	6.5 – 7.5
Ligeramente alcalino	8 – 9
Fuertemente alcalino	9 – 10
Excesivamente alcalino	10 o más

Cationes intercambiables. El intercambio catiónico es una de las propiedades más importantes del suelo. Los cationes intercambiables influyen en la estructura, en la actividad biológica, en el régimen hídrico y gaseoso, y en los procesos genéticos del suelo y su formación (Cepeda, 1991). Los procesos de intercambio catiónico y aniónico que resultan de las interacciones de las fases líquidas y sólidas del suelo dependen, tanto de la composición y características del estado coloidal (partículas de arcilla y materia orgánica) como de la composición del suelo.

En los suelos, los cationes intercambiables encontrados comúnmente son: calcio, magnesio, hidrógeno, potasio, sodio y amonio. El calcio por regla general es el más abundante, mientras que la cantidad de los otros elementos varía de acuerdo con las condiciones del suelo.

El intercambio catiónico en el suelo se efectúa entre:

a) Los cationes en la solución del suelo y los de las superficies de los coloides minerales y orgánicos.
b) Los cationes liberados por las raíces de las plantas y los de las superficies de las partículas minerales y materia orgánica.
c) Los cationes de la superficie ya de dos cristales cualquiera de arcilla, ya de dos partículas de humus, ya de un cristal de arcilla y una partícula de humus.

En la Figura 5 se ilustra lo anterior.

Easy PDF Creator is professional software to create PDF. If you wish to remove this line, buy it now.

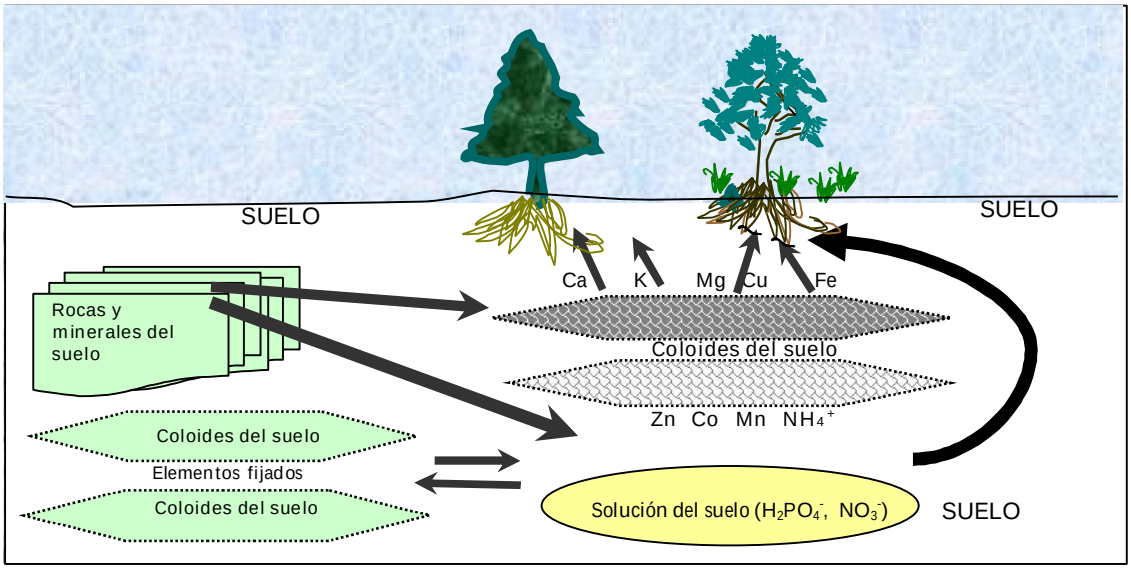


Figura 5. Intercambio de cationes entre el complejo coloidal, la solución del suelo y las raíces de las plantas para el suministro de nutrimentos (Tomado de Cruz, 2006).

Materia Orgánica del Suelo (MOS). Según la recomendación de la *Soil Science Society of America*, la materia orgánica del suelo debe definirse como: la fracción orgánica del suelo que incluye vegetales y animales en diferentes estados de descomposición, tejidos y células de organismos que viven en el suelo y sustancias producidas por los habitantes del mismo.

La MOS sirve para muchos fines en el suelo forestal; mejora la estructura y aumenta la porosidad, además, la MOS influye en el régimen de temperatura, sirve como fuente de energía para los microorganismos y aumenta la retención de la humedad de los suelos forestales, retiene las sustancias nutritivas y las intercambia y al descomponerse es una fuente de nutrimentos para los árboles (Young, 1991).

Se ha reconocido, dentro del concepto de calidad del suelo, a la materia orgánica del suelo como uno de los elementos que mejora más claramente la productividad y la calidad ambiental (Franzluebbers, 2002) ya que esta demostrada su influencia positiva en la formación de agregados y con ello la mejor estructura del suelo (Six *et al.*, 2002).

En los procesos de formación del suelo, la importancia de la MOS reside en sus propiedades de peptización, coagulación, formación de quelatos y otros. También funciona como una fuente de energía, gracias a sus componentes de carbono (Fassbender y Bornemisza, 1987).

Easy PDF Creator is professional software to create PDF. If you wish to remove this line, buy it now.

Entre los procesos químicos de mayor importancia, en los que interviene la MOS, se pueden mencionar los siguientes:

- El suministro de elementos nutritivos por la mineralización, en particular la liberación de P, N, S y micronutrimentos disponibles para las plantas.
- La estabilización de la acidez del suelo; la MOS interviene por su papel amortiguador.
- La capacidad de cambio catiónico de los suelos. La intervención de la MOS es muy importante en suelos con textura arenosa.
- La MOS es importante porque actúa en los fenómenos de adsorción (son de particular importancia la inactivación de plaguicidas y la aplicación de P).
- Interviene de manera directa en la regulación de los niveles de disponibilidad de nutrimentos principales y de elementos menores, mediante la formación de sustancias orgánicas que constituyen compuestos solubles, no iónicos (complejos internos), con cationes de valencia variable. Estas sustancias llamadas quelatos -móviles en el suelo- son también importantes en los procesos edafogenéticos. Se sabe que los ácidos orgánicos influyen considerablemente, en la solubilización y movilización de los componentes inorgánicos.

La MOS también afecta algunas propiedades físicas del suelo:

- Favorece la formación de agregados individuales, reduce la agregación global del suelo y disminuye la plasticidad del mismo.
- Incide en el uso más eficiente del agua:

a) Mejora la infiltración del agua, reduce la pérdida por evaporación, mejora el drenaje de suelos de textura fina y por lo tanto, ayuda a una mejor distribución del agua en el perfil del suelo.
b) Promueve un sistema de raíces más profundas que permiten el uso del agua en una capa del suelo también más profunda.
c) Al oscurecer el suelo en los climas templados fomenta su calentamiento y por ende, promueve una mejor germinación y el fácil aprovechamiento del agua.
d) Al mejorar el drenaje y la estructura beneficia la aireación en los suelos y así, el mejor crecimiento y funcionamiento más eficaz de las raíces.

Easy PDF Creator is professional software to create PDF. If you wish to remove this line, buy it now.

e) Los coloides orgánicos ayudan a retener el agua en suelos arenosos, aunque su influencia es menos pronunciada en otros.

La MOS, para las plantas, es la mayor fuente de micronutrimentos y macronutrimentos como N, P y S, elementos que, durante los procesos biológicos de mineralización, sufren transformaciones químicas que influyen sobre su disponibilidad para la vegetación.

Como ya se mencionó la materia orgánica del suelo es de suma importancia ecológica, ya que su contribución de sustancias húmicas es vital para la estabilización de agregados y por otro lado participa en procesos de intercambio iónico, hidrólisis, en la liberación de nutrimentos y actúa como destoxificador del suelo al participar en la formación de complejos de coordinación de sustancias químicas orgánicas aromáticas sintéticas (Hayes, 1997).

Un parámetro ecológico y edáfico importante que interviene en la mineralización de la materia orgánica es la proporción entre nutrimentos de las cuales la relación C:N es de las más importantes; además de esto la mineralización biológica requiere de una buena actividad microbiana en el suelo, que puede ser evaluada a través de la evolución de CO_2 (Harris, 1992).

Fertilidad de los suelos. La fertilidad considera al suelo como un medio que permite el crecimiento de las plantas. Colectivamente los elementos esenciales, constituyen solo uno de los factores externos que influyen en la vida de las plantas. Se reconocen seis factores de este tipo: (1) luz; (2) soporte mecánico; (3) temperatura; (4) aire; (5) agua, y (6) nutrimentos. A excepción de la luz, el suelo es un agente de aprovisionamiento, en todo o en parte, de todos estos factores. El factor menos favorable determinará el nivel de producción de cosechas. Este principio, llamado también *principio de factores limitantes, puede ser establecido así*:

El nivel de producción agrícola puede no ser mayor que el determinado por el más limitante de los factores esenciales del crecimiento vegetal (Buckman y Brady, 1991).

Elementos nutritivos. Se entiende por nutrición vegetal el proceso mediante el cual la planta absorbe del medio que la rodea las sustancias que le son necesarias para llevar a cabo su metabolismo y, en consecuencia, desarrollarse y crecer.

Las sustancias requeridas para el desarrollo de las plantas verdes son exclusivamente de origen mineral o inorgánico. Se define como elementos nutritivos a los elementos químicos integrantes

Easy PDF Creator is professional software to create PDF. If you wish to remove this line, buy it now.

de estos compuestos y más concretamente a aquellos elementos que son esenciales para el desarrollo completo del ciclo vegetativo (Domínguez, 1989). Los elementos nutritivos son esenciales en base al siguiente criterio:

- La falta de este elemento impide a la planta completar su ciclo vegetativo.
- La falta o deficiencia es exclusiva del elemento en cuestión y solo puede ser corregida suministrando dicho elemento y no otro.
- El elemento esencial esta relacionado directamente con la nutrición de la planta, por ser constituyente de alguna sustancia esencial, o por participar en funciones vitales de la planta.

Los elementos esenciales son dieciséis (Cuadro 2), de estos, los tres primeros se hallan libremente a disposición de la planta en el aíre, anhídrido carbónico (CO_2) y oxígeno (O_2) y por medio del agua (H_2O) que absorbe (Buckman y Brady, 1991).

Cuadro 2. Elementos esenciales para el desarrollo de las plantas y sus fuentes (Buckman y Brady, 1991).

Elementos esenciales usados en cantidades relativamente grandes.	Elementos esenciales usados en cantidades relativamente pequeñas.
Por lo general del aire y del agua	*De los sólidos del suelo*
Carbono, Hidrógeno y Oxígeno.	Hierro, Manganeso, Boro, Molibdeno
De los sólidos del suelo	Cobre, Zinc y Cloro.
Nitrógeno, Fósforo, Potasio Calcio, Magnesio y Azufre.	

De acuerdo a las cantidades que absorben las plantas, los elementos nutritivos se pueden clasificar en macronutrimentos y micronutrimentos.

a) Macronutrimentos: N, P, K, S, Ca y Mg. Son los elementos absorbidos por las plantas en mayores cantidades.

- macronutrimentos primarios: N, P y K
- macronutrimentos secundarios: S, Ca y Mg

Easy PDF Creator is professional software to create PDF. If you wish to remove this line, buy it now.

b) Micronutrimentos: Fe, Cu, Zn, Mn, Mo, B y Cl. Son elementos que se absorben por la planta en cantidades mínimas, con las que quedan cubiertas sus necesidades.

Un examen de los suelos representativos, revelará que en general, los elementos nutritivos existen en dos condiciones: 1) compuestos complejos casi siempre insolubles, y 2) formas sencillas, casi siempre solubles, en el agua del suelo y casi siempre asimilables fácilmente por las plantas superiores (Buckman y Brady, 1991) (Cuadro 3).

Cuadro 3. Formas en que se presentan los macronutrimentos en los suelos minerales (Buckman y Brady, 1991).

Grupo I Formas más complejas y menos activas	Grupo II Algunas de las formas más sencillas y asimilables y sus equivalentes iónicos
Nitrógeno Combinaciones orgánicas: proteínas, aminoácidos y formas similares; en forma coloidal y sujeta a desintegraciones.	Sales amónicas. . . . . NH_4^+ Nitritos. . . . . NO_2^- Nitratos. . . . . NO_3^-
Fósforo Apatita, en forma primaria. Fosfatos secundarios de Ca, Fe y Al. Orgánico: fitina, ácido nucleico.	Fosfatos de Ca, K, Mg, etc. PO_4H^{-2} Formas orgánicas solubles. $PO_4H_2^-$
Potasio Minerales primarios, como feldespatos y micas. Silicatos complejos secundarios de Al, como arcillas, especialmente ilita.	Iones de K absorbidos por coloides complejos. Sales de K, tales como sulfatos, carbonatos, etc. K^+
Calcio Minerales como feldespatos, hornblenda, calcita y dolomita.	Iones de Ca absorbidos por complejos coloidales. Una variedad de sales simples de Ca. Ca^{++}
Magnesio Minerales, como mica, hornblenda, dolomita y serpentina. Silicatos secundarios de Al, tales como arcillas, en especial montmorillonita.	Iones de Mg absorbidos por complejos coloidales. Numerosas sales de magnesio. Mg^{++}
Azufre Combinaciones minerales tales como pirita y yeso. Formas orgánicas: coloidales y sujetas a descomposición.	Varios sulfitos . . . . . SO_3^{-2} y sulfatos . . . . . SO_4^{-2} De Ca, K, Mg, etc.

Easy PDF Creator is professional software to create PDF. If you wish to remove this line, buy it now.

Funciones generales de los nutrimentos.

Los elementos C, O, N y S son constituyentes de compuestos orgánicos básicos en el metabolismo de la planta. También participan en las reacciones bioquímicas básicas del metabolismo. El C y el O, formando parte del grupo carboxílico, el nitrógeno en grupos amino y amidas principalmente y el S como grupo sulfhídrilo. En todos ellos participa el H.

El fósforo participa en todas las reacciones de la planta en las que hay intercambio de energía, siendo el compuesto más importante en este aspecto, el trifosfato de adenosina (ATP).

Nitrógeno. El N es un constituyente de los más importantes compuestos y complejos orgánicos minerales de la planta. Como ejemplo, se pueden citar los aminoácidos, proteínas, ácidos nucleicos, aminas, amidas, nucleoproteínas, clorofila, etc.

El N total en los suelos forestales se encuentra sobre todo en las capas de humus de la cubierta forestal y en el horizonte A1.

La fijación o mineralización del N en el suelo depende en gran medida del ritmo de descomposición de la MOS, la temperatura y del pH y esta dada por la actividad de los microorganismos que lo dejan disponible para las plantas. Estas lo asimilan en forma de iones nitrato (NO_3^-) y amonio (NH_4^+). En la planta el N tiene una gran movilidad.

Este elemento hace que la planta tenga un color verde oscuro y sea más suculenta, fomenta el desarrollo vegetativo e impulsa la formación de follaje.

Relación C:N. Teniendo en cuenta que el C entra en una grande y definitiva proporción de la MOS no es sorprendente que la razón entre el C y el N de los suelos sea aproximadamente constante. Está bien establecido que la razón C:N tiende a disminuir en las regiones áridas, al revés en la húmedas cuando las temperaturas anuales son aproximadamente las mismas.

La relación de C:N en el tejido vegetal es variable alcanzando de 20 a 30:1 para las legumbres y estiércol, hasta 90:1 y aún más en ciertos residuos de pajas. La razón C:N de los cuerpos de los microorganismos, por otro lado, no solo no es constante, sino, mucho menor, de ordinario de 4:1 a 9:1. Los tejidos bacterianos son más ricos en proteínas que los hongos, y por lo tanto, tienen una razón menor.

Easy PDF Creator is professional software to create PDF. If you wish to remove this line, buy it now.

La competencia por el N asimilable comienza cuando los restos orgánicos tienen una razón C:N alta y estos son añadidos al suelo; debido a la constancia de esta relación en el suelo, el mantenimiento del carbono y a su vez de la MOS, depende en no menor grado del nivel de N en el suelo (Buckman y Brady, 1991).

El N de la MOS queda disponible para las plantas superiores solo cuando la relación C:N se aproxima a 10:1, la liberación de N es baja porque el proceso de mineralización en suelos de bosques es lenta. Al existir mayor acumulación de humus, hay menos N disponible. Solamente después de que el contenido de C en algunos materiales se ha reducido a una relación inferior de 20:1 aproximadamente, queda N disponible.

Fósforo. La materia orgánica es la principal fuente de P para los árboles en muchos suelos. La cantidad de este elemento en la solución del suelo en cualquier tiempo dado es muy baja, por lo general menos de 1ppm, y la cantidad disponible para las plantas queda influida por varios factores, entre los que están la acidez del suelo, (reducción notable a pH elevado), la temperatura (se reduce con el frío) y la presencia de Fe y Al solubles, el tipo de humus y su tasa de descomposición. Otros factores son la humedad, la aireación y la disponibilidad de nutrimentos.

Los suelos que sostienen árboles de coníferas contienen un nivel relativamente bajo de P. El P se encuentra en la planta en forma de ortofosfato y, en algunos casos como pirofosfato. Se une a diferentes compuestos orgánicos mediante la formación de esteres con grupos hidroxilos y el enlace con otros grupos fosfato, mediante un enlace de pirofosfato. Entre los compuestos más frecuentes y significativos destacan el di y trifosfato de adenosina (ADP, ATP), fosfolípidos, ácidos nucleicos (RNA, DNA, etc.), etc. Las formas absorbidas de fósforo son los iones P mono ($PO_4H_2^-$) y bibásico (PO_4H^{-2}).

4.6.3 Propiedades bioquímicas

La microbiología estudia las reacciones bioquímicas que ocurren en el suelo. Existiendo prácticas en donde se mide el metabolismo aeróbico del suelo utilizando para ello la técnica volumétrica en donde se determina cuantitativamente la cantidad de CO_2 producido.

Easy PDF Creator is professional software to create PDF. If you wish to remove this line, buy it now.

En la naturaleza existen dos formas de enriquecer el suelo: por adición de carbohidratos, donde un aporte proveniente de tejidos vegetales y animales y el otro es añadido por el hombre en formas de abono, fertilizantes y plaguicidas. Todos los sustratos orgánicos anteriormente mencionados son mineralizables a diferentes velocidades por diversas microfloras.

Todas las secuencias degradativas convergen hacia una mineralización más o menos completa, en donde los diversos organismos heterótrofos con sus capacidades fisiológicas asimilan los diversos compuestos intermedios y los incorporan a su citoplasma, dando lugar al proceso de inmovilización, este proceso esta ligado a su metabolismo energético en el que el CO_2 es el producto final. De tal manera que la evolución de CO_2 en el sistema suelo se utiliza para determinar indirectamente el índice de actividad microbiana.

La MOS origina un incremento en la producción de CO_2; esto esta sujeto a diferentes condiciones ambientales como temperatura, pH y aireación del suelo (García, 1984).

La cantidad y disponibilidad de nutrimentos depende de la Biomasa Microbiana (BM). Una parte de la BM muere debido a los cambios en las condiciones ambientales, estas células muertas pueden descomponerse fácilmente por la mineralización hecha por otros microorganismos y ellos suplen o liberan fácilmente la cantidad de nutrimentos que la planta necesita (Paul y Solaiman, 2004).

4.7 COMPONENTES ORGÁNICOS DEL SUELO.

La MOS esta compuesta o constituida por los compuestos de origen biológico que se encuentran en el suelo. El edafón consiste en los organismos vivientes del suelo: flora y fauna. Los tallos, hojas, flores y frutos depositados en la superficie del suelo constituyen la hojarasca o mantillo. El humus esta compuesto por los restos postmortem de vegetales y animales que, depositados en el suelo, son constantemente sometidos a procesos de descomposición, transformación y resíntesis.

Según la recomendación de la Soil Science Society of America, la MOS se define en los términos siguientes: fracción orgánica del suelo que incluyen residuos vegetales y animales en diferentes estados de descomposición, tejidos y células de organismos que viven en el suelo y sustancias producidas por los habitantes del suelo (Fassbender y Bornemisza, 1987).

Easy PDF Creator is professional software to create PDF. If you wish to remove this line, buy it now.

La composición de los componentes de la MOS puede clasificarse de maneras distintas, atendiendo siempre, al origen o la naturaleza química de sus materiales (Cuadro 4).

Desde el punto de vista del origen pueden considerarse los siguientes grupos significativos.

- Macroorganismos vivos
- Restos de microorganismos muertos pero identificables
- Microorganismos vivos
- Materiales orgánicos muertos y finamente divididos.

Cuadro 4. Cantidades medias de materiales orgánicos por hectárea de suelo, formadas bajo pradera en una región templada subhúmeda (Tomado de Cepeda 1991).

Material orgánico	kg ha^{-1}
Macroorganismos vivos	15,000
Raíces	
Insectos	1,000
Lombrices de tierra	500
Nemátodos	50
Crustáceos	40
Caracoles, babosas	20
Roedores, culebras, etc.	20
Restos de macroorganismos muertos pero identificables	4,000
Microorganismos vivos	3,000
Bacterias	
Hongos	3,000
Actinomicetos	1,500
Protozoos	100
Algas	100
Materiales orgánicos muertos y finamente divididos	150,000

La numerosa población del suelo comprende desde bacterias hasta grandes animales excavadores y raíces de árboles corpulentos. La descomposición es una particularidad de los organismos del suelo, por lo que ningún material escapa a este fin. Con frecuencia son los insectos y lombrices de tierra los que inician el proceso masticando el material, digiriendo parte de él y desmenuzando el resto en fragmentos.

Easy PDF Creator is professional software to create PDF. If you wish to remove this line, buy it now.

La descomposición es sólo una de las muchas funciones desarrolladas por la vida animal y vegetal en el suelo; otra es la extracción de agua. La absorción de agua por las plantas reduce mucho la intensidad del lavado y, en consecuencia, ayuda a mantener la fertilidad del suelo (Cepeda, 1991).

La actividad biológica depende mucho de la estructura del suelo, del volumen de poros y de la permeabilidad: las raíces de las plantas al abrirse camino y crecer desplazan partículas del suelo; las lombrices, insectos y roedores reorganizan el suelo con sus galerías, incluso las bacterias son capaces de mover partículas de arcilla y contribuir en la formación de agregados del suelo. Tanto los organismos grandes como los diminutos producen exudados y residuos que ayudan a unir las partículas de limo y arcilla para formar unidades estructurales (Cepeda, 1991).

La parte más estable de la MOS se llama humus, que se define como la fracción más o menos estable de la materia orgánica del suelo, la que se obtiene después que se ha descompuesto la mayor parte de las sustancias vegetales o animales añadidas al suelo.

El humus se puede clasificar de acuerdo a tres criterios generales:

- Por su morfología
- Por su forma en la naturaleza
- Por su composición química

Los tipos de humus generados dependerán del tipo de vegetación y de la acción de los microorganismos presentes. Esto los hace específicos para cada lugar.

El tipo de humus generado también depende del régimen hídrico:

- Humus bruto
- Humus moder
- Humus mull

Cada uno de los cuales se considera como humus terrestre; en suelos forestales, por lo regular se presentan condiciones hídricas favorables, lo que permite la formación de humus terrestre (Fassbender y Bornemisza, 1987).

Easy PDF Creator is professional software to create PDF. If you wish to remove this line, buy it now.

El humus también se clasifica de acuerdo al tiempo de descomposición de sus componentes:

- Bruto. Lenta descomposición, de 10 a 20 años.
- Moder. Estado intermedio
- Mull. Procesos de transformación rápida, si se presentan altas temperaturas y condiciones edafológicas óptimas.

El humus representa a los restos vegetales intactos que se han acumulado en la superficie del suelo por depósito; formando la capa de mantillo. En el mantillo hay tres capas:

- O_L litter; hojarasca, residuos vegetales inalterados.
- O_F fermentación; alteración, residuos vegetales en proceso de degradación.
- O_H humus; con acumulación de productos de resíntesis de naturaleza húmica.

En la mineralización, los residuos sufren un proceso de degradación o descomposición hasta de los componentes elementales de las proteínas, carbohidratos y otros. Los productos resultantes pueden ser objeto de nuevos procesos de resíntesis y polimerización, dando lugar a nuevos agregados químicos que reciben el nombre de ácidos húmicos que poseen características y propiedades específicas; este proceso recibe el nombre de humificación (Fassbender y Bornemisza, 1987).

En la Figura 6, se muestra la tasa de transferencia anual de C entre los principales compartimentos (vegetación terrestre, suelo, océanos y atmósfera) que lo contienen. La reserva de los residuos vegetales se divide, con base en su contenido de lignina y N, en productos estructurales y metabólicos con tasas de descomposición entre 2 a 5 y 0.1 a 1 años respectivamente.

Easy PDF Creator is professional software to create PDF. If you wish to remove this line, buy it now.

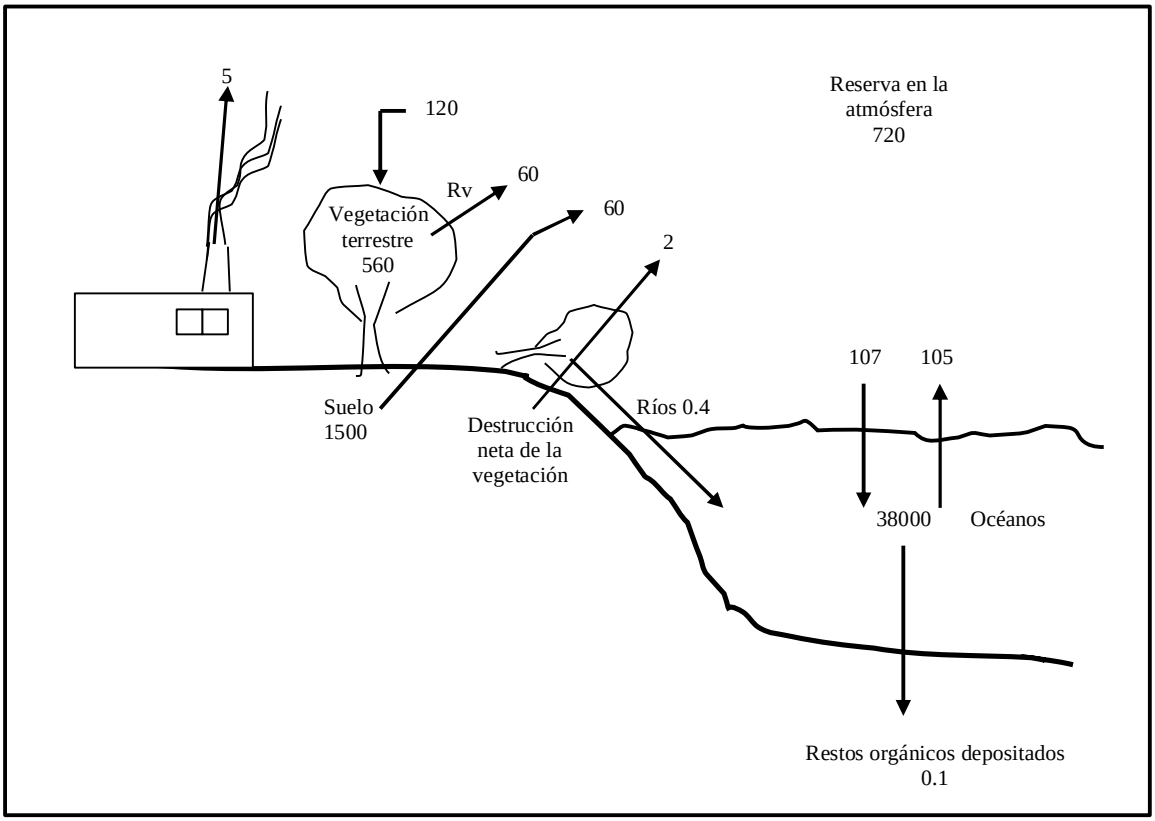


Figura 6. Ciclo global del carbono. Transferencia anual de carbono entre litosfera, hidrosfera y atmósfera. (Cantidades expresadas como 10^{15} g C año^{-1}). Tomado de Lal *et al*., 1998.

Los ciclos de nutrimentos en suelos involucran reacciones bioquímicas, químicas y fisicoquímicas que se llevan a cabo a través de procesos bioquímicos en los que participan microorganismos, raíces de plantas y fauna edáfica (Tabatabai, 1994). La calidad y estructura de la MOS tiene influencia sobre todos los flujos de materia, tanto en el suelo como entre el suelo, planta, agua y atmósfera.

El carbono orgánico del suelo esta relacionado con la calidad del mismo ya que, mejora su estructura, la capacidad de retención de agua, la biodiversidad del suelo, los ciclos de elementos y la reserva de nutrimentos, por lo que el COS ha sido reconocido, por el Ministerio Canadiense de investigación sobre bosques (Canadian Council of Forest Minister) como el principal indicador de manejo sustentable de los bosques (Tremblay *et al*., 2002).

Easy PDF Creator is professional software to create PDF. If you wish to remove this line, buy it now.

En nuestro país los suelos de bosques de zonas templadas se derivan frecuentemente de roca madre volcánica y son relativamente fértiles (Aguilera-Herrera, 1993, citados en Challenger, 1998).

Con procesos que degradan al suelo como sobrepastoreo, deforestación, uso agrícola y cambio en uso del suelo que son irreversibles, se provocan pérdidas de MOS o erosión (pérdida de la capa más fértil del suelo) y con ello del carbono residente en el suelo y así la calidad del suelo se convierte en uno de los factores que determinan la salud del ecosistema.

El contenido y estado del COS, influye en los procesos microbianos y químicos de los demás elementos esenciales contenidos en la MOS (Bundt *et al.,* 2001). Los procesos de mineralización y humidificación de la materia orgánica aportada al suelo, controlados por la temperatura, humedad y estado de perturbación del suelo, pueden formar, en condiciones favorables humus *mull*, biológicamente activo (Polo *et al*., 1978) o sustancias húmicas químicamente resistentes *moder* que con las *mull*, participan de manera importante tanto para amortiguar los efectos de gas invernadero que tendría el CO_2 en la atmósfera como en los procesos relacionados al ciclo del C (Qualls *et al*., 2003; Conant *et al*., 2003).

4.7.1 Ciclo del carbono

El carbono es el constituyente común en toda la materia orgánica. Como consecuencia, sus movimientos durante la digestión microbiana de los tejidos son extraordinariamente significativos. Mucha de la energía adquirida por la fauna y flora en el suelo viene de la oxidación del carbono. Como resultado, su anhídrido es desalojado continuamente y en grandes cantidades. Los cambios variados que este elemento provoca dentro de y fuera del suelo son designados colectivamente como “ciclo del carbono” (Figura 7).

Liberación del CO_2. Al ser digeridos los compuestos de los residuos vegetales, el anhídrido carbónico es expulsado. Esta es la principal fuente de este gas, a pesar de que pequeñas cantidades de él sean excretadas por las raíces de las plantas y sean incorporadas al agua de lluvia. El anhídrido carbónico del suelo, expulsado tanto en verano como en invierno, escapa al fin a la atmósfera en su mayor grado, donde de nuevo puede ser usado por las plantas. Así en ciclo queda completado.

Easy PDF Creator is professional software to create PDF. If you wish to remove this line, buy it now.

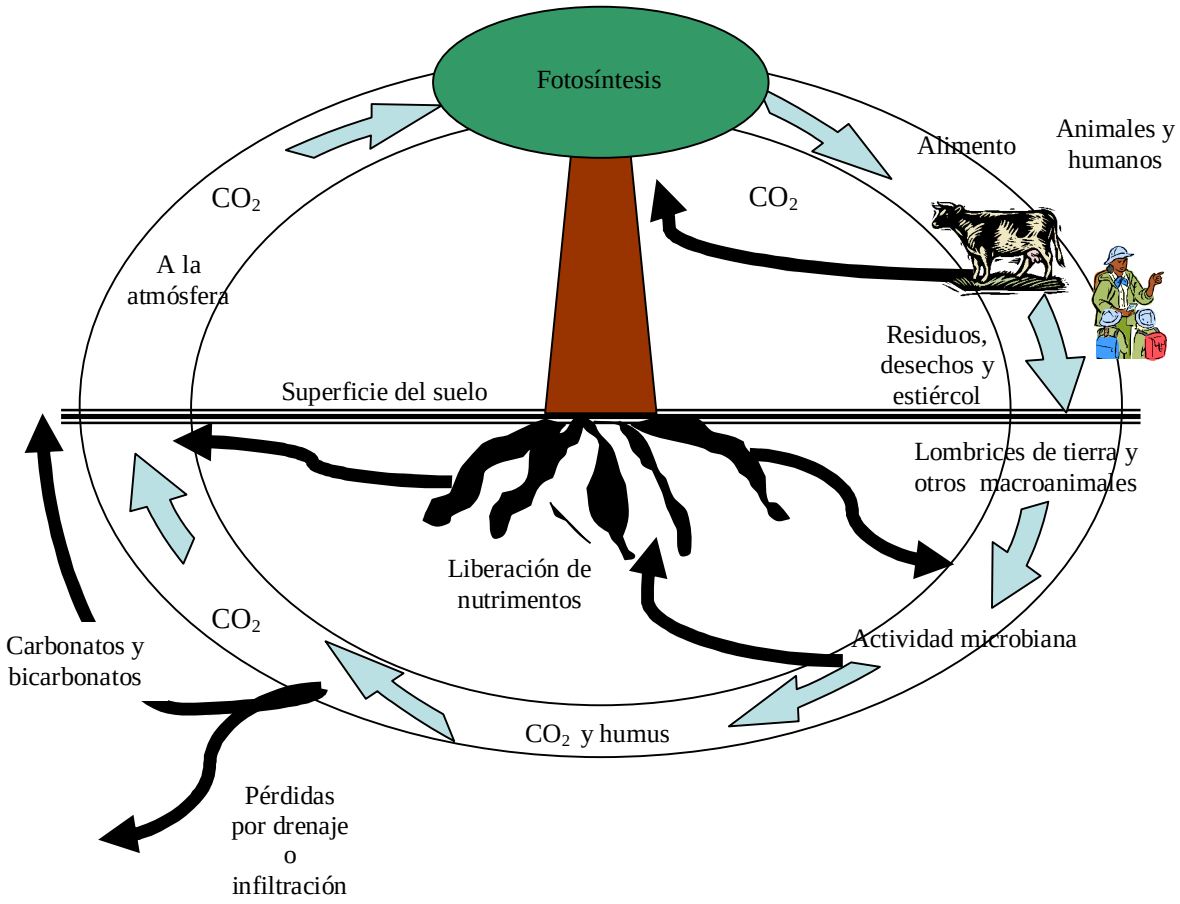


Figura 7. Ciclo del carbono. Tomado de Brady, 1991.

El ciclo del carbono, también llamado biociclo o ciclo de la vida. Las plantas asimilan el CO_2 proveniente de la atmósfera, para producir compuestos orgánicos utilizando la energía del sol. El hombre y otros animales superiores obtienen energía y nutren sus cuerpos de los productos de las plantas y estos incorporan desechos y residuos al suelo. Los micro y macroorganismos son los principales digestores de estos residuos o materiales orgánicos en el suelo, incorporando nutrimentos para la planta y a la vez liberan CO_2 y humus que son productos relativamente estables.

Una menor cantidad de C reacciona en el suelo, produciendo ácido carbónico (H_2CO_3) y los carbonatos y bicarbonatos de Ca, K, Mg y de otras bases. Estas sales son fácilmente solubles y pueden perderse por drenaje o ser usadas por las plantas superiores. Así, no solo los iones de Ca, Mg y K están presentes en las superficies de absorción de microorganismos y plantas superiores, sino que los iones CO_3^{-2} y CO_3H^{-1} también los hacen asimilables. Pequeñas cantidades de carbono pueden entrar en las plantas por este procedimiento. Mucho C presente en las plantas superiores, no obstante, es adquirido de la atmósfera por fotosíntesis.

Easy PDF Creator is professional software to create PDF. If you wish to remove this line, buy it now.

El C elemental se halla en los suelos en cierta cantidad, y a pesar de no ser específicamente importante, su presencia es bien significativa. Bajo ciertas condiciones el metano (CH_4) y el sulfuro de carbono (S_2C) pueden ser producidos en pequeña cantidad. Pero de todos los productos sencillos del C, el anhídrido carbónico es con mucho, el más abundante (Buckman y Brady, 1991).

4.7.2 Ácidos orgánicos

La MOS se ha dividido en ácidos fúlvicos y húmicos. Esta división esta basada en sus diferentes solubilidades en soluciones ácidas y básicas (Yang y Wang, 1996).

El reconocimiento de la naturaleza química de los constituyentes de la materia orgánica, es importante porque su presencia y proporción, pueden ser indicadores de la actividad microbiana ya que por ejemplo las ligninas, le imparten a la MOS una resistencia a la descomposición bioquímica, a diferencia de los carbohidratos que pronto pasan a ser convertidos en nueva biomasa o ser descompuestos en agua y CO_2.

Clasen *et al.,* (1998) y Porta *et al*., (1999) explican que existen procesos de humificación directa, de compuestos orgánicos sencillos a sustancias húmicas y humificación lenta de la biomasa microbiana a sustancias húmicas. El producto final en ambos casos son los ácidos fúlvicos y ácidos húmicos (60 a 90%) y huminas (10 al 40%), cuyas proporciones relativas dependerán de los factores internos: composición química de los materiales aportados y de factores externos o características ecológicas del medio.

Las sustancias húmicas son macromoléculas polielectrolíticas de alto peso molecular. Son materiales resistentes a la degradación, formados durante la descomposición de vegetales que se depositan en el suelo, son clasificadas en función de su solubilidad.

Estas sustancias ejercen un papel importante en el transporte y asimilación de nutrimentos para las plantas, pues afectan directamente las actividades enzimáticas y de la permeabilidad de la membrana e indirectamente modifican la estructura del suelo, aumentan la capacidad de intercambio de cationes, estimulan la actividad microbiana y la capacidad de solubilizar algunos complejos (Silva, 2001, citado por Santos, L. F. dos, 2003).

Piccolo (1996) citado por Santos, L. F. dos (2003), verificó experimentalmente que la estabilización de agregados del suelo aumenta debido a un aumento en la fracción de material orgánico, como son las sustancias húmicas y no la materia orgánica como un todo, siendo los

Easy PDF Creator is professional software to create PDF. If you wish to remove this line, buy it now.

ácidos húmicos la fracción húmica más hidrófoba y menos ácida, y la principal responsable por la estabilidad de los agregados. El autor comenta que el alto peso molecular del material húmico altamente condensado es más importante en la estabilización de microagregados que la materia húmica de bajo peso molecular.

Se han realizado diferentes investigaciones a lo largo del tiempo con lo que ahora se cree que todas las sustancias húmicas de color oscuro son parte de un sistema. De acuerdo con este criterio, las diferencias entre ácidos húmicos y fúlvicos se explican en función de su peso molecular, número de grupos funcionales y su extensión de polimerización. Los ácidos fúlvicos tienen menor peso molecular que los húmicos, una mayor cantidad de O_2 en su estructura y bajos contenidos de C y más grupos funcionales de naturaleza ácida como el COOH.

4.8 HERRAMIENTAS EN EL MUESTREO Y ANÁLISIS DE SUELOS.

El muestreo es la actividad por medio de la cual se toman partes representativas de un todo llamado población, con el objetivo de que, a partir del estudio de las características de cada una de esas partes, se conozcan los de la población total (Valencia y Hernández, 2002).
Un muestreo de suelo consiste en tomar muestras representativas de un área a cierta profundidad, con la finalidad de analizarlas para conocer las propiedades que presentan y a partir de ellas obtener conclusiones válidas para la extensión original.

Diseño probabilístico para el muestreo de suelos. Este diseño se utiliza en zonas homogéneas que son las que no presentan variaciones superficiales visibles de color, drenaje, evidencias de salinidad o sodicidad, y otros problemas como pedregosidad, pendiente, etc.

Diseño aleatorio simple al asar. Se utiliza si un área homogénea es menor a cinco hectáreas y existen puntos de referencia fácilmente visibles a lo largo y ancho de toda la zona. Para la ubicación de los lugares de muestreo se requiere situar en los límites del terreno los ejes coordenados de un plano cartesiano imaginario. Las coordenadas de cada sitio de muestreo se eligen al azar.

Easy PDF Creator is professional software to create PDF. If you wish to remove this line, buy it now.

4.9 ANÁLISIS ESTADÍSTICO

Análisis multivariado. Los métodos multivariados se utilizan para ayudar a que un gran número de variables medidas en un gran número de unidades experimentales. Los datos multivariados son observaciones de las diferentes variables, el término se refiere al método que analiza simultáneamente estas múltiple variables. Estas técnicas tienen su importancia en examinar los datos en un intento por saber si existe información útil en los datos, para el establecimiento de importancia de variables para el estudio.

Análisis de componentes principales (ACP). Es una técnica estadística que crea nuevas variables, esto consiste en la reducción de la información sobre un conjunto de variables. En el ACP se transforma un conjunto de variables correlacionadas en un nuevo conjunto no correlacionado (Pérez, 1996).

El ACP reduce el número de datos e identifica nuevas variables significativas o de mayor robustez, estas nuevas variables no están correlacionadas, el primer componente principal explica la variabilidad de los datos, tanto como sea posible; cada componente subsiguiente toma en cuenta la variabilidad restante.

Para decidir que componentes excluir, para reducir el número de datos, se debe considerar:

1.- Que los componentes requeridos expliquen preferentemente el 90% de la variabilidad total.

2.- Excluir los componentes cuyos valores propios asociados sean menores que la media (eigenvalores < 1, con variables estandarizadas).

3.- Elegir los componentes principales requeridos, de tal forma que queden representadas todas las variables, es decir, que con los componentes principales elegidos se explique el mayor porcentaje de variables (r cercana a 100%) (Rencher, 1995).

Easy PDF Creator is professional software to create PDF. If you wish to remove this line, buy it now.

5. ANTECEDENTES Y JUSTIFICACIÓN.

5.1 Antecedentes

Los bosques templados del país son de gran importancia para las comunidades humanas. Proporcionan bienes y servicios ambientales múltiples como recreación, visión estética, hábitat para la vida silvestre y protección de cuencas hidrológicas en las que los suelos funcionan como cuerpos receptores, filtradores y almacenadores de agua, además de sus funciones en captura de carbono, almacenamiento y suministro de nutrimentos para los vegetales, por lo que el suelo que sostiene estos bosques tiene usos múltiples.

La población rural y urbana de las zonas adyacentes al PN Izta-Popo y Zoquiapan y Anexas, Texcoco, Ixtapaluca, Tlalmanalco, Amecameca, Atlautla, Ecatzingo en el Estado de México también en Tlahuapan, San Salvador el Verde, Domingo Arenas, San Nicolás de los Ranchos y Tochimilco, en el Estado de Puebla y Tetela del Volcán en Morelos y en la RB El Cielo, Gómez Farias, Ocampo, Jaumave y Llera de Canales; utilizan de manera directa estas zonas forestales protegidas para obtener beneficios de la Biodiversidad presente, de la captura de carbono, de las condiciones de las cuencas hidrológicas, plantas medicinales, comestibles, maderables, fauna silvestre, minerales no metálicos, ente otros (Figura 8).

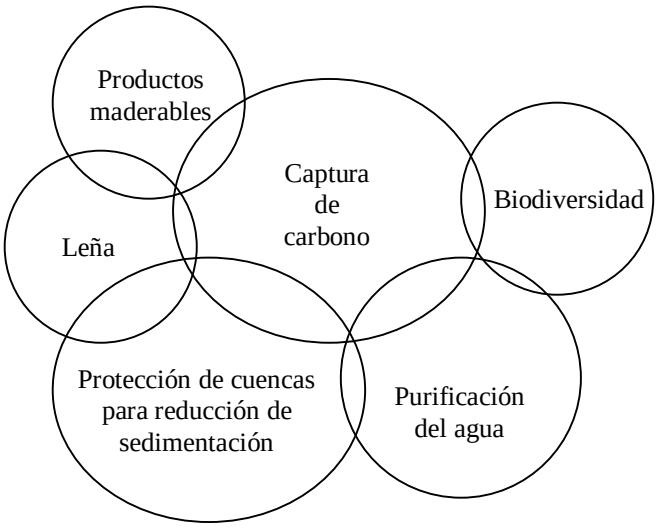


Figura 8. Beneficios sociales de los servicios forestales.

Easy PDF Creator is professional software to create PDF. If you wish to remove this line, buy it now.

5.2 Justificación

Un diagnóstico de indicadores de calidad edáfica ayuda (a mediano y largo plazo) a los manejadores de recursos, al establecimiento de un programa de manejo que sea la base de un desarrollo sustentable para las comunidades rurales y la sociedad en general.

Con la aplicación de los resultados de ésta investigación, se puede contribuir al desarrollo de técnicas modernas de manejo y conservación de recursos de los bosques, para satisfacer la demanda nacional y mundial de productos forestales.

Como ya se menciono, el suelo es un importante receptor de carbono atmosférico, por lo tanto su estudio es de gran importancia, no solo para determinar índices de calidad edáfica, sino, también para contribuir en los estudios de captura de CO_2 y calentamiento global, además de la relación que guarda su ciclo biogeoquímico con la disponibilidad de otros elementos para las plantas.

Mediante la estimación de contenidos de carbono orgánico del suelo en cada una de sus fracciones, el grado de humificación de la materia orgánica y su relación con la calidad del suelo se puede contribuir a desarrollar índices de calidad edáfica de bosques templados que aún están poco desarrollados.

Los resultados de este trabajo tienen impacto en:

- La determinación de los índices de calidad de suelos forestales, que aún están poco desarrollados; con lo que se ayuda a establecer estrategias de manejo de los recursos forestales.
- Aportar información para el diseño de los planes nacionales e internacionales de manejo de recursos naturales en cuanto al derecho a pago por los servicios ambientales de los ecosistemas forestales.
- Contribuir a la concientización de las comunidades humanas aledañas a los bosques de México para el establecimiento de programas de manejo, conservación y aprovechamiento económico de los recursos forestales de estas comunidades.

Easy PDF Creator is professional software to create PDF. If you wish to remove this line, buy it now.

6. OBJETIVOS

General

Estimar la cantidad de Carbono Orgánico del Suelo de bosques templados y la relación existente con la calidad del suelo.

Particulares

- Determinar la cantidad de C orgánico del suelo (COS).
- Determinar la cantidad de C en la biomasa microbiana (CBM).
- Determinar la cantidad de C en la fracción del mantillo.
- Estimar las fracciones de los ácidos Húmicos y ácidos Fúlvicos en la materia orgánica del suelo.
- Comparar los contenidos de Carbono Orgánico del Suelo en bosques templados desarrollados en suelos de diferente origen geológico.

Easy PDF Creator is professional software to create PDF. If you wish to remove this line, buy it now.

7. HIPÓTESIS

Con base en el conocimiento de que el carbono orgánico del suelo (COS) contribuye a mejorar la estructura, la capacidad de retención de agua, los ciclos de elementos y la reserva de nutrimentos, se plantea la siguiente:

Hipótesis

La cantidad y calidad (grado de humificación, carbono en mantillo y carbono en biomasa microbiana) del carbono orgánico del suelo (COS), son un buen indicador de la calidad del suelo.

Easy PDF Creator is professional software to create PDF. If you wish to remove this line, buy it now.

8. ZONAS ECOLÓGICAS DE ESTUDIO

La zona ecológica templada húmeda de México se restringe a estrechas zonas altitudinales de las regiones montañosas que contribuyen a condensaciones de masas de aire húmedo que provienen del mar durante el verano y de masas de aire polar hacia el sur en invierno (Challenger, 1998).

Los bosques de *Quercus* o encinares son comunidades vegetales muy características de las zonas montañosas de México. De hecho junto con los pinares constituyen la mayor parte de la cubierta vegetal de áreas de clima templado y semihúmedo. Los encinares guardan relaciones complejas con los pinares, con los cuales comparten afinidades ecológicas generales y los bosques mixtos de *Quercus* y *Pinus* son muy frecuentes en el país.

Con frecuencia la franja del encinar se ubica a niveles altitudinales inferiores a las del pinar, pero esta disposición no se cumple en muchas regiones y a veces se invierte. Los bosques de coníferas, son frecuentes en las zonas de clima templado y frío del hemisferio boreal. Según Flores *et al.,* (1971) citados en Rzedowski (1978), el conjunto de los bosques de coníferas ocupa cerca de 15% del territorio del país y más de 9/10 de esta superficie corresponde a los de *Pinus* o de *Pinus* y *Quercus.* Les siguen en importancia, en cuanto a la extensión, los bosques de *Juniperus* y los de *Abies*, siendo los restantes de distribución muy restringida y localizada (Rzedowski, 1978).

8.1 PARQUES NACIONALES IZTACCIHUATL POPOCATEPETL Y ZOQUIAPAN Y A.

El Parque Nacional Izta-Popo y Zoquiapan y Anexas cuentan con una superficie de 45,097 ha (25,679 ha para el PN Izta-Popo y 19,418 ha para Zoquiapan y Anexas) ubicados en los municipios de Texcoco, Ixtapaluca, Tlalmanalco, Amecameca, Atlautla, Ecatzingo en el Estado de México, también en Tlahuapan, San Salvador el Verde, Domingo Arenas, San Nicolás de los Ranchos y Tochimilco, en el Estado de Puebla y Tetela del Volcán en Morelos. Los parques quedan comprendidos dentro de la Sierra Nevada, entre los estados de Puebla, Morelos y Estado de México, forman parte del Eje Neovolcánico Transversal.

Easy PDF Creator is professional software to create PDF. If you wish to remove this line, buy it now.

La topografía del PN Izta-Popo comprende a los volcanes Iztaccíhuatl y Popocatepetl, con alturas de 5280 y 5482 m respectivamente. En el área de Zoquiapan y Anexas, las elevaciones más notables son el cerro Tláloc (4,120m), el Yoloxóchitl (3900m), el Telapón (4060m) y el Papayo (3600m).

El Parque Nacional Izta-Popo se encuentra en las coordenadas 18°54.6´19° 42´ Lat N y 98° 31.2´ 98° 48´ Long W, con una extensión de 1320.16 Km^2. El Parque Nacional Zoquiapan y Anexas se encuentra en las coordenadas 19°15´ y 19°26´ Lat N y 99°49´- 99°58´ Long E y tiene una superficie de 19,418 ha que incluye la Zona Protectora Forestal Montes de la Hacienda de Zoquiapan, Río Frío e Ixtahuacan (Figura 9).

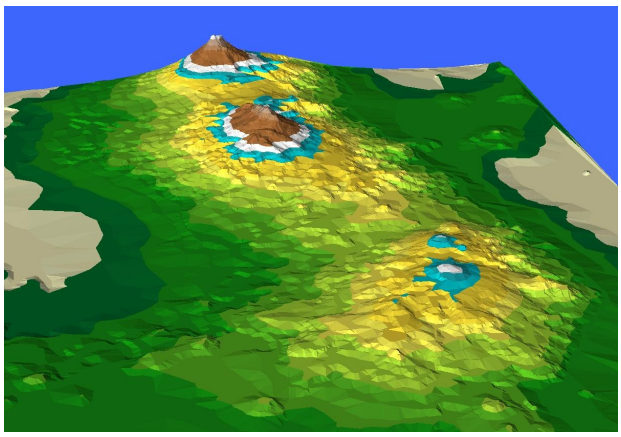


Figura 9. Mapa de El Parque Nacional Izta-Popo y Zoquiapan y Anexas.
Tomado de Valderrábano, 2005.

Englobando los diferentes municipios de los cuales forman parte los Parques Nacionales Izta-Popo y Zoquiapan y Anexas, se pueden agrupar distintos climas: templado subhúmedo, templado húmedo, semifrío húmedo, frío y muy frió, presentando lluvias en verano.

En los municipios donde se presenta el clima templado subhúmedo la temperatura media anual es de 16°C con una precipitación anual de 746 mm, con temperaturas en el mes más frío inferiores a los 18°C, pero superiores a los -3°C.

Easy PDF Creator is professional software to create PDF. If you wish to remove this line, buy it now.

En los municipios que presentan clima templado húmedo la temperatura media anual es de 16.1°C, en los meses más fríos la temperatura promedio es de 13.4°C y en los más cálidos es de 19.1°C, con una precipitación media anual de 659.3 mm a 1885 mm.

En el clima semifrío húmedo la temperatura media anual es de 14.9°C, teniendo temperaturas en los meses más fríos que van de los -3 a los 15°C y en los más calidos, de 16 a 19.8°C, con una precipitación promedio anual de 1186 mm.

En los lugares donde predomina el clima frío y muy frío, la temperatura media anual va de los -2 a los 5°C, con precipitaciones anuales de 1186 mm (CONANP, 2006).

En el PN Izta-Popo, las principales comunidades vegetales que se encontraron en el intervalo altitudinal entre los 2650 y 3892 m, están representadas por los géneros *Pinus* y *Abies*. El género *Pinus* se encuentra a lo largo de todo el gradiante altitudinal, mientras que el *Abies* es de localización más restringida, predominantemente entre los 3000 y 3500 m. En el PN Zoquiapan y Anexas la vegetación arbórea dominante en el intervalo altitudinal de los 2800 a los 3500 m, son *Pinus*, *Abies* y *Quercus*.

Los tipos de suelos reportados en la cartografía como dominantes de estas zonas son:

- Andosol: suelos de color oscuro, característicos de los afloramientos de cenizas volcánicas y formados por complejos alofano-humus. En estos suelos la MOS desempeña un papel motor esencial; su perfil es de tipo AC, en algunos casos se puede formar un horizonte B de poco espesor.
- Leptosol (Regosol): llamados suelos poco evolucionados, pobres en MO característicos de las pendientes donde la erosión ha tenido actividad intensa, en general la MO se incorpora mal o no forma verdaderos complejos húmico-arcillosos con el material mineral.
- Phaeozem: llamados suelos isohúmicos empardecidos. Este suelo representa la transición entre lo suelos isohúmicos (con perfil AC) y los suelos empardecidos, cuyo horizonte humífero A_1 está menos desarrollado que el horizonte B su formación vegetal característica es la pradera, que esta bien representada en América del Norte.
- Cambisol: también conocidos como suelos pardos templados, son suelos empardecidos, caracterizados por la ausencia de lavado de arcilla y de hierro, su perfil es de tipo A (B) C (Duchaufour, 1984).

Easy PDF Creator is professional software to create PDF. If you wish to remove this line, buy it now.

8.2 RESERVA DE LA BIOSFERA EL CIELO.

En el sur del estado de Tamaulipas, se encuentra la Sierra de Cucharas o de Guatemala. La convergencia de diferentes condiciones geológicas, climáticas y biológicas en esta zona provocan una riqueza natural de gran magnitud. La Reserva de la Biosfera el Cielo se extiende a través de 144,530 ha, ocupando parte de los municipios de Llera de Canales (17,330.744 ha), Gómez Farías (21,744.164 ha), Ocampo (24,004.695 ha), y Jaumave (81,450.907 ha) (SEDESOL estatal, s.f. 2005), 22° 55’ 23° 25’ N y 99° 05’ 99° 26’ W (Figura 10).

La Sierra Madre Oriental, se encuentra constituida por masas calcáreas secundarias del Cretácico Inferior de origen sedimentario (Puig, 1976).

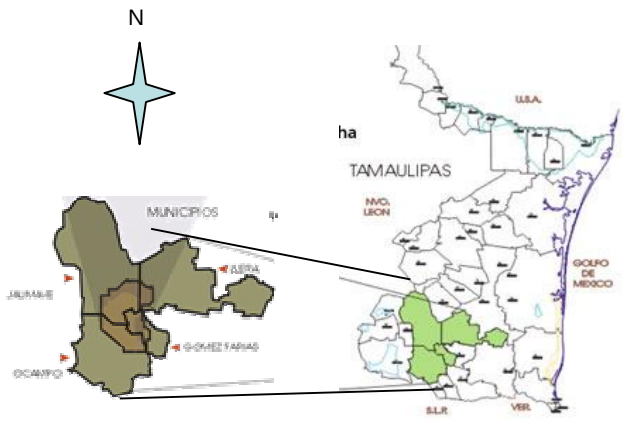


Figura 10. Mapa de la Reserva de La Biosfera El Cielo.

Las características peculiares de la reserva se presentan debido, en gran parte, a los cambios pronunciados de altitud; por lo tanto, se afirma que en solo 21 km, medidos en línea recta, se presenta un gradiante de vegetación tropical-templado-xérico.

La reserva se divide para su manejo; en dos tipos básicos de zonas, la zona núcleo; de esta categoría se tienen dos diferentes zonas, y la zona de amortiguamiento que rodea a las zonas núcleo.

Los macizos montañosos presentan altitudes que van de los 300 a los 2000 m; los principales son: la Sierra de Nogales con una orientación norte-sur, en la parte norte de la reserva, la sierra de Santa Fe en la parte noroeste de la reserva con la misma orientación y en la parte sur se encuentra la sierra de Tamalave parte de la cual le pertenece a la sierra de Cucharas, finalmente la sierra Chiquita esta localizada muy cerca de Gómez Farías.

Easy PDF Creator is professional software to create PDF. If you wish to remove this line, buy it now.

En las sierras dominan suelos derivados de la disolución de calizas, donde existen diferentes asociaciones de ellos. Las formaciones geológicas más comúnmente representadas en la reserva son: Basalto, Calizas y Lutitas (formación dominante en la zona de estudio), Conglomerado, y suelos aluviales.

Los tipos de suelo encontrados en la reserva son: Phaeozem calcárico, P. háplico, y P. lúvico, Litosol (suelo dominante en la zona de estudio), Luvisol-crómico, Regosol-calcárico, Rendzina y Xerosol-cálcico y háplico (INEGI, 2000).

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

Los climas de la reserva se pueden agrupar en cuatro principales de acuerdo con la altitud: el cálido subhúmedo se presenta entre los 300 y 800 m, con precipitaciones anuales de 1,500 a 2,000 mm al año.

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

Los principales tipos de comunidades vegetales son: en la parte mas baja (200 a 800 m de altitud), dominan el bosque tropical subcaducifolio; el bosque de *Quercus* o encinar, se desarrolla entre los 700 y 1000 m; el bosque mesófilo de montaña predomina de los 700 a los 1,400 m; en el bosque de coníferas dominan varias especies de pinos y de encinos hubicandoce por encima de los 1,400 m (zona de trabajo). Finalmente, el matorral xerófilo, se localiza en las laderas del sotavento del norte, a una altitud de 1,600 m.

Los tipos de suelos reportados en la cartografía como dominantes de esta zona de estudio son:

- Leptosol lítico (Litosol): son suelos que se desarrollan sobre roca dura, en estos suelos, un aumento en los contenidos de MO en la superficie, provoca un principio de evolución.
- Rendzinas: estos suelos se caracterizan por presentar un perfil de tipo AC o AR, a excepción de la rendsina forestal, que presenta un horizonte B pardo u

Easy PDF Creator is professional software to create PDF. If you wish to remove this line, buy it now.

ocre, poco desarrollado con relación al horizonte A_1. El horizonte A_1 esta teñido por la MO, enmascara más o menos el color pardo del hierro:

- Luvisol: también conocidos como suelos fersialíticos, presentan evolución particular de los óxidos de hierro (rubificación); con predominio de arcillas 2/1. Se presentan en sitios con clima marcado por el fuerte contraste entre un periodo húmedo, relativamente frío, y un verano calido y seco (Duchaufour, 1984).

Easy PDF Creator is professional software to create PDF. If you wish to remove this line, buy it now.

9. MATERIALES Y MÉTODOS

9.1 ZONAS DE ESTUDIO Y TOMA DE MUESTRAS.

El estudio fue realizado en tres zonas de la Republica Mexicana caracterizadas por presentar bosques templados en distintos pisos altitudinales y suelos con diferente origen geológico; los Parques Nacionales (PN) Izta-Popo, Zoquiapan y Anexas en la Sierra Volcánica Transversal y la Reserva de la Biosfera El Cielo, en la parte norte de la Sierra Madre Oriental.

- Con apoyo cartográfico (cartas climáticas, geológica, hidrológica, topográfica, edafológica, de uso actual y de uso potencial, etc.), con base en un gradiante altitudinal y de precipitación, se ubicaron tres zonas de bosque templado en el país; correspondientes a los PN Izta-Popo, Zoquiapan y Anexas y la Reserva de la Biosfera El Cielo.

- Se realizaron recorridos en campo, para la ubicación de las unidades ecológicas (UE), las cuales debían de presentar vegetación arbórea representada por *Abies, Pinus y Quercus,* principalmente y en un orden altitudinal.

- Para la toma de muestras de suelo se delimitó la unidad de muestreo (cuadrante de 50x20 metros que es representativa de la UE que se esta estudiando), posteriormente se colecto el número de muestras individuales para componer una muestra compuesta. Se definieron los sitios de muestreo en zig zag en equidistancia. Utilizando el diseño aleatorio o simple al azar, como técnica de muestreo.

La profundidad del muestreo se determinó en función de la profundidad de actividad radical de las especies dominantes. Las profundidades referidas, comenzaron a contar después de haber removido los residuos orgánicos.

- En cada condición observada, se realizó la toma de muestras compuestas de suelo, así como la toma de muestras de mantillo de las especies arbóreas dominantes.

Easy PDF Creator is professional software to create PDF. If you wish to remove this line, buy it now.

- Para las muestras de mantillo: en los sitios de colecta de muestra de suelo, se determinaron cuadrantes de medidas uniformes (2 cuadros de 0.25x0.25 m dentro del cuadrante de la Unidad de Muestreo), se colectaron y determinaron los pesos en fresco de cada uno y se formo una muestra compuesta con la que se trabajo en el laboratorio, donde fue estimado el peso seco y los contenidos de Carbono (Stevenson, 1982, citado en Himes *et al.,*1998), N y P (Allan, 1971).

En el Parque Nacional Izta-Popo, se trabajó en prácticamente todas sus exposiciones, en el estado de México en los municipios de Amecameca, Tlalmanalco y Atlautla, en el estado de Puebla en Sn. Salvador EL Verde, Tochimilco, Calpan y Santiago Xalizintla y en el municipio de Tetela del Volcán en Morelos en un rango altitudinal entre los 2650 y los 3892 m. La toma de muestras se realizó de Septiembre de 2004 a Febrero de 2005.

Las muestras de Zoquiapan y Anexas corresponden a la zona comprendida desde las comunidades de Río Frío, San Francisco, Acuautla y Coatepec hacia la cumbre del Telapon, San Dieguito Xochimanca, San Pablo Ixayoc hacia el Tlaloc; en un rango altitudinal de los 2864 a los 3537 m (Figura 11).

Se trabajó en la zona centro de la Reserva de la Biosfera de el Cielo en los límites de Gómez Farias y Jaumave y entre Ocampo y Gómez Farias en las zonas de mayor altitud, de los 1316 a los 2054 m (Figura 12).
La toma de muestras se realizó de Octubre de 2004 a Marzo de 2005.

Easy PDF Creator is professional software to create PDF. If you wish to remove this line, buy it now.

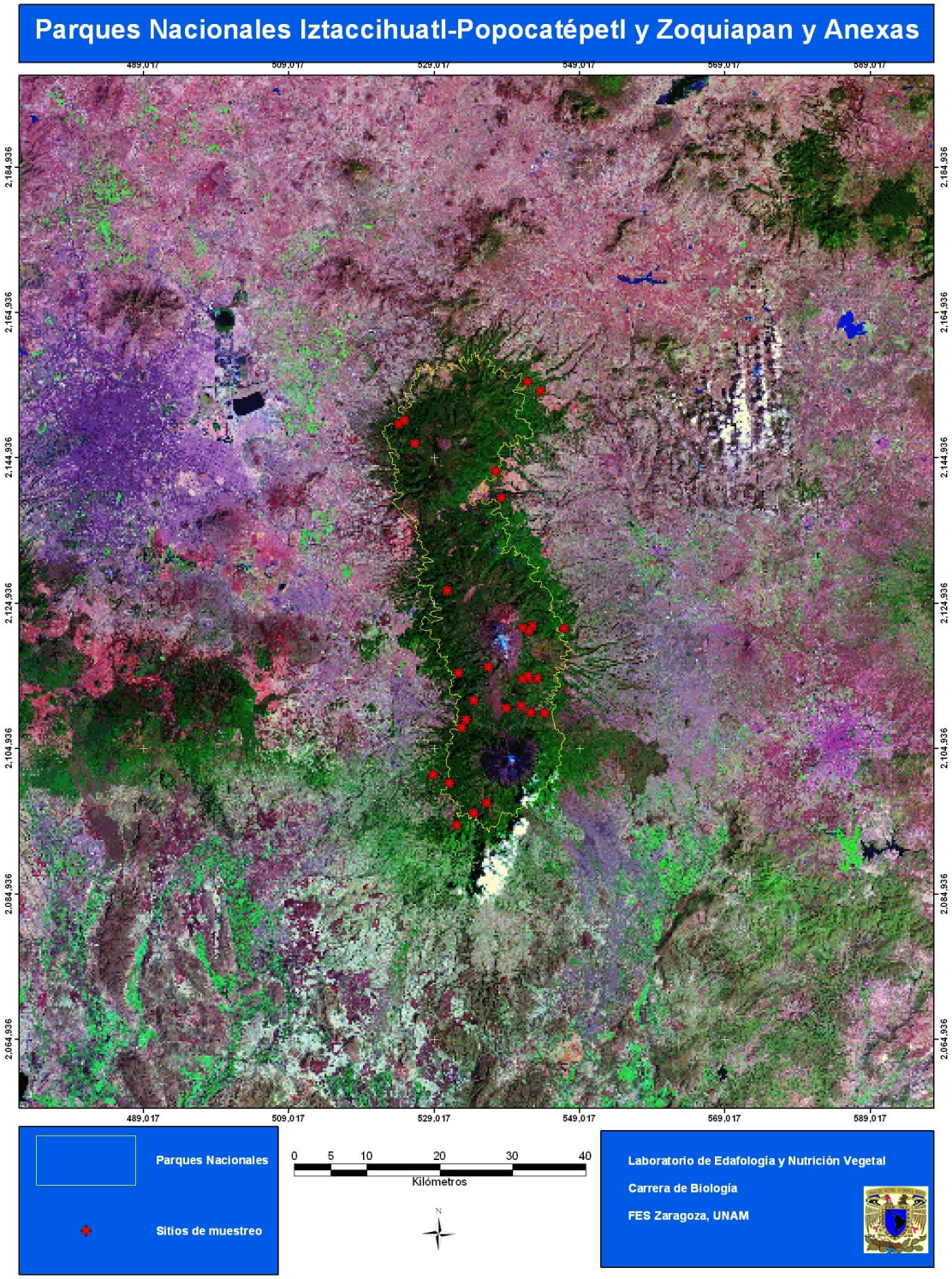


Figura 11. Puntos de trabajo dentro de los Parques Nacionales Izta-Popo y Zoquiapan y Anexas.

Easy PDF Creator is professional software to create PDF. If you wish to remove this line, buy it now.

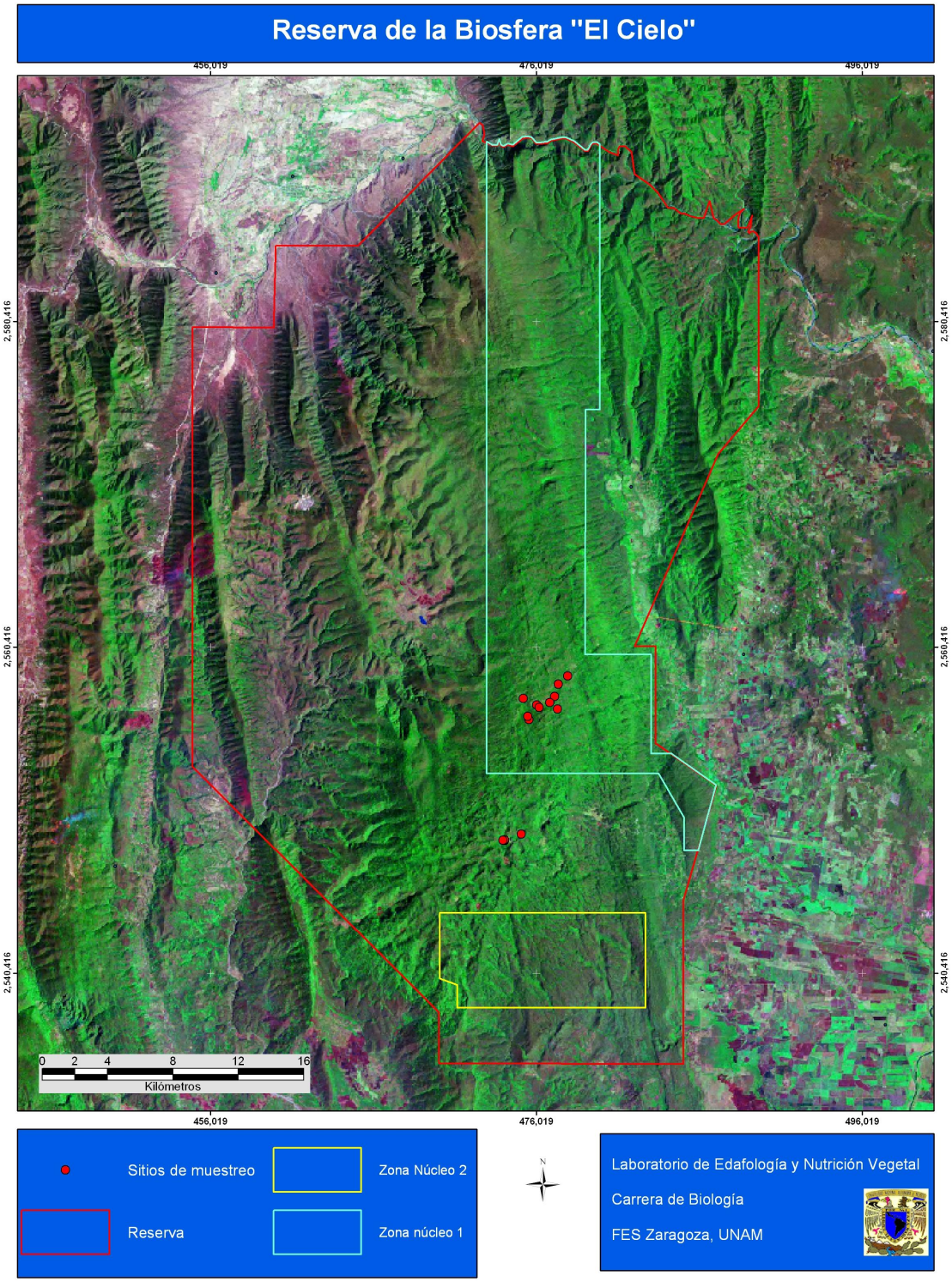


Figura 12. Puntos de trabajo en la Reserva de la Biosfera El Cielo.

Easy PDF Creator is professional software to create PDF. If you wish to remove this line, buy it now.

Con apoyo cartográfico y con base en un gradiante altitudinal en el que coexisten comunidades de *Pinus* o *Pinus-Quercus* y *Pinus-Abies*. Se eligieron 20 unidades ecológicas (UE) en el PN Izta-Popo, 10 en el PN Zoquiapan y Anexas y 17 UE en la Reserva de la Biosfera El Cielo, para su estudio. En cada una de las UE se trazaron de manera perpendicular a la pendiente más próxima, cuadrantes de 50x20 m. Para la descripción ecológica de cada unidad ambiental, se hicieron recorridos en campo y eligieron sitios representativos del tipo de suelo y vegetación dominante (Figura 13).

De aproximadamente 25600 ha que comprende el PN Izta-Popo, el área representativa estudiada en este parque, corresponde a 24000 ha, de acuerdo a un polígono que presenta vértices en sus distintas exposiciones. De 19000 ha que comprende el PN Zoquiapan y Anexas, fueron estudiadas 15 UE de 1000 m^2 cada una, las cuales distribuidas en los diferentes sitios de observación, comprenden un triangulo que incluye aproximadamente 17000 ha, mientras que en la RB El Cielo el área directamente estudiada representa 17,000m^2 o 1.7 ha, representando aproximadamente unas 2750 ha, considerando un polígono con vértices en las comunidades la Gloria, El Porvenir, Julilo y Alta Cima.

Figura 13. Recorridos en campo para la elección de los sitios representativos del tipo de suelo y vegetación dominante (UE).

Easy PDF Creator is professional software to create PDF. If you wish to remove this line, buy it now.

En los Parques Nacionales Izta-Popo y Zoquiapan y Anexas se presenta como material parental de sus suelos, roca ígnea extrusiva y volcánica-sedimentaria, dominan los suelos Andosoles, mientras que en la RB El Cielo predomina la roca sedimentaria calcárea y en menor grado la roca ígnea extrusiva, el tipo de suelo mayormente representado es el Leptosol (INEGI, 2006) (Figura 14).

Suelo Andosol, común en el PN Izta-Popo y Zoquiapan y anexas

Leptosol, dominante en la reserva de la Biosfera

Figura 14. Tipos de suelos dominantes en las zonas de estudio.

En la descripción fisiográfica de cada sitio de trabajo se registró fecha, lugar y altitud con la ayuda de un GPS (Garmin V), exposición, pendiente y vegetación arbórea dominante (Figura 15).

Figura 15. Descripción fisiográfica de los sitios de trabajo.

Easy PDF Creator is professional software to create PDF. If you wish to remove this line, buy it now.

Dentro de cada cuadrante y bajo la cobertura de las especies arbóreas estudiadas, se tomaron muestras de suelo y mantillo para realizar los análisis físicos, químicos y bioquímicos. Se formaron muestras compuestas provenientes de cuatro submuestras de suelo de 0 a 10 (horizonte de actividad biológica) y 0 a 20 cm (horizonte de actividad geoquímica), las muestras de 0 a 10 cm se tomaron utilizando un cilindro de plástico o metal de 10 cm de largo, este cilindro se introduce en el suelo extrayendo el suelo alojado dentro de él (Figura 16), las muestras de 0 a 20 cm fueron tomadas con una pala recta retirando la mayor parte del mantillo y colocándolas en bolsas de plástico, se secaron al aire y posteriormente se hicieron las determinaciones correspondientes en el laboratorio. Las muestras de mantillo se tomaron con pala de jardinero, procurando tomar lo menos posible fragmentos de suelo, estas muestras se guardaron en bolsas de papel y se secaron en la estufa, para su posterior uso en el laboratorio (Figura 16).

Figura 16. Toma de muestras de suelo y mantillo.

Las muestras se almacenaron de acuerdo a los objetivos planteados para su uso (Figura 17).

Figura 17. Almacenamiento de muestras de suelo, foliares y de mantillo.

Easy PDF Creator is professional software to create PDF. If you wish to remove this line, buy it now.

9.2 ANÁLISIS DE LABORATORIO

El reconocimiento de los mejores indicadores de calidad del suelo, se realizó con base en los análisis siguientes:

9.2.1 Análisis físicos

- Conductividad eléctrica 1:5 (Richards, 1990).
- (AS-03, clave de la técnica en la norma oficial mexicana). Densidad aparente, método de la probeta y densidad real con el método del picnómetro, porcentaje de porosidad (Domínguez y Aguilera, 1982).
- (AS-09) Textura por el método de Bouyoucos (Bouyoucos, 1963, citado en Palmer y Truch, 1989) (Figura 18).

9.2.2 Análisis químicos

- pH activo 1:2 H_2O (Jackson, 1964).
- pH potencial 1:2 KCl (Jackson, 1964) (Figura 19).
- (AS-07). Materia orgánica y carbono orgánico (Walkley y Black, 1934, citado en Jackson, 1964) (Figura 20).
- (AS-08). Nitrógeno total por el método semimicro-Kjeldhal (Bremmer, 1965) Figura 21).
- Relaciones C:N y C:P (Himes, 1998).
- Fósforo Disponible, fósforo extractable, Bray I (Bray y Kurtz, 1945).
- Fósforo Total, digestión de HNO_4 y $HClO_4$ en relación 2:1 y cuantificación en base a el desarrollo del complejo vanadomolibdico, (Jackson, 1964).
- Extracción de Ácidos Húmicos y Fúlvicos (Celli *et al.*, 1997), dispersión y fraccionamiento de la materia orgánica del suelo (con precipitaciones parciales con ácidos, bases y alcoholes. (Cranwell y Haworth, 1975, citados en Yang y Wang, 1996) (Figura 22).

Figura 18. Extracción de Ácidos Húmicos y Fúlvicos.

Easy PDF Creator is professional software to create PDF. If you wish to remove this line, buy it now.

Análisis químico de mantillo (reserva de nutrimentos)

- Carbono orgánico (López-Rita y López-Mélida, 1990).
- Nitrógeno total con inclusión de nitratos, método de Kjeldhal (Bremmer, 1965).
- Fósforo Total, digestión de HNO_4 y $HClO_4$ en relación 2:1 y cuantificación en base a el desarrollo del complejo vanadomolibdico, (Jackson, 1964).

9.2.3 Análisis bioquímico de suelo

- Actividad microbiana por el método de Evolución de CO_2 (Powlson *et al.,* 1987).
- Determinación de carbono en biomasa microbiana mediante el método de Fumigación-Incubación por medición estequiométrica de CO_2 (Powlson *et al*., 1987, Shan-Min, *et al.,*1987) modificado por Cruz-Flores y Granados, 2002 citados en Granados, 2003 (Figura 23).

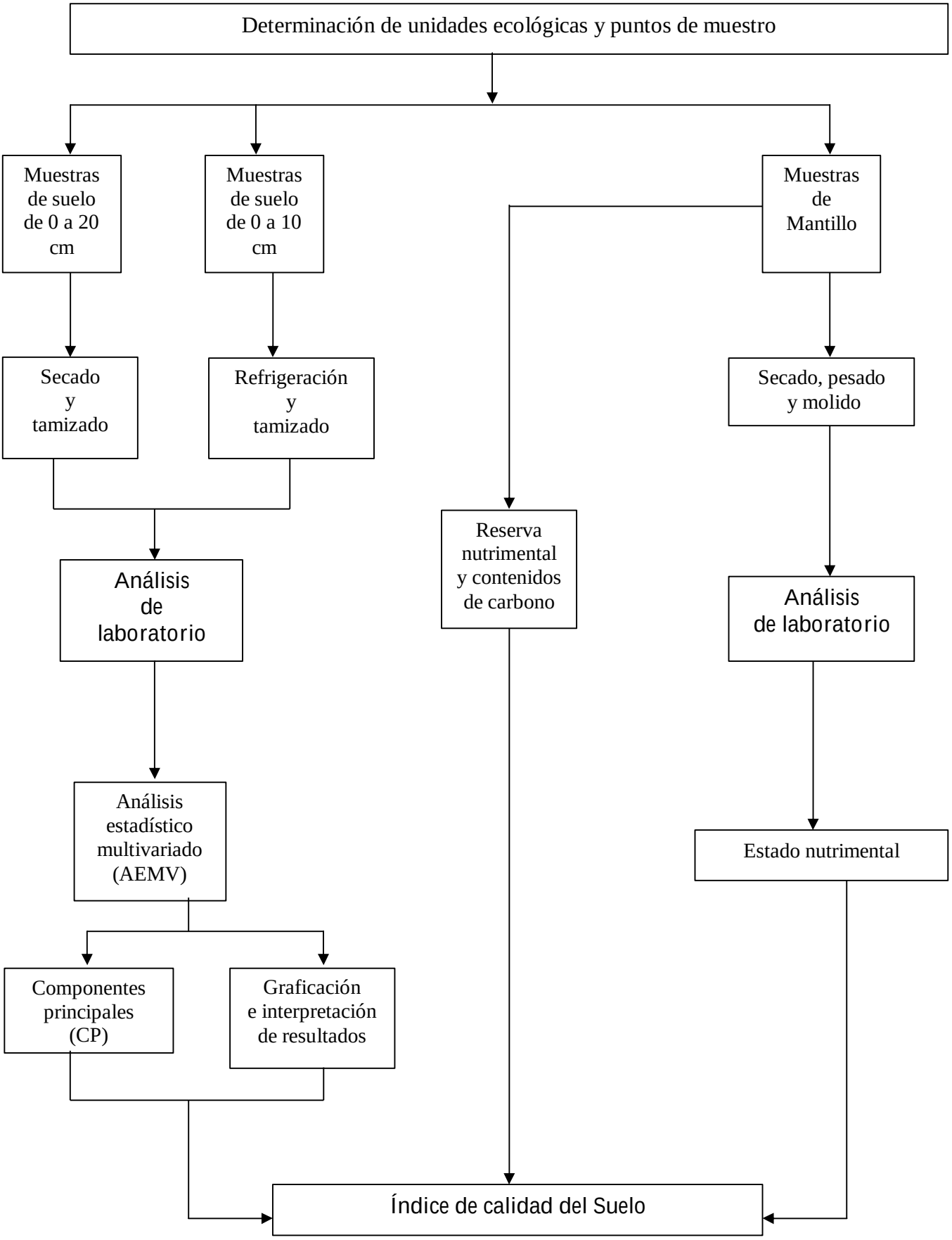
Figura 19. Determinación de CBM mediante la evaluación de producción de CO_2.

9.2.4 Análisis estadístico multivariado

Con la información generada, se crearon bases de datos que fueron trabajadas en el análisis multivariado (componentes principales, correlación de variables, etc.), que permitieron el establecimiento de un numérico de variables robustas o componentes principales de la calidad del suelo, que pueden ser relacionados con el COS, C en mantillo, ácidos orgánicos, CBM, y la actividad microbiana.

Easy PDF Creator is professional software to create PDF. If you wish to remove this line, buy it now.

9.3 Diagrama de Flujo



Easy PDF Creator is professional software to create PDF. If you wish to remove this line, buy it now.

10. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

10.1 DESCRIPCIÓN GENERAL DE LAS CONDICIONES FISIOGRÁFICAS EN LOS SITIOS DE ESTUDIO.

a) Parque Nacional Izta-Popo

Se trabajó en un intervalo altitudinal entre 2650 y 3892 m, las pendientes del terreno fueron de 20 a 60%, encontrando terrenos con pendientes sencillas lo que significa que la inclinación del relieve va en un solo sentido; de acuerdo con Valencia y Hernández (2002), los valores de estas pendientes, van de muy a extremadamente inclinadas. La vegetación arbórea dominante estuvo representada por los géneros *Pinus* y *Abies*. El género *Pinus* se encontró a lo largo de todo el gradiante altitudinal, mientras que *Abies* se localizó predominantemente entre los 3000 y 3500 m y estableciéndose en cañadas en las que el factor humedad es importante (Cuadro 5). Challenger (1998) y Rzedowski (1978) reportan que los bosques de coníferas, son frecuentes en las zonas de clima templado y frío y en México, la distribución de estos se restringe a estrechas zonas altitudinales de las regiones montañosas.

Se encuentra un gran mosaico edáfico en el área estudiada los Andosoles están presentes en la mayoría de los sitios de trabajo mientras que en menor grado los Regosoles. (Figura 24).

Figura 20. Suelos del Parque Nacional Izta-Popo (izquierda) Andosol, (derecha) Regosol (Leptosol).

Granados (2003) y García (2003), en un estudio sobre calidad del suelo bajo *Pinus* y *Abies* respectivamente, reportaron también estos grupos o tipos de suelo para esta ANP.

Easy PDF Creator is professional software to create PDF. If you wish to remove this line, buy it now.

Cuadro 5. Características principales de los sitios de trabajo en el PN Izta-Popo, en orden altitudinal ascendente.

Localidad	Latitud	Longitud	Altitud	Pendiente	Exposición	Vegetación	Grupo de Suelo
	_____ UTM _____		m	%			
W-D14	2 101 465	528 925	2650	ND	N	*P. pseudostrobus*	Andosol
Barranca Apapaxco	2 094 455	532 177	2834	60	NW	*P. montezumae* *A. religiosa*	Regosol eútrico, Litosol, Andosol húmico
La Papa Acatzi	2 121 540	546 875	2964	ND	-	*P. montezumae* *P. patula*	Litosol, Regosol dístrito+Andosol húmico
Sur de El Salto	2 096 137	534 478	3099	8	NW	*P. patula* *A. religiosa*	Regosol eútrico, Litosol, Andosol húmico
La Ventana	2 109 851	544 221	3127	16	E	*P. pseudostrobus* *P. ayacahuite*	Regosol eútrico
O16	2 100 270	531 169	3225	55	-	*A. religiosa*	Phaeozem
SE. B. Tlalquecotchcotl	2 114 683	543 181	3281	45	SE	*A. religiosa* *Cupresus sp.*	Regosol eútrico, Fluvisol eútrico
Valle	2 126 706	530 838	3301	24	NW	*P. teocote* *A. religiosa*	Andosol
N. B. Mata leones	2 097 553	536 262	3312	20	S	*P. hartwegii* *A. religiosa*	Regosol, Litosol, Andosol
Agua escondida	2 110 002	542 286	3333	60	E	*P. teocote* *P. montezumae*	Regosol
La Venta	2 110 845	541 056	3418	20	E	*P. teocote* *P. hartwegii*	Regosol
S. B. Tlalquecotchcotl	2 114 526	542 103	3425	40	S	*P. harwegii* *A. religiosa*	Regosol eútrico
Tlalcomajada E. Tetorre	2 121 800	542 529	3512	61	N	*P. hartwegii*	Litosol, Regosol, Andosol
SW. B. Tlalquecotchcotl	2 114 562	541 221	3540	35	S	*P. hartwegii*	Regosol eútrico
F1	2 111 637	534 534	3553	20	W	*P. hartwegii*	Phaeozem
Pela gallina	2 110 546	538 910	3615	8	NE	*P. teocote*	Regosol dístrico, Cambisol eútrico
S. B. Tlalquecotchcotl	2 115 007	541 942	3667	60	N	*P. hartwegii*	Regosol eútrico
Chalchoapa NE. Tetorre	2 121 193	542 010	3696	21	N	*P. hartwegii*	Litosol, Regosol dístrico, Andosol húmico
La Laguna Xahuehahuatialco	2 121 616	541 183	3828	24	N	*P. hartwegii*	Litosol, Regosol dístrico, Andosol húmico
La Joya	2 116 230	536 507	3892	51	N	*P. hartwegii*	Regosol eútrico, Litosol

El tipo de suelo fue determinado en base a información cartográfica (INEGI, 1984 mapa topográfico y edafológico) y campo.

Easy PDF Creator is professional software to create PDF. If you wish to remove this line, buy it now.

Se considera que los aspectos físicos del terreno no limitan el establecimiento de los géneros arbóreos encontrados, sin embargo las condiciones imperantes en un rango altitudinal si influye en el establecimiento del género *Abies*, que como ya se menciono anteriormente, sólo se encontró entre los 3000 y 3500 m.

b) Parque Nacional Zoquiapan y Anexas

En este PN se trabajó entre los 2864 y los 3537 m de altitud. Los sitios que se estudiaron exhibieron pendientes que van de 25 a 80%, al igual que en el caso del PN Izta-Popo y considerando que pertenecen al mismo sistema orográfico, las pendientes van de fuertemente a extremadamente inclinadas. Los géneros arbóreos dominantes en esta zona son *Pinus*, *Abies* y *Quercus*; el genero *Pinus* se encontró entre 2800 y 3500 m, mientras que el de *Abies* se encontró representado a partir de los 3000 m, junto con el género *Quercus* (Cuadro 6).

Cuadro 6. Características principales de los sitios estudiados en el gradiente altitudinal del PN Zoquiapan y A.

Localidad	Latitud	Longitud	Altitud[1]	Pendiente	Exposición	Vegetación	Grupo de Suelo
	_____ UTM _____		m	%			
S de los colgados	2 254 106	543 584	2864	__	__	*Pinus. sp*	Andosol húmico, Cambisol húmico, Litosol
NW de Texola	2 139 414	538 309	2876	33	N	*Pinus. sp*	Cambisol húmico y eútrico
S de la Vaqueria	2 155 277	541 879	2950	ND	NE	*Pinus. sp*	Andosol húmico, Cambisol húmico, Litosol
D11 Cañada La Coquia	2 107 890	532 792	2965	25	SW	*A. religiosa*	Phaeozem
Cañada Atlapulco	2 149 554	524 251	3003	35	NE	*A. religiosa*	Andosol
S de la B. del paso del muerto	2 143 075	537 553	3036	80	__	*A. religiosa*	Cambisol húmico, Cambisol eútrico
Sn Miguel Tlaixpan	2 150 047	524 968	3066	55	E	*Quercus. sp*	Andosol, Cambisol
Punto 8	2 115 364	532 419	3231	65	NE	*Cupresus. sp*	Andosol
O1 Sn.Pedro	2 108 985	533 405	3286	60	SW	*A. religiosa*	Phaeozem
Puerto Mancilla	2 146 877	526 376	3537	28	SE	*A. religiosa*	Cambisol

El tipo de suelo fue determinado con base a información cartográfica (INEGI, 1984 mapa topográfico y edafológico) y en campo.
[1]Sitios de estudio ordenados en forma ascendente respecto a la altitud.

Easy PDF Creator is professional software to create PDF. If you wish to remove this line, buy it now.

Valderrábano (2005), reporta que en el PN Zoquiapan y A. a lo largo de un gradiante altitudinal entre los 2700 y 4100 m la vegetación arbórea dominante estuvo representada mayormente por el género *Pinus*, seguido por los de *Abies* y *Quercus*.

c) Reserva de la Biosfera El Cielo

En la RB, se trabajó en un intervalo altitudinal entre 1300 y 2050 m; este intervalo así como la región geográfica de la Reserva son distintas a las de los Parques Nacionales Izta-Popo y Zoquiapan, por lo que las condiciones climáticas como la temperatura y precipitación son diferentes, presentando climas calido y templado subhúmedo y un promedio de precipitación que va de los 1500 a los 2000 mm al año, lo que influye en las propiedades generales del suelo. El material parental y la génesis del tipo de suelo también son distintas, además de las diferencias del relieve del terreno que presenta pendientes de 30 y hasta de 90% que fueron las más pronunciadas en el presente estudio. Los tipos de suelo predominante en la RB son Leptosoles y las Rendzinas (Cuadro 7). Las asociaciones vegetales predominantes en el intervalo altitudinal estudiado estuvieron representadas por *Pinus*, *Abies* y *Quercus*. En cuanto a la distribución de los individuos del género *Abies*, como para PN Izta-Popo y Zoquiapan se observó una restricción más específica con respecto al intervalo altitudinal, distribuyéndose entre 1600 y 1900 m. Estas asociaciones vegetales se desarrollan predominantemente sobre Leptosoles rendzicos los cuales son suelos en proceso de formación, delgados y con presencia marcada de afloramiento rocoso (Figura 25).

Figura 21. Suelo Leptosol lítico (izquierda), Suelo Luvisol (derecha).

Easy PDF Creator is professional software to create PDF. If you wish to remove this line, buy it now.

Cuadro 7. Principales características de los sitios de trabajo en la Reserva de la Biosfera El Cielo.

Localidad	Latitud	Longitud	Altitud[1]	Pendiente	Exposición	Especie	Grupo de Suelo
	_____ UTM _____		m	%			
Valle del Ovni	2 557 411	477 127	1316	27	N	ND	Litosol, Rendzina
Valle del Ovni	2 557 411	477 127	1316	27	N	ND	Litosol, Rendzina
Sur de Julilo	2 558 656	477 924	1563	10	NE	*P. patula*	Luvisol crómico, Litosol, Rendzina
Noreste de la Gloria	2 548 992	475 073	1566	45	NE	*A. vejarii*	Rendzina, Litosol crómico
Sur de la Gloria	2 548 642	474 050	1645	50	NW	*P. pseudostrobus*	Rendzina, Litosol crómico
Suroeste de la Gloria	2 548 632	473 969	1653	45	NW	*A. vejarii*	Rendzina, Litosol crómico
Suroeste de Julilo	2 558 172	477 349	1672	9	NE	*P. pseudostrobus*	Rendzina, Litosol
Oeste de la Gloria	2 548 588	474 067	1709	90	N	*Q. crassifolia*	Rendzina, Litosol crómico
Sur de julilo	2 557 411	477 127	1746	27	N	*A. vejarii*	Rendzina, Litosol
Noreste del Porvenir	2 557 042	476 839	1774	6	NE	*P. pseudostrobus*	Rendzina, Litosol
Noreste del Porvenir	2 556 640	477 293	1865	35	N	*P. patula*	Rendzina, Litosol
Norte del Porvenir	2 556 761	476 188	1873	31	SE	*P. pseudostrobus*	Luvisol crómico
Noreste del Porvenir	2 556 901	476 024	1935	70	NE	*A. vejarii*	Luvisol crómico
Noroeste del Porvenir	2 556 013	475 547	1960	12	W	*P. pseudostrobus*	Luvisol crómico
Oeste del Porvenir	2 556 203	475 492	1972	8	W	*P. pseudostrobus*	Rendzina, Litosol
Noroeste del Porvenir	2 557 302	475 198	2054	9	NE	*P. pseudostrobus*	Rendzina, Litosol

El tipo de suelo fue determinado con base a información cartográfica (INEGI, 1984 mapa topográfico y edafológico) y en campo.
[1]Sitios de estudio ordenados en forma ascendente respecto a la altitud.
ND = no determinado

Easy PDF Creator is professional software to create PDF. If you wish to remove this line, buy it now.

10.2 INDICADORES FÍSICOS DE CALIDAD DEL SUELO

a) Parque Nacional Iztaccihuatl - Popocatepetl.

El valor promedio de conductividad eléctrica (CE) para los suelos del PN Izta-Popo fue de 0.04 dS m^{-1}, lo que revela sus características poco salinas (Cuadro 8). En el *Apéndice A*, se pueden observar las correlaciones de Pearson entre CE con las demás variables estudiadas, mostrando significancia estadística con la presencia de especies arbóreas, altitud y el COS. Además de C en mantillo (r= 0.68) y CO_2 (r= -0.62).

Se considera que las condiciones anteriores se deben en general a la cantidad de MOS, al origen ígneo del suelo de tendencia ácida y al régimen hídrico predominante en la zona con una precipitación pluvial de 659.3 a 1885 mm al año.

Con la determinación de densidad aparente (DA) se obtuvieron valores que están dentro de lo establecido para este tipo de suelo, ya que en suelos del Valle la DA fue de 0.75 g cm^{-3} y para W-D14 fue de 1.34 g cm^{-3}. Granados (2003), reporto valores de DA para esta ANP en un rango de 0.86 a 1.33 g cm^{-3} y la Soil Taxonomy menciona que la DA para los andosoles debe ser cercana a 0.9 o menos (Cruz, 2000).

El estudio de las correlaciones mostró que hay relación de la DA con los contenidos de Arena del suelo (r= 0.59), de Arcilla (r= -0.50) y Limo (r= -0.51). Lo anterior confirma lo reportado en la literatura; que en suelos superficiales de textura gruesa la DA estará entre 1.3 y 1.8 g cm^{-3} (Foth y Turk, 1981).

Los valores de densidad real (DR) se encontraron entre 1.40 y 2.97 g cm^{-3}, García (2003), reportó valores de DR para esta zona que van de 2.01 a 2.56 g cm^{-3}.

Con los valores de DA y DR aplicados en una fórmula se obtuvo el porcentaje de EP. La porosidad guarda una relación inversa con la DA ya que cuando esta última es menor, el EP es mayor (r=-0.42). En la mayoría de los sitios este porcentaje fue alto con valores de 31.10 a 74.75% (Cuadro 8).

El grupo textural que se encontró en estos suelos fue arenoso-migajonoso o franco-arenoso (textura gruesa). Bockheim (1991), reportó que los suelos forestales con vegetación de pino y oyamel, se caracterizan por sus texturas gruesas.

Easy PDF Creator is professional software to create PDF. If you wish to remove this line, buy it now.

Cuadro 8. Propiedades físicas de los suelos del PN Izta-Popo.

Localidad	DA	DR	CE	EP	Arcilla	Limo	Arena	Grupo textural
	g cm^{-3}		dS m^{-1}	%				USDA
W-D14	1.34	2.34	0.03	42.74	8	18	74	Migajón Arenoso
Barranca Apapaxo	1.02	2.16	0.05	52.78	8	20	72	Migajón Arenoso
La Papa Acatzi	1.04	2.49	0.07	58.23	7	18	75	Migajón Arenoso
Sur de El Salto	1.13	1.64	0.04	31.10	7	22	71	Migajón Arenoso
La Ventana	1.29	2.13	0.03	39.44	7	14	79	Arena migajonosa
O16	1.21	2.16	0.06	43.98	9	26	65	Migajón Arenoso
SE. B. Tlalquecotchcotl	0.81	1.90	0.04	57.37	9	20	71	Migajón Arenoso
Valle	0.75	2.97	0.05	74.75	18	32	50	Migajón
N. B. Mata leones	1.13	2.09	0.04	45.93	6	20	74	Arena migajonosa
Agua escondida	1.08	1.66	0.06	34.94	6	16	78	Arena migajonosa
La Venta	1.07	1.40	0.06	23.57	5	18	77	Arena migajonosa
S. B. Tlalquecotchcotl	1.12	1.64	0.03	31.71	8	16	76	Migajón Arenoso
Tlalcomajada E. Tetorre	0.91	2.63	0.04	65.40	7	24	69	Migajón Arenoso
SW. B. Tlalquecotchcotl	0.84	2.27	0.03	63.00	7	26	67	Migajón Arenoso
F1	1.29	2.34	0.04	44.87	4	20	76	Arena migajonosa
Pela gallina	1.07	1.94	0.05	44.85	6	14	80	Arena migajonosa
S. B. Tlalquecotchcotl	1.26	2.32	0.03	45.69	4	26	70	Arena migajonosa
Chalchoapa NE. Tetorre	1.07	ND	0.03	ND	4	22	74	Migajón Arenoso
Laguna Xahuehahuatialco	0.84	2.45	0.04	65.71	5	22	73	Migajón Arenoso
La Joya	0.76	2.59	0.07	70.66	9	44	47	Migajón

DA, Densidad aparente; DR, Densidad Real; EP, Espacio Poroso; CE, Conductividad Eléctrica.
ND = No determinado.

b) Parque Nacional Zoquiapan y Anexas.

Los valores de CE estuvieron en un intervalo entre 0.02 y 0.13 dS m^{-1} por lo que de acuerdo a Jackson (1964), estos suelos no mostraron propiedades salinas ni sódicas (Cuadro 9). De igual forma que para el PN Izta-Popo, se considera que las propiedades anteriores se deben en general a la alta cantidad de MOS, al material de origen ígneo de tendencia generalmente ácida como las andesitas y el basalto, así como al régimen hídrico predominante en la zona que tiene una precipitación pluvial entre 659 y 1885 mm al año.

En cuanto a los valores de DA encontrados, están dentro de lo establecido para este tipo de suelo con valores de 0.74 g cm^{-3} en NW de Texola y 1.20 g cm^{-3} en la Cañada Coquia, ya que la Soil Taxonomy ha reportado que los Andosoles tienen una DA cercana a 0.9 g cm^{-3} o menos (Cruz, 2000), y en los suelos superficiales de textura gruesa la DA está entre 1.3 y

Easy PDF Creator is professional software to create PDF. If you wish to remove this line, buy it now.

1.8 g cm^{-3} de acuerdo con lo reportado por Foth y Turk (1981). Lo que confirma lo anterior es el estudio de correlación, que muestra una relación directa entre la DA y los contenidos de Arena del suelo (r= 0.75) (*Apéndice B*). Los contenidos abundantes de MOS disminuyen los valores de DA (r= 0.48). Los valores de DA determinados para los suelos de este parque nacional corresponden a lo reportado por Valderrábano (2005), que reporta valores que van de 0.64 a 1.28 g cm^{-3}.

Cuadro 9. Propiedades físicas de suelo de cada sitio de trabajo en el PN Zoquiapan y A, en orden alt. ascendente.

Localidad	DA	DR	CE	EP	Arcilla	Limo	Arena	Grupo textural
	___ g cm-^{3}___		dS m^{-1}	_____ %_____				USDA
Sur de los Colgados	0.82	2.37	0.02	65.40	25	32	43	Migajón
NW de Texola	0.74	2.55	0.07	70.98	13	38	49	Migajón
Sur de la Vaquería	0.87	2.69	0.05	67.66	17	32	51	Migajón
D11 Cañ Coquia	1.20	1.74	0.05	31.03	8	22	70	Migajón Arenoso
Cañada Atlapulco	0.92	1.97	0.07	53.30	21	32	47	Arena migajonosa
Sur B. del paso del muerto	0.89	2.55	0.04	65.10	14	40	46	Migajón Arenoso
Sn Miguel Tlaixpan	0.90	1.83	0.10	50.82	17	38	45	Migajón
Pto. 8	1.09	1.72	0.04	36.63	6	26	68	Migajón Arenoso
O1 Sn.Pedro	0.87	1.39	0.13	37.41	8	26	66	Migajón Arenoso
Puerto Mancilla	0.90	1.97	0.05	54.31	16	26	58	Migajón Arenoso

DA Densidad aparente; DR Densidad Real; EP Espacio Poroso; CE, Conductividad Eléctrica.

Los valores de DR se encontraron entre 1.39 y 2.55 g cm^{-3} que son resultados semejantes a los encontrados en suelos del PN Izta-Popo y a los reportados por Valderrábano (2005) para el PN Zoquiapan y Anexas, con valores entre 1.4 y 2.81 g cm^{-3}.

El porcentaje de EP se encontró en un valor promedio de 53.26%, lo que estaría relacionado con buena aireación y con adecuados niveles de humedad, así como con los valores altos de DR, los cuales se relacionan de forma positiva (r = 0.81).

La textura de estos suelos tiene un mayor porcentaje de arena, con un grupo textural definido como arena-migajonosa o franco-arenoso.

Easy PDF Creator is professional software to create PDF. If you wish to remove this line, buy it now.

c) Reserva de la Biosfera El Cielo.

La CE del suelo encontrada fue de 0.03 a 0.56 dS m^{-1}, a pesar de que son valores mayores que los encontrados en el PN Izta-Popo y Zoquiapan y Anexas, debido al origen calcáreo del suelo de esta región, las condiciones no son salinas. La CE mostró relación positiva con respecto a las pendientes pronunciadas (r= 0.58) (*Apéndice C*), lo que se puede atribuir a que en estas inclinaciones, el arrastre o pérdida de sales pero también de MO es mayor a causa del escurrimiento debido a las lluvias (arrastre por agua), empobreciendo al suelo en su contenido de MO impidiendo que se manifieste un carácter de alta acidez en estos lugares.

Los valores encontrados de DA van de 0.35 a 1.15 g cm^{-3} (valores muy bajos por el alto contenido de materia orgánica) (r = -0.84), concuerdan con lo planteado por Pritchett (1991), que indica que la DA de suelos forestales varía desde 0.2 en algunas capas orgánicas hasta casi 1.9 g cm^{-3} en las arenas gruesas (Cuadro 10).

Cuadro 10. Propiedades físicas del suelo de La Reserva de la Biosfera El Cielo en orden altitudinal ascendente.

Localidad	DA	DR	CE	EP	Arcilla	Limo	Arena	Grupo textural
	g cm^{-3}		dS m^{-1}	%				USDA
Valle del Ovni	1.08	2.30	0.09	53.54	14	10	76	Migajón arenoso
Valle del Ovni	1.15	2.58	0.05	63.79	28	6	66	Migajón arcillo-arenoso
S. de Julilo	0.95	ND	0.03	ND	26	22	52	Migajón arcillo-arenoso
NE. de la Gloria	0.35	2.48	0.16	85.80	18	20	62	Migajón arenoso
S. de la Gloria	0.66	2.41	0.08	72.35	15	38	47	Migajón
SW. de la Gloria	0.68	1.88	0.12	63.96	12	32	56	Migajón arenoso
SW. de Julilo	0.79	2.72	0.06	70.58	26	30	44	Migajón
W de la Gloria	0.68	ND	0.28	ND	ND	ND	ND	ND
S. de Julilo	0.85	1.98	0.24	56.65	34	20	46	Migajón arcilloso
NE. del Porvenir	0.71	2.44	0.12	70.54	20	28	52	Migajón
NE del Porvenir	0.67	1.71	0.17	62.17	20	14	66	Migajón arcillo-arenoso
N. del Porvenir	0.84	2.67	0.04	68.53	2	22	76	Arena migajonosa
NE del Porvenir	0.70	1.64	0.56	57.45	18	20	62	Migajón arenoso
NW del Porvenir	0.79	2.03	0.25	59.98	18	22	60	Migajón arenoso
W. del Porvenir	0.68	1.76	0.09	59.98	22	22	56	Migajón arcillo-arenoso
NW del Porvenir	0.64	1.86	0.05	60.90	24.	32	44	Migajón
NW del Porvenir	0.73	1.72	0.03	51.23	32	32	36	Migajón

DA, Densidad aparente; DR, Densidad Real; EP, Espacio Poroso; CE, Conductividad Eléctrica.
ND = No Determinado

Easy PDF Creator is professional software to create PDF. If you wish to remove this line, buy it now.

Los valores de DR se encontraron entre 1.64 a 2.72 g cm^{-3}. El porcentaje de EP en suelos de la RB El Cielo fue mayor que los de los PN Izta-Popo y Zoquiapan y Anexas con valores de 51.23 hasta 85.80%, lo que señala una mayor interacción entre el grado de aireación con el contenido de humedad en el suelo. El suelo presentó textura migajonosa-arenosa y migajonosa-arcillosa.

La DA y DR del suelo mostraron diferencias significativas entre cada ANP así como con la pendiente del terreno y el gradiante altitudinal (*Apéndice D*).

El grupo textural que se encontró en los suelos de las tres ANP fue arenoso-migajonoso o franco-arenoso (textura gruesa), los porcentajes de limo y arena tuvieron diferencias significativas por cada ANP, con respeto a la pendiente del terreno, los géneros y especies arbóreas dominantes de cada zona y con respecto al gradiante altitudinal (*Apéndice D*). El valor de CE promedio para estos suelos fue de 0.08 dS m^{-1}, a pesar de que lo suelos de la RB El Cielo presenta los valores más elevados de CE siguen revelando sus características poco salinas y sódicas, ya que de acuerdo con USDA (1954) citados por Jackson (1964), estos valores muestran que los efectos de salinidad en estos suelos son despreciables (Cuadro 11).

Cuadro 11. Propiedades físicas del suelo por Área Natural Protegida.

ANP	DA	DR	CE	EP	Arcilla	Limo	Arena	Grupo textural
	____g cm^{-3}____		dS m^{-1}	_____ % _____				USDA
PN- Izta-Popo	1.05	2.16	0.04	49.30	7.12	21.90	70.98	Arena migajonosa
PN Zoquiapan	0.92	2.08	0.06	53.26	14.41	31.20	54.39	Migajón arenoso
RB El Cielo	0.74	2.13	0.14	63.64	20.68	23.12	56.20	Migajón

Easy PDF Creator is professional software to create PDF. If you wish to remove this line, buy it now.

10.3 INDICADORES QUÍMICOS DE CALIDAD DEL SUELO.

a) Parque Nacional Iztaccíhuatl – Popocatépetl.

Los valores de pH activo estuvieron entre 4.6 y 6.3, con un valor extremo de pH potencial de 3.6 (muy ácido) en la localidad de Acatzi (La Papa), que se encuentra en altitudes intermedias (1960 m) y es un sitio alterado por la actividad agrícola (Cuadro 12). Estos valores indican que el pH de estos suelos fue encontrado entre moderadamente y fuertemente ácido, de acuerdo con Cepeda (1991), lo cual concuerda con respecto a lo descrito por Pritchett (1991), quien menciona que en suelos forestales el pH se puede encontrar en una escala de 3.50 a 6.23.

Las condiciones mencionadas, respecto al pH y a la CE en esta zona, están relacionadas directamente con la cantidad de MOS que en estos suelos se encontró en un intervalo que va desde 0.49 a 10.57% (Cuadro 16). Se sabe que los suelos forestales tienen típicamente la mayor proporción de MOS muy cerca de la superficie y muy cerca de ella se encuentra la mayor parte de las raíces efímeras de los árboles lo cual explica los altos contenidos de materia orgánica en estos suelos (Russell, 1968).

Además de las altas cantidades de MOS y el material parental de estos suelos (derivados de ceniza volcánica, ricos en MOS y en el porcentaje de Al y Fe, que le dan un carácter de moderado a fuertemente ácido), otro factor que le da el carácter ácido es que durante el proceso de mineralización de la MOS y ante la oxidación biológica que es realizada por los microorganismos se libera anhídrido carbónico que favorece la condición de un pH ácido en el suelo, ya que cuanto mayor sea la concentración de este compuesto en el aire del suelo, el pH será menor (Russell, 1968).

A lo largo del gradiante altitudinal se encontraron comunidades del género *Pinus*, los mismos que presentan tolerancia y eficiencia para desarrollarse en suelos muy ácidos (Pritchett, 1991).

Los contenidos de N-total van de 0.55 en el Sur del Salto a 5.68 Mg ha^{-1} en Agua escondida (Cuadro 12). Pritchett (1991), menciona que el N total en suelos forestales se puede encontrar principalmente en la capa de humus de la cubierta forestal y el horizonte mineral A1, desde 1 Mg ha^{-1} en suelos arenosos muy drenados, hasta 30 en bosques boreales que tienen una gran acumulación de humus.

Easy PDF Creator is professional software to create PDF. If you wish to remove this line, buy it now.

Cuadro 12. Propiedades químicas del suelo del Parque Nacional Izta-Popo.

Localidad	N total	N mant	P-d	P total	P mant	C:N	C:P disp	pH H_20 2:1	pH KCl 2:1
	Mg ha^{-1}								
W-D14	1.94	0.36	0.31	ND	0.08	8.10	46.90	5.3	4.9
Barranca Apapaxco	2.49	0.49	0.03	2.14	0.15	38.90	3091.80	5.9	5.1
La Papa Acatzi	1.94	ND	0.06	3.22	ND	3.20	240.60	4.9	3.6
Sur de El Salto	0.55	0.39	0.05	2.14	0.10	95.80	944.20	6.1	5.3
La ventana	0.83	0.29	0.002	1.38	0.25	13.10	5696.10	5.6	4.7
O16	1.39	0.38	0.07	ND	0.03	14.60	235.50	6.0	5.3
SE. B. Tlalquecotchcotl	1.11	0.44	0.08	2.00	0.07	24.80	365.30	6.3	5.2
Valle	1.66	0.37	0.39	ND	0.21	80.80	309.60	5.1	4.4
N. B. Mata leones	1.94	0.69	0.03	2.00	0.10	49.10	4750.10	5.4	4.4
Agua escondida	5.68	0.73	0.01	2.68	0.15	15.10	8038.70	5.2	5.0
La venta	4.16	0.46	0.01	1.66	0.10	15.70	8329.70	6.2	4.5
S. B. Tlalquecotchcotl	4.99	0.39	0.02	2.00	0.09	18.60	5077.30	5.7	4.6
Tlalcomajada E. Tetorre	2.22	0.64	0.02	3.23	0.11	35.50	5262.70	4.9	3.8
SW. B. Tlalquecotchcotl	3.66	0.38	0.02	2.11	0.09	31.50	6415.10	5.6	4.2
F1	1.66	0.64	0.38	ND	0.11	15.80	54.30	5.7	4.8
Pela Gallina	3.74	0.41	0.01	2.11	0.06	15.60	7087.20	6.1	4.6
S. B. Tlalquecotchcotl	3.88	0.38	0.02	3.23	0.06	25.00	7808.80	5.8	4.5
Chalchoapa NE. Tetorre	0.97	0.51	0.02	2.11	0.07	60.60	3584.70	5.1	4.2
Laguna Xahuehahuatialco	2.77	0.72	0.02	3.43	0.08	38.80	5422.90	4.6	3.7
La Joya	2.49	0.46	0.08	ND	0.09	39.80	1152.90	4.8	4.0

Sitios con orden altitudinal ascendente. mant = mantillo d = disponible. ND = no determinado.

Se encontró que las cantidades de N total del suelo, aumentaron conforme se incrementa la altitud hasta llegar a sus valores máximos en altitudes intermedias, en el punto ya mencionado Agua escondida a una altitud de 3333 m, el contenido de N es de 5.68 Mg ha^{-1} y en el S de la barranca Tlalquecotchcotl a una altitud de 3425 m, es de 4.99 Mg ha^{-1} (Figura 22).

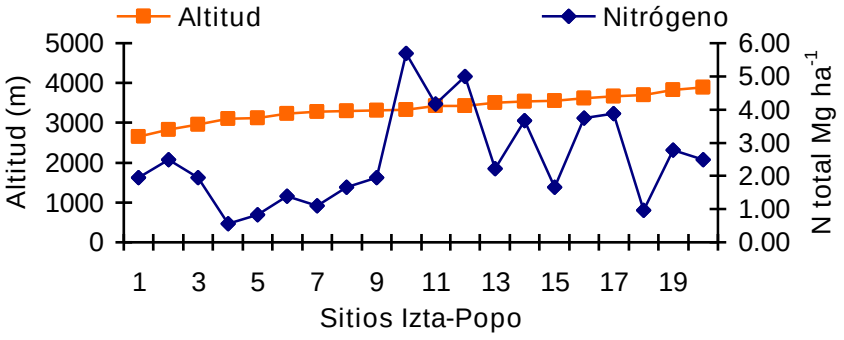


Figura 22. N total del suelo a lo largo del gradiante altitudinal en suelos del PN Izta-Popo.

Easy PDF Creator is professional software to create PDF. If you wish to remove this line, buy it now.

García (2003), mencionó que la concentración de N en suelos de bosque eran mayores a niveles superiores de altitud y que las coníferas provocaban que este elemento se almacenara en el mantillo y en las capas superiores del humus.

En los sitios en los que se encontraron las mayores cantidades de N total, presentan relaciones C:N que van de 15:1 a 31:1, en estas condiciones el crecimiento bacteriano no se da en forma exponencial, pero si predomina la degradación de la MOS y la mineralización de su nitrógeno (Primo, 1981).

El promedio de la razón C:N fue de 32:1 para esta ANP. En el sitio 3 (Acatzi, se encontró un suelo con uso agrícola), la razón C:N fue de 3:1 quizá por una fertilización reciente. Los valores de la relación C:N oscilan entre 13:1 y 38:1 excluyendo a los valores mas extremos, lo que de acuerdo con Buckman y Brady (1991), indican una estabilidad en las cantidades que se van consumiendo o perdiendo en el suelo tanto de N como de C.

El N de la MOS queda disponible para las plantas cuando la relación C:N se aproxima a 10:1. Sin embargo, la liberación de N es baja ya que en los suelos forestales el proceso de mineralización es lento. Cuando no se mineraliza suficiente N por resíntesis, ocasiona que durante el proceso de descomposición, este deba ser tomado del medio ambiente; ya que de otro modo se frena la descomposición porque los microorganismos no pueden reproducirse. El C y el N total pueden relacionarse habida cuenta de su mutua dependencia. Relaciones C:N mayores de 30 revelan condiciones malas tanto de descomposición de la MOS como de baja disponibilidad de N (Salas de las, 1987). Por lo que se considera que en 9 de los 20 sitios de trabajo el N es un elemento limitante.

Los contenidos de P disponible (P-d) van de 0.002 a 0.39 Mg ha^{-1} con un promedio de 0.08 Mg ha^{-1} (Cuadro 12).

Cuando los suelos presentan una relación C:P alta, existen bajas cantidades de P-d, ya que el proceso de mineralización para dejar disponible al P es lento debido a que en suelos con alto contenido de C, el P es acumulado en su forma orgánica. En lugares donde la relación C:P alcanzó valores de 5000:1 a 8000:1 puede entenderse que existe una marcada deficiencia de P-disponible (Figura 23).

En este tipo de suelos el pH es ácido y en consecuencia el P se fija en formas de fosfatos de hierro y aluminio. Ello se debe a la acidez del lugar que favorece la formación de iones de Fe^{3+} y Al^{3+} que a ese pH son insolubles (Primo, 1981).

Easy PDF Creator is professional software to create PDF. If you wish to remove this line, buy it now.

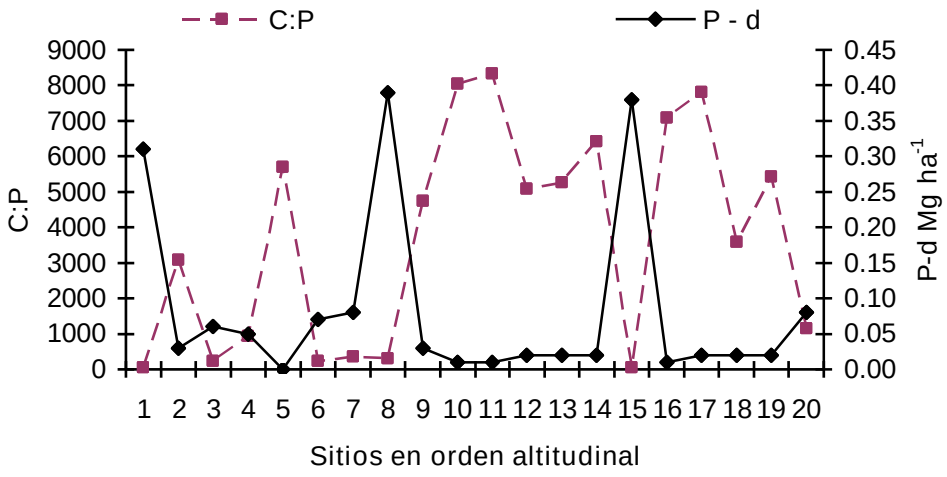


Figura 23. Relación C:P y P-d a lo largo del gradiante altitudinal del PN Izta-Popo.

b) Parque Nacional Zoquiapan y Anexas.

En los suelos de este Parque Nacional, los valores de pH activo encontrados estuvieron en un intervalo de 4.9 a 5.9 y pH potencial entre 4.7 y 5.2 (Cuadro 13). Estos resultados indican que el pH de estos suelos va de moderadamente a fuertemente ácido (Cepeda, 1991).

El pH y la CE están relacionados directamente con la cantidad de MOS, cuyo contenido en estos suelos varía del 3 al 10% (Cuadro 17).

La MOS libera ácidos orgánicos, así como anhídrido carbónico durante los procesos de mineralización y humificación, que favorece la condición de un pH ácido en el suelo. El desarrollo de estos suelos ácidos se debe entre otras cosas, al proceso de lixiviación en las regiones que cuentan con suficiente agua de lluvia para arrastrar, fuera de los horizontes superficiales del suelo, sales solubles primordialmente de Ca y Mg (Cepeda, 1991).

Easy PDF Creator is professional software to create PDF. If you wish to remove this line, buy it now.

Cuadro 13. Propiedades químicas de los suelos de cada sitio de trabajo en el PN Zoquiapan y Anexas.

Localidad	N total	Nmant	P-d	P total	P mant	C:N	C:Pdisp	pH H_20 2:1	pH KCl 2:1
	Mg ha^{-1}								
S de los calgados	1.53	0.41	0.63	2.96	0.05	23.60	53.50	5.2	4.7
NW de Texola	1.27	0.58	0.65	2.96	0.09	37.00	79.60	5.6	5.2
S de la Vaquería	0.25	0.43	0.78	2.96	0.09	209.70	69.10	4.9	4.9
D11 Cañ Coquia	2.55	0.25	0.04	ND	0.11	39.50	2480.80	5.7	5.2
Cañ Atlapulco	2.04	0.17	0.02	ND	0.08	30.80	2561.00	5.7	5.1
S de la B. del P. del muerto	1.02	0.30	0.71	2.96	0.04	41.60	56.80	5.5	5.0
Sn Miguel Tlaixpan	1.27	0.28	0.02	ND	0.09	64.50	3391.80	5.9	4.8
Pto. 8	1.78	0.43	0.09	ND	0.12	22.70	462.10	5.5	5.0
O1 Sn.Pedro	2.04	0.29	0.05	ND	0.08	36.20	1391.60	5.4	5.1
Puerto Mancilla	2.04	0.28	0.02	ND	0.07	56.30	4200.10	5.5	4.9

Sitios en orden altitudinal ascendente. mant= mantillo d = disponible. ND = no determinado.

El contenido de N total de estos suelos va de 0.25 a 2.55 Mg ha^{-1} (Cuadro 13). El C y el N total se pueden relacionar por su mutua dependencia (Salas de las, 1987), los procesos de mineralización de la MOS propician que ambos elementos se encuentren en proporciones similares a lo largo del gradiante altitudinal o que se presente una estabilidad en las cantidades que se van perdiendo en el suelo tanto de N como NO_3^- y de C en forma de CO_2 que son lixiviados o absorbidos por las plantas (Buckman y Brady, 1991), mostrando una relación C:N estable que va de 22:1 a 56.30:1 excluyendo dos valores extremos (Figura 24).

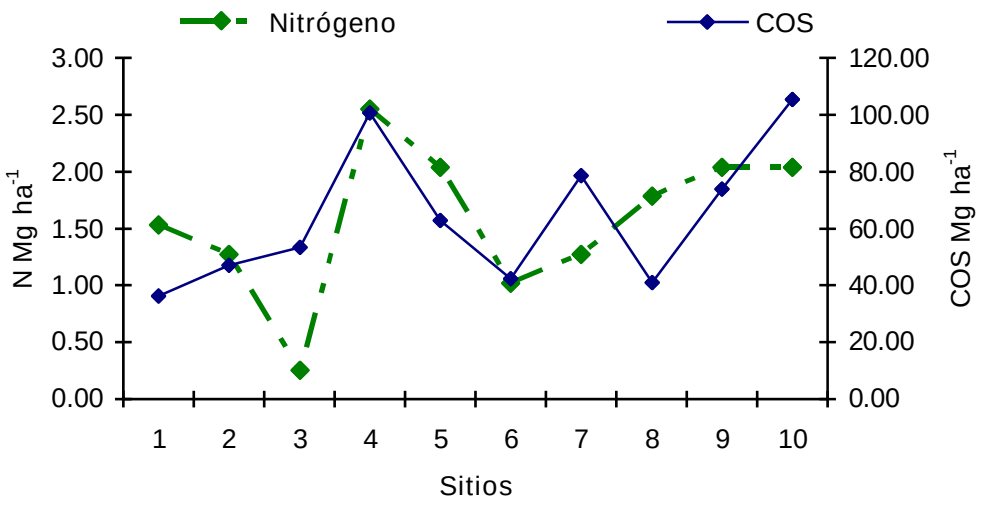


Figura 24. Cantidades de N y COS a lo largo del gradiante altitudinal del PN Zoquiapan y Anexas.

Easy PDF Creator is professional software to create PDF. If you wish to remove this line, buy it now.

Los contenidos de P-d van de 0.02 a 0.78 Mg ha^{-1} con un promedio de 0.30 Mg ha^{-1}. Presentando una relación C:P que va de 53.50:1 a 4200.10:1 con un promedio de 1474.60:1 con lo que se entiende que existen bajas cantidades de P-d ya que el P puede estar siendo acumulado en su forma orgánica y la liberación de P orgánico es lenta en los suelos con débil actividad biológica (en estos suelos se encontró la menor actividad biológica), generando humus moder ácido (Duchaufour, 1978); que en este caso se presentan ya que se tienen altas cantidades de ácidos fúlvicos en esta zona, que son representativos de este humus (Cuadro 19).

Al igual que para el N, se observan fenómenos de mineralización y reorganización microbiana. La mineralización solo se produce si la MO fresca es rica en P; en caso contrario, los microorganismos utilizan la totalidad del P presente para sus propias síntesis (Duchaufour, 1978).

Al igual que en el PN Izta-Popo, este tipo de suelos presenta un pH ácido y en consecuencia el P se fija en formas de fosfatos de hierro y aluminio que a ese pH son insolubles (Primo, 1981).

c) Reserva de la Biosfera El Cielo.

A pesar del origen calcáreo de sus suelos en la RB El Cielo estos presentan un carácter marcadamente ácido, típico de los suelos forestales. Esto se debe entre otras cosas al efecto del arrastre de las sales solubles. La cual provoca la desaturación del complejo adsorbente, que es, por tanto, responsable de la acidificación (Duchaufour, 1984). Una alta precipitación pluvial y altas cantidades de MOS que van de 1 hasta 40% (Cuadro 18), le dan a estos suelos un carácter ácido con un pH activo de 4 a 6 y un caso extremo de pH potencial de 3.8 en el norte del Porvenir (Cuadro 14).

Los procesos de lavado eliminan bases del suelo y por lo tanto, tienden a provocar con el tiempo, un descenso en el pH. Este proceso es importante en los suelos jóvenes. En la RB El Cielo se presentan predominantemente suelos Leptosoles que están en proceso de formación.

Este proceso se da en cualquier medio con condiciones de humedad suficiente; en los que la productividad de ácidos orgánicos solubles aumenta considerablemente, lo que acelera el arrastre de bases y los cationes básicos son sustituidos por los iones ácidos, H^+ o Al^{3+} (Duchaufour, 1984).

Easy PDF Creator is professional software to create PDF. If you wish to remove this line, buy it now.

Los factores biológicos también tienen influencia en la descarbonatación. En suelos de bosques frondosos; la velocidad de descarbonatación alcanza un valor máximo, tres agentes combinan su acción, el ion NO_3^-, el CO_2 y los compuestos orgánicos solubles que emanan de la hojarasca, la mayoría de los cuales son insolubles en forma de ácidos fúlvicos, aunque una fracción minoritaria permanece soluble y arrastra el Ca^{2+} (Robert *et al.,* 1980; citado por Duchaufour, 1984). Esto explica porque en clima templado los suelos forestales normalmente están descarbonatados, cualquiera que sea el contenido de caliza en la roca madre.

Cuadro 14. Propiedades químicas de los suelos de cada sitio de trabajo en La RB El Cielo.

Localidad	N total	N mant	P-d	P total	P mant	C:N	C:P disp	pH H_20 2:1	pH KCl 2:1
	Mg ha^{-1}								
Valle del Ovni	nd	ND	0.01	0.76	ND	ND	3214.30	5.4	4.3
Valle del Ovni	ND	ND	0.003	0.76	ND	ND	3635.80	5.7	4.3
S. de Julilo	2.13	0.41	0.01	0.94	0.06	47.90	11653.40	6.0	4.7
NE. de la Gloria	6.18	0.46	0.14	1.90	0.10	54.00	2394.90	5.8	5.2
S. de la Gloria	3.67	0.41	0.05	1.90	0.11	33.20	2731.30	5.3	5.1
SW. de la Gloria	3.67	0.24	0.12	1.90	0.09	67.60	2007.80	5.7	5.2
SW. de Julilo	2.32	0.37	0.01	1.40	0.05	40.00	10250.50	5.1	4.0
W de la Gloria	9.66	0.57	0.01	1.90	0.10	28.00	22260.10	5.3	ND
S. de Julilo	1.16	0.26	0.01	1.90	0.10	71.40	13221.10	4.5	4.2
NE. del Porvenir	1.93	0.34	0.01	0.90	0.05	67.90	18867.10	5.8	5.2
NE del Porvenir	4.06	0.52	0.03	1.50	0.10	22.50	3466.90	5.1	5.0
N. del Porvenir	1.16	0.35	0.02	0.91	0.05	84.40	3240.60	4.4	3.8
NE del Porvenir	5.22	0.34	0.13	1.50	0.15	22.80	912.30	6.9	5.0
NW del Porvenir	6.76	0.42	0.01	1.08	0.01	18.50	24250.20	5.8	4.9
W. del Porvenir	3.96	0.42	0.01	1.08	0.02	53.40	37511.00	5.9	5.1
NW del Porvenir	3.09	0.43	0.01	1.02	0.05	38.20	7880.90	5.2	4
NW del Porvenir	1.93	0.35	0.01	1.02	0.05	51.80	13837.00	5.8	4.5

Sitios en orden altitudinal ascendente. Mant = mantillo d = disponible ND = no determinado.

Los contenidos de N en este suelo van de 1.16 a 6.76 Mg ha^{-1} y un promedio de 3.79 Mg ha^{-1} (el valor más alto de las tres ANP). Los valores de la relación C:N están entre 18.50:1 y 84.40:1 en el sitio denominado “El norte del Porvenir. El promedio de esta razón fue de 47:1 (Figura 25).

Easy PDF Creator is professional software to create PDF. If you wish to remove this line, buy it now.

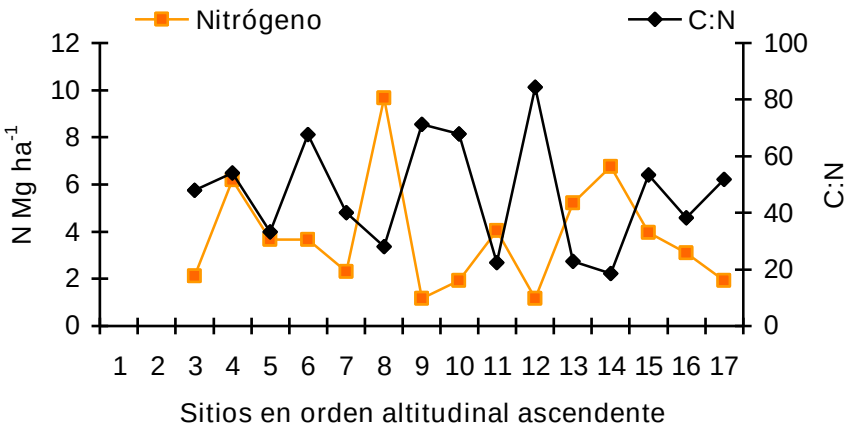


Figura 25. Razón C:N y su relación con la cantidad de N total en el suelo de la RB El Cielo.

Las bacterias metabolizan C de la MOS, convirtiéndolo en CO_2, que escapa del suelo, dando como resultado el enriquecimiento en N por lo que la relación C:N es una medida del grado de humificación de la MOS. En este caso, en el que la relación C:N promedio, es mayor a 30, se favorece el desarrollo de microorganismos, estos metabolizan la materia carbonada, desprendiendo CO_2 y se multiplican, consumiendo el N asimilable por lo que el contenido de NO_3^- disminuye (Primo, 1981).

Las diferencias de la relación C:N de la RB El Cielo con respecto a las presentes en los PN Izta-Popo y Zoquiapan y Anexas parecen estar relacionadas en general, con las condiciones climáticas, especialmente la temperatura y la cantidad y distribución de lluvias. Por ejemplo esta bien establecido que la razón C:N tiende a disminuir en las regiones áridas, al revés que en las húmedas (Buckman y Brady, 1991).

Lo que pasa en esta zona de estudio podría ser lo siguiente: de acuerdo con Buckman y Brady (1991), cuando existe un aporte de MO con alta razón C:N, ocurre un cambio rápido, la flora heterótrofa (bacterias, hongos y actinomicetos) se reproduce activamente desprendiendo CO_2 en grandes cantidades. En la RB El Cielo se encontró la mayor actividad microbiana, evaluada por la evolución de CO_2 (Cuadro 16). Bajo estas condiciones el N en forma de nitratos, decrece debido a la demanda de los microorganismos.

En los suelos de la RB El Cielo, se encontraron las mayores cantidades de C y de N total (Cuadros 18 y 19). En condiciones de estabilidad en la relación C:N (menores de 30:1), la cantidad de N determina la de COS. Así cuando aumenta el N en los residuos orgánicos, es mayor la posibilidad de acumulación de C combinado orgánicamente.

Easy PDF Creator is professional software to create PDF. If you wish to remove this line, buy it now.

Los contenidos de P-d van de 0.003 a 0.14 Mg ha^{-1} con un promedio de 0.03 Mg ha^{-1}. Presentando una relación C:P-d que va de 912.3:1 a 37511:1 con un promedio de 10666.8:1 el P puede estar siendo acumulado en su forma orgánica.

Los suelos tuvieron un valor de pH promedio entre 4.7 y 5.1 a este pH el P se fija en formas de fosfatos de Fe y Al insolubles (Primo, 1981).

Los valores de la razón C:P marcan la competencia que existe entre los microorganismos y las plantas por el P-d (Pierre, 2004). En suelos con alto contenido de C y gran proliferación de microorganismos, el P soluble puede ser consumido por estos para su multiplicación y acumulado en el suelo en forma orgánica, en la propia sustancia bacteriana transformada en humus. De esta será cedido lentamente a medida que actúen los procesos degradativos a largo plazo (Primo, 1981).

Los valores de pH activo promedio para las tres ANP fue de 5.1 y de pH potencial de 4.7 (Cuadro 15), las condiciones mencionadas respecto al pH y a la CE del suelo en estas zonas, están relacionadas directamente con el promedio de precipitación pluvial al año y con la cantidad de MO que se encontró en un intervalo de 1 a 10% en el PN Izta-Popo y Zoquiapan y de 1 hasta 40% en la RB El Cielo.

El N es uno de los macroelementos más importantes para el desarrollo de las plantas, este elemento mostró diferencias significativas con respecto a cada ANP y también de las distintas pendientes de cada zona (*Apéndice D*).

Las condiciones antes mencionadas en la RB El Cielo, probablemente se deben a que presenta suelos muy someros en procesos de formación y procesos de descomposición de MO muy acelerados debido a que, existe una gran aportación de MO al suelo, en interacción con el material parental de origen calcáreo, forma productos carbonatados que contribuyen favorablemente a la descomposición de la misma (Duchaufour, 1984). También existe una mayor precipitación pluvial al año por su clima templado subhúmedo (Sánchez *et al*., 2005).

Concuerdo 15. Propiedades químicas del suelo por Área Natural Protegida.

ANP	N total	P-disponible	P total	C:N	C:P-disponible	pH H_20	pH KCl
	Mg ha^{-1}						
PN Izta-Popo	2.50	0.08	2.34	32.03	3695.70	5.52	4.57
PN Zoquiapan	1.73	0.03	2.96	39.13	1474.60	5.50	4.99
RB El Cielo	3.79	0.03	1.32	46.78	10666.80	5.52	4.66

Easy PDF Creator is professional software to create PDF. If you wish to remove this line, buy it now.

10.4 INDICADORES ORGÁNICOS Y BIOQUÍMICOS DE CALIDAD DEL SUELO.

a) Parque Nacional Iztaccihuatl - Popocatepetl.

La cantidad de MOS forestal (Cuadro 16), tiene correlación estadística significativa con el grado de pendiente en el relieve del terreno y con la altitud, ya que en altitudes intermedias, (entre 3000 y 3600 m) fueron los sitios en los que se encontraron los mayores porcentajes de MOS y en estos lugares se tuvieron las menores pendientes del terreno reportadas (de 8 a 20 %) (*Apéndice A*).

Cuadro 16. Componentes orgánicos y propiedades bioquímicas del suelo en el PN Izta-Popo.

Localidad	MOS	COS	C mantillo	CBM	Ácidos Húmicos	Ácidos Fúlvicos	C Total	CO_2
	%	Mg ha^{-1}						kg ha^{-1} d^{-1}
W-D14	1.19	13.68	55.87	ND	ND	ND	98.34	ND
Barranca Apapaxco	8.45	97.09	15.78	29.18	26.73	120.78	213.57	140.00
La Papa Acatzi	0.49	5.63	ND	34.58	3.96	118.80	51.41	100.00
Sur de El Salto	4.63	53.13	22.049	31.87	21.78	124.74	163.39	140.00
La Ventana	0.95	10.86	29.86	24.85	1.98	136.62	89.41	230.00
O16	1.49	17.10	55.04	ND	ND	ND	102.22	ND
SE. B. Tlalquecotchcotl	2.39	27.48	23.68	37.28	28.71	134.64	137.96	240.00
Valle	10.57	121.39	55.87	ND	ND	ND	268.82	ND
N. B. mata leones	8.29	95.26	22.049	37.28	28.71	134.64	218.35	240.00
Agua escondida	7.43	85.32	58.85	17.02	15.84	128.70	233.25	200.00
La venta	5.67	65.15	22.45	28.64	17.82	117.81	177.33	170.00
S. B. Tlalquecotchcotl	7.98	91.60	15.24	37.28	28.71	134.64	222.40	240.00
Tlalcomajada E. Tetorre	6.86	78.82	24.09	21.07	28.71	97.02	188.78	295.00
SW. B. Tlalquecotchcotl	10.05	115.41	3.51	4.32	19.80	122.76	178.44	415.00
F1	1.79	20.52	45.37	ND	ND	ND	103.11	ND
Pela gallina	5.13	58.95	19.35	4.32	19.80	122.76	114.55	415.00
S. B. Tlalquecotchcotl	8.45	97.09	6.72	21.07	28.71	97.02	182.75	295.00
Chalchoapa NE. Tetorre	4.90	56.30	19.04	4.32	19.80	122.76	122.56	415.00
Laguna Xahuehahuatialco	7.35	84.45	23.47	27.83	41.58	92.07	210.46	155.00
La Joya	7.89	90.62	55.87	ND	ND	ND	216.32	ND

MO= Materia Orgánica, COS= Carbono Orgánico del Suelo, CBM= Carbono en Biomasa Microbiana ND= No determinado.

Los contenidos de MOS para estos suelos van de 0.49 a 10.57 % (Cuadro 16). Buckman y Brady (1991), reportan que las cantidades de MOS en suelos minerales varían tanto que es difícil

Easy PDF Creator is professional software to create PDF. If you wish to remove this line, buy it now.

presentar cifras representativas. El suelo superficial mineral puede contener del 15 al 20 % de MOS.

De las fracciones de C en el suelo, la fracción correspondiente al COS es la más abundante, seguida de la de C de mantillo y después Carbono en Biomasa Microbiana (CBM), lo que es consecuencia de la constante incorporación de materia orgánica al suelo por parte de la vegetación y los micro y macroorganismos, así como de la constante actividad microbiana (Figura 26).

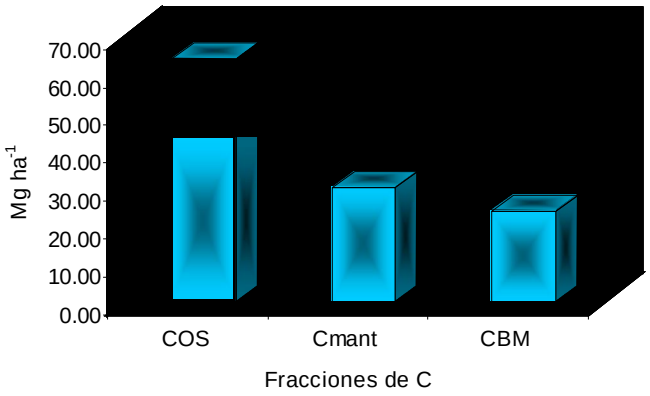


Figura 26. Fracciones de C en suelos del Parque Nacional Izta-Popo.

En los sitios localizados en altitudes intermedias se encontró una mayor cantidad de COS y una menor cantidad CBM, existiendo en estos lugares una mayor actividad microbiana que incrementa la producción de CO_2 (Figura 27).

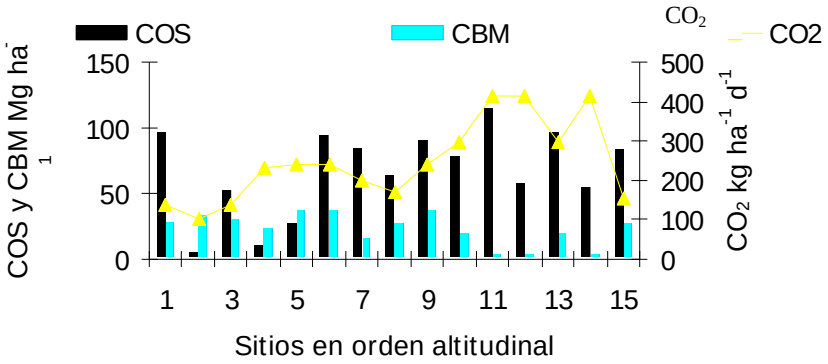


Figura 27. Contenido de COS, CBM y producción de CO_2 en el suelo del PN Izta-Popo.

Easy PDF Creator is professional software to create PDF. If you wish to remove this line, buy it now.

La producción de CO_2 aumentó con respecto al incremento altitudinal, entre los 3540 y 3828 m, aunque disminuyó en la altitud de 3892 m. La mayor producción de CO_2 se encontró en sitios a los cuales con base en el criterio del cociente metabólico, les corresponde la menor cantidad de CBM, lo que se puede atribuir a una mayor respiración de los microorganismos que influyen en la oxidación de compuestos de carbono (Figura 27). Según Sparling *et al.* (1992) y Blagodatskaya y Anderson (1998), el CBM puede alcanzar de 2 a 3% del C orgánico y por ello la respiración del suelo, puede considerarse para evaluar al CBM mediante los cocientes metabólicos (qCO_2, C-CO_2/C-biomasa). La producción de CO_2 está influenciada por altos valores de COS, de su estado de degradación y de las condiciones ambientales predominantes en cada unidad ecológica (García, 1984).

El suelo es enriquecido por adición de carbohidratos, donde los tejidos vegetales y animales dan el aporte principal. Estos sustratos son mineralizables por la microflora, durante este proceso se da el metabolismo energético en el que el CO_2 es el producto final. Una parte de la biomasa microbiana muere, las células microbianas destruidas actuaran como sustrato carbonado y durante su descomposición desprenderán CO_2 (Harris, 1992, citado por Granados, 2003), además estas células muertas pueden descomponerse fácilmente por la mineralización hecha por otros microorganismos (Paul y Solaiman, 2004).

Los contenidos de ácidos húmicos (AH) van de 1.98 a 28.71 Mg ha^{-1} con un promedio de 22.18 Mg ha^{-1} mientras que los contenidos de ácidos fúlvicos (AF) se encontraron entre 92.07 y 136.62 Mg ha^{-1} (Cuadro 16), con un promedio de 120.38 Mg ha^{-1}.
En estos suelos se encontraron mayores proporciones de AF con respecto a los AH (Figura 28).

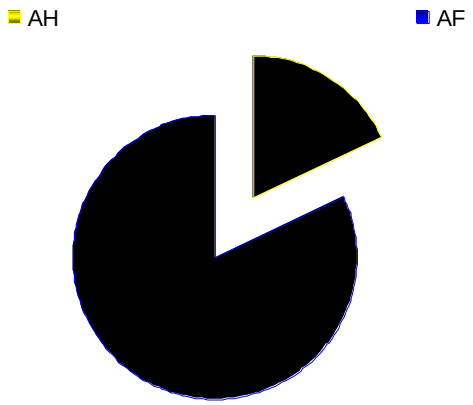


Figura 28. Proporciones de ácidos húmicos y fúlvicos en los suelos del PN Izta-Popo.

Easy PDF Creator is professional software to create PDF. If you wish to remove this line, buy it now.

Los AF no solo se dan en suelos ácidos, sino en donde las condiciones para la vida microbiana son algo precarias. De acuerdo con Primavesi (1984), en altitudes superiores a los 1000 m, donde el clima es frío, se forman casi exclusivamente AF.

Aunque existan mayores cantidades de AF, están presentes los AH, por lo que se forma un humus menos rico en Ca y P que el humus mull pero aún así se da la actividad microbiana, denominando el humus moder (Primavesi, 1984). Que de acuerdo con Velasco y Almendros (1984), esto indicaría que se trata de un humus de actividad biológica media.

b) Parque Nacional Zoquiapan y Anexas.

Los porcentajes de MOS para estos suelos van del 3.42 al 9.98%, que se clasifican como un nivel alto. Bajo condiciones naturales, las partes aéreas y raíces de los árboles, arbustos, hierbas y otras plantas naturales, son grandes proveedores de residuos orgánicos lo cual es la principal causa de los altos contenidos de MOS (Primo, 1981) (Cuadro 17).

Cuadro 17. Componentes orgánicos y propiedades bioquímicas del suelo en el PN Zoquiapan y Anexas.

Localidad	MOS	COS	C mantillo	CBM	Ácidos Húmicos	Ácidos Fúlvicos	C Total	CO_2
	%	Mg ha^{-1}						kg ha^{-1} d^{-1}
S de los Colgados	3.42	36.15	50.06	34.58	3.64	109.20	177.30	100.00
NW de Texola	4.47	47.15	25.20	34.58	3.64	109.20	143.15	100.00
S de la Vaquería	5.06	53.44	68.6	34.58	3.64	109.20	230.26	100.00
D11 Cañ Coquia	9.53	100.59	1.86	ND	ND	ND	141.88	ND
Cañ Atlapulco	5.96	62.87	26.92	ND	ND	ND	135.47	ND
S de laB. del P.del muerto	4.02	42.44	44.14	26.47	10.92	87.36	168.71	100.00
Sn Miguel Tlaixpan	7.44	78.58	19.95	ND	ND	ND	147.01	ND
Pto. 8	3.87	40.86	12.59	ND	ND	ND	84.11	ND
O1 Sn.Pedro	6.99	73.87	33.57	ND	ND	ND	159.59	ND
Puerto Mancilla	9.98	105.30	15.59	ND	ND	ND	176.62	ND

MO - Materia Orgánica, COS - Carbono Orgánico del Suelo, CBM - Carbono en Biomasa Microbiana.
ND = no determinado.

Easy PDF Creator is professional software to create PDF. If you wish to remove this line, buy it now.

Las fracciones de C en el suelo del PN Zoquiapan y Anexas, se encuentran de manera similar a las del PN Izta-Popo. Los porcentajes de MOS son muy parecidos por lo que la fracción correspondiente al COS fue mayor a la de C en mantillo y a la de CBM (Figura 29).

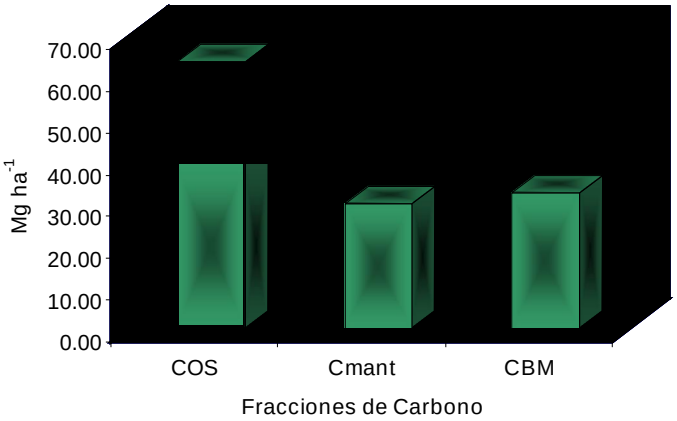


Figura 29. Fracciones de COS en el suelo del PN Zoquiapan y Anexas.

La cantidad de CBM se encontró de 26.47 a 34.58 Mg ha^{-1}, con un promedio de 32.55 Mg ha^{-1} (Cuadro 17). Se admite que entre un tercio y un medio de la materia orgánica del suelo procede de microorganismos (Primo, 1981).

En esta zona se encontró la mayor cantidad de CBM, debido a un menor metabolismo presentado por los microorganismos, basado en el cociente metabólico (qCO_2, C-CO_2/C-biomasa) de acuerdo con Sparling *et al.* (1992) y Blagodatskaya y Anderson (1998). La producción de CO_2 se mantuvo en un promedio de 100 kg ha^{-1} d^{-1} (Cuadro 17).

El contenido de AF se encontró entre 87.36 y 109.20 Mg ha^{-1} (los contenidos más altos en el presente estudio), mientras que los AH se encuentran entre 3.64 y 10.92 Mg ha^{-1} (Figura 30).

Los contenidos de AF, aunados a que se presenta una baja actividad microbiana sugieren que el proceso de humificación en esta zona se lleva a cabo lentamente generando un humus de tipo moor (de escasa actividad biológica y que muestra una mucho mayor proporción de AF con respecto a los AH (Velasco y Almendros, 1984) o moder ácido (Duchaufour, 1978).

Easy PDF Creator is professional software to create PDF. If you wish to remove this line, buy it now.

Los AF no solo se dan en suelos ácidos, sino en donde las condiciones para la vida microbiana son algo precarias. En altitudes superiores a los 1000 m, donde el clima es frío, se forman casi exclusivamente AF (Primavesi, 1984).

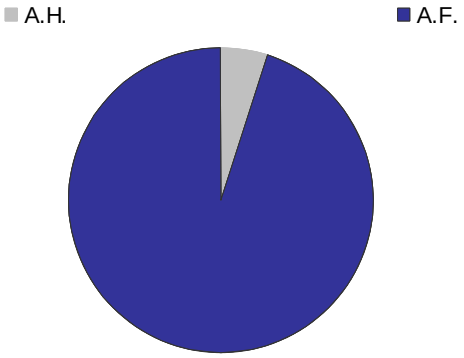


Figura 30. Contenido de Ácidos Húmicos y Fúlvicos en suelos del PN Zoquiapan y A.

El humus está formado por distintas fracciones húmicas que muestran diferencias significativas de un tipo de suelo a otro. El humus de suelos forestales es caracterizado por presentar altos contenidos de AF (Stevenson, 1982).

c) Reserva de la Biosfera El Cielo.

Los porcentajes de MOS se encontraron entre 1.22 hasta 41.43% que se clasifica como un nivel alto, mostrando que en algunos sitios de trabajo existen suelos orgánicos.

Los contenidos de MOS fueron los más altos encontrados en el presente estudio; debido a la constante incorporación de hojarasca aportada por la vegetación, estos suelos son delgados y están en procesos de formación por lo que en algunos lugares la MOS es una fracción dominante en su perfil (Cuadro 18).

De acuerdo con Foth y Turk (1981), existe un aumento en la MOS a medida que aumenta la precipitación, lo cual se acompaña con un incremento en la producción anual de MOS.

De acuerdo con Salas de las (1987), la producción total de sustancias orgánicas en el suelo de un bosque pluvial se encuentran en el orden de entre 7 y 12 Mg ha^{-1} de biomasa aérea y de 5 Mg ha^{-1} de material radical.

Easy PDF Creator is professional software to create PDF. If you wish to remove this line, buy it now.

En una hectárea de terreno en un clima cálido se calcula que se incorporan al suelo 3 Mg de materia vegetal seca por año (Primo, 1981), lo que indica que en esta zona el aporte de material orgánico al suelo es mayor al aportado en los PN Izta-Popo y Zoquiapan y A.

Cuadro 18. Componentes orgánicos y propiedades bioquímicas del suelo en La Reserva de la Biosfera El Cielo.

Localidad	MOS	COS	C mantillo	CBM	Ácidos Húmicos	Ácidos Fúlvicos	C Total	CO_2
	%	Mg ha^{-1}						kg $ha^{-1}d^{-1}$
Valle del Ovni	2.43	19.46	ND	ND	35.88	91.77	29.19	ND
Valle del Ovni	1.22	9.73	ND	ND	35.88	91.77	16.22	ND
S. de Julilo	8.10	64.80	52.38	0.08	44.85	72.45	172.52	49.05
NE. de la Gloria	41.43	331.59	27.16	ND	45.54	49.68	504.00	ND
S. de la Gloria	15.04	120.36	68.31	0.02	45.54	49.68	292.58	328.70
SW. de la Gloria	31.20	249.71	36.92	0.02	45.54	49.68	450.43	328.70
SW. De Julilo	11.58	92.73	11.31	0.01	37.26	48.30	156.62	401.65
W de la Gloria	33.76	270.18	19.10	ND	45.54	49.68	437.33	ND
S. de Julilo	10.42	83.42	49.37	0.02	45.54	49.68	190.28	328.70
NE. del Porvenir	15.77	126.25	40.09	0.04	29.67	36.57	250.12	231.43
NE del Porvenir	11.59	92.79	117.34	0.02	80.73	55.20	302.26	328.70
N. del Porvenir	10.82	86.61	34.93	0.06	37.26	57.27	182.98	109.85
NE del Porvenir	14.66	117.35	42.91	0.02	37.26	48.30	245.20	328.70
NW del Porvenir	15.71	125.76	14.16	ND	22.08	42.09	201.58	469.74
W. del Porvenir	26.39	211.22	15.97	ND	22.08	42.09	336.68	469.74
NW del Porvenir	14.53	116.27	17.11	0.06	127.65	55.20	200.16	107.41
NW del Porvenir	12.01	96.10	20.62	0.06	127.65	55.20	175.17	107.41

MOS - Materia Orgánica del Suelo, COS - Carbono orgánico del suelo, CBM - Carbono en Biomasa Microbiana, ND = no determinado.

En cuanto a las fracciones de C del suelo, la correspondiente al COS es la más abundante seguida de la presente en el mantillo y finalmente la del CBM (Figura 31).

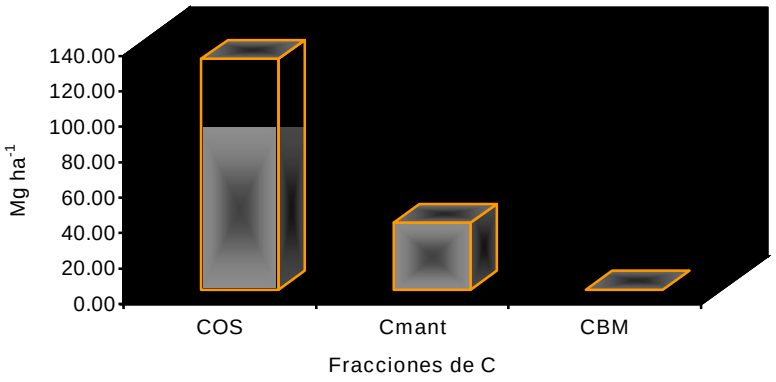


Figura 31. Fracciones de Carbono orgánico en suelos de la RB El Cielo.

Easy PDF Creator is professional software to create PDF. If you wish to remove this line, buy it now.

El contenido de C en la MOS es muy variable y depende, entre otras cosas, de la profundidad de la capa. En capas profundas, el contenido promedio es de 40%, mientras en las superficiales varia entre 45 y 58% y llegando en ocasiones a 60% (Primo 1981). En la RB El Cielo, se encuentran suelos de poca profundidad por lo que el contenido de COS es alto.

Las cantidades de CBM fueron mucho menores que las encontradas en los Parques Nacionales Izta-Popo y Zoquiapan, ya que van de 0.01 a 0.08 Mg ha^{-1} lo que se debe interpretar como una mayor actividad microbiana, ya que los valores de producción de CO_2 están entre 49.05 y 469.74 kg ha^{-1} $día^{-1}$ (Figura 32).

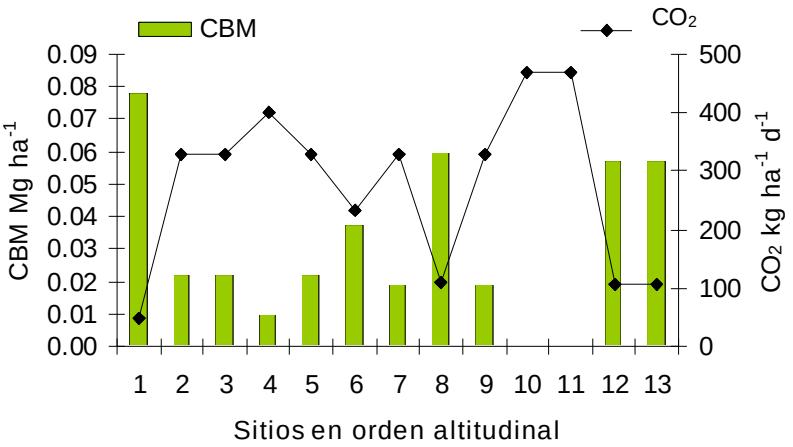


Figura 32. Contenido de CBM y CO_2 liberado en el suelo de la RB El Cielo.

La mayor producción de CO_2 se encontró en sitios a los cuales con base en el criterio del cociente metabólico, les corresponde la menor cantidad de CBM, lo que se puede atribuir a un mayor metabolismo por parte de los microorganismos que influyen en la oxidación de compuestos de carbono.

En la RB El Cielo, el suelo esta en procesos de formación y existe una incorporación de MO a una velocidad mayor, el clima es más cálido y existe una mayor precipitación pluvial anual en comparación con los PN Izta-Popo y Zoquiapan y Anexas.

En este caso en el que la relación C:N en promedio es mayor a 30 (Cuadro 15), se favorece el desarrollo de microorganismos, estos metabolizan la materia carbonada, desprendiendo CO_2 y se multiplican rápidamente (Primo, 1981). Como ya fue mencionado, cuando el aporte de MO tiene alta razón C:N, las bacterias, hongos y actinomicetos se reproducen activamente y desprende CO_2 en grandes cantidades (Buckman y Brady, 1991).

Easy PDF Creator is professional software to create PDF. If you wish to remove this line, buy it now.

En los suelos de la RB El Cielo, los AH tuvieron valores entre 22.08 y 127.65 Mg ha^{-1} (Cuadro 18) con un promedio de 50.93 Mg ha^{-1} (los más altos en este estudio) mientras que los AF se encontraron en un intervalo de 36.57 a 91.77 Mg ha^{-1}. Los contenidos de AH y AF para esta zona se presentaron de manera distinta a la de los PN Izta-Popo y Zoquiapan ya que en este cazo las proporciones de ambos ácidos estuvieron en valor similar, existiendo sin embargo, en mayor cantidad los AF (Figura 33).

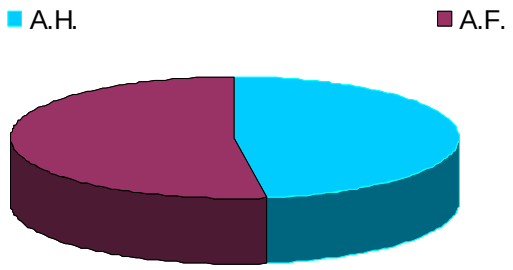


Figura 33. Contenido de Ácidos Húmicos y Fúlvicos en suelos de la RB El Cielo.

Estos valores indican que el humus dominante en esta zona fue el denominado moder. De acuerdo con Duchaufour (1978), este es un humus formado en un medio aireado, en el que se da una incorporación incompleta del material mineral y no existe la formación de un complejo húmico-arcilloso y se da una transformación biológica fuerte, por influencia de los organismos del suelo en particular artrópodos, hongos y bacterias.

Los altos contenidos de C y de N en esta zona, la mayor actividad microbiana, temperatura y precipitación pluvial, favorecen la descomposición de la materia orgánica, por lo que se estaría formando un humus de consumo, más que un humus de reserva (Primavesi, 1984).

El porcentaje promedio de MOS para los PN Izta-Popo y Zoquiapan fue de 6%, mientras que para la RB El Cielo fue de 16%, lo que se refleja en los altos contenidos de COS y C en mantillo en la RB El Cielo (Cuadro 19).

Con respecto a ANP, pendiente del terreno, exposición y gradiante altitudinal, se encontró que los contenidos de COS tuvieron alta significancia ($F=65.81$, $P<0.05$), mostrando diferencias significativas (*Apéndice D*).

Easy PDF Creator is professional software to create PDF. If you wish to remove this line, buy it now.

Cuadro 19. Propiedades orgánicas y bioquímicas del suelo por Área Natural Protegida.

ANP	MOS	COS	C mantillo	CBM	Ácidos Húmicos	Ácidos Fúlvicos	C total	CO_2
	%	Mg ha^{-1}						kg ha^{-1} d^{-1}
PN Izta-Popo	6.00	64.30	30.22	24.06	22.18	120.38	164.67	246.00
PN Zoquiapan	6.00	64.12	29.84	32.55	5.50	103.74	156.41	100.00
RB El Cielo	16.00	130.25	37.85	0.04	50.93	55.56	243.73	276.14

Los contenidos de C total son muy similares en los PN Izta-Popo y Zoquiapan y Anexas, pero para la RB El Cielo los contenidos fueron mayores (Fgura 34). El contenido de C total tuvo diferencias con respecto a cada ANP ($F=52.89$, $P<0.05$). Hyvönen *et al.,* (2002) predicen que el contenido de C del suelo en bosques de coníferas debe estar entre 50 y 90 Mg ha^{-1}, sin embargo en el presente trabajo se encontró que los contenidos de este elemento son mayores, desde 64.3 hasta 130.2 Mg ha^{-1} (Cuadro 19).

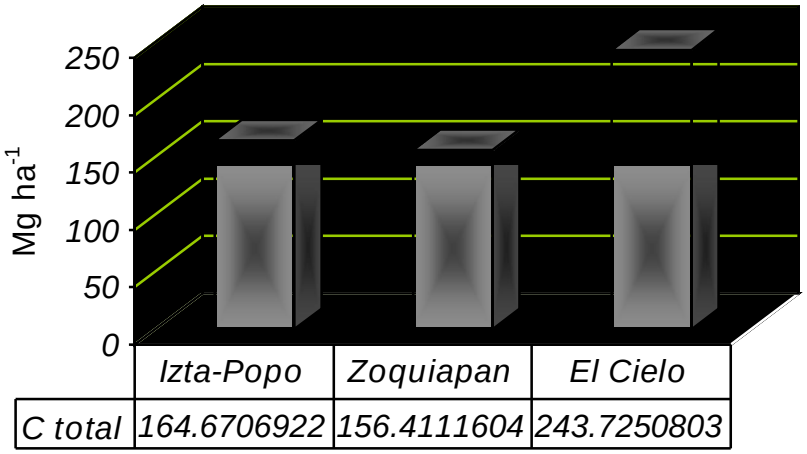


Figura 34. Contenido de C total en el suelo por cada Área Natural Protegida.

Las reservas de C en las fracciones crudas de la MOS, se destruyen fácilmente y la fracción más fina de ésta, es más resistente (Christensen, 1992, citado por Balesdent *et al.,* 1998). Esta debe ser la causa más probable de que los contenidos de COS sean mayores en la RB El Cielo, al tener mayor acumulación de MO, descomponiéndose rápidamente sus fracciones gruesas, liberando al C y otros nutrimentos.

En suelos forestales existen marcadas variaciones de la reserva de C con respecto a temperatura, productividad y tipo de vegetación. Se asume que la velocidad de

Easy PDF Creator is professional software to create PDF. If you wish to remove this line, buy it now.

descomposición se incrementa con la temperatura y consecuentemente el almacenamiento de C debe decrecer con respecto al clima caluroso (Hyvönen *et al.,* 2002).

La tasa de acumulación de C es grande en bosques de edad madura, como es el caso de los bosques de los PN Izta-Popo y Zoquiapan. En los lugares donde existe la presencia de áreas significativas de bosques los cuales no tienen la edad en la que la acumulación de C es balanceada por las emisiones de C de los procesos de respiración, el cual es crucial para el descenso de C como es el caso de la RB El Cielo.

Los contenidos de carbono presente en mantillo y el COS fueron mayores en la RBC (Figura 35). La producción de mantillo se incrementa al incrementarse la temperatura, pero no se han hecho estudios para los distintos tipos de bosques y vegetación y sus variaciones en producción (Hyvönen *et al.,* 2002). Muchos autores han intentado evaluar la cantidad de materia orgánica fresca que retorna anualmente al suelo por medio de la hojarasca: según Dommergues (1963), citado por Duchaufour (1978), representa de 2 a 4 Mg ha^{-1}en bosques templados, lo que corresponde a 2.3 Mg ha^{-1} de C en mantillo; en este estudio se encontraron valores más altos con un promedio de 33 Mg ha^{-1} de C en mantillo (Cuadro 19).

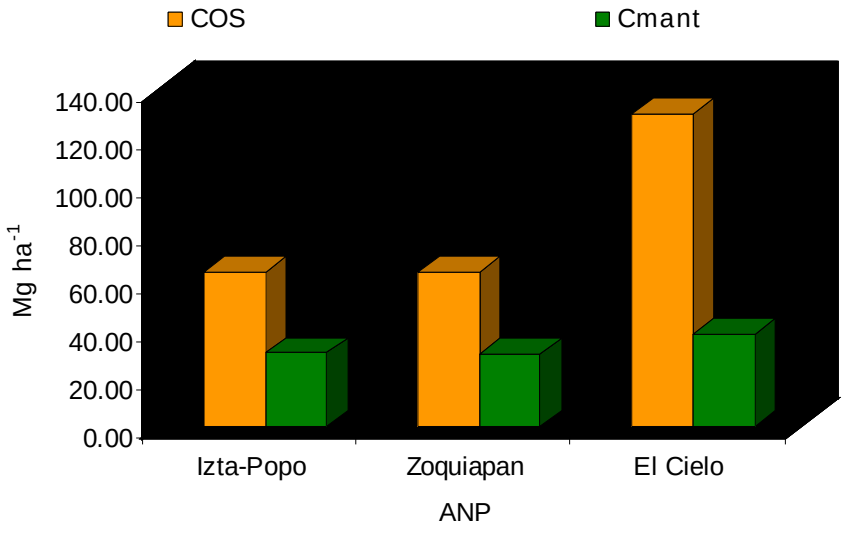


Figura 35. Cantidades de COS y C de mantillo en los suelos de las tres ANP.

La actividad microbiana, expresada como evolución de CO_2 fue mayor en los suelos de la RB El Cielo con valores de hasta 469 kg ha^{-1} d^{-1} en el Norte del Porvenir (Figura 36), probablemente debido a las condiciones climáticas y geográficas, así como el intervalo altitudinal en el que se trabajó en esta zona, siendo este mucho menor a los estudiados en los PN Izta-Popo y Zoquiapan.

Easy PDF Creator is professional software to create PDF. If you wish to remove this line, buy it now.

Ulrik y Singh en el 2005 reportaron valores de 0.25, 0.6 y 1.75 mg de CO_2 g^{-1} ha^{-1} que considerando una densidad de 1.07 g cm^{-3} y una profundidad de 0 a 10 cm, sería una producción de 11, 26 y 78 kg de CO_2 ha^{-1} $día^{-1}$.

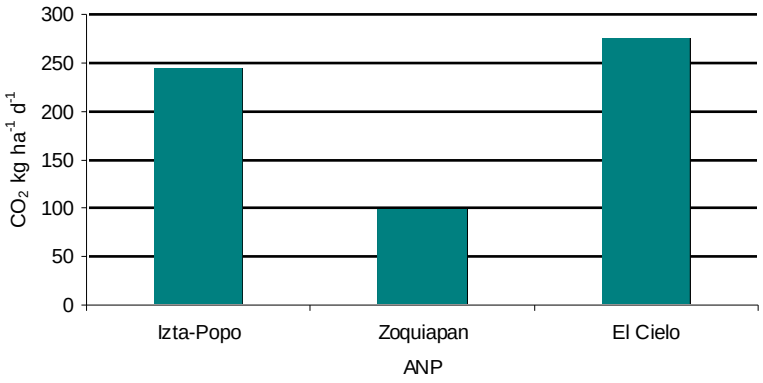


Figura 36. Evolución de CO_2 por parte de los microorganismos del suelo en cada ANP.

El cambio climático influye en los procesos microbianos, en la velocidad de descomposición de la MOS y en la dinámica del C en el suelo (Hyvönen *et al.,* 2002), por lo que se considera que en los suelos de la RB El Cielo, ocurre lo mismo que en el suelo fumigado de nuestros experimentos que consisten en que, las células microbianas destruidas actuarán como sustrato carbonado y durante su descomposición desprenderán una proporción de sus componentes de carbono en forma de CO_2 que, además, resulta razonablemente constante aunque existan menores reservas de CBM (Harris, 1992, citado por Granados, 2003). Sin embargo en el estudio realizado por Ladd *et al* (2004), se encontró que el suelo control (sin fumigar) excede en un 50% la producción de CO_2 que el del fumigado, lo que podría explicar el hecho de que en el suelo de el PN Zoquiapan y Anexas, se encuentre la menor producción de este compuesto ya que son sistemas que presentan una velocidad menor en su dinámica general en comparación a la de la RB El Cielo, ya que al parecer los procesos metabólicos en la RB El Cielo se están llevando a cabo en forma exponencial.

En la RB El Cielo, existe una mayor variedad de vegetación, el bosque de coníferas presenta asociaciones con árboles caducifolios; de acuerdo a Porta (1999), las hojas y madera de estos árboles presenta mayor cantidad de proteínas, celulosa, hemicelulosa y carbohidratos, así como una menor cantidad de lignina en comparación con las coníferas, lo que favorece la descomposición de este material, por lo que en los PN Izta-Popo y Zoquiapan y Anexas el metabolismo microbiano es menor.

Easy PDF Creator is professional software to create PDF. If you wish to remove this line, buy it now.

La mayor cantidad de CBM se encontró en los suelos del PN Zoquiapan y Anexas, seguido del PN Izta-Popo esto se debe a una menor actividad microbiana presente en estos suelos. Mientras que en los suelos de la RBC la actividad microbiana expresada en términos de producción de CO_2 es mayor, esto se confirma con la baja cantidad de CBM (Figura 37).

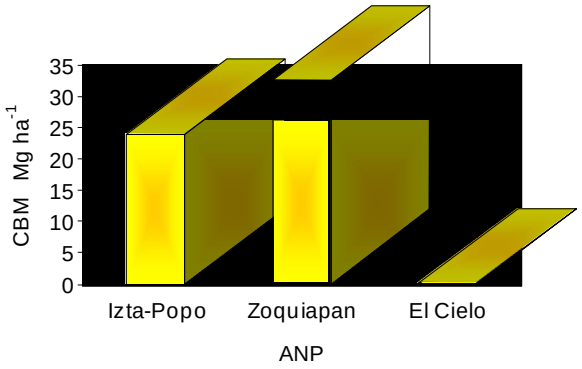


Figura 37. Contenido de CBM en el suelo de cada ANP.

Ladd *et al.,* (2004), explican que en los suelos más desarrollados y con mayor contenido de arcillas (mayor contenido de microagregados y por ende de microhabitats), la protección de BM es mayor, debido a esto es que en el suelo de los PN Izta-Popo y Zoquiapan que presentan un suelo más desarrollado, la cantidad de CBM es mayor que en los suelos de la RB el Cielo que son suelos jóvenes y someros, con un metabolismo microbiano acelerado.

De acuerdo con estudios realizados por Paul y Solaiman (2004), el material orgánico mejora significativamente el suelo, incrementa el N mineral y el CBM rápidamente.

En los procesos edafológicos una parte de la población microbiana muere, estas células muertas pueden descomponerse fácilmente por la mineralización hecha por otros microorganismos liberando o supliendo fácilmente la cantidad de nutrimentos que la planta necesita (Paul y Solaiman 2004).

Se encontró que los ácidos fúlvicos fueron predominantes en estos suelos forestales. En el PN Izta-Popo, los AH se encontraron en menor proporción con respecto a los AF, esta situación se presento de manera más marcada en el PN Zoquiapan, mientras que en la RB El Cielo las proporciones de estos ácidos fueron muy similares (Figura 38).

Probablemente los AF se encuentren en combinación con las huminas ya que de acuerdo con Schnitzer y Khan, (1978), Manahan (2000) y Stevenson (1994), citados por Santos dos

Easy PDF Creator is professional software to create PDF. If you wish to remove this line, buy it now.

(2003), las huminas son residuos orgánicos que no pueden ser extraídos mediante la técnica utilizada en este trabajo que consiste en utilizar una base fuerte y posteriormente acidificar la solución.

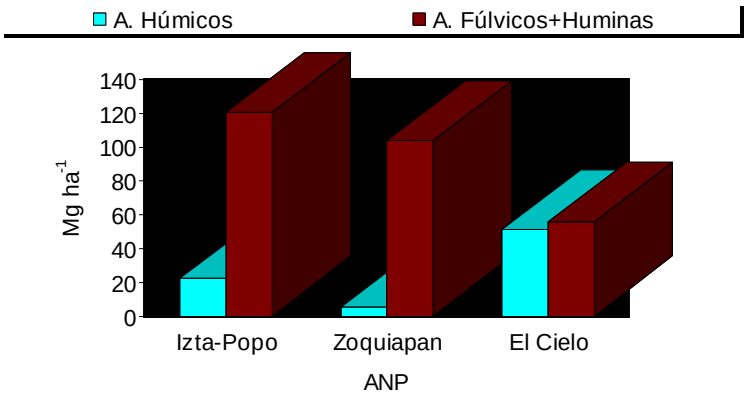


Figura 38. Contenido de A. Húmicos y Fúlvicos de la MOS en cada ANP.

En la Figura 38 se observa que en los suelos de la RB El Cielo, se encontraron las mayores cantidades de ácidos húmicos y menores de fúlvicos, lo que se puede atribuir a las condiciones ambientales predominantes en esta zona, en donde existe una mayor precipitación pluvial, el clima más cálido y existe una mayor actividad por parte de los microorganismos, que favorece la degradación de la MOS dando como resultado la formación de una mayor cantidad de AH (Duchaufour, 1978).

En promedio, en los suelos de la RB El Cielo se formaron las mayores cantidades de sustancias húmicas (AH+AF), ya que la cantidad global de compuestos húmicos que contiene el suelo caracteriza su grado de humificación (Duchaufour, 1978); por sus condiciones climáticas y altos contenidos de C y N ofrece condiciones extremadamente favorables a la actividad microbiana. Al presentar un clima más cálido se favorece la descomposición de la materia orgánica y el grado de humificación es mayor (Primavesi, 1984).

En los suelos de los PN Izta-Popo y Zoquiapan y Anexas, se encontró la mayor cantidad de AF+AH ya que de acuerdo con Primavesi (1984), en climas templados la mayor fracción de la MOS esta humificada, debido a la descomposición muy lenta en esas latitudes.

El porcentaje de humus se puede dividir en varias fracciones dependiendo de cada tipo de suelo. El humus de los suelos forestales esta caracterizado por presentar altos contenidos de ácidos fúlvicos, mientras que el humus presente en suelos de pradera tiene altos contenidos

Easy PDF Creator is professional software to create PDF. If you wish to remove this line, buy it now.

de ácidos húmicos (Stevenson, 1982). Por lo que los resultados obtenidos en el presente trabajo coinciden con lo reportado en la literatura; Primavesi (1984), Duchaufour (1978) y Salas de las (1987).

En un medio muy activo y bien aireado, la mineralización es rápida, la de la celulosa es más rápida que la de la lignina, una proporción de la cual se transforma en AH y sobre todo en humina no extraíble; al contrario en un medio poco activo y medianamente aireado, la mineralización es lenta, la lignina desaparece en primer lugar por la acción de los lignívoros; liberando monómeros, polifenoles solubles que se suman a los compuestos tánicos, estos compuestos forman con las proteínas complejos muy resistentes a la acción microbiana: son los complejos polifenolproteínas que a menudo impregnan las membranas celulósicas de los tejidos, retrasando su descomposición (Handley, 1954, citado por Duchaufour, 1978), por lo que se considera que en los suelos de los PN Izta-Popo y Zoquiapan y Anexas se forma un humus mas resistente a la degradación microbiana.

Con respecto a la vegetación arbórea dominante en cada zona de estudio, se encontró que en suelos bajo el género *Quercus* existe la mayor cantidad de MOS así como de COS, seguida del género *Abies* y de *Pinus* (Cuadro 20), de acuerdo con Porta (1999), las hojas y la madera de los árboles caducifolios presentan una mayor cantidad de proteínas, celulosa, hemicelulosa y carbohidratos, así como una menor cantidad de lignina, de ceras y resinas en comparación con las coníferas, lo que favorece la descomposición de este material, rico en C, incorporándolo al suelo.

Velasco y Almendros (1984), reportan que en un bosque de *Quercus* se desarrolla un humus moder, presentando un mayor grado de saturación de Ca^{2+} y Mg^{2+} y que la razón C:N esta en un promedio de 24:1 lo que demuestra el efecto inducido por la vegetación para la polimerización de las moléculas de AH. En la RB El Cielo es la zona donde se encontró el mayor desarrollo de AH, siendo en esta zona donde la vegetación fue más variada, presentando un mayor número de sitos con presencia de *Pinus* en combinación *Quercus* y otros árboles caducifolios.

En los PN Izta-Popo y Zoquiapan y Anexas, en el rango altitudinal estudiado, la vegetación arbórea estuvo representada en casi su totalidad por los géneros *Pinus* y *Abies* (coníferas). De acuerdo con Polo *et al*., (1978), cuando la vegetación permanente incluye en el estrato arbóreo coníferas, la humificación se desarrolla en condiciones menos favorables para la actividad biológica, lo que coincide con las cantidades de AF encontrados en estos PN,

Easy PDF Creator is professional software to create PDF. If you wish to remove this line, buy it now.

siendo los contenidos más altos con respecto a los de la RB El Cielo, lo que como ya se ha mencionado refleja una humificación y una actividad biológica media (Cuadro 20).

Cuadro 20. Contenido de C, ácidos orgánicos y producción de CO_2 en suelos bajo los géneros *Pinus, Abies y Quercus*.

ANP	Género	MOS	COS	C mantillo	CBM	C Total	Ácidos Húmicos	Ácidos Fúlvicos	CO_2
		%	Mg ha^{-1}						kg $ha^{-1}d^{-1}$
PN Izta-Popo	*Pinus*	5.62	64.59	32.33	18.80	159.68	19.80	115.63	269.00
	Abies	5.54	63.61	25.64	34.58	176.32	26.93	129.89	200.00
PN Zoquiapan	*Pinus*	4.32	45.58	47.95	34.58	183.57	3.64	109.20	100.00
	Abies	7.30	77.01	24.42	26.48	156.45	10.92	87.36	100.00
	Quercus	7.44	78.58	19.95	ND	147.01	ND	ND	ND
RB El Cielo	*Pinus*	14.15	113.29	39.22	0.04	227.07	57.48	51.41	260.37
	Abies	24.43	195.52	39.09	0.02	347.48	43.47	49.34	328.70
	Quercus	33.76	270.18	19.10	ND	437.33	45.54	49.68	ND

ND = no determinado.

Las especies vegetales cuyas hojas, se caracterizan por una relación C:N baja se llaman mejorantes y dan una hojarasca que se descompone activamente, mientras que las especies llamadas acidificantes, cuyas hojas son pobres en N (C:N elevado), tienen tendencia a formar un humus moder. De acuerdo con Wittich (1961), citado por Duchaufour (1978), el Pino silvestre presenta una razón C:N alta 65:1 en comparación con Robles y Olmos; además las hojas tienen distinto contenido de materiales hidrosolubles, mientras más abundantes sean estos contenidos, se favorece la vida microbiana y, por consiguiente la velocidad de mineralización; así la hojarasca de especies frondosas contienen mayor cantidad de estas sustancias que las de pino silvestre y da un humus más activo como es el caso de la vegetación de la RB El Cielo en comparación con la de los PN Izta-Popo y Zoquiapan y Anexas (Nykvist, 1959, citados por Duchaufour, 1978).

Easy PDF Creator is professional software to create PDF. If you wish to remove this line, buy it now.

10.5 ANÁLISIS DE COMPONENTES PRINCIPALES

Con los resultados del análisis estadístico multivariado (AEMV) y mediante la técnica de análisis de componentes principales (ACP) que consideró 23 variables originales, se encontró que 11 de ellas fueron variables robustas y de estas solo el porcentaje de Arena fue la única propiedad física considerada como componente principal. Granados (2003) también reportó que la cantidad de arena es una variable robusta en la definición de calidad del suelo forestal. La arena (y en consecuencia la textura), es una propiedad importante ya que en suelos forestales influye en su productividad de forma negativa. Pritchett (1991), menciona que la productividad de los suelos arenosos se incrementa a medida que la porción de las otras fracciones aumenta a un nivel óptimo.

Se encontró que el N total, pH, N de mantillo y la relación C:N son las propiedades químicas consideradas como componentes principales. García (2003) y Granados (2003), reportaron al pH y al N total como variables robustas en la determinación de índices de calidad edáfica.

La cantidad de ácidos fúlvicos, C total (suma de las fracciones de carbono orgánico), CO_2 y C de mantillo se consideraron como variables o componentes principales en la determinación de indicadores de calidad del suelo.

Todas las variables conforman el 100% de la varianza, con los componentes principales se explica el 85% de todas las posibles interacciones. Estas variables se consideran de mayor importancia debido al peso de su información (*Apéndice E)*.

Easy PDF Creator is professional software to create PDF. If you wish to remove this line, buy it now.

10. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

10.1 DESCRIPCIÓN GENERAL DE LAS CONDICIONES FISIOGRÁFICAS EN LOS SITIOS DE ESTUDIO.

a) Parque Nacional Izta-Popo

Se trabajó en un intervalo altitudinal entre 2650 y 3892 m, las pendientes del terreno fueron de 20 a 60%, encontrando terrenos con pendientes sencillas lo que significa que la inclinación del relieve va en un solo sentido; de acuerdo con Valencia y Hernández (2002), los valores de estas pendientes, van de muy a extremadamente inclinadas. La vegetación arbórea dominante estuvo representada por los géneros *Pinus* y *Abies*. El género *Pinus* se encontró a lo largo de todo el gradiante altitudinal, mientras que *Abies* se localizó predominantemente entre los 3000 y 3500 m y estableciéndose en cañadas en las que el factor humedad es importante (Cuadro 5). Challenger (1998) y Rzedowski (1978) reportan que los bosques de coníferas, son frecuentes en las zonas de clima templado y frío y en México, la distribución de estos se restringe a estrechas zonas altitudinales de las regiones montañosas.

Se encuentra un gran mosaico edáfico en el área estudiada los Andosoles están presentes en la mayoría de los sitios de trabajo mientras que en menor grado los Regosoles. (Figura 24).

Figura 20. Suelos del Parque Nacional Izta-Popo (izquierda) Andosol, (derecha) Regosol (Leptosol).

Granados (2003) y García (2003), en un estudio sobre calidad del suelo bajo *Pinus* y *Abies* respectivamente, reportaron también estos grupos o tipos de suelo para esta ANP.

Easy PDF Creator is professional software to create PDF. If you wish to remove this line, buy it now.

Cuadro 5. Características principales de los sitios de trabajo en el PN Izta-Popo, en orden altitudinal ascendente.

Localidad	Latitud	Longitud	Altitud	Pendiente	Exposición	Vegetación	Grupo de Suelo
	_____ UTM _____		m	%			
W-D14	2 101 465	528 925	2650	ND	N	*P. pseudostrobus*	Andosol
Barranca Apapaxco	2 094 455	532 177	2834	60	NW	*P. montezumae* *A. religiosa*	Regosol eútrico, Litosol, Andosol húmico
La Papa Acatzi	2 121 540	546 875	2964	ND	-	*P. montezumae* *P. patula*	Litosol, Regosol dístrito+Andosol húmico
Sur de El Salto	2 096 137	534 478	3099	8	NW	*P. patula* *A. religiosa*	Regosol eútrico, Litosol, Andosol húmico
La Ventana	2 109 851	544 221	3127	16	E	*P. pseudostrobus* *P. ayacahuite*	Regosol eútrico
O16	2 100 270	531 169	3225	55	-	*A. religiosa*	Phaeozem
SE. B. Tlalquecotchcotl	2 114 683	543 181	3281	45	SE	*A. religiosa* *Cupresus sp.*	Regosol eútrico, Fluvisol eútrico
Valle	2 126 706	530 838	3301	24	NW	*P. teocote* *A. religiosa*	Andosol
N. B. Mata leones	2 097 553	536 262	3312	20	S	*P. hartwegii* *A. religiosa*	Regosol, Litosol, Andosol
Agua escondida	2 110 002	542 286	3333	60	E	*P. teocote* *P. montezumae*	Regosol
La Venta	2 110 845	541 056	3418	20	E	*P. teocote* *P. hartwegii*	Regosol
S. B. Tlalquecotchcotl	2 114 526	542 103	3425	40	S	*P. harwegii* *A. religiosa*	Regosol eútrico
Tlalcomajada E. Tetorre	2 121 800	542 529	3512	61	N	*P. hartwegii*	Litosol, Regosol, Andosol
SW. B. Tlalquecotchcotl	2 114 562	541 221	3540	35	S	*P. hartwegii*	Regosol eútrico
F1	2 111 637	534 534	3553	20	W	*P. hartwegii*	Phaeozem
Pela gallina	2 110 546	538 910	3615	8	NE	*P. teocote*	Regosol dístrico, Cambisol eútrico
S. B. Tlalquecotchcotl	2 115 007	541 942	3667	60	N	*P. hartwegii*	Regosol eútrico
Chalchoapa NE. Tetorre	2 121 193	542 010	3696	21	N	*P. hartwegii*	Litosol, Regosol dístrico, Andosol húmico
La Laguna Xahuehahuatialco	2 121 616	541 183	3828	24	N	*P. hartwegii*	Litosol, Regosol dístrico, Andosol húmico
La Joya	2 116 230	536 507	3892	51	N	*P. hartwegii*	Regosol eútrico, Litosol

El tipo de suelo fue determinado en base a información cartográfica (INEGI, 1984 mapa topográfico y edafológico) y campo.

Easy PDF Creator is professional software to create PDF. If you wish to remove this line, buy it now.

Se considera que los aspectos físicos del terreno no limitan el establecimiento de los géneros arbóreos encontrados, sin embargo las condiciones imperantes en un rango altitudinal si influye en el establecimiento del género *Abies*, que como ya se menciono anteriormente, sólo se encontró entre los 3000 y 3500 m.

b) Parque Nacional Zoquiapan y Anexas

En este PN se trabajó entre los 2864 y los 3537 m de altitud. Los sitios que se estudiaron exhibieron pendientes que van de 25 a 80%, al igual que en el caso del PN Izta-Popo y considerando que pertenecen al mismo sistema orográfico, las pendientes van de fuertemente a extremadamente inclinadas. Los géneros arbóreos dominantes en esta zona son *Pinus*, *Abies* y *Quercus*; el genero *Pinus* se encontró entre 2800 y 3500 m, mientras que el de *Abies* se encontró representado a partir de los 3000 m, junto con el género *Quercus* (Cuadro 6).

Cuadro 6. Características principales de los sitios estudiados en el gradiente altitudinal del PN Zoquiapan y A.

Localidad	Latitud	Longitud	Altitud[1]	Pendiente	Exposición	Vegetación	Grupo de Suelo
	_____ UTM _____		m	%			
S de los colgados	2 254 106	543 584	2864	__	__	*Pinus. sp*	Andosol húmico, Cambisol húmico, Litosol
NW de Texola	2 139 414	538 309	2876	33	N	*Pinus. sp*	Cambisol húmico y eútrico
S de la Vaqueria	2 155 277	541 879	2950	ND	NE	*Pinus. sp*	Andosol húmico, Cambisol húmico, Litosol
D11 Cañada La Coquia	2 107 890	532 792	2965	25	SW	*A. religiosa*	Phaeozem
Cañada Atlapulco	2 149 554	524 251	3003	35	NE	*A. religiosa*	Andosol
S de la B. del paso del muerto	2 143 075	537 553	3036	80	__	*A. religiosa*	Cambisol húmico, Cambisol eútrico
Sn Miguel Tlaixpan	2 150 047	524 968	3066	55	E	*Quercus. sp*	Andosol, Cambisol
Punto 8	2 115 364	532 419	3231	65	NE	*Cupresus. sp*	Andosol
O1 Sn.Pedro	2 108 985	533 405	3286	60	SW	*A. religiosa*	Phaeozem
Puerto Mancilla	2 146 877	526 376	3537	28	SE	*A. religiosa*	Cambisol

El tipo de suelo fue determinado con base a información cartográfica (INEGI, 1984 mapa topográfico y edafológico) y en campo.
[1]Sitios de estudio ordenados en forma ascendente respecto a la altitud.

Easy PDF Creator is professional software to create PDF. If you wish to remove this line, buy it now.

Valderrábano (2005), reporta que en el PN Zoquiapan y A. a lo largo de un gradiante altitudinal entre los 2700 y 4100 m la vegetación arbórea dominante estuvo representada mayormente por el género *Pinus*, seguido por los de *Abies* y *Quercus*.

c) Reserva de la Biosfera El Cielo

En la RB, se trabajó en un intervalo altitudinal entre 1300 y 2050 m; este intervalo así como la región geográfica de la Reserva son distintas a las de los Parques Nacionales Izta-Popo y Zoquiapan, por lo que las condiciones climáticas como la temperatura y precipitación son diferentes, presentando climas calido y templado subhúmedo y un promedio de precipitación que va de los 1500 a los 2000 mm al año, lo que influye en las propiedades generales del suelo. El material parental y la génesis del tipo de suelo también son distintas, además de las diferencias del relieve del terreno que presenta pendientes de 30 y hasta de 90% que fueron las más pronunciadas en el presente estudio. Los tipos de suelo predominante en la RB son Leptosoles y las Rendzinas (Cuadro 7). Las asociaciones vegetales predominantes en el intervalo altitudinal estudiado estuvieron representadas por *Pinus*, *Abies* y *Quercus*. En cuanto a la distribución de los individuos del género *Abies*, como para PN Izta-Popo y Zoquiapan se observó una restricción más específica con respecto al intervalo altitudinal, distribuyéndose entre 1600 y 1900 m. Estas asociaciones vegetales se desarrollan predominantemente sobre Leptosoles rendzicos los cuales son suelos en proceso de formación, delgados y con presencia marcada de afloramiento rocoso (Figura 25).

Figura 21. Suelo Leptosol lítico (izquierda), Suelo Luvisol (derecha).

Easy PDF Creator is professional software to create PDF. If you wish to remove this line, buy it now.

Cuadro 7. Principales características de los sitios de trabajo en la Reserva de la Biosfera El Cielo.

Localidad	Latitud	Longitud	Altitud[1]	Pendiente	Exposición	Especie	Grupo de Suelo
	_____ UTM _____		m	%			
Valle del Ovni	2 557 411	477 127	1316	27	N	ND	Litosol, Rendzina
Valle del Ovni	2 557 411	477 127	1316	27	N	ND	Litosol, Rendzina
Sur de Julilo	2 558 656	477 924	1563	10	NE	*P. patula*	Luvisol crómico, Litosol, Rendzina
Noreste de la Gloria	2 548 992	475 073	1566	45	NE	*A. vejarii*	Rendzina, Litosol crómico
Sur de la Gloria	2 548 642	474 050	1645	50	NW	*P. pseudostrobus*	Rendzina, Litosol crómico
Suroeste de la Gloria	2 548 632	473 969	1653	45	NW	*A. vejarii*	Rendzina, Litosol crómico
Suroeste de Julilo	2 558 172	477 349	1672	9	NE	*P. pseudostrobus*	Rendzina, Litosol
Oeste de la Gloria	2 548 588	474 067	1709	90	N	*Q. crassifolia*	Rendzina, Litosol crómico
Sur de julilo	2 557 411	477 127	1746	27	N	*A. vejarii*	Rendzina, Litosol
Noreste del Porvenir	2 557 042	476 839	1774	6	NE	*P. pseudostrobus*	Rendzina, Litosol
Noreste del Porvenir	2 556 640	477 293	1865	35	N	*P. patula*	Rendzina, Litosol
Norte del Porvenir	2 556 761	476 188	1873	31	SE	*P. pseudostrobus*	Luvisol crómico
Noreste del Porvenir	2 556 901	476 024	1935	70	NE	*A. vejarii*	Luvisol crómico
Noroeste del Porvenir	2 556 013	475 547	1960	12	W	*P. pseudostrobus*	Luvisol crómico
Oeste del Porvenir	2 556 203	475 492	1972	8	W	*P. pseudostrobus*	Rendzina, Litosol
Noroeste del Porvenir	2 557 302	475 198	2054	9	NE	*P. pseudostrobus*	Rendzina, Litosol

El tipo de suelo fue determinado con base a información cartográfica (INEGI, 1984 mapa topográfico y edafológico) y en campo.
[1]Sitios de estudio ordenados en forma ascendente respecto a la altitud.
ND = no determinado

Easy PDF Creator is professional software to create PDF. If you wish to remove this line, buy it now.

10.2 INDICADORES FÍSICOS DE CALIDAD DEL SUELO

a) Parque Nacional Iztaccihuatl - Popocatepetl.

El valor promedio de conductividad eléctrica (CE) para los suelos del PN Izta-Popo fue de 0.04 dS m^{-1}, lo que revela sus características poco salinas (Cuadro 8). En el *Apéndice A*, se pueden observar las correlaciones de Pearson entre CE con las demás variables estudiadas, mostrando significancia estadística con la presencia de especies arbóreas, altitud y el COS. Además de C en mantillo (r= 0.68) y CO_2 (r= -0.62).

Se considera que las condiciones anteriores se deben en general a la cantidad de MOS, al origen ígneo del suelo de tendencia ácida y al régimen hídrico predominante en la zona con una precipitación pluvial de 659.3 a 1885 mm al año.

Con la determinación de densidad aparente (DA) se obtuvieron valores que están dentro de lo establecido para este tipo de suelo, ya que en suelos del Valle la DA fue de 0.75 g cm^{-3} y para W-D14 fue de 1.34 g cm^{-3}. Granados (2003), reporto valores de DA para esta ANP en un rango de 0.86 a 1.33 g cm^{-3} y la Soil Taxonomy menciona que la DA para los andosoles debe ser cercana a 0.9 o menos (Cruz, 2000).

El estudio de las correlaciones mostró que hay relación de la DA con los contenidos de Arena del suelo (r= 0.59), de Arcilla (r= -0.50) y Limo (r= -0.51). Lo anterior confirma lo reportado en la literatura; que en suelos superficiales de textura gruesa la DA estará entre 1.3 y 1.8 g cm^{-3} (Foth y Turk, 1981).

Los valores de densidad real (DR) se encontraron entre 1.40 y 2.97 g cm^{-3}, García (2003), reportó valores de DR para esta zona que van de 2.01 a 2.56 g cm^{-3}.

Con los valores de DA y DR aplicados en una fórmula se obtuvo el porcentaje de EP. La porosidad guarda una relación inversa con la DA ya que cuando esta última es menor, el EP es mayor (r=-0.42). En la mayoría de los sitios este porcentaje fue alto con valores de 31.10 a 74.75% (Cuadro 8).

El grupo textural que se encontró en estos suelos fue arenoso-migajonoso o franco-arenoso (textura gruesa). Bockheim (1991), reportó que los suelos forestales con vegetación de pino y oyamel, se caracterizan por sus texturas gruesas.

Easy PDF Creator is professional software to create PDF. If you wish to remove this line, buy it now.

Cuadro 8. Propiedades físicas de los suelos del PN Izta-Popo.

Localidad	DA	DR	CE	EP	Arcilla	Limo	Arena	Grupo textural
	g cm^{-3}		dS m^{-1}	%				USDA
W-D14	1.34	2.34	0.03	42.74	8	18	74	Migajón Arenoso
Barranca Apapaxo	1.02	2.16	0.05	52.78	8	20	72	Migajón Arenoso
La Papa Acatzi	1.04	2.49	0.07	58.23	7	18	75	Migajón Arenoso
Sur de El Salto	1.13	1.64	0.04	31.10	7	22	71	Migajón Arenoso
La Ventana	1.29	2.13	0.03	39.44	7	14	79	Arena migajonosa
O16	1.21	2.16	0.06	43.98	9	26	65	Migajón Arenoso
SE. B. Tlalquecotchcotl	0.81	1.90	0.04	57.37	9	20	71	Migajón Arenoso
Valle	0.75	2.97	0.05	74.75	18	32	50	Migajón
N. B. Mata leones	1.13	2.09	0.04	45.93	6	20	74	Arena migajonosa
Agua escondida	1.08	1.66	0.06	34.94	6	16	78	Arena migajonosa
La Venta	1.07	1.40	0.06	23.57	5	18	77	Arena migajonosa
S. B. Tlalquecotchcotl	1.12	1.64	0.03	31.71	8	16	76	Migajón Arenoso
Tlalcomajada E. Tetorre	0.91	2.63	0.04	65.40	7	24	69	Migajón Arenoso
SW. B. Tlalquecotchcotl	0.84	2.27	0.03	63.00	7	26	67	Migajón Arenoso
F1	1.29	2.34	0.04	44.87	4	20	76	Arena migajonosa
Pela gallina	1.07	1.94	0.05	44.85	6	14	80	Arena migajonosa
S. B. Tlalquecotchcotl	1.26	2.32	0.03	45.69	4	26	70	Arena migajonosa
Chalchoapa NE. Tetorre	1.07	ND	0.03	ND	4	22	74	Migajón Arenoso
Laguna Xahuehahuatialco	0.84	2.45	0.04	65.71	5	22	73	Migajón Arenoso
La Joya	0.76	2.59	0.07	70.66	9	44	47	Migajón

DA, Densidad aparente; DR, Densidad Real; EP, Espacio Poroso; CE, Conductividad Eléctrica.
ND = No determinado.

b) Parque Nacional Zoquiapan y Anexas.

Los valores de CE estuvieron en un intervalo entre 0.02 y 0.13 dS m^{-1} por lo que de acuerdo a Jackson (1964), estos suelos no mostraron propiedades salinas ni sódicas (Cuadro 9). De igual forma que para el PN Izta-Popo, se considera que las propiedades anteriores se deben en general a la alta cantidad de MOS, al material de origen ígneo de tendencia generalmente ácida como las andesitas y el basalto, así como al régimen hídrico predominante en la zona que tiene una precipitación pluvial entre 659 y 1885 mm al año.

En cuanto a los valores de DA encontrados, están dentro de lo establecido para este tipo de suelo con valores de 0.74 g cm^{-3} en NW de Texola y 1.20 g cm^{-3} en la Cañada Coquia, ya que la Soil Taxonomy ha reportado que los Andosoles tienen una DA cercana a 0.9 g cm^{-3} o menos (Cruz, 2000), y en los suelos superficiales de textura gruesa la DA está entre 1.3 y

Easy PDF Creator is professional software to create PDF. If you wish to remove this line, buy it now.

1.8 g cm^{-3} de acuerdo con lo reportado por Foth y Turk (1981). Lo que confirma lo anterior es el estudio de correlación, que muestra una relación directa entre la DA y los contenidos de Arena del suelo (r= 0.75) (*Apéndice B*). Los contenidos abundantes de MOS disminuyen los valores de DA (r= 0.48). Los valores de DA determinados para los suelos de este parque nacional corresponden a lo reportado por Valderrábano (2005), que reporta valores que van de 0.64 a 1.28 g cm^{-3}.

Cuadro 9. Propiedades físicas de suelo de cada sitio de trabajo en el PN Zoquiapan y A, en orden alt. ascendente.

Localidad	DA	DR	CE	EP	Arcilla	Limo	Arena	Grupo textural
	___ g cm-^{3}___		dS m^{-1}	_____ %_____				USDA
Sur de los Colgados	0.82	2.37	0.02	65.40	25	32	43	Migajón
NW de Texola	0.74	2.55	0.07	70.98	13	38	49	Migajón
Sur de la Vaquería	0.87	2.69	0.05	67.66	17	32	51	Migajón
D11 Cañ Coquia	1.20	1.74	0.05	31.03	8	22	70	Migajón Arenoso
Cañada Atlapulco	0.92	1.97	0.07	53.30	21	32	47	Arena migajonosa
Sur B. del paso del muerto	0.89	2.55	0.04	65.10	14	40	46	Migajón Arenoso
Sn Miguel Tlaixpan	0.90	1.83	0.10	50.82	17	38	45	Migajón
Pto. 8	1.09	1.72	0.04	36.63	6	26	68	Migajón Arenoso
O1 Sn.Pedro	0.87	1.39	0.13	37.41	8	26	66	Migajón Arenoso
Puerto Mancilla	0.90	1.97	0.05	54.31	16	26	58	Migajón Arenoso

DA Densidad aparente; DR Densidad Real; EP Espacio Poroso; CE, Conductividad Eléctrica.

Los valores de DR se encontraron entre 1.39 y 2.55 g cm^{-3} que son resultados semejantes a los encontrados en suelos del PN Izta-Popo y a los reportados por Valderrábano (2005) para el PN Zoquiapan y Anexas, con valores entre 1.4 y 2.81 g cm^{-3}.

El porcentaje de EP se encontró en un valor promedio de 53.26%, lo que estaría relacionado con buena aireación y con adecuados niveles de humedad, así como con los valores altos de DR, los cuales se relacionan de forma positiva (r = 0.81).

La textura de estos suelos tiene un mayor porcentaje de arena, con un grupo textural definido como arena-migajonosa o franco-arenoso.

Easy PDF Creator is professional software to create PDF. If you wish to remove this line, buy it now.

c) Reserva de la Biosfera El Cielo.

La CE del suelo encontrada fue de 0.03 a 0.56 dS m^{-1}, a pesar de que son valores mayores que los encontrados en el PN Izta-Popo y Zoquiapan y Anexas, debido al origen calcáreo del suelo de esta región, las condiciones no son salinas. La CE mostró relación positiva con respecto a las pendientes pronunciadas (r= 0.58) (*Apéndice C*), lo que se puede atribuir a que en estas inclinaciones, el arrastre o pérdida de sales pero también de MO es mayor a causa del escurrimiento debido a las lluvias (arrastre por agua), empobreciendo al suelo en su contenido de MO impidiendo que se manifieste un carácter de alta acidez en estos lugares.

Los valores encontrados de DA van de 0.35 a 1.15 g cm^{-3} (valores muy bajos por el alto contenido de materia orgánica) (r = -0.84), concuerdan con lo planteado por Pritchett (1991), que indica que la DA de suelos forestales varía desde 0.2 en algunas capas orgánicas hasta casi 1.9 g cm^{-3} en las arenas gruesas (Cuadro 10).

Cuadro 10. Propiedades físicas del suelo de La Reserva de la Biosfera El Cielo en orden altitudinal ascendente.

Localidad	DA	DR	CE	EP	Arcilla	Limo	Arena	Grupo textural
	g cm^{-3}		dS m^{-1}	%				USDA
Valle del Ovni	1.08	2.30	0.09	53.54	14	10	76	Migajón arenoso
Valle del Ovni	1.15	2.58	0.05	63.79	28	6	66	Migajón arcillo-arenoso
S. de Julilo	0.95	ND	0.03	ND	26	22	52	Migajón arcillo-arenoso
NE. de la Gloria	0.35	2.48	0.16	85.80	18	20	62	Migajón arenoso
S. de la Gloria	0.66	2.41	0.08	72.35	15	38	47	Migajón
SW. de la Gloria	0.68	1.88	0.12	63.96	12	32	56	Migajón arenoso
SW. de Julilo	0.79	2.72	0.06	70.58	26	30	44	Migajón
W de la Gloria	0.68	ND	0.28	ND	ND	ND	ND	ND
S. de Julilo	0.85	1.98	0.24	56.65	34	20	46	Migajón arcilloso
NE. del Porvenir	0.71	2.44	0.12	70.54	20	28	52	Migajón
NE del Porvenir	0.67	1.71	0.17	62.17	20	14	66	Migajón arcillo-arenoso
N. del Porvenir	0.84	2.67	0.04	68.53	2	22	76	Arena migajonosa
NE del Porvenir	0.70	1.64	0.56	57.45	18	20	62	Migajón arenoso
NW del Porvenir	0.79	2.03	0.25	59.98	18	22	60	Migajón arenoso
W. del Porvenir	0.68	1.76	0.09	59.98	22	22	56	Migajón arcillo-arenoso
NW del Porvenir	0.64	1.86	0.05	60.90	24.	32	44	Migajón
NW del Porvenir	0.73	1.72	0.03	51.23	32	32	36	Migajón

DA, Densidad aparente; DR, Densidad Real; EP, Espacio Poroso; CE, Conductividad Eléctrica.
ND = No Determinado

Easy PDF Creator is professional software to create PDF. If you wish to remove this line, buy it now.

Los valores de DR se encontraron entre 1.64 a 2.72 g cm^{-3}. El porcentaje de EP en suelos de la RB El Cielo fue mayor que los de los PN Izta-Popo y Zoquiapan y Anexas con valores de 51.23 hasta 85.80%, lo que señala una mayor interacción entre el grado de aireación con el contenido de humedad en el suelo. El suelo presentó textura migajonosa-arenosa y migajonosa-arcillosa.

La DA y DR del suelo mostraron diferencias significativas entre cada ANP así como con la pendiente del terreno y el gradiante altitudinal (*Apéndice D*).

El grupo textural que se encontró en los suelos de las tres ANP fue arenoso-migajonoso o franco-arenoso (textura gruesa), los porcentajes de limo y arena tuvieron diferencias significativas por cada ANP, con respeto a la pendiente del terreno, los géneros y especies arbóreas dominantes de cada zona y con respecto al gradiante altitudinal (*Apéndice D*). El valor de CE promedio para estos suelos fue de 0.08 dS m^{-1}, a pesar de que lo suelos de la RB El Cielo presenta los valores más elevados de CE siguen revelando sus características poco salinas y sódicas, ya que de acuerdo con USDA (1954) citados por Jackson (1964), estos valores muestran que los efectos de salinidad en estos suelos son despreciables (Cuadro 11).

Cuadro 11. Propiedades físicas del suelo por Área Natural Protegida.

ANP	DA	DR	CE	EP	Arcilla	Limo	Arena	Grupo textural
	____g cm^{-3}____		dS m^{-1}	_____ % _____				USDA
PN- Izta-Popo	1.05	2.16	0.04	49.30	7.12	21.90	70.98	Arena migajonosa
PN Zoquiapan	0.92	2.08	0.06	53.26	14.41	31.20	54.39	Migajón arenoso
RB El Cielo	0.74	2.13	0.14	63.64	20.68	23.12	56.20	Migajón

Easy PDF Creator is professional software to create PDF. If you wish to remove this line, buy it now.

10.3 INDICADORES QUÍMICOS DE CALIDAD DEL SUELO.

a) Parque Nacional Iztaccíhuatl – Popocatépetl.

Los valores de pH activo estuvieron entre 4.6 y 6.3, con un valor extremo de pH potencial de 3.6 (muy ácido) en la localidad de Acatzi (La Papa), que se encuentra en altitudes intermedias (1960 m) y es un sitio alterado por la actividad agrícola (Cuadro 12). Estos valores indican que el pH de estos suelos fue encontrado entre moderadamente y fuertemente ácido, de acuerdo con Cepeda (1991), lo cual concuerda con respecto a lo descrito por Pritchett (1991), quien menciona que en suelos forestales el pH se puede encontrar en una escala de 3.50 a 6.23.

Las condiciones mencionadas, respecto al pH y a la CE en esta zona, están relacionadas directamente con la cantidad de MOS que en estos suelos se encontró en un intervalo que va desde 0.49 a 10.57% (Cuadro 16). Se sabe que los suelos forestales tienen típicamente la mayor proporción de MOS muy cerca de la superficie y muy cerca de ella se encuentra la mayor parte de las raíces efímeras de los árboles lo cual explica los altos contenidos de materia orgánica en estos suelos (Russell, 1968).

Además de las altas cantidades de MOS y el material parental de estos suelos (derivados de ceniza volcánica, ricos en MOS y en el porcentaje de Al y Fe, que le dan un carácter de moderado a fuertemente ácido), otro factor que le da el carácter ácido es que durante el proceso de mineralización de la MOS y ante la oxidación biológica que es realizada por los microorganismos se libera anhídrido carbónico que favorece la condición de un pH ácido en el suelo, ya que cuanto mayor sea la concentración de este compuesto en el aire del suelo, el pH será menor (Russell, 1968).

A lo largo del gradiante altitudinal se encontraron comunidades del género *Pinus*, los mismos que presentan tolerancia y eficiencia para desarrollarse en suelos muy ácidos (Pritchett, 1991).

Los contenidos de N-total van de 0.55 en el Sur del Salto a 5.68 Mg ha^{-1} en Agua escondida (Cuadro 12). Pritchett (1991), menciona que el N total en suelos forestales se puede encontrar principalmente en la capa de humus de la cubierta forestal y el horizonte mineral A1, desde 1 Mg ha^{-1} en suelos arenosos muy drenados, hasta 30 en bosques boreales que tienen una gran acumulación de humus.

Easy PDF Creator is professional software to create PDF. If you wish to remove this line, buy it now.

Cuadro 12. Propiedades químicas del suelo del Parque Nacional Izta-Popo.

Localidad	N total	N mant	P-d	P total	P mant	C:N	C:P disp	pH H_20 2:1	pH KCl 2:1
	Mg ha^{-1}								
W-D14	1.94	0.36	0.31	ND	0.08	8.10	46.90	5.3	4.9
Barranca Apapaxco	2.49	0.49	0.03	2.14	0.15	38.90	3091.80	5.9	5.1
La Papa Acatzi	1.94	ND	0.06	3.22	ND	3.20	240.60	4.9	3.6
Sur de El Salto	0.55	0.39	0.05	2.14	0.10	95.80	944.20	6.1	5.3
La ventana	0.83	0.29	0.002	1.38	0.25	13.10	5696.10	5.6	4.7
O16	1.39	0.38	0.07	ND	0.03	14.60	235.50	6.0	5.3
SE. B. Tlalquecotchcotl	1.11	0.44	0.08	2.00	0.07	24.80	365.30	6.3	5.2
Valle	1.66	0.37	0.39	ND	0.21	80.80	309.60	5.1	4.4
N. B. Mata leones	1.94	0.69	0.03	2.00	0.10	49.10	4750.10	5.4	4.4
Agua escondida	5.68	0.73	0.01	2.68	0.15	15.10	8038.70	5.2	5.0
La venta	4.16	0.46	0.01	1.66	0.10	15.70	8329.70	6.2	4.5
S. B. Tlalquecotchcotl	4.99	0.39	0.02	2.00	0.09	18.60	5077.30	5.7	4.6
Tlalcomajada E. Tetorre	2.22	0.64	0.02	3.23	0.11	35.50	5262.70	4.9	3.8
SW. B. Tlalquecotchcotl	3.66	0.38	0.02	2.11	0.09	31.50	6415.10	5.6	4.2
F1	1.66	0.64	0.38	ND	0.11	15.80	54.30	5.7	4.8
Pela Gallina	3.74	0.41	0.01	2.11	0.06	15.60	7087.20	6.1	4.6
S. B. Tlalquecotchcotl	3.88	0.38	0.02	3.23	0.06	25.00	7808.80	5.8	4.5
Chalchoapa NE. Tetorre	0.97	0.51	0.02	2.11	0.07	60.60	3584.70	5.1	4.2
Laguna Xahuehahuatialco	2.77	0.72	0.02	3.43	0.08	38.80	5422.90	4.6	3.7
La Joya	2.49	0.46	0.08	ND	0.09	39.80	1152.90	4.8	4.0

Sitios con orden altitudinal ascendente. mant = mantillo d = disponible. ND = no determinado.

Se encontró que las cantidades de N total del suelo, aumentaron conforme se incrementa la altitud hasta llegar a sus valores máximos en altitudes intermedias, en el punto ya mencionado Agua escondida a una altitud de 3333 m, el contenido de N es de 5.68 Mg ha^{-1} y en el S de la barranca Tlalquecotchcotl a una altitud de 3425 m, es de 4.99 Mg ha^{-1} (Figura 22).

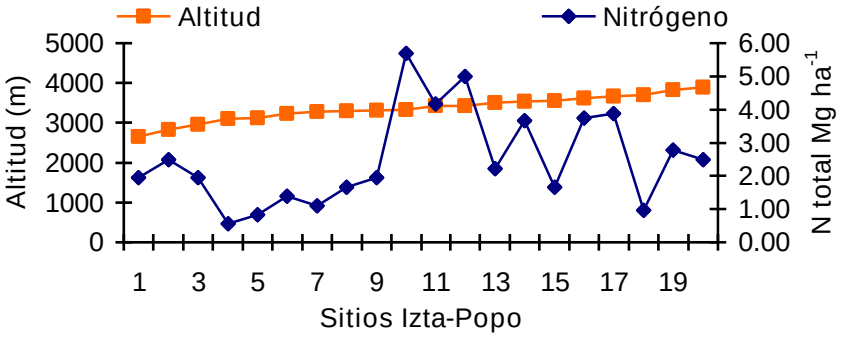


Figura 22. N total del suelo a lo largo del gradiante altitudinal en suelos del PN Izta-Popo.

Easy PDF Creator is professional software to create PDF. If you wish to remove this line, buy it now.

García (2003), mencionó que la concentración de N en suelos de bosque eran mayores a niveles superiores de altitud y que las coníferas provocaban que este elemento se almacenara en el mantillo y en las capas superiores del humus.

En los sitios en los que se encontraron las mayores cantidades de N total, presentan relaciones C:N que van de 15:1 a 31:1, en estas condiciones el crecimiento bacteriano no se da en forma exponencial, pero si predomina la degradación de la MOS y la mineralización de su nitrógeno (Primo, 1981).

El promedio de la razón C:N fue de 32:1 para esta ANP. En el sitio 3 (Acatzi, se encontró un suelo con uso agrícola), la razón C:N fue de 3:1 quizá por una fertilización reciente. Los valores de la relación C:N oscilan entre 13:1 y 38:1 excluyendo a los valores mas extremos, lo que de acuerdo con Buckman y Brady (1991), indican una estabilidad en las cantidades que se van consumiendo o perdiendo en el suelo tanto de N como de C.

El N de la MOS queda disponible para las plantas cuando la relación C:N se aproxima a 10:1. Sin embargo, la liberación de N es baja ya que en los suelos forestales el proceso de mineralización es lento. Cuando no se mineraliza suficiente N por resíntesis, ocasiona que durante el proceso de descomposición, este deba ser tomado del medio ambiente; ya que de otro modo se frena la descomposición porque los microorganismos no pueden reproducirse. El C y el N total pueden relacionarse habida cuenta de su mutua dependencia. Relaciones C:N mayores de 30 revelan condiciones malas tanto de descomposición de la MOS como de baja disponibilidad de N (Salas de las, 1987). Por lo que se considera que en 9 de los 20 sitios de trabajo el N es un elemento limitante.

Los contenidos de P disponible (P-d) van de 0.002 a 0.39 Mg ha^{-1} con un promedio de 0.08 Mg ha^{-1} (Cuadro 12).

Cuando los suelos presentan una relación C:P alta, existen bajas cantidades de P-d, ya que el proceso de mineralización para dejar disponible al P es lento debido a que en suelos con alto contenido de C, el P es acumulado en su forma orgánica. En lugares donde la relación C:P alcanzó valores de 5000:1 a 8000:1 puede entenderse que existe una marcada deficiencia de P-disponible (Figura 23).

En este tipo de suelos el pH es ácido y en consecuencia el P se fija en formas de fosfatos de hierro y aluminio. Ello se debe a la acidez del lugar que favorece la formación de iones de Fe^{3+} y Al^{3+} que a ese pH son insolubles (Primo, 1981).

Easy PDF Creator is professional software to create PDF. If you wish to remove this line, buy it now.

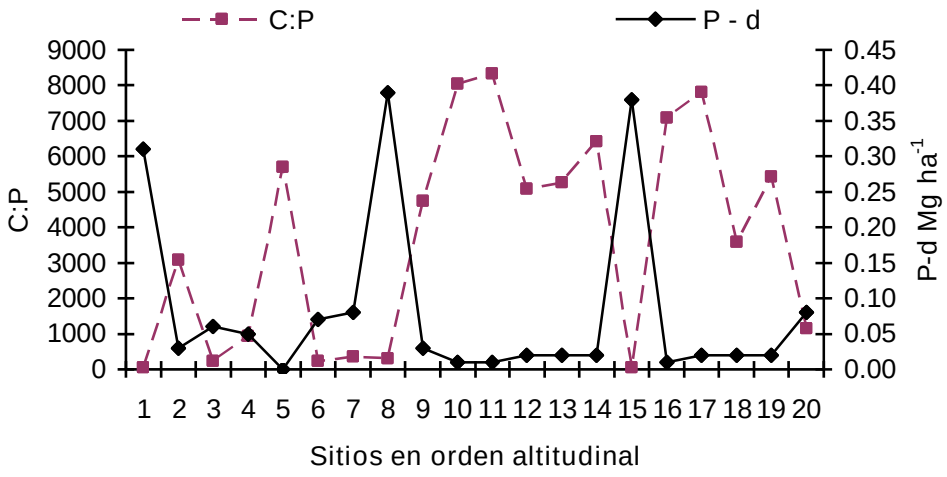


Figura 23. Relación C:P y P-d a lo largo del gradiante altitudinal del PN Izta-Popo.

b) Parque Nacional Zoquiapan y Anexas.

En los suelos de este Parque Nacional, los valores de pH activo encontrados estuvieron en un intervalo de 4.9 a 5.9 y pH potencial entre 4.7 y 5.2 (Cuadro 13). Estos resultados indican que el pH de estos suelos va de moderadamente a fuertemente ácido (Cepeda, 1991).

El pH y la CE están relacionados directamente con la cantidad de MOS, cuyo contenido en estos suelos varía del 3 al 10% (Cuadro 17).

La MOS libera ácidos orgánicos, así como anhídrido carbónico durante los procesos de mineralización y humificación, que favorece la condición de un pH ácido en el suelo. El desarrollo de estos suelos ácidos se debe entre otras cosas, al proceso de lixiviación en las regiones que cuentan con suficiente agua de lluvia para arrastrar, fuera de los horizontes superficiales del suelo, sales solubles primordialmente de Ca y Mg (Cepeda, 1991).

Easy PDF Creator is professional software to create PDF. If you wish to remove this line, buy it now.

Cuadro 13. Propiedades químicas de los suelos de cada sitio de trabajo en el PN Zoquiapan y Anexas.

Localidad	N total	Nmant	P-d	P total	P mant	C:N	C:Pdisp	pH H_20 2:1	pH KCl 2:1
	Mg ha^{-1}								
S de los calgados	1.53	0.41	0.63	2.96	0.05	23.60	53.50	5.2	4.7
NW de Texola	1.27	0.58	0.65	2.96	0.09	37.00	79.60	5.6	5.2
S de la Vaquería	0.25	0.43	0.78	2.96	0.09	209.70	69.10	4.9	4.9
D11 Cañ Coquia	2.55	0.25	0.04	ND	0.11	39.50	2480.80	5.7	5.2
Cañ Atlapulco	2.04	0.17	0.02	ND	0.08	30.80	2561.00	5.7	5.1
S de la B. del P. del muerto	1.02	0.30	0.71	2.96	0.04	41.60	56.80	5.5	5.0
Sn Miguel Tlaixpan	1.27	0.28	0.02	ND	0.09	64.50	3391.80	5.9	4.8
Pto. 8	1.78	0.43	0.09	ND	0.12	22.70	462.10	5.5	5.0
O1 Sn.Pedro	2.04	0.29	0.05	ND	0.08	36.20	1391.60	5.4	5.1
Puerto Mancilla	2.04	0.28	0.02	ND	0.07	56.30	4200.10	5.5	4.9

Sitios en orden altitudinal ascendente. mant= mantillo d = disponible. ND = no determinado.

El contenido de N total de estos suelos va de 0.25 a 2.55 Mg ha^{-1} (Cuadro 13). El C y el N total se pueden relacionar por su mutua dependencia (Salas de las, 1987), los procesos de mineralización de la MOS propician que ambos elementos se encuentren en proporciones similares a lo largo del gradiante altitudinal o que se presente una estabilidad en las cantidades que se van perdiendo en el suelo tanto de N como NO_3^- y de C en forma de CO_2 que son lixiviados o absorbidos por las plantas (Buckman y Brady, 1991), mostrando una relación C:N estable que va de 22:1 a 56.30:1 excluyendo dos valores extremos (Figura 24).

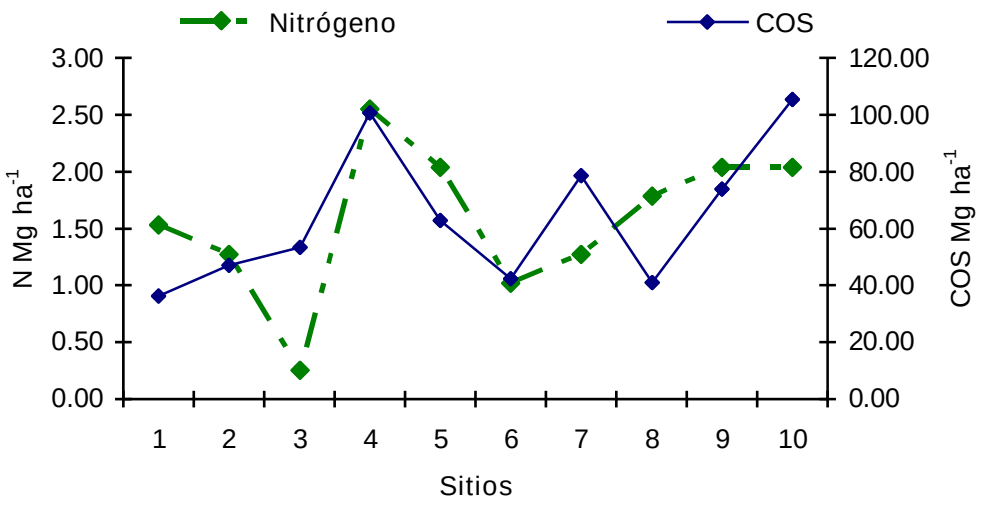


Figura 24. Cantidades de N y COS a lo largo del gradiante altitudinal del PN Zoquiapan y Anexas.

Easy PDF Creator is professional software to create PDF. If you wish to remove this line, buy it now.

Los contenidos de P-d van de 0.02 a 0.78 Mg ha^{-1} con un promedio de 0.30 Mg ha^{-1}. Presentando una relación C:P que va de 53.50:1 a 4200.10:1 con un promedio de 1474.60:1 con lo que se entiende que existen bajas cantidades de P-d ya que el P puede estar siendo acumulado en su forma orgánica y la liberación de P orgánico es lenta en los suelos con débil actividad biológica (en estos suelos se encontró la menor actividad biológica), generando humus moder ácido (Duchaufour, 1978); que en este caso se presentan ya que se tienen altas cantidades de ácidos fúlvicos en esta zona, que son representativos de este humus (Cuadro 19).

Al igual que para el N, se observan fenómenos de mineralización y reorganización microbiana. La mineralización solo se produce si la MO fresca es rica en P; en caso contrario, los microorganismos utilizan la totalidad del P presente para sus propias síntesis (Duchaufour, 1978).

Al igual que en el PN Izta-Popo, este tipo de suelos presenta un pH ácido y en consecuencia el P se fija en formas de fosfatos de hierro y aluminio que a ese pH son insolubles (Primo, 1981).

c) Reserva de la Biosfera El Cielo.

A pesar del origen calcáreo de sus suelos en la RB El Cielo estos presentan un carácter marcadamente ácido, típico de los suelos forestales. Esto se debe entre otras cosas al efecto del arrastre de las sales solubles. La cual provoca la desaturación del complejo adsorbente, que es, por tanto, responsable de la acidificación (Duchaufour, 1984). Una alta precipitación pluvial y altas cantidades de MOS que van de 1 hasta 40% (Cuadro 18), le dan a estos suelos un carácter ácido con un pH activo de 4 a 6 y un caso extremo de pH potencial de 3.8 en el norte del Porvenir (Cuadro 14).

Los procesos de lavado eliminan bases del suelo y por lo tanto, tienden a provocar con el tiempo, un descenso en el pH. Este proceso es importante en los suelos jóvenes. En la RB El Cielo se presentan predominantemente suelos Leptosoles que están en proceso de formación.

Este proceso se da en cualquier medio con condiciones de humedad suficiente; en los que la productividad de ácidos orgánicos solubles aumenta considerablemente, lo que acelera el arrastre de bases y los cationes básicos son sustituidos por los iones ácidos, H^+ o Al^{3+} (Duchaufour, 1984).

Easy PDF Creator is professional software to create PDF. If you wish to remove this line, buy it now.

Los factores biológicos también tienen influencia en la descarbonatación. En suelos de bosques frondosos; la velocidad de descarbonatación alcanza un valor máximo, tres agentes combinan su acción, el ion NO_3^-, el CO_2 y los compuestos orgánicos solubles que emanan de la hojarasca, la mayoría de los cuales son insolubles en forma de ácidos fúlvicos, aunque una fracción minoritaria permanece soluble y arrastra el Ca^{2+} (Robert *et al.,* 1980; citado por Duchaufour, 1984). Esto explica porque en clima templado los suelos forestales normalmente están descarbonatados, cualquiera que sea el contenido de caliza en la roca madre.

Cuadro 14. Propiedades químicas de los suelos de cada sitio de trabajo en La RB El Cielo.

Localidad	N total	N mant	P-d	P total	P mant	C:N	C:P disp	pH H_20 2:1	pH KCl 2:1
	Mg ha^{-1}								
Valle del Ovni	nd	ND	0.01	0.76	ND	ND	3214.30	5.4	4.3
Valle del Ovni	ND	ND	0.003	0.76	ND	ND	3635.80	5.7	4.3
S. de Julilo	2.13	0.41	0.01	0.94	0.06	47.90	11653.40	6.0	4.7
NE. de la Gloria	6.18	0.46	0.14	1.90	0.10	54.00	2394.90	5.8	5.2
S. de la Gloria	3.67	0.41	0.05	1.90	0.11	33.20	2731.30	5.3	5.1
SW. de la Gloria	3.67	0.24	0.12	1.90	0.09	67.60	2007.80	5.7	5.2
SW. de Julilo	2.32	0.37	0.01	1.40	0.05	40.00	10250.50	5.1	4.0
W de la Gloria	9.66	0.57	0.01	1.90	0.10	28.00	22260.10	5.3	ND
S. de Julilo	1.16	0.26	0.01	1.90	0.10	71.40	13221.10	4.5	4.2
NE. del Porvenir	1.93	0.34	0.01	0.90	0.05	67.90	18867.10	5.8	5.2
NE del Porvenir	4.06	0.52	0.03	1.50	0.10	22.50	3466.90	5.1	5.0
N. del Porvenir	1.16	0.35	0.02	0.91	0.05	84.40	3240.60	4.4	3.8
NE del Porvenir	5.22	0.34	0.13	1.50	0.15	22.80	912.30	6.9	5.0
NW del Porvenir	6.76	0.42	0.01	1.08	0.01	18.50	24250.20	5.8	4.9
W. del Porvenir	3.96	0.42	0.01	1.08	0.02	53.40	37511.00	5.9	5.1
NW del Porvenir	3.09	0.43	0.01	1.02	0.05	38.20	7880.90	5.2	4
NW del Porvenir	1.93	0.35	0.01	1.02	0.05	51.80	13837.00	5.8	4.5

Sitios en orden altitudinal ascendente. Mant = mantillo d = disponible ND = no determinado.

Los contenidos de N en este suelo van de 1.16 a 6.76 Mg ha^{-1} y un promedio de 3.79 Mg ha^{-1} (el valor más alto de las tres ANP). Los valores de la relación C:N están entre 18.50:1 y 84.40:1 en el sitio denominado “El norte del Porvenir. El promedio de esta razón fue de 47:1 (Figura 25).

Easy PDF Creator is professional software to create PDF. If you wish to remove this line, buy it now.

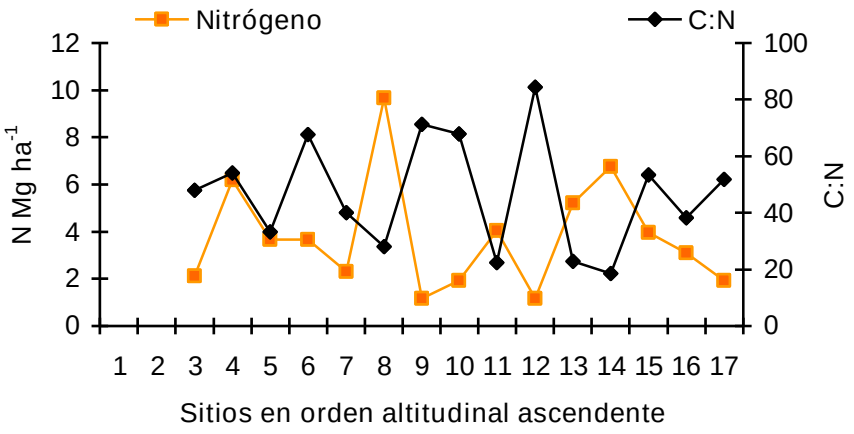


Figura 25. Razón C:N y su relación con la cantidad de N total en el suelo de la RB El Cielo.

Las bacterias metabolizan C de la MOS, convirtiéndolo en CO_2, que escapa del suelo, dando como resultado el enriquecimiento en N por lo que la relación C:N es una medida del grado de humificación de la MOS. En este caso, en el que la relación C:N promedio, es mayor a 30, se favorece el desarrollo de microorganismos, estos metabolizan la materia carbonada, desprendiendo CO_2 y se multiplican, consumiendo el N asimilable por lo que el contenido de NO_3^- disminuye (Primo, 1981).

Las diferencias de la relación C:N de la RB El Cielo con respecto a las presentes en los PN Izta-Popo y Zoquiapan y Anexas parecen estar relacionadas en general, con las condiciones climáticas, especialmente la temperatura y la cantidad y distribución de lluvias. Por ejemplo esta bien establecido que la razón C:N tiende a disminuir en las regiones áridas, al revés que en las húmedas (Buckman y Brady, 1991).

Lo que pasa en esta zona de estudio podría ser lo siguiente: de acuerdo con Buckman y Brady (1991), cuando existe un aporte de MO con alta razón C:N, ocurre un cambio rápido, la flora heterótrofa (bacterias, hongos y actinomicetos) se reproduce activamente desprendiendo CO_2 en grandes cantidades. En la RB El Cielo se encontró la mayor actividad microbiana, evaluada por la evolución de CO_2 (Cuadro 16). Bajo estas condiciones el N en forma de nitratos, decrece debido a la demanda de los microorganismos.

En los suelos de la RB El Cielo, se encontraron las mayores cantidades de C y de N total (Cuadros 18 y 19). En condiciones de estabilidad en la relación C:N (menores de 30:1), la cantidad de N determina la de COS. Así cuando aumenta el N en los residuos orgánicos, es mayor la posibilidad de acumulación de C combinado orgánicamente.

Easy PDF Creator is professional software to create PDF. If you wish to remove this line, buy it now.

Los contenidos de P-d van de 0.003 a 0.14 Mg ha^{-1} con un promedio de 0.03 Mg ha^{-1}. Presentando una relación C:P-d que va de 912.3:1 a 37511:1 con un promedio de 10666.8:1 el P puede estar siendo acumulado en su forma orgánica.

Los suelos tuvieron un valor de pH promedio entre 4.7 y 5.1 a este pH el P se fija en formas de fosfatos de Fe y Al insolubles (Primo, 1981).

Los valores de la razón C:P marcan la competencia que existe entre los microorganismos y las plantas por el P-d (Pierre, 2004). En suelos con alto contenido de C y gran proliferación de microorganismos, el P soluble puede ser consumido por estos para su multiplicación y acumulado en el suelo en forma orgánica, en la propia sustancia bacteriana transformada en humus. De esta será cedido lentamente a medida que actúen los procesos degradativos a largo plazo (Primo, 1981).

Los valores de pH activo promedio para las tres ANP fue de 5.1 y de pH potencial de 4.7 (Cuadro 15), las condiciones mencionadas respecto al pH y a la CE del suelo en estas zonas, están relacionadas directamente con el promedio de precipitación pluvial al año y con la cantidad de MO que se encontró en un intervalo de 1 a 10% en el PN Izta-Popo y Zoquiapan y de 1 hasta 40% en la RB El Cielo.

El N es uno de los macroelementos más importantes para el desarrollo de las plantas, este elemento mostró diferencias significativas con respecto a cada ANP y también de las distintas pendientes de cada zona (*Apéndice D*).

Las condiciones antes mencionadas en la RB El Cielo, probablemente se deben a que presenta suelos muy someros en procesos de formación y procesos de descomposición de MO muy acelerados debido a que, existe una gran aportación de MO al suelo, en interacción con el material parental de origen calcáreo, forma productos carbonatados que contribuyen favorablemente a la descomposición de la misma (Duchaufour, 1984). También existe una mayor precipitación pluvial al año por su clima templado subhúmedo (Sánchez *et al*., 2005).

Concuerdo 15. Propiedades químicas del suelo por Área Natural Protegida.

ANP	N total	P-disponible	P total	C:N	C:P-disponible	pH H_20	pH KCl
	Mg ha^{-1}						
PN Izta-Popo	2.50	0.08	2.34	32.03	3695.70	5.52	4.57
PN Zoquiapan	1.73	0.03	2.96	39.13	1474.60	5.50	4.99
RB El Cielo	3.79	0.03	1.32	46.78	10666.80	5.52	4.66

Easy PDF Creator is professional software to create PDF. If you wish to remove this line, buy it now.

10.4 INDICADORES ORGÁNICOS Y BIOQUÍMICOS DE CALIDAD DEL SUELO.

a) Parque Nacional Iztaccihuatl - Popocatepetl.

La cantidad de MOS forestal (Cuadro 16), tiene correlación estadística significativa con el grado de pendiente en el relieve del terreno y con la altitud, ya que en altitudes intermedias, (entre 3000 y 3600 m) fueron los sitios en los que se encontraron los mayores porcentajes de MOS y en estos lugares se tuvieron las menores pendientes del terreno reportadas (de 8 a 20 %) (*Apéndice A*).

Cuadro 16. Componentes orgánicos y propiedades bioquímicas del suelo en el PN Izta-Popo.

Localidad	MOS	COS	C mantillo	CBM	Ácidos Húmicos	Ácidos Fúlvicos	C Total	CO_2
	%	Mg ha^{-1}						kg ha^{-1} d^{-1}
W-D14	1.19	13.68	55.87	ND	ND	ND	98.34	ND
Barranca Apapaxco	8.45	97.09	15.78	29.18	26.73	120.78	213.57	140.00
La Papa Acatzi	0.49	5.63	ND	34.58	3.96	118.80	51.41	100.00
Sur de El Salto	4.63	53.13	22.049	31.87	21.78	124.74	163.39	140.00
La Ventana	0.95	10.86	29.86	24.85	1.98	136.62	89.41	230.00
O16	1.49	17.10	55.04	ND	ND	ND	102.22	ND
SE. B. Tlalquecotchcotl	2.39	27.48	23.68	37.28	28.71	134.64	137.96	240.00
Valle	10.57	121.39	55.87	ND	ND	ND	268.82	ND
N. B. mata leones	8.29	95.26	22.049	37.28	28.71	134.64	218.35	240.00
Agua escondida	7.43	85.32	58.85	17.02	15.84	128.70	233.25	200.00
La venta	5.67	65.15	22.45	28.64	17.82	117.81	177.33	170.00
S. B. Tlalquecotchcotl	7.98	91.60	15.24	37.28	28.71	134.64	222.40	240.00
Tlalcomajada E. Tetorre	6.86	78.82	24.09	21.07	28.71	97.02	188.78	295.00
SW. B. Tlalquecotchcotl	10.05	115.41	3.51	4.32	19.80	122.76	178.44	415.00
F1	1.79	20.52	45.37	ND	ND	ND	103.11	ND
Pela gallina	5.13	58.95	19.35	4.32	19.80	122.76	114.55	415.00
S. B. Tlalquecotchcotl	8.45	97.09	6.72	21.07	28.71	97.02	182.75	295.00
Chalchoapa NE. Tetorre	4.90	56.30	19.04	4.32	19.80	122.76	122.56	415.00
Laguna Xahuehahuatialco	7.35	84.45	23.47	27.83	41.58	92.07	210.46	155.00
La Joya	7.89	90.62	55.87	ND	ND	ND	216.32	ND

MO= Materia Orgánica, COS= Carbono Orgánico del Suelo, CBM= Carbono en Biomasa Microbiana ND= No determinado.

Los contenidos de MOS para estos suelos van de 0.49 a 10.57 % (Cuadro 16). Buckman y Brady (1991), reportan que las cantidades de MOS en suelos minerales varían tanto que es difícil

Easy PDF Creator is professional software to create PDF. If you wish to remove this line, buy it now.

presentar cifras representativas. El suelo superficial mineral puede contener del 15 al 20 % de MOS.

De las fracciones de C en el suelo, la fracción correspondiente al COS es la más abundante, seguida de la de C de mantillo y después Carbono en Biomasa Microbiana (CBM), lo que es consecuencia de la constante incorporación de materia orgánica al suelo por parte de la vegetación y los micro y macroorganismos, así como de la constante actividad microbiana (Figura 26).

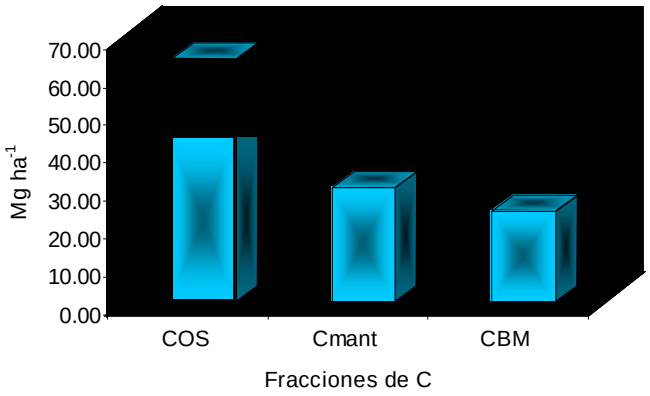


Figura 26. Fracciones de C en suelos del Parque Nacional Izta-Popo.

En los sitios localizados en altitudes intermedias se encontró una mayor cantidad de COS y una menor cantidad CBM, existiendo en estos lugares una mayor actividad microbiana que incrementa la producción de CO_2 (Figura 27).

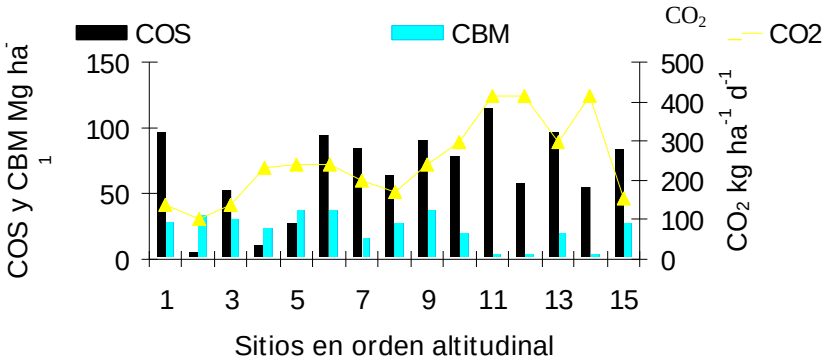


Figura 27. Contenido de COS, CBM y producción de CO_2 en el suelo del PN Izta-Popo.

Easy PDF Creator is professional software to create PDF. If you wish to remove this line, buy it now.

La producción de CO_2 aumentó con respecto al incremento altitudinal, entre los 3540 y 3828 m, aunque disminuyó en la altitud de 3892 m. La mayor producción de CO_2 se encontró en sitios a los cuales con base en el criterio del cociente metabólico, les corresponde la menor cantidad de CBM, lo que se puede atribuir a una mayor respiración de los microorganismos que influyen en la oxidación de compuestos de carbono (Figura 27). Según Sparling *et al.* (1992) y Blagodatskaya y Anderson (1998), el CBM puede alcanzar de 2 a 3% del C orgánico y por ello la respiración del suelo, puede considerarse para evaluar al CBM mediante los cocientes metabólicos (qCO_2, C-CO_2/C-biomasa). La producción de CO_2 está influenciada por altos valores de COS, de su estado de degradación y de las condiciones ambientales predominantes en cada unidad ecológica (García, 1984).

El suelo es enriquecido por adición de carbohidratos, donde los tejidos vegetales y animales dan el aporte principal. Estos sustratos son mineralizables por la microflora, durante este proceso se da el metabolismo energético en el que el CO_2 es el producto final. Una parte de la biomasa microbiana muere, las células microbianas destruidas actuaran como sustrato carbonado y durante su descomposición desprenderán CO_2 (Harris, 1992, citado por Granados, 2003), además estas células muertas pueden descomponerse fácilmente por la mineralización hecha por otros microorganismos (Paul y Solaiman, 2004).

Los contenidos de ácidos húmicos (AH) van de 1.98 a 28.71 Mg ha^{-1} con un promedio de 22.18 Mg ha^{-1} mientras que los contenidos de ácidos fúlvicos (AF) se encontraron entre 92.07 y 136.62 Mg ha^{-1} (Cuadro 16), con un promedio de 120.38 Mg ha^{-1}.
En estos suelos se encontraron mayores proporciones de AF con respecto a los AH (Figura 28).

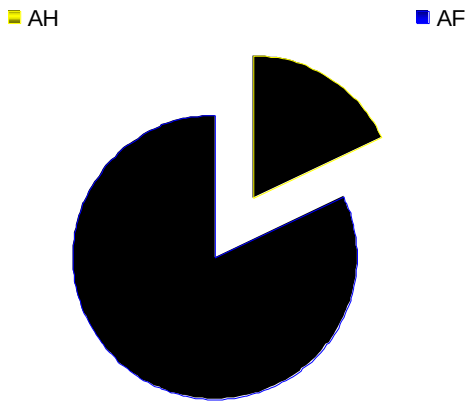


Figura 28. Proporciones de ácidos húmicos y fúlvicos en los suelos del PN Izta-Popo.

Easy PDF Creator is professional software to create PDF. If you wish to remove this line, buy it now.

Los AF no solo se dan en suelos ácidos, sino en donde las condiciones para la vida microbiana son algo precarias. De acuerdo con Primavesi (1984), en altitudes superiores a los 1000 m, donde el clima es frío, se forman casi exclusivamente AF.

Aunque existan mayores cantidades de AF, están presentes los AH, por lo que se forma un humus menos rico en Ca y P que el humus mull pero aún así se da la actividad microbiana, denominando el humus moder (Primavesi, 1984). Que de acuerdo con Velasco y Almendros (1984), esto indicaría que se trata de un humus de actividad biológica media.

b) Parque Nacional Zoquiapan y Anexas.

Los porcentajes de MOS para estos suelos van del 3.42 al 9.98%, que se clasifican como un nivel alto. Bajo condiciones naturales, las partes aéreas y raíces de los árboles, arbustos, hierbas y otras plantas naturales, son grandes proveedores de residuos orgánicos lo cual es la principal causa de los altos contenidos de MOS (Primo, 1981) (Cuadro 17).

Cuadro 17. Componentes orgánicos y propiedades bioquímicas del suelo en el PN Zoquiapan y Anexas.

Localidad	MOS	COS	C mantillo	CBM	Ácidos Húmicos	Ácidos Fúlvicos	C Total	CO_2
	%	Mg ha^{-1}						kg ha^{-1} d^{-1}
S de los Colgados	3.42	36.15	50.06	34.58	3.64	109.20	177.30	100.00
NW de Texola	4.47	47.15	25.20	34.58	3.64	109.20	143.15	100.00
S de la Vaquería	5.06	53.44	68.6	34.58	3.64	109.20	230.26	100.00
D11 Cañ Coquia	9.53	100.59	1.86	ND	ND	ND	141.88	ND
Cañ Atlapulco	5.96	62.87	26.92	ND	ND	ND	135.47	ND
S de laB. del P.del muerto	4.02	42.44	44.14	26.47	10.92	87.36	168.71	100.00
Sn Miguel Tlaixpan	7.44	78.58	19.95	ND	ND	ND	147.01	ND
Pto. 8	3.87	40.86	12.59	ND	ND	ND	84.11	ND
O1 Sn.Pedro	6.99	73.87	33.57	ND	ND	ND	159.59	ND
Puerto Mancilla	9.98	105.30	15.59	ND	ND	ND	176.62	ND

MO - Materia Orgánica, COS - Carbono Orgánico del Suelo, CBM - Carbono en Biomasa Microbiana.
ND = no determinado.

Easy PDF Creator is professional software to create PDF. If you wish to remove this line, buy it now.

Las fracciones de C en el suelo del PN Zoquiapan y Anexas, se encuentran de manera similar a las del PN Izta-Popo. Los porcentajes de MOS son muy parecidos por lo que la fracción correspondiente al COS fue mayor a la de C en mantillo y a la de CBM (Figura 29).

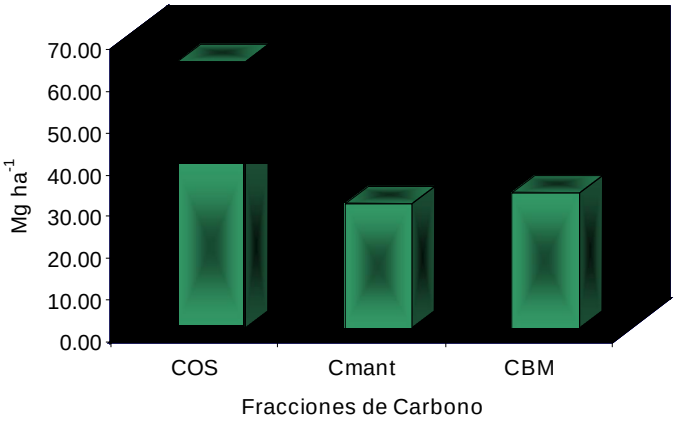


Figura 29. Fracciones de COS en el suelo del PN Zoquiapan y Anexas.

La cantidad de CBM se encontró de 26.47 a 34.58 Mg ha^{-1}, con un promedio de 32.55 Mg ha^{-1} (Cuadro 17). Se admite que entre un tercio y un medio de la materia orgánica del suelo procede de microorganismos (Primo, 1981).

En esta zona se encontró la mayor cantidad de CBM, debido a un menor metabolismo presentado por los microorganismos, basado en el cociente metabólico (qCO_2, C-CO_2/C-biomasa) de acuerdo con Sparling *et al.* (1992) y Blagodatskaya y Anderson (1998). La producción de CO_2 se mantuvo en un promedio de 100 kg ha^{-1} d^{-1} (Cuadro 17).

El contenido de AF se encontró entre 87.36 y 109.20 Mg ha^{-1} (los contenidos más altos en el presente estudio), mientras que los AH se encuentran entre 3.64 y 10.92 Mg ha^{-1} (Figura 30).

Los contenidos de AF, aunados a que se presenta una baja actividad microbiana sugieren que el proceso de humificación en esta zona se lleva a cabo lentamente generando un humus de tipo moor (de escasa actividad biológica y que muestra una mucho mayor proporción de AF con respecto a los AH (Velasco y Almendros, 1984) o moder ácido (Duchaufour, 1978).

Easy PDF Creator is professional software to create PDF. If you wish to remove this line, buy it now.

Los AF no solo se dan en suelos ácidos, sino en donde las condiciones para la vida microbiana son algo precarias. En altitudes superiores a los 1000 m, donde el clima es frío, se forman casi exclusivamente AF (Primavesi, 1984).

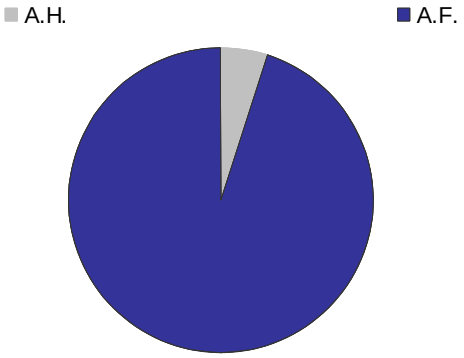


Figura 30. Contenido de Ácidos Húmicos y Fúlvicos en suelos del PN Zoquiapan y A.

El humus está formado por distintas fracciones húmicas que muestran diferencias significativas de un tipo de suelo a otro. El humus de suelos forestales es caracterizado por presentar altos contenidos de AF (Stevenson, 1982).

c) Reserva de la Biosfera El Cielo.

Los porcentajes de MOS se encontraron entre 1.22 hasta 41.43% que se clasifica como un nivel alto, mostrando que en algunos sitios de trabajo existen suelos orgánicos.

Los contenidos de MOS fueron los más altos encontrados en el presente estudio; debido a la constante incorporación de hojarasca aportada por la vegetación, estos suelos son delgados y están en procesos de formación por lo que en algunos lugares la MOS es una fracción dominante en su perfil (Cuadro 18).

De acuerdo con Foth y Turk (1981), existe un aumento en la MOS a medida que aumenta la precipitación, lo cual se acompaña con un incremento en la producción anual de MOS.

De acuerdo con Salas de las (1987), la producción total de sustancias orgánicas en el suelo de un bosque pluvial se encuentran en el orden de entre 7 y 12 Mg ha^{-1} de biomasa aérea y de 5 Mg ha^{-1} de material radical.

Easy PDF Creator is professional software to create PDF. If you wish to remove this line, buy it now.

En una hectárea de terreno en un clima cálido se calcula que se incorporan al suelo 3 Mg de materia vegetal seca por año (Primo, 1981), lo que indica que en esta zona el aporte de material orgánico al suelo es mayor al aportado en los PN Izta-Popo y Zoquiapan y A.

Cuadro 18. Componentes orgánicos y propiedades bioquímicas del suelo en La Reserva de la Biosfera El Cielo.

Localidad	MOS	COS	C mantillo	CBM	Ácidos Húmicos	Ácidos Fúlvicos	C Total	CO_2
	%	Mg ha^{-1}						kg $ha^{-1}d^{-1}$
Valle del Ovni	2.43	19.46	ND	ND	35.88	91.77	29.19	ND
Valle del Ovni	1.22	9.73	ND	ND	35.88	91.77	16.22	ND
S. de Julilo	8.10	64.80	52.38	0.08	44.85	72.45	172.52	49.05
NE. de la Gloria	41.43	331.59	27.16	ND	45.54	49.68	504.00	ND
S. de la Gloria	15.04	120.36	68.31	0.02	45.54	49.68	292.58	328.70
SW. de la Gloria	31.20	249.71	36.92	0.02	45.54	49.68	450.43	328.70
SW. De Julilo	11.58	92.73	11.31	0.01	37.26	48.30	156.62	401.65
W de la Gloria	33.76	270.18	19.10	ND	45.54	49.68	437.33	ND
S. de Julilo	10.42	83.42	49.37	0.02	45.54	49.68	190.28	328.70
NE. del Porvenir	15.77	126.25	40.09	0.04	29.67	36.57	250.12	231.43
NE del Porvenir	11.59	92.79	117.34	0.02	80.73	55.20	302.26	328.70
N. del Porvenir	10.82	86.61	34.93	0.06	37.26	57.27	182.98	109.85
NE del Porvenir	14.66	117.35	42.91	0.02	37.26	48.30	245.20	328.70
NW del Porvenir	15.71	125.76	14.16	ND	22.08	42.09	201.58	469.74
W. del Porvenir	26.39	211.22	15.97	ND	22.08	42.09	336.68	469.74
NW del Porvenir	14.53	116.27	17.11	0.06	127.65	55.20	200.16	107.41
NW del Porvenir	12.01	96.10	20.62	0.06	127.65	55.20	175.17	107.41

MOS - Materia Orgánica del Suelo, COS - Carbono orgánico del suelo, CBM - Carbono en Biomasa Microbiana, ND = no determinado.

En cuanto a las fracciones de C del suelo, la correspondiente al COS es la más abundante seguida de la presente en el mantillo y finalmente la del CBM (Figura 31).

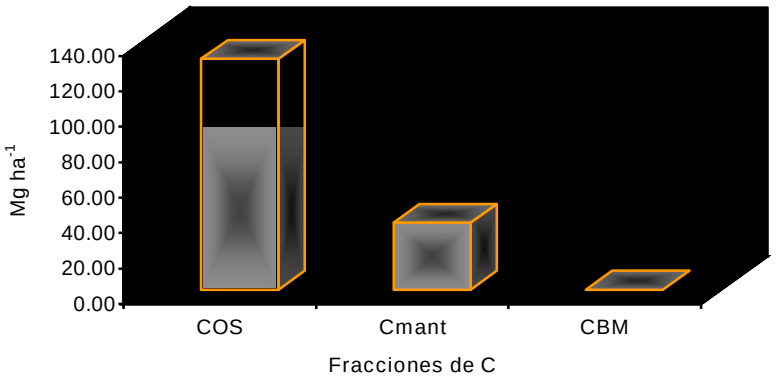


Figura 31. Fracciones de Carbono orgánico en suelos de la RB El Cielo.

Easy PDF Creator is professional software to create PDF. If you wish to remove this line, buy it now.

El contenido de C en la MOS es muy variable y depende, entre otras cosas, de la profundidad de la capa. En capas profundas, el contenido promedio es de 40%, mientras en las superficiales varia entre 45 y 58% y llegando en ocasiones a 60% (Primo 1981). En la RB El Cielo, se encuentran suelos de poca profundidad por lo que el contenido de COS es alto.

Las cantidades de CBM fueron mucho menores que las encontradas en los Parques Nacionales Izta-Popo y Zoquiapan, ya que van de 0.01 a 0.08 Mg ha^{-1} lo que se debe interpretar como una mayor actividad microbiana, ya que los valores de producción de CO_2 están entre 49.05 y 469.74 kg ha^{-1} $día^{-1}$ (Figura 32).

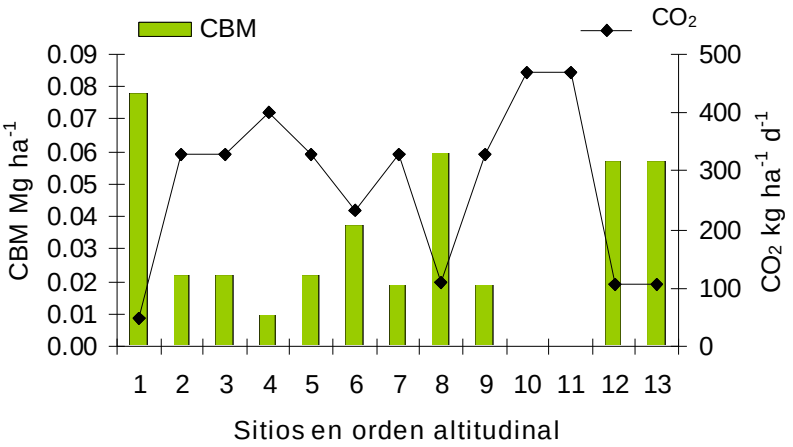


Figura 32. Contenido de CBM y CO_2 liberado en el suelo de la RB El Cielo.

La mayor producción de CO_2 se encontró en sitios a los cuales con base en el criterio del cociente metabólico, les corresponde la menor cantidad de CBM, lo que se puede atribuir a un mayor metabolismo por parte de los microorganismos que influyen en la oxidación de compuestos de carbono.

En la RB El Cielo, el suelo esta en procesos de formación y existe una incorporación de MO a una velocidad mayor, el clima es más cálido y existe una mayor precipitación pluvial anual en comparación con los PN Izta-Popo y Zoquiapan y Anexas.

En este caso en el que la relación C:N en promedio es mayor a 30 (Cuadro 15), se favorece el desarrollo de microorganismos, estos metabolizan la materia carbonada, desprendiendo CO_2 y se multiplican rápidamente (Primo, 1981). Como ya fue mencionado, cuando el aporte de MO tiene alta razón C:N, las bacterias, hongos y actinomicetos se reproducen activamente y desprende CO_2 en grandes cantidades (Buckman y Brady, 1991).

Easy PDF Creator is professional software to create PDF. If you wish to remove this line, buy it now.

En los suelos de la RB El Cielo, los AH tuvieron valores entre 22.08 y 127.65 Mg ha^{-1} (Cuadro 18) con un promedio de 50.93 Mg ha^{-1} (los más altos en este estudio) mientras que los AF se encontraron en un intervalo de 36.57 a 91.77 Mg ha^{-1}. Los contenidos de AH y AF para esta zona se presentaron de manera distinta a la de los PN Izta-Popo y Zoquiapan ya que en este cazo las proporciones de ambos ácidos estuvieron en valor similar, existiendo sin embargo, en mayor cantidad los AF (Figura 33).

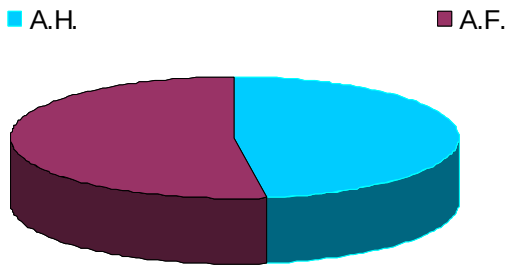


Figura 33. Contenido de Ácidos Húmicos y Fúlvicos en suelos de la RB El Cielo.

Estos valores indican que el humus dominante en esta zona fue el denominado moder. De acuerdo con Duchaufour (1978), este es un humus formado en un medio aireado, en el que se da una incorporación incompleta del material mineral y no existe la formación de un complejo húmico-arcilloso y se da una transformación biológica fuerte, por influencia de los organismos del suelo en particular artrópodos, hongos y bacterias.

Los altos contenidos de C y de N en esta zona, la mayor actividad microbiana, temperatura y precipitación pluvial, favorecen la descomposición de la materia orgánica, por lo que se estaría formando un humus de consumo, más que un humus de reserva (Primavesi, 1984).

El porcentaje promedio de MOS para los PN Izta-Popo y Zoquiapan fue de 6%, mientras que para la RB El Cielo fue de 16%, lo que se refleja en los altos contenidos de COS y C en mantillo en la RB El Cielo (Cuadro 19).

Con respecto a ANP, pendiente del terreno, exposición y gradiante altitudinal, se encontró que los contenidos de COS tuvieron alta significancia ($F=65.81$, $P<0.05$), mostrando diferencias significativas (*Apéndice D*).

Easy PDF Creator is professional software to create PDF. If you wish to remove this line, buy it now.

Cuadro 19. Propiedades orgánicas y bioquímicas del suelo por Área Natural Protegida.

ANP	MOS	COS	C mantillo	CBM	Ácidos Húmicos	Ácidos Fúlvicos	C total	CO_2
	%	Mg ha^{-1}						kg ha^{-1} d^{-1}
PN Izta-Popo	6.00	64.30	30.22	24.06	22.18	120.38	164.67	246.00
PN Zoquiapan	6.00	64.12	29.84	32.55	5.50	103.74	156.41	100.00
RB El Cielo	16.00	130.25	37.85	0.04	50.93	55.56	243.73	276.14

Los contenidos de C total son muy similares en los PN Izta-Popo y Zoquiapan y Anexas, pero para la RB El Cielo los contenidos fueron mayores (Fgura 34). El contenido de C total tuvo diferencias con respecto a cada ANP ($F=52.89$, $P<0.05$). Hyvönen *et al.,* (2002) predicen que el contenido de C del suelo en bosques de coníferas debe estar entre 50 y 90 Mg ha^{-1}, sin embargo en el presente trabajo se encontró que los contenidos de este elemento son mayores, desde 64.3 hasta 130.2 Mg ha^{-1} (Cuadro 19).

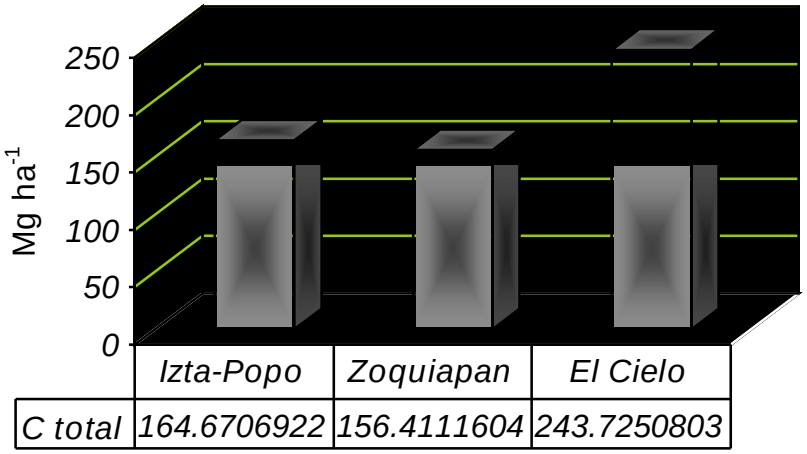


Figura 34. Contenido de C total en el suelo por cada Área Natural Protegida.

Las reservas de C en las fracciones crudas de la MOS, se destruyen fácilmente y la fracción más fina de ésta, es más resistente (Christensen, 1992, citado por Balesdent *et al.,* 1998). Esta debe ser la causa más probable de que los contenidos de COS sean mayores en la RB El Cielo, al tener mayor acumulación de MO, descomponiéndose rápidamente sus fracciones gruesas, liberando al C y otros nutrimentos.

En suelos forestales existen marcadas variaciones de la reserva de C con respecto a temperatura, productividad y tipo de vegetación. Se asume que la velocidad de

Easy PDF Creator is professional software to create PDF. If you wish to remove this line, buy it now.

descomposición se incrementa con la temperatura y consecuentemente el almacenamiento de C debe decrecer con respecto al clima caluroso (Hyvönen *et al.,* 2002).

La tasa de acumulación de C es grande en bosques de edad madura, como es el caso de los bosques de los PN Izta-Popo y Zoquiapan. En los lugares donde existe la presencia de áreas significativas de bosques los cuales no tienen la edad en la que la acumulación de C es balanceada por las emisiones de C de los procesos de respiración, el cual es crucial para el descenso de C como es el caso de la RB El Cielo.

Los contenidos de carbono presente en mantillo y el COS fueron mayores en la RBC (Figura 35). La producción de mantillo se incrementa al incrementarse la temperatura, pero no se han hecho estudios para los distintos tipos de bosques y vegetación y sus variaciones en producción (Hyvönen *et al.,* 2002). Muchos autores han intentado evaluar la cantidad de materia orgánica fresca que retorna anualmente al suelo por medio de la hojarasca: según Dommergues (1963), citado por Duchaufour (1978), representa de 2 a 4 Mg ha^{-1}en bosques templados, lo que corresponde a 2.3 Mg ha^{-1} de C en mantillo; en este estudio se encontraron valores más altos con un promedio de 33 Mg ha^{-1} de C en mantillo (Cuadro 19).

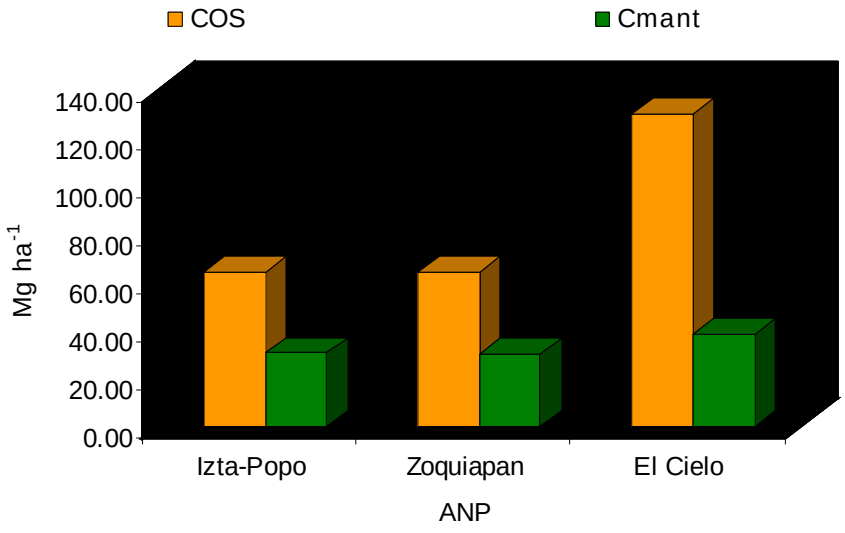


Figura 35. Cantidades de COS y C de mantillo en los suelos de las tres ANP.

La actividad microbiana, expresada como evolución de CO_2 fue mayor en los suelos de la RB El Cielo con valores de hasta 469 kg ha^{-1} d^{-1} en el Norte del Porvenir (Figura 36), probablemente debido a las condiciones climáticas y geográficas, así como el intervalo altitudinal en el que se trabajó en esta zona, siendo este mucho menor a los estudiados en los PN Izta-Popo y Zoquiapan.

Easy PDF Creator is professional software to create PDF. If you wish to remove this line, buy it now.

Ulrik y Singh en el 2005 reportaron valores de 0.25, 0.6 y 1.75 mg de CO_2 g^{-1} ha^{-1} que considerando una densidad de 1.07 g cm^{-3} y una profundidad de 0 a 10 cm, sería una producción de 11, 26 y 78 kg de CO_2 ha^{-1} $día^{-1}$.

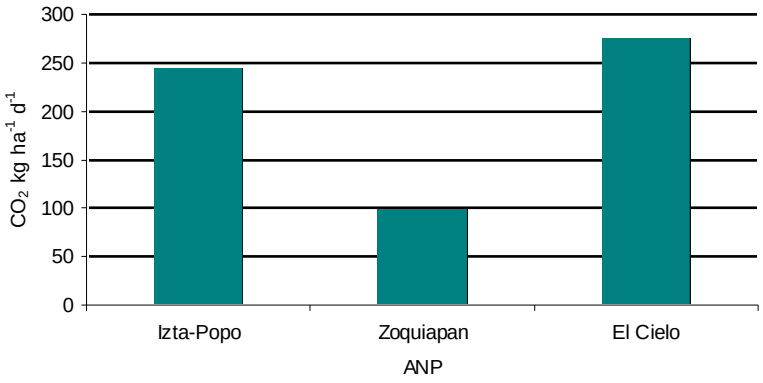


Figura 36. Evolución de CO_2 por parte de los microorganismos del suelo en cada ANP.

El cambio climático influye en los procesos microbianos, en la velocidad de descomposición de la MOS y en la dinámica del C en el suelo (Hyvönen *et al.,* 2002), por lo que se considera que en los suelos de la RB El Cielo, ocurre lo mismo que en el suelo fumigado de nuestros experimentos que consisten en que, las células microbianas destruidas actuarán como sustrato carbonado y durante su descomposición desprenderán una proporción de sus componentes de carbono en forma de CO_2 que, además, resulta razonablemente constante aunque existan menores reservas de CBM (Harris, 1992, citado por Granados, 2003). Sin embargo en el estudio realizado por Ladd *et al* (2004), se encontró que el suelo control (sin fumigar) excede en un 50% la producción de CO_2 que el del fumigado, lo que podría explicar el hecho de que en el suelo de el PN Zoquiapan y Anexas, se encuentre la menor producción de este compuesto ya que son sistemas que presentan una velocidad menor en su dinámica general en comparación a la de la RB El Cielo, ya que al parecer los procesos metabólicos en la RB El Cielo se están llevando a cabo en forma exponencial.

En la RB El Cielo, existe una mayor variedad de vegetación, el bosque de coníferas presenta asociaciones con árboles caducifolios; de acuerdo a Porta (1999), las hojas y madera de estos árboles presenta mayor cantidad de proteínas, celulosa, hemicelulosa y carbohidratos, así como una menor cantidad de lignina en comparación con las coníferas, lo que favorece la descomposición de este material, por lo que en los PN Izta-Popo y Zoquiapan y Anexas el metabolismo microbiano es menor.

Easy PDF Creator is professional software to create PDF. If you wish to remove this line, buy it now.

La mayor cantidad de CBM se encontró en los suelos del PN Zoquiapan y Anexas, seguido del PN Izta-Popo esto se debe a una menor actividad microbiana presente en estos suelos. Mientras que en los suelos de la RBC la actividad microbiana expresada en términos de producción de CO_2 es mayor, esto se confirma con la baja cantidad de CBM (Figura 37).

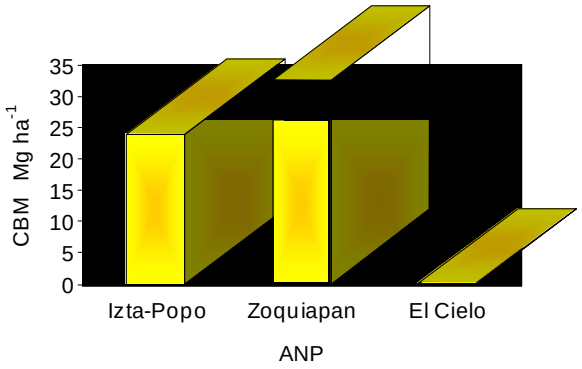


Figura 37. Contenido de CBM en el suelo de cada ANP.

Ladd *et al.,* (2004), explican que en los suelos más desarrollados y con mayor contenido de arcillas (mayor contenido de microagregados y por ende de microhabitats), la protección de BM es mayor, debido a esto es que en el suelo de los PN Izta-Popo y Zoquiapan que presentan un suelo más desarrollado, la cantidad de CBM es mayor que en los suelos de la RB el Cielo que son suelos jóvenes y someros, con un metabolismo microbiano acelerado.

De acuerdo con estudios realizados por Paul y Solaiman (2004), el material orgánico mejora significativamente el suelo, incrementa el N mineral y el CBM rápidamente.

En los procesos edafológicos una parte de la población microbiana muere, estas células muertas pueden descomponerse fácilmente por la mineralización hecha por otros microorganismos liberando o supliendo fácilmente la cantidad de nutrimentos que la planta necesita (Paul y Solaiman 2004).

Se encontró que los ácidos fúlvicos fueron predominantes en estos suelos forestales. En el PN Izta-Popo, los AH se encontraron en menor proporción con respecto a los AF, esta situación se presento de manera más marcada en el PN Zoquiapan, mientras que en la RB El Cielo las proporciones de estos ácidos fueron muy similares (Figura 38).

Probablemente los AF se encuentren en combinación con las huminas ya que de acuerdo con Schnitzer y Khan, (1978), Manahan (2000) y Stevenson (1994), citados por Santos dos

Easy PDF Creator is professional software to create PDF. If you wish to remove this line, buy it now.

(2003), las huminas son residuos orgánicos que no pueden ser extraídos mediante la técnica utilizada en este trabajo que consiste en utilizar una base fuerte y posteriormente acidificar la solución.

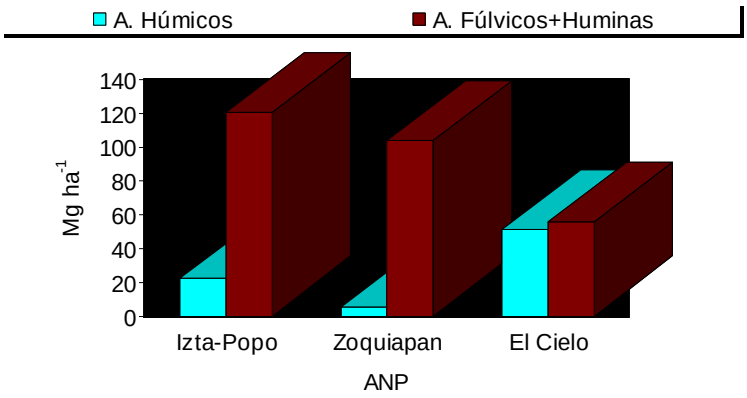


Figura 38. Contenido de A. Húmicos y Fúlvicos de la MOS en cada ANP.

En la Figura 38 se observa que en los suelos de la RB El Cielo, se encontraron las mayores cantidades de ácidos húmicos y menores de fúlvicos, lo que se puede atribuir a las condiciones ambientales predominantes en esta zona, en donde existe una mayor precipitación pluvial, el clima más cálido y existe una mayor actividad por parte de los microorganismos, que favorece la degradación de la MOS dando como resultado la formación de una mayor cantidad de AH (Duchaufour, 1978).

En promedio, en los suelos de la RB El Cielo se formaron las mayores cantidades de sustancias húmicas (AH+AF), ya que la cantidad global de compuestos húmicos que contiene el suelo caracteriza su grado de humificación (Duchaufour, 1978); por sus condiciones climáticas y altos contenidos de C y N ofrece condiciones extremadamente favorables a la actividad microbiana. Al presentar un clima más cálido se favorece la descomposición de la materia orgánica y el grado de humificación es mayor (Primavesi, 1984).

En los suelos de los PN Izta-Popo y Zoquiapan y Anexas, se encontró la mayor cantidad de AF+AH ya que de acuerdo con Primavesi (1984), en climas templados la mayor fracción de la MOS esta humificada, debido a la descomposición muy lenta en esas latitudes.

El porcentaje de humus se puede dividir en varias fracciones dependiendo de cada tipo de suelo. El humus de los suelos forestales esta caracterizado por presentar altos contenidos de ácidos fúlvicos, mientras que el humus presente en suelos de pradera tiene altos contenidos

Easy PDF Creator is professional software to create PDF. If you wish to remove this line, buy it now.

de ácidos húmicos (Stevenson, 1982). Por lo que los resultados obtenidos en el presente trabajo coinciden con lo reportado en la literatura; Primavesi (1984), Duchaufour (1978) y Salas de las (1987).

En un medio muy activo y bien aireado, la mineralización es rápida, la de la celulosa es más rápida que la de la lignina, una proporción de la cual se transforma en AH y sobre todo en humina no extraíble; al contrario en un medio poco activo y medianamente aireado, la mineralización es lenta, la lignina desaparece en primer lugar por la acción de los lignívoros; liberando monómeros, polifenoles solubles que se suman a los compuestos tánicos, estos compuestos forman con las proteínas complejos muy resistentes a la acción microbiana: son los complejos polifenolproteínas que a menudo impregnan las membranas celulósicas de los tejidos, retrasando su descomposición (Handley, 1954, citado por Duchaufour, 1978), por lo que se considera que en los suelos de los PN Izta-Popo y Zoquiapan y Anexas se forma un humus mas resistente a la degradación microbiana.

Con respecto a la vegetación arbórea dominante en cada zona de estudio, se encontró que en suelos bajo el género *Quercus* existe la mayor cantidad de MOS así como de COS, seguida del género *Abies* y de *Pinus* (Cuadro 20), de acuerdo con Porta (1999), las hojas y la madera de los árboles caducifolios presentan una mayor cantidad de proteínas, celulosa, hemicelulosa y carbohidratos, así como una menor cantidad de lignina, de ceras y resinas en comparación con las coníferas, lo que favorece la descomposición de este material, rico en C, incorporándolo al suelo.

Velasco y Almendros (1984), reportan que en un bosque de *Quercus* se desarrolla un humus moder, presentando un mayor grado de saturación de Ca^{2+} y Mg^{2+} y que la razón C:N esta en un promedio de 24:1 lo que demuestra el efecto inducido por la vegetación para la polimerización de las moléculas de AH. En la RB El Cielo es la zona donde se encontró el mayor desarrollo de AH, siendo en esta zona donde la vegetación fue más variada, presentando un mayor número de sitos con presencia de *Pinus* en combinación *Quercus* y otros árboles caducifolios.

En los PN Izta-Popo y Zoquiapan y Anexas, en el rango altitudinal estudiado, la vegetación arbórea estuvo representada en casi su totalidad por los géneros *Pinus* y *Abies* (coníferas). De acuerdo con Polo *et al*., (1978), cuando la vegetación permanente incluye en el estrato arbóreo coníferas, la humificación se desarrolla en condiciones menos favorables para la actividad biológica, lo que coincide con las cantidades de AF encontrados en estos PN,

Easy PDF Creator is professional software to create PDF. If you wish to remove this line, buy it now.

siendo los contenidos más altos con respecto a los de la RB El Cielo, lo que como ya se ha mencionado refleja una humificación y una actividad biológica media (Cuadro 20).

Cuadro 20. Contenido de C, ácidos orgánicos y producción de CO_2 en suelos bajo los géneros *Pinus, Abies y Quercus*.

ANP	Género	MOS	COS	C mantillo	CBM	C Total	Ácidos Húmicos	Ácidos Fúlvicos	CO_2
		%	Mg ha^{-1}						kg $ha^{-1}d^{-1}$
	Pinus	5.62	64.59	32.33	18.80	159.68	19.80	115.63	269.00
PN Izta-Popo	*Abies*	5.54	63.61	25.64	34.58	176.32	26.93	129.89	200.00
	Pinus	4.32	45.58	47.95	34.58	183.57	3.64	109.20	100.00
PN Zoquiapan	*Abies*	7.30	77.01	24.42	26.48	156.45	10.92	87.36	100.00
	Quercus	7.44	78.58	19.95	ND	147.01	ND	ND	ND
	Pinus	14.15	113.29	39.22	0.04	227.07	57.48	51.41	260.37
RB El Cielo	*Abies*	24.43	195.52	39.09	0.02	347.48	43.47	49.34	328.70
	Quercus	33.76	270.18	19.10	ND	437.33	45.54	49.68	ND

ND = no determinado.

Las especies vegetales cuyas hojas, se caracterizan por una relación C:N baja se llaman mejorantes y dan una hojarasca que se descompone activamente, mientras que las especies llamadas acidificantes, cuyas hojas son pobres en N (C:N elevado), tienen tendencia a formar un humus moder. De acuerdo con Wittich (1961), citado por Duchaufour (1978), el Pino silvestre presenta una razón C:N alta 65:1 en comparación con Robles y Olmos; además las hojas tienen distinto contenido de materiales hidrosolubles, mientras más abundantes sean estos contenidos, se favorece la vida microbiana y, por consiguiente la velocidad de mineralización; así la hojarasca de especies frondosas contienen mayor cantidad de estas sustancias que las de pino silvestre y da un humus más activo como es el caso de la vegetación de la RB El Cielo en comparación con la de los PN Izta-Popo y Zoquiapan y Anexas (Nykvist, 1959, citados por Duchaufour, 1978).

Easy PDF Creator is professional software to create PDF. If you wish to remove this line, buy it now.

10.5 ANÁLISIS DE COMPONENTES PRINCIPALES

Con los resultados del análisis estadístico multivariado (AEMV) y mediante la técnica de análisis de componentes principales (ACP) que consideró 23 variables originales, se encontró que 11 de ellas fueron variables robustas y de estas solo el porcentaje de Arena fue la única propiedad física considerada como componente principal. Granados (2003) también reportó que la cantidad de arena es una variable robusta en la definición de calidad del suelo forestal. La arena (y en consecuencia la textura), es una propiedad importante ya que en suelos forestales influye en su productividad de forma negativa. Pritchett (1991), menciona que la productividad de los suelos arenosos se incrementa a medida que la porción de las otras fracciones aumenta a un nivel óptimo.

Se encontró que el N total, pH, N de mantillo y la relación C:N son las propiedades químicas consideradas como componentes principales. García (2003) y Granados (2003), reportaron al pH y al N total como variables robustas en la determinación de índices de calidad edáfica.

La cantidad de ácidos fúlvicos, C total (suma de las fracciones de carbono orgánico), CO_2 y C de mantillo se consideraron como variables o componentes principales en la determinación de indicadores de calidad del suelo.

Todas las variables conforman el 100% de la varianza, con los componentes principales se explica el 85% de todas las posibles interacciones. Estas variables se consideran de mayor importancia debido al peso de su información (*Apéndice E)*.

Easy PDF Creator is professional software to create PDF. If you wish to remove this line, buy it now.

12. CONCLUSIONES

- Los suelos de bosques templados de *Pinus* y *Abies* principalmente presentan un alto potencial para la retención (captura o secuestro) de carbono, (188.26 Mg ha^{-1} en promedio para las tres ANP), destacando de los estudiados el bosque de *Pinus* y *Abies* de la RB El Cielo con 244 Mg ha^{-1} mientras que en los PN Izta-Popo y Zoquiapan y Anexas son muy similares (165 y 155 Mg ha^{-1} respectivamente).

- El carbono de la Biomasa Microbiana también contribuye a la captura del carbono, además de la reserva de carbono orgánico del suelo, pues fue casi equivalente al C de mantillo en suelos derivados de ceniza volcánica, pero no en aquellos derivados de materiales ricos en caliza.

- La mayor cantidad de CBM se encontró en los suelos del PN Zoquiapan y Anexas, seguido del PN Izta-Popo, que en base al cociente metabólico (qCO_2, C-CO_2/C-biomasa) se atribuye a un menor metabolismo microbiano influyendo en una menor oxidación de los productos de C en estas zonas, en comparación con la RB El Cielo.

- Las condiciones climáticas, vegetación y razón C:N encontradas en la RB El Cielo favorecen la actividad biológica (liberación de CO_2), lo que influye en el proceso de mineralización y humificación de la MOS.

- Los contenidos de carbono en mantillo fueron mayores en la RBC (38 Mg ha^{-1}).

- Los ácidos fúlvicos fueron predominantes en suelos forestales, de la RB El Cielo y de los PN Izta-Popo y Zoquiapan (56, 120 y 104 Mg ha^{-1} respectivamente).

- Los productos carbonatados (riqueza en Ca en el medio), así como la presencia de especies arbóreas latifoliadas como el *Quercus* en la RB El Cielo, contribuyen favorablemente a la actividad microbiana, descomposición de la MOS y formación global de compuestos húmicos.

- Los procesos de descomposición de MOS en los suelos del PN Izta-Popo generan un humus rico en polifenolproteínas, lo que aunado a una menor actividad microbiana, forma una mayor cantidad de AF y el desarrollo de un humus denominado moder.

- De 23 parámetros evaluados 11 fueron variables robustas y cinco están ligadas al COS y sus fracciones (C:N, contenido de AF, C total, producción de CO_2 y C de mantillo), lo cual muestra la importancia del COS en la definición de índices de calidad del suelo.

Easy PDF Creator is professional software to create PDF. If you wish to remove this line, buy it now.

Comentario: Estos datos pueden servir como un diagnóstico del estado del ecosistema y del verdadero potencial que podría alcanzar con un mejor manejo.

Recomendación: El potencial de captura de C puede aumentar con un mejor manejo en los recursos forestales.

Easy PDF Creator is professional software to create PDF. If you wish to remove this line, buy it now.

13. LITERATURA CITADA

Allan, J.E. 1971. The preparation of agricultural samples for analisis by atomic absorptionspectroscopy. Varian Techtron, Walnut Creek, California.

Ángeles C. E, 1998. Bases para la restauración del estrato arbóreo de los bosques mixtostemplados. Tesis de Maestría. Fac. de Ciencias, UNAM, México.

Balesdent, J., E. Besnard, D. Arrouays y C. Chenu. 1998. The dynamics of carbon in particle-size fractions of soil in a forest-cultivation sequence. Plant and Soil 201: 49-57.

Baver L. D., W. H. Gardner y W. R. Gardner. 1980. Física de Suelos. Union Tipográfica Editorial Hispano-Americana, S.A. de C. V. México D. F.

Bhatti, J. S. M. J. Apps y C. Tarnocai. 2002. Estimates of soil organic carbon stocks in central Canada using three different approaches. Can. J. For. Res. 32:805-812.

Blagodatskaya, E.V., Anderson, T.H., 1998. Interactive effects of pH and substrate quality on the fungal-to-bacterial ratio and qCO_2 of microbial communities in forest soils. Soil Biol. Biochem. 30: 1269–1274.

Bockheim, J. G. 1991. Suelos forestales. Young R. A. Noriega Editores. México.

Bray N. C. 1991. Naturaleza y propiedades de los suelos. Macmillan Publishing Company. New York.

Bray, R. H. y L. T. Kurtz. 1945. Determination of total, organic and available phosphorus in soil. Soil Sci. 59:39-45.

Bremer, J. M. 1965. Total nitrogen. pp. 1149-1178. In: C. A. Black (ed), Methods of análisis. Part 2. Agronomy 9. American Society of agronomy. Madison Wisconsin.

Buckman, H. O y Brady, N.C. 1991. Naturaleza y propiedades de los suelos. Editorial Limusa. México.

Bundt, M., M. Jaggi, P. Blaser, R. Siegwolf and F. Hagedorn, 2001. Carbon and Nitrogen dynamics in preferential flow paths and matricx of a forest soil. Soil Sci. Soc. Am. J.65:1529-1538.

Celli, L., M. Shnitzer, y M. Negre. 1997. Analysis of carboxyl groups in soil humic acids by a wet chemical mathod, Fourier-Transform Infrared spectrophotometry, and solution – state carbon – 13 nuclear magnetic resonance A comparative study. Soil Science. 162 (3): 189-197.

Cepeda, D.J.M. 1991. Química de suelos. Editorial Trillas. México.

Easy PDF Creator is professional software to create PDF. If you wish to remove this line, buy it now.

Challenger, A.1998. Utilización y Conservación de los Ecosistemas Terrestres de México. Pasado, presente y futuro. CONABIO, Instituto de Biología de la UNAM, Agrupación Sierra Madre.

Chapman, H. D. 1965. Cation exchange capacity. pp 891-901. In: C. A. Black (ed), Methods Of analisis. Part 2. Agronomy 9. American Society of Agronomy. Madison Wisconsin.

Clasen, H. A. C., R. T. Lessa, M. Kaemmerer e P. R. Koetz. 1998. Ácidos Húmicos e Fúlvicos do Carvao da Jazida de Candiota. Agrociencia 4(1): 35-40.

CONANP. Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas. 2006. http://iztapopo.conanp.gob.mx/clima.php.

Conant, R. T., G. R. Smith y K. Paustian. 2003. Spatial Variability of soil carbon in forested and cultivated sities. J. Environ. Qual. 32: 278-286.

Cruz, F. G, 2000. Fertilidad del suelo y nutrición vegetal: un enfoque ecológico. Biología FES Zaragoza UNAM.

Cruz F. G. 2006. Ecología del suelo. Un enfoque hacia la nutrición mineral de plantas superiores. FES Zaragoza, UNAM.

Domínguez, V. A., 1989. Tratado de fertilización. Ed. Mundi-Prensa, Madrid, España.

Domínguez, R. I. y N. Aguilera H. 1982. Metodología de análisis físicos y químicos de suelos. UNAM, Facultad de Ciencias-Biología 34 p.

Doran, J. W. y T. B. Parkin. 1994. Defining Soil Quality for a Sustainable Environment. Ed. SSSA y ASA. Madison, Wisconsin, USA.

Douglas, L. K., Craig, A. D. y Susan S. A. 2003. Soil Quality: why and how? USDA-ARS National Soil Tilth Laboratory. Geoderma. June vol. 114 no 3. pp. 145-156.

Duchaufour, P. 1978. Manual de Edafología. Editorial Toray-Masson, S. A. Barcelona. España.

Duchaufour, P. y B. Souchier. 1984. Edafología, 1. Edafogénesis y Clasificación. Masson, S.A. Barcelona España.

Etchevers, B. J., M. A. Bautista y M. A. Vergara. 2000. Calidad del suelo, indicadores de calidad y captura de carbono. In R. Quintero-Lizaola, T. Reyna-Trujillo, L. Corlay Chee, A. Ibáñez-Huerta y N. E. García-Calderón (Eds.) 2000. La Edafología y sus perspectivas al siglo XXI. Tomo II Colegio de Postgraduados, Universidad Nacional Autónoma de México, Universidad Autónoma de Chapingo. México.

Fassbender, H. W y E. Bornemisza. 1987. Química de suelos de América Latina. Ed. IICA San Jose, Costa Rica.

Easy PDF Creator is professional software to create PDF. If you wish to remove this line, buy it now.

Franzluebber, A. J. 2002. Soil organic matter stratification ratio as an indicator of soil cuality. Soil and Tillage Res. 66: 95-106.

Foth, H. D y L. M. Turk. 1981. Fundamentos de la Ciencia del Suelo. Ed. Continental. México.

García, H. M. 2003. Indicadores de calidad del suelo y estado nutrimental de *Abies religiosa (H.B.K.) Schlt. et Cham.,* en la exposición occidental de los volcanes Iztaccíhuatl y Popocatepetl. Tesis de licenciatura. FES Zaragoza UNAM.

García, T. A. 1984. Experimentos en microbiología del suelo. Laboratorio de Microbiología, División de Ciencias Biológicas y de la Salud, UAM Iztapalapa. CIA. Editorial continental, S.A. de C. V., México.

Gaucher, G. 1971. El suelo. Ed. Omega. España.

Gavande, S. A. 1979. Física de suelos, principios y aplicaciones. Editorial Limusa. México D. F.

Giardina P.C y M.G. Ryan. M. Hubbard and D. Binkley. 2001. Tree species and soil Textural controls. On carbon and nitrogen mineralization rates. Soil Soc. Am. J. 65: 1272-1279.

Gieese, L. A. B., W. m. Aust, R. K. Kolka y C. C. Trettin. 2003. Biomass and carbon pools of distributed riparian forest. Forest Ecology and Management. 180: 493-508.

Granados, D. M. 2003. Calidad del suelo y estado nutrimental del género *Pinus* en la vertiente occidental del Iztaccíhuatl y Popocatepetl. Tesis de licenciatura. FES Zaragoza UNAM.

Harris, P.J. 1992. Ecología de las poblaciones del suelo. Pp. 495-526. In. P. Urbano y C. Hernández (Eds). Condiciones del suelo y desarrollo de las plantas. Según Rusell. Mundi-Prensa, Madrid España.

Hayes, M. H. B. 1997. Emerging concepts of the composition and structures of humic substances Pp 3-30. In Hayes M. H. B. and W. S. Wilson (Eds). Humic substances in soils, peats and waters. Health and enviromental aspects. The Royal Society of Chemistry. Information services. Cambridge, UK.

Hart C. S., Stark M. J., A. E. Davidson y M. K. Firestone. 1994. Nitrogen mineralization, Inmovilization, and nitrification. In: Weavwe R. W., J. S. Angle and P. S. Bottomley, D. Besdizek, S. Smith, A. Tabatabai, A. Wollum (ed). pp. 997-1018. Methods of soil analysis. Part 2. Microbial and biochemical properties. Soil Sci of Am. USA.

Himes, F. L. 1998. Nitrogen, sulfur and phosphorus and the sequestering of carbon. pp. 313- 319 In: Rattan, L., Kimble, J.M., Follet, F. R. and Stewart A. Bobby. Soil processes and the carbon cycle. Advaces in Soil Sciences. CRC, Press LLC. USA.

Hyvönen, R., M. Berg y G. Agren. 2002. Modeling carbon dynamics in coniferous soils in a temperature gradient. Plant and soil 242: 33-39.

Easy PDF Creator is professional software to create PDF. If you wish to remove this line, buy it now.

Honorato, P. R., 2000. Manual de Edafología. Ed. Alfaomega. 4ª ed. México.

INEGI, 2000. Estados Unidos Mexicanos. XII Censo General de Población y Vivienda. INEGI.

INEGI, 2006. Instituto Nacional de Ecología. http://www.ine.gob.mx (5 de Noviembre de 2006).

INEGI, 1984. Mapa topográfico 1:50000. E14B31. Chalco.

INEGI, 1984. Mapa topográfico 1:50000. E14B32. San Martín Texmelucan (Mariano Arista).

INEGI, 1984. Mapa topográfico 1:50000. E14B41. Amecameca.

INEGI, 1984. Mapa topográfico 1:50000. E14B42. Huejotzingo.

INEGI, 1984. Mapa topográfico 1:50000. E14B51. Cuautla.

INEGI, 1984. Mapa topográfico 1:50000. E14B52. Atlixco.

INEGI, 1984. Mapa edafológico 1:50000. E14-2. Ciudad de México.

INEGI, 1984. Mapa topográfico 1:50000. F14A49. Gómez Farias.

INEGI, 1984. Mapa edafológico 1:50000. F14A49. Gómez Farias.

Jackson, M. L. 1964. Análisis químico de suelos. Ed Omega. Barcelona, España.

Jackson, M. L. 1982. Análisis químico de suelos. Traducción al español de J. Beltrán. Ed Omega. Barcelona, España.

Ladd, J. N, M. Amato y Veen H. A. van. 2004. Siol microbial biomass: its assy and role in turnover of organic matter C and N. Soil biology and Biochemistry 36 1369-1372 www.elsevier.com/locate/soilbio

Lal R., Kimble y R. F. Follet. 1998. Pedospheric and the carbon cycle. In: Lal R., J. M. Kimble, R. F. Follet and B. A. Stewart (eds) pp 1-8. Advances in Soil Science. CRC Press. LLC, USA.

Lindenmayer, D. B. 1999. Future directions for biodiversity conservation in managed forest: indicators species, impact studies and monitoring programs. For. Ecol. Manage. 115: 277-287.

López-Ritas J. y J. López-Mélida, 1990. El diagnóstico de suelos y plantas. Métodos de campo y Laboratorio. Ed. Mundi- Prensa. Madrid, España.

Easy PDF Creator is professional software to create PDF. If you wish to remove this line, buy it now.

Masera, O., Astier, S. López. 2000. sustentabilidad y manejo de recursos naturales. El marco de evaluación MESMI. Mundi Prensa. México.

Palmer, R. G. y Truch. 1989. Introducción a la Ciencia del Suelo. Manual de laboratorio AGT Eds. México.

Paul, G. C. and A. R. Solaiman. 2004. Changes of Microbial Biomass Carbon and Nitrogen in Upland Sugarcane Soil Amendmend with Different Organic Materials. Comunications in Soil Science and plant analysis. Vol. 35, Nos. 17 and 18, pp. 2433-2447.

Pérez, L. C. 1996. Econometría y análisis estadístico multivariable con STATGRAPHICS. Técnicas avanzadas. Ed. RA-MA Madrid, España.

Pierre, D. 2004. Microbial Ecology of the soil and plant. Science publishert, Inc. USA.

Polo, A., F. Velásco y E. Dorado. 1978. Contribución al estudio de las formaciones de mull en diversos ecosistemas forestales españoles. Boletín de la Estación Central de Ecología. 7 (13): 23-31.

Porta, C. J., R. M. A. López y L. C. Roguero. 1999. Edafología para la Agricultura y el Medio Ambiente. 2ª edición. Ed. Mundi – Prensa. Madrid.

Powlson, D. S., P. C. Brookes y B. T. Christensen, 1987. Measurement of soil microbial biomass provides an early indication of changes in total soil organic matter due to straw incorparation. Soil Biol. Biochem. Great Britain. 19 (2): 159-164.

Primavesi, A. 1984. Manejo ecológico del suelo. La agricultura en suelos tropicales. Editorial El ateneo. 5ª edición. Argentina.

Primo, Y. E. y J. M. Carrasco. 1981. Química agrícola. Editorial Alhambra Mexicana, S. A. España.

Pritchett, W. L. 1991. Suelos forestales. Propiedades, conservación y mejoramiento. Ed. Limusa. 2° ed. México.

Puig, H. y Bracho, R. 1987. El bosque mesófilo de montaña de Tamaulipas. Instituto de Ecología. México D.F.

Qualls, R. G., A. Takiyama y R. L. Wershaw. 2003. Formation and loss of humic substances during decomposition in a pine fores floor. Soil Sci. Soc. Am J. 67:899-909.

Rencher, A. 1995. Methods of multivariate analysis. Jhon Wiley and sons. USA.

Richards, L.A. 1990. Diagnóstico y rehabilitación de suelos salinos y sodicos. Departamento de Agricultura de los Estados Unidos de América, Limusa, México D.F.

Easy PDF Creator is professional software to create PDF. If you wish to remove this line, buy it now.

Russell, J y W. Russell. 1968. Las condiciones del suelo y el crecimiento de las plantas. Folle, Lege. Aguilar.

Rzedowski, J. 1978. Vegetación de México. Limusa, Noriega Editores. México D.F.

Salas, G. de las. 1987. Suelos y ecosistemas forestales con énfasis en América tropical. Instituto Interamericano de Cooperación para la agricultura San José Costa Rica.

Sánchez-Marañon, M., M. Soriano y R. Delgado. 2002. Soil quality in mediterranean mountain enviroments. Efects of land use change. Soil Sci. Am. J. 66:948-958.

Sánchez-Ramos, S., Reyes, C. P., y Dirzo, R. 2005. Historia Natural de la Reserva de la Biosfera El Cielo, Tamaulipas, México. Universidad Autónoma de Tamaulipas, Ciudad Victoria, Tamaulipas, México.

Santander, G. M. 2004. Caracterización de materia orgánica por espectroscopia de infrarrojo (FT-IR) y su relación con nitrógeno y fósforo en suelo post-incendio de un bosque de oyamel. FES Zaragoza UNAM. Tesis de licenciatura.

Santos, L. F. dos. 2003. Estado de las fracciones obtenidas en el proceso de extracción alcalina de sustancias húmicas de la turfa. Universidad Federal de Río Grande del Sur. Escuela de Ingeniería. Disertación para la obtención de maestría. Porto Alegre.

Secretaría de Desarrollo Social (SEDESOL) 2005. S.F. Plan de Manejo Integral para el Área Protegida de la Biósfera denominada "Reserva de la Biosfera El Cielo." Documento inédito de Gobierno del Estado.

SEMARNAT, 2000. Indicadores para la evaluación del desempeño ambiental. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. Reporte 2000. México, D. F.

Seybold, C.A., M.J. Mausbach, D.L. Karlen y H. H. Rogers, 1997. Quantification ofsoil qulity. pp. 387-404. In: Rattan, L., J.M. Kimble, R. F. Follett. B.A. Stewart. (ed). Soil processes and the carbon cycle. CRC. U.S.A.

Schoenholts. S. H., H. Miegroet van y J. A. Burger. 2000. A review of chemical and Physical propierties as indicators of forest soil quality: Challenges and opportunieties. For. Ecol. Manage. 138: 335-356.

Shan-Min, S., P.C. Brookes y D.S. Jenckinson. 1987. Soil respiration and the measurement of microbial biomass C by the fumigation technique in freh and in air-dried soil. Soil Biol. Biochem.

Six, J. P. Callewart, S. Lenders, S. De Gryze, S.J. Morris, E. G. Gregorich, E. A. Paul y K. Paustian. 2002. Measuring and understanding carbon storage in afforested soils by physical fractionation. Soil Sci. Soc. Am. J. 66: 1981-1987.

Easy PDF Creator is professional software to create PDF. If you wish to remove this line, buy it now.

Soil Improvement Committee California Fertilizer Associación (SICCFA), 1995. Manual de fertilizantes para horticultura. Ed. Limusa. México, D.F.

Sojka, R. E. y D. R. Upchurch, 1999. Reservations regarding the soil quality concept. Soil Sci. Soc. Am. J. 63: 1039-1054.

Sparling, G.P., Shepherd, T.G., Kettles, H.A., 1992. Changes in soil organic C, microbial C and aggregate stability under continuous maize and cereal cropping, and after restoration to pasture in soils from the Manawatu Region. New Zealand Soil Till. Res. 24: 225-241.

Stevenson, 1982. http://www.ar.wroc.pl/~weber/kwasy2.htm (11 de Diciembre de 2006)

Sumner, M. E. 2000. Handbook of soil Science. Ed. CRC Press. Madison Wisconsin, USA. 2148 p.

Swift, S. R. 2001. Sequestration of carbon by soil. Soil Science. 166 (11): 858-871.

Tabatabai, M. 1994. Soil enzymes. In: Weavwe R. W., J. S. Angle and P. S. Bottomley, D. Besdizek, S. Smith, A. Tabatabai, A. Wollum (ed). pp 775-834. Methods of soil analysis. Part 2. Microbial and biochemical properties.Soil Sci of Am. USA.

Tremblay, S. R. Quimet y D. Houle. 2002. Prediction of organic carbon content in upland forest soil of Quebec, Canada. Can. For. Res. 32: 903-914.

Ulrik I. y S. Singh, 2005. Nitrogen and phosphorus limitations of microbial respiration in a tropical phosphorus-fixing acrisol (Ultisol) compared with organic compost. Soil Biol. Biochem. 37: 1407–1410

USDA-NRCS, 1996. indicators for Soil Quality evaluation. Soil quality information Sheet. http://soil.usda.gov/files/sq_htr_2.pdf

USDA-NRCS, 1998. Guía para la evaluación de la calidad y salud del suelo. Departamento de agricultura , servicio de recursos naturales e instituto de calidad de suelos. Traducido al español por: Alberto Luters y Juan Carlos Salazar. Argentina: en http://soils.usda.gob.sqi/files/kitspanish.pdf

USDA. 1999. Soil Taxonomy. A Basic System of Soil Classification for Making and Interpreting Soil Surveys. United States Department of Agriculture Natural Resources Conservation Service Second Edition.

Valderrábano G. J. M. 2005. Calidad del Suelo y Estado Nutrimental de la Vegetación Forestal en el Parque Nacional Zoquiapan y Anexas. Tesis de licenciatura. FES Zaragoza. UNAM.

Valencia, I. C. y A. Hernández. 2002. Muestreo de suelos preparación de muestras y guía de campo. FES Cuautitlán, UNAM. México D.F.

Easy PDF Creator is professional software to create PDF. If you wish to remove this line, buy it now.

Velasco, F. y G. Almendros. 1984. Características del humus forestal en las tierras pardas subhúmedas sobre areniscas (Facies Buntsandstein) (Guadalajara). Boletin de la Estación Central de Ecología. 13 (26): 17-24. Madrid España.

Velásquez A., J. F. Mas, J. R. Díaz-Gallegos, R. Mayorga-Saucedo, P. C. Alcantara, R. Castro, T. Fernández, G. Bocco y J. L. Palacio. 2002. Patrones y tasa de cambio de uso del suelo en México. Gaceta ecológica No. 62. INE. http://www.ine.gob.mx/ueajei/publicaciones/gaceta/62/velazquez.html.5-09-2003.

Yan, Y. y T. Wang. 1996. Fourier transform Raman spectroscopic characterization of humic substances. Vibrational spectroscopy 14: 105-112.

Young, R. A. 1991. Introducción a las ciencias forestales. Ed. Noriega Editores. México.

Easy PDF Creator is professional software to create PDF. If you wish to remove this line, buy it now.

13. ANEXOS

Técnicas de análisis de suelo.

Anexo A. Determinación de Materia Orgánica, método de Walkley y Black (Jackson, 1964).

Reactivos

Dicromato de potasio 1.0 N
Sulfato ferroso 0.5 N
Indicador de difenilamina
Ácido sulfúrico concentrado
Ácido fosfórico concentrado
Fluoruro de sodio

Procedimiento

Se pesan 0.5 g de suelo (en este caso se pesaron 0.1 g de suelo por alto contenido de MOS) tamizado en una malla de 2 mm, se colocan en un matraz Erlenmeyer de 250 mL, se añaden 5 mL de dicromato de potasio 1N y se agita.

Se añaden 10 mL de ácido sulfúrico concentrado y se agita durante 1 minuto, se deja reposar por 30 minutos o hasta que se haya enfriado.

Se añaden 100 mL de agua destilada, se ajita y se deja enfriar.

Se agregan 5 mL de ácido fosfórico concentrado, 0.05 g de fluoruro de sodio y10 a 15 gotas de indicador de difenilamina.

Se titula con sulfato ferroso 0.5 N.

Para hacer la valoración de la solución de sulfato ferroso, se corre una prueba en blanco (todos los reactivos sin suelo) y se obtiene el valor de B de la siguiente ecuación. Con el empleo de la siguiente formula no es necesario calcular específicamente la normalidad.

Cálculos

$$\% \text{ M.O.} = 10\,(1 - M/B) \times 1.34$$

M = mL de sulfato ferroso gastados en la titulación
B = mL de sulfato ferroso gastados en el blanco
El factor 1.34 se deduce de la siguiente forma:

$$(1.0\text{ N}) \times 12/4000 \times 1.72/0.77 \times 100/0.5 = 1.34$$

$$(1.0\text{ N}) \times 12/4000 \times 1.72/0.77 \times 100/0.1 = 6.70 \text{ (en este caso)}$$

1.0 = normalidad del $K_2Cr_2O_7$
12/4000 = peso miliequivalentes del carbono
1.72 = factor de transformación de carbono en materia orgánica (MO)
0.77 = factor de recuperación de 77% determinado por Walkley
0.5 = peso de muestra (en este caso 0.1g)

Easy PDF Creator is professional software to create PDF. If you wish to remove this line, buy it now.

Anexo B. Evolución de CO_2 por el método de fumigación e incubación, para la determinación de CBM.

El método de fumigación e incubación se basa en que, cuando un suelo se esteriliza con cloroformo y después se reinocula con una pequeña dosis de suelo fresco, las células microbianas destruidas actuarán como sustrato carbonado y durante su descomposición despenderán, en forma de CO_2, una proporción de sus componentes carbonados que, además, resulta razonablemente constante. Midiendo el CO_2 desprendido por determinadas células microbianas añadidas al suelo, en condiciones normalizadas, utilizando un factor, se permite el cálculo de la biomasa a partir de las medidas del CO_2 desprendido (Harris, 1992, citado por Granados, 2003).

Procedimiento:

Hacer pasar el suelo fresco (con la humedad que presenta en campo) por una malla de 2 mm de abertura para eliminar restos orgánicos.

Separar la muestra en dos fracciones, 1 (suelo para fumigar) y 2 (suelo natural) pesando 20 g para cada fracción y colocarlas en frascos de vidrio con tapa hermética.

A la fracción 1, se le adicionan 7 mL de cloroformo y a la fracción 2, se le adicionan 7 mL de agua esterilizada, se cierran y se mantienen así por 48 horas. Terminada la fumigación, se abren los frascos y se colocan en baño maría a 40 °C, hasta que el cloroformo se elimine. Ambos suelos, (fumigado y natural) se reinoculan con 1 g de suelo natural.

A las dos fracciones se les agrega la cantidad necesaria de agua para llevarlas a capacidad de campo.
Nota: el suministro de agua se ara mL por mL.
Las muestras del mismo lugar deben llevar la misma cantidad de agua.

Se introduce en cada frasco un tubo de ensaye que contenga 7 mL de hidróxido de potasio (KOH) 0.5 N y una tira de papel filtro procurando que la longitud de ésta sea ligeramente mayor que la del tubo.

*Colocar para la corrección de la normalidad, un blanco absoluto (frasco que contenga un tubo con solo 7 mL de KOH 0.5 N). Hacer esto por duplicado.

Cerrar los frascos e incubar entre 35 y 37 °C, por el tiempo establecido previamente por el analista (10, 20, etc. días).

Al término de la incubación, sacar los frascos de la estufa. Sacar el tubo de ensaye y transferir su contenido en un matraz Erlenmeyer de 50 mL. Enjuagar el tubo con 1 mL d agua libre de CO_2.

Colocar 2 o 3 gotas de fenolftaleina como indicador y proceder a titular con HCl 0.5 N. incluir un blanco de titulación.

Easy PDF Creator is professional software to create PDF. If you wish to remove this line, buy it now.

Realizar los cálculos para determinar los mg de CO_2 producidos y de carbono en biomasa microbiana.

Cálculos:

Calcular los miliequivalentes de KOH en el blanco y en las muestras problema.
(Normalidad del ácido) (mL gastados en la titulación) = meq KOH

Obtener los miliequivalentes de KOH transformados en K_2CO_3
meq del blanco – meq muestra = meq K_2CO_3

Igualar unidades a equivalentes químicos.
meq K_2CO_3 / 1000 = eq K_2CO_3

A partir de esto, obtener gramos de K_2CO_3 formados.
(eq de K_2CO_3) (PM K_2CO_3/# H sustituibles) = g de K_2CO_3

Por estequiometría se obtienen los miligramos de CO_2.
[(g de K_2CO_3) (PM CO_2) / PM K_2CO_3] 1000 = mg CO_2

Por último obtener el peso del C en Biomasa Microbiana (CBM).
(mg CO_2 suelo fumigado – mg CO_2 suelo natural) / 0.45 = CBM mg

Easy PDF Creator is professional software to create PDF. If you wish to remove this line, buy it now.

Anexo C. Extracción de Ácidos Húmicos y Fúlvicos (Celli *et al*., 1997, citado por Santander, 2004).

Reactivos.

Solución de Pirofosfato de sodio ($Na_4O_7P_2$) 0.1 M.
Hidróxido de sodio (NaOH) 0.1 M.
Ácido Clorhídrico (HCl) 6 M.

Procedimiento

Secar la muestra de suelo en la estufa a una temperatura de 30 ºC, y tamizar con una luz de malla de 2 mm.

Pesar 10 g de muestra y transferir a un tubo con cierre hermético, adicionar 35 mL de la solución 1:1 de Hidróxido de Sodio y Pirofosfato de sodio 0.1 M, agitar por una hora y dejar a temperatura ambiente durante 24 horas bajo atmósfera de nitrógeno.

Centrifugar la muestra por 30 minutos a 3000 rpm, por 30 minutos, decantar el sobrenadante (ácidos húmicos y ácidos fúlvicos) y acidificarlo con la solución de ácido clorhídrico 6 M hasta pH 1. dejar reposar por 12 horas a temperatura ambiente.

Centrifugar por 30 minutos a 3000 rpm, el sobrenadante (ácidos fúlvicos), se coloca en cápsula de porcelana y se seca en la estufa a una temperatura de 30 a 35 ºC.

El precipitado corresponde a los ácidos húmicos, los cuales se disuelven nuevamente con 25 mL de solución de pirofosfato de sodio e hidróxido de sodio (1:1), agitar por 4 horas en atmósfera de nitrógeno.

Acidificar nuevamente con solución de ácido clorhídrico 6 M hasta pH 1, permitiendo la coagulación de los ácidos húmicos.

Centrifugar nuevamente por 30 minutos a 3000 rpm, eliminando el sobrenadante y lavando el precipitado con agua destilada (de 4 a 5 lavados) hasta que el contenido de cenizas sea menor al 4%.

Secar los ácidos húmicos en la estufa a una temperatura de 30 a 35 ºC.
Almacenar en recipientes de cierre hermético.

Caracterización por espectroscopia de IR.

Instrumento. Espectrofotómetro en Infrarrojo con transformadas de Fourier Perkin Elmer 1600. La posición de las señales se da en número de onda (cm^{-1}).

Preparación de la muestra para análisis IR. Pulverizar en un mortero de ágata 5 mg de la muestra con 100 mg de bromuro de potasio y triturar hasta obtener un polvo fino, colocar la mezcla en una matriz de acero inoxidable y comprimir en una prensa hidráulica. Para obtener una pastilla de KBr, la cual se analiza en el espectrofotómetro IR.

Easy PDF Creator is professional software to create PDF. If you wish to remove this line, buy it now.

14. APÉNDICE

- *Apéndice A*

Coeficiente de correlación de Pearson para las variables determinadas en el PN Izta-Popo.

Prob > |r| H0: Rho=0

Número de observaciones:

25 Variables: ANP, COS, CE, Pend, Cmant, Arci, Exp, CBM, Lim, Gen, CO_2, Are, Esp, C:P, Nmant, Alti, P, Pman, Nit, D.A., Pt, pH(KCL), D.R., C:N, E.P.

	ANP	Pend	Exp	Gen	Esp	Alti	Nit	pHkcl	CN
ANP	.	.	.	.	.	.	.	.	.
	.	.	.	.	.	.	.	.	.
	176	158	158	176	176	176	117	113	117
Pend	.	1.00000	-0.20714	0.03753	-0.02515	0.01484	0.41260	0.00691	-0.46930
	.		0.0097	0.6397	0.7538	0.8532	<.0001	0.9453	<.0001
	158	158	155	158	158	158	105	101	105
Exp	.	-0.20714	1.00000	0.32795	0.25349	-0.64562	-0.44164	0.67953	0.46502
	.	0.0097		<.0001	0.0013	<.0001	<.0001	<.0001	<.0001
	158	155	158	158	158	158	105	101	105
Gen	.	0.03753	0.32795	1.00000	0.84989	-0.18419	-0.16805	0.36356	0.16295
	.	0.6397	<.0001		<.0001	0.0144	0.0701	<.0001	0.0792
	176	158	158	176	176	176	117	113	117
Esp	.	-0.02515	0.25349	0.84989	1.00000	-0.04749	-0.24890	0.34820	0.29862
	.	0.7538	0.0013	<.0001		0.5314	0.0068	0.0002	0.0011
	176	158	158	176	176	176	117	113	117
Alti	.	0.01484	-0.64562	-0.18419	-0.04749	1.00000	0.32970	-0.30080	0.01736
	.	0.8532	<.0001	0.0144	0.5314		0.0003	0.0012	0.8526
	176	158	158	176	176	176	117	113	117
Nit	.	0.41260	-0.44164	-0.16805	-0.24890	0.32970	1.00000	-0.03684	-0.48213
	.	<.0001	<.0001	0.0701	0.0068	0.0003		0.6985	<.0001
	117	105	105	117	117	117	117	113	117
pHkcl	.	0.00691	0.67953	0.36356	0.34820	-0.30080	-0.03684	1.00000	0.22840
	.	0.9453	<.0001	<.0001	0.0002	0.0012	0.6985		0.0150
	113	101	101	113	113	113	113	113	113
CN	.	-0.46930	0.46502	0.16295	0.29862	0.01736	-0.48213	0.22840	1.00000
	.	<.0001	<.0001	0.0792	0.0011	0.8526	<.0001	0.0150	
	117	105	105	117	117	117	117	113	117
COS	.	0.18626	-0.12577	0.06041	0.12154	0.39934	0.44453	0.02304	0.38840
	.	0.0571	0.2011	0.5177	0.1918	<.0001	<.0001	0.8086	<.0001
	117	105	105	117	117	117	117	113	117
Cmant	.	-0.02889	0.24167	-0.04991	-0.20745	-0.18433	-0.04037	0.12313	-0.02557
	.	0.8389	0.0843	0.7227	0.1361	0.1864	0.7741	0.3894	0.8558
	53	52	52	53	53	53	53	51	53

Easy PDF Creator is professional software to create PDF. If you wish to remove this line, buy it now.

	COS	Cmant	CBM	CO_2	CP	P	DA	DR	EP
ANP	.	.	.	.	.	.	.	.	.
	.	.	.	.	.	.	.	.	.
	117	53	93	87	118	175	123	123	124
Pend	0.18626	-0.02889	-0.01320	0.00729	0.20767	-0.22743	-0.05973	0.01824	0.24091
	0.0571	0.8389	0.9057	0.9498	0.0327	0.0042	0.5335	0.8493	0.0105
	105	52	83	77	106	157	111	111	112
Exp	-0.12577	0.24167	0.26750	-0.47687	-0.54394	0.41976	-0.28670	-0.12855	-0.18867
	0.2011	0.0843	0.0145	<.0001	<.0001	<.0001	0.0023	0.1787	0.0463
	105	52	83	77	106	157	111	111	112
Gen	0.06041	-0.04991	0.24728	-0.06324	-0.20507	0.04857	-0.17480	-0.10821	-0.00343
	0.5177	0.7227	0.0169	0.5606	0.0259	0.5233	0.0532	0.2335	0.9698
	117	53	93	87	118	175	123	123	124
Esp	0.12154	-0.20745	0.23354	0.05731	-0.16735	-0.01424	-0.13713	-0.08211	0.02541
	0.1918	0.1361	0.0243	0.5980	0.0701	0.8516	0.1304	0.3666	0.7794
	117	53	93	87	118	175	123	123	124
Alti	0.39934	-0.18433	-0.36249	0.61280	0.43549	-0.15971	-0.16981	0.15000	0.25304
	<.0001	0.1864	0.0004	<.0001	<.0001	0.0348	0.0604	0.0977	0.0046
	117	53	93	87	118	175	123	123	124
Nit	0.44453	-0.04037	-0.21495	0.18121	0.63579	-0.29418	0.14503	-0.27380	0.05305
	<.0001	0.7741	0.0385	0.0930	<.0001	0.0013	0.1187	0.0028	0.5700
	117	53	93	87	117	117	117	117	117
pHkcl	0.02304	0.12313	0.08960	-0.06088	-0.06240	0.06279	0.23276	-0.47809	-0.54833
	0.8086	0.3894	0.4037	0.5799	0.5115	0.5088	0.0131	<.0001	<.0001
	113	51	89	85	113	113	113	113	113
CN	0.38840	-0.02557	-0.04463	0.00935	-0.21821	0.33255	-0.25834	0.07257	0.00254
	<.0001	0.8558	0.6710	0.9315	0.0181	0.0002	0.0049	0.4368	0.9784
	117	53	93	87	117	117	117	117	117
COS	1.00000	-0.12192	-0.27713	0.38088	0.42713	0.08445	-0.26318	0.08389	0.34305
		0.3845	0.0072	0.0003	<.0001	0.3653	0.0041	0.3685	0.0002
	117	53	93	87	117	117	117	117	117
Cmant	-0.12192	1.00000	-0.03384	-0.30739	-0.39137	0.60937	-0.14760	0.21161	0.02974
	0.3845		0.8254	0.0925	0.0038	<.0001	0.2916	0.1282	0.8326
	53	53	45	31	53	53	53	53	53

	CE	Arci	Lim	Are	Nmant	Pman	Pt
ANP	.	.	.	.	.	.	.
	.	.	.	.	.	.	.
	143	58	58	58	108	160	102
Pend	0.10465	-0.06405	0.08493	-0.03353	0.14902	-0.05006	0.31323
	0.2454	0.6519	0.5494	0.8135	0.1274	0.5335	0.0024
	125	52	52	52	106	157	92
Exp	0.28581	0.58459	0.04117	-0.28435	-0.20179	0.42335	-0.23746
	0.0012	<.0001	0.7720	0.0410	0.0381	<.0001	0.0227
	125	52	52	52	106	157	92
Gen	-0.15135	0.23489	0.00076	-0.10113	-0.01566	0.08448	-0.17451
	0.0712	0.0759	0.9955	0.4500	0.8722	0.2882	0.0794
	143	58	58	58	108	160	102
Esp	-0.36263	0.14613	0.09186	-0.12942	-0.06500	0.00891	-0.19579
	<.0001	0.2737	0.4928	0.3329	0.5039	0.9110	0.0486
	143	58	58	58	108	160	102
Alti	-0.37521	-0.24385	0.37051	-0.16519	0.15502	-0.39457	0.11233
	<.0001	0.0651	0.0042	0.2153	0.1092	<.0001	0.2610
	143	58	58	58	108	160	102
Nit	-0.10261	-0.11659	-0.17815	0.17956	0.13752	-0.22242	0.07408
	0.2710	0.3834	0.1809	0.1774	0.1578	0.0213	0.4616
	117	58	58	58	107	107	101

Easy PDF Creator is professional software to create PDF. If you wish to remove this line, buy it now.

pHkcl	-0.20169	0.10607	-0.16564	0.07508	-0.30283	0.20411	-0.37587
	0.0322	0.4366	0.2225	0.5824	0.0019	0.0386	0.0001
	113	56	56	56	103	103	97
CN	-0.14839	0.15837	0.39552	-0.35562	-0.01835	0.15964	-0.15329
	0.1103	0.2351	0.0021	0.0062	0.8512	0.1005	0.1259
	117	58	58	58	107	107	101
COS	-0.37216	0.31665	0.48295	-0.48702	0.14704	-0.01095	-0.02981
	<.0001	0.0154	0.0001	0.0001	0.1307	0.9109	0.7673
	117	58	58	58	107	107	101
Cmant	0.68312	0.52732	0.20824	-0.37969	0.22427	0.63439	0.14511
	<.0001	<.0001	0.1346	0.0050	0.1064	<.0001	0.3416
	53	53	53	53	53	53	45

	ANP	Pend	Exp	Gen	Esp	Alti	Nit	pHkcl	CN
CBM	.	-0.01320	0.26750	0.24728	0.23354	-0.36249	-0.21495	0.08960	-0.04463
	.	0.9057	0.0145	0.0169	0.0243	0.0004	0.0385	0.4037	0.6710
	93	83	83	93	93	93	93	89	93
CO_2	.	0.00729	-0.47687	-0.06324	0.05731	0.61280	0.18121	-0.06088	0.00935
	.	0.9498	<.0001	0.5606	0.5980	<.0001	0.0930	0.5799	0.9315
	87	77	77	87	87	87	87	85	87
CP	.	0.20767	-0.54394	-0.20507	-0.16735	0.43549	0.63579	-0.06240	-0.21821
	.	0.0327	<.0001	0.0259	0.0701	<.0001	<.0001	0.5115	0.0181
	118	106	106	118	118	118	117	113	117
P	.	-0.22743	0.41976	0.04857	-0.01424	-0.15971	-0.29418	0.06279	0.33255
	.	0.0042	<.0001	0.5233	0.8516	0.0348	0.0013	0.5088	0.0002
	175	157	157	175	175	175	117	113	117
DA	.	-0.05973	-0.28670	-0.17480	-0.13713	-0.16981	0.14503	0.23276	-0.25834
	.	0.5335	0.0023	0.0532	0.1304	0.0604	0.1187	0.0131	0.0049
	123	111	111	123	123	123	117	113	117
DR	.	0.01824	-0.12855	-0.10821	-0.08211	0.15000	-0.27380	-0.47809	0.07257
	.	0.8493	0.1787	0.2335	0.3666	0.0977	0.0028	<.0001	0.4368
	123	111	111	123	123	123	117	113	117
EP	.	0.24091	-0.18867	-0.00343	0.02541	0.25304	0.05305	-0.54833	0.00254
	.	0.0105	0.0463	0.9698	0.7794	0.0046	0.5700	<.0001	0.9784
	124	112	112	124	124	124	117	113	117
CE	.	0.10465	0.28581	-0.15135	-0.36263	-0.37521	-0.10261	-0.20169	-0.14839
	.	0.2454	0.0012	0.0712	<.0001	<.0001	0.2710	0.0322	0.1103
	143	125	125	143	143	143	117	113	117
Arci	.	-0.06405	0.58459	0.23489	0.14613	-0.24385	-0.11659	0.10607	0.15837
	.	0.6519	<.0001	0.0759	0.2737	0.0651	0.3834	0.4366	0.2351
	58	52	52	58	58	58	58	56	58
Lim	.	0.08493	0.04117	0.00076	0.09186	0.37051	-0.17815	-0.16564	0.39552
	.	0.5494	0.7720	0.9955	0.4928	0.0042	0.1809	0.2225	0.0021
	58	52	52	58	58	58	58	56	58
Are	.	-0.03353	-0.28435	-0.10113	-0.12942	-0.16519	0.17956	0.07508	-0.35562
	.	0.8135	0.0410	0.4500	0.3329	0.2153	0.1774	0.5824	0.0062
	58	52	52	58	58	58	58	56	58

Easy PDF Creator is professional software to create PDF. If you wish to remove this line, buy it now.

	COS	Cmant	CBM	CO_2	CP	P	DA	DR	EP
CBM	-0.27713	-0.03384	1.00000	-0.78322	-0.47968	0.29810	0.18975	-0.45746	-0.37741
	0.0072	0.8254		<.0001	<.0001	0.0037	0.0685	<.0001	0.0002
	93	45	93	79	93	93	93	93	93
CO_2	0.38088	-0.30739	-0.78322	1.00000	0.57547	-0.42362	-0.14354	0.38051	0.46902
	0.0003	0.0925	<.0001		<.0001	<.0001	0.1847	0.0003	<.0001
	87	31	79	87	87	87	87	87	87
CP	0.42713	-0.39137	-0.47968	0.57547	1.00000	-0.51501	0.25944	-0.13994	0.08448
	<.0001	0.0038	<.0001	<.0001		<.0001	0.0047	0.1324	0.3631
	117	53	93	87	118	117	117	117	118
P	0.08445	0.60937	0.29810	-0.42362	-0.51501	1.00000	-0.28202	0.33534	0.25908
	0.3653	<.0001	0.0037	<.0001	<.0001		0.0016	0.0001	0.0038
	117	53	93	87	117	175	123	123	123
DA	-0.26318	-0.14760	0.18975	-0.14354	0.25944	-0.28202	1.00000	-0.28130	-0.41987
	0.0041	0.2916	0.0685	0.1847	0.0047	0.0016		0.0016	<.0001
	117	53	93	87	117	123	123	123	123
DR	0.08389	0.21161	-0.45746	0.38051	-0.13994	0.33534	-0.28130	1.00000	0.72492
	0.3685	0.1282	<.0001	0.0003	0.1324	0.0001	0.0016		<.0001
	117	53	93	87	117	123	123	123	123
EP	0.34305	0.02974	-0.37741	0.46902	0.08448	0.25908	-0.41987	0.72492	1.00000
	0.0002	0.8326	0.0002	<.0001	0.3631	0.0038	<.0001	<.0001	
	117	53	93	87	118	123	123	123	124
CE	-0.37216	0.68312	0.23362	-0.61984	-0.33358	-0.01219	-0.09315	-0.00498	-0.18570
	<.0001	<.0001	0.0242	<.0001	0.0002	0.8851	0.3055	0.9564	0.0397
	117	53	93	87	117	143	123	123	123
Arci	0.31665	0.52732	0.44331	-0.34164	-0.47263	0.76109	-0.50379	0.43251	0.33148
	0.0154	<.0001	0.0013	0.0414	0.0002	<.0001	<.0001	0.0007	0.0110
	58	53	50	36	58	58	58	58	58
Lim	0.48295	0.20824	-0.22835	0.41942	-0.04694	0.40462	-0.51307	0.57038	0.58036
	0.0001	0.1346	0.1107	0.0109	0.7264	0.0016	<.0001	<.0001	<.0001
	58	53	50	36	58	58	58	58	58
Are	-0.48702	-0.37969	0.06532	-0.31937	0.23654	-0.62033	0.58907	-0.60025	-0.56425
	0.0001	0.0050	0.6522	0.0576	0.0738	<.0001	<.0001	<.0001	<.0001
	58	53	50	36	58	58	58	58	58

	CE	Arci	Lim	Are	Nmant	Pman	Pt
CBM	0.23362	0.44331	-0.22835	0.06532	-0.11429	-0.02675	0.31356
	0.0242	0.0013	0.1107	0.6522	0.3036	0.8103	0.0022
	93	50	50	50	83	83	93
CO_2	-0.61984	-0.34164	0.41942	-0.31937	-0.06528	-0.32922	-0.36545
	<.0001	0.0414	0.0109	0.0576	0.5727	0.0035	0.0005
	87	36	36	36	77	77	87
CP	-0.33358	-0.47263	-0.04694	0.23654	0.26307	-0.19665	-0.26899
	0.0002	0.0002	0.7264	0.0738	0.0059	0.0423	0.0063
	117	58	58	58	108	107	102
P	-0.01219	0.76109	0.40462	-0.62033	-0.13367	0.41422	0.11164
	0.8851	<.0001	0.0016	<.0001	0.1699	<.0001	0.2663
	143	58	58	58	107	160	101
DA	-0.09315	-0.50379	-0.51307	0.58907	-0.13848	-0.00564	-0.02848
	0.3055	<.0001	<.0001	<.0001	0.1549	0.9528	0.7774
	123	58	58	58	107	113	101
DR	-0.00498	0.43251	0.57038	-0.60025	0.06667	0.12128	0.15836
	0.9564	0.0007	<.0001	<.0001	0.4950	0.2007	0.1137
	123	58	58	58	107	113	101
EP	-0.18570	0.33148	0.58036	-0.56425	0.13704	-0.02047	0.10613
	0.0397	0.0110	<.0001	<.0001	0.1573	0.8296	0.2884
	123	58	58	58	108	113	102

Easy PDF Creator is professional software to create PDF. If you wish to remove this line, buy it now.

CE	1.00000	0.18297	0.02641	-0.09757	0.31168	0.26751	0.17918
		0.1692	0.8440	0.4662	0.0011	0.0023	0.0730
	143	58	58	58	107	128	101
Arci	0.18297	1.00000	0.46078	-0.76350	-0.29166	0.54301	0.32163
	0.1692		0.0003	<.0001	0.0341	<.0001	0.0227
	58	58	58	58	53	53	50
Lim	0.02641	0.46078	1.00000	-0.92497	-0.14373	0.09879	-0.25816
	0.8440	0.0003		<.0001	0.3045	0.4816	0.0703
	58	58	58	58	53	53	50
Are	-0.09757	-0.76350	-0.92497	1.00000	0.23070	-0.30719	0.14488
	0.4662	<.0001	<.0001		0.0965	0.0253	0.3155
	58	58	58	58	53	53	50

	ANP	Pend	Exp	Gen	Esp	Alti	Nit	pHkcl	CN
Nmant	.	0.14902	-0.20179	-0.01566	-0.06500	0.15502	0.13752	-0.30283	-0.01835
	.	0.1274	0.0381	0.8722	0.5039	0.1092	0.1578	0.0019	0.8512
	108	106	106	108	108	108	107	103	107
Pman	.	-0.05006	0.42335	0.08448	0.00891	-0.39457	-0.22242	0.20411	0.15964
	.	0.5335	<.0001	0.2882	0.9110	<.0001	0.0213	0.0386	0.1005
	160	157	157	160	160	160	107	103	107
Pt	.	0.31323	-0.23746	-0.17451	-0.19579	0.11233	0.07408	-0.37587	-0.15329
	.	0.0024	0.0227	0.0794	0.0486	0.2610	0.4616	0.0001	0.1259
	102	92	92	102	102	102	101	97	101

	COS	Cmant	CBM	CO_2	CP	P	DA	DR	EP
Nmant	0.14704	0.22427	-0.11429	-0.06528	0.26307	-0.13367	-0.13848	0.06667	0.13704
	0.1307	0.1064	0.3036	0.5727	0.0059	0.1699	0.1549	0.4950	0.1573
	107	53	83	77	108	107	107	107	108
Pman	-0.01095	0.63439	-0.02675	-0.32922	-0.19665	0.41422	-0.00564	0.12128	-0.02047
	0.9109	<.0001	0.8103	0.0035	0.0423	<.0001	0.9528	0.2007	0.8296
	107	53	83	77	107	160	113	113	113
Pt	-0.02981	0.14511	0.31356	-0.36545	-0.26899	0.11164	-0.02848	0.15836	0.10613
	0.7673	0.3416	0.0022	0.0005	0.0063	0.2663	0.7774	0.1137	0.2884
	101	45	93	87	102	101	101	101	102

	CE	Arci	Lim	Are	Nmant	Pman	Pt
Nmant	0.31168	-0.29166	-0.14373	0.23070	1.00000	-0.03876	0.12877
	0.0011	0.0341	0.3045	0.0965		0.6918	0.2212
	107	53	53	53	108	107	92
Pman	0.26751	0.54301	0.09879	-0.30719	-0.03876	1.00000	-0.20193
	0.0023	<.0001	0.4816	0.0253	0.6918		0.0549
	128	53	53	53	107	160	91

	CE	Arci	Lim	Are	Nmant	Pman	Pt
Pt	0.17918	0.32163	-0.25816	0.14488	0.12877	-0.20193	1.00000
	0.0730	0.0227	0.0703	0.3155	0.2212	0.0549	
	101	50	50	50	92	91	102

Easy PDF Creator is professional software to create PDF. If you wish to remove this line, buy it now.

- *Apéndice B*

Coeficiente de correlación de Pearson para las variables determinadas en el PN Zoquiapan y Anexas.
Prob > |r| H0: Rho=0

Número de observaciones:

24 Variables: Pend Exp Gen Esp Alti Nit pH(KCl) C:N COS
Cmant CBM CO_2 C.P. P D.A. D.R. E.P. C.E.
Arci Lim Are Nmant Pman Pt

	Pend	Exp	Gen	Esp	Alti	Nit	pHkcl	CN
Pend	1.00000	-0.30231	-0.01320	-0.00327	-0.14809	-0.64506	-0.23252	-0.08376
		0.0436	0.9267	0.9818	0.2997	<.0001	0.1857	0.6377
	51	45	51	51	51	34	34	34
Exp	-0.30231	1.00000	0.08101	-0.09372	0.31045	0.52305	0.27351	-0.08242
	0.0436		0.5720	0.5130	0.0266	0.0015	0.1175	0.6431
	45	51	51	51	51	34	34	34
Gen	-0.01320	0.08101	1.00000	0.96309	-0.02812	0.32272	0.14874	-0.22680
	0.9267	0.5720		<.0001	0.8311	0.0423	0.3597	0.1593
	51	51	60	60	60	40	40	40
Esp	-0.00327	-0.09372	0.96309	1.00000	-0.11310	0.24664	0.06061	-0.21435
	0.9818	0.5130	<.0001		0.3896	0.1250	0.7103	0.1841
	51	51	60	60	60	40	40	40
Alti	-0.14809	0.31045	-0.02812	-0.11310	1.00000	0.32865	-0.19574	-0.15311
	0.2997	0.0266	0.8311	0.3896		0.0384	0.2261	0.3456
	51	51	60	60	60	40	40	40
Nit	-0.64506	0.52305	0.32272	0.24664	0.32865	1.00000	0.43999	-0.72352
	<.0001	0.0015	0.0423	0.1250	0.0384		0.0045	<.0001
	34	34	40	40	40	40	40	40
pHkcl	-0.23252	0.27351	0.14874	0.06061	-0.19574	0.43999	1.00000	-0.38635
	0.1857	0.1175	0.3597	0.7103	0.2261	0.0045		0.0138
	34	34	40	40	40	40	40	40
CN	-0.08376	-0.08242	-0.22680	-0.21435	-0.15311	-0.72352	-0.38635	1.00000
	0.6377	0.6431	0.1593	0.1841	0.3456	<.0001	0.0138	
	34	34	40	40	40	40	40	40
COS	-0.65060	0.42779	0.17785	0.13924	0.50214	0.44136	-0.00868	0.01942
	<.0001	0.0116	0.2722	0.3915	0.0010	0.0044	0.9576	0.9053
	34	34	40	40	40	40	40	40
Cmant	0.60992	-0.19407	-0.49888	-0.44754	-0.38705	-0.84807	-0.39627	0.74414
	0.0093	0.4554	0.0251	0.0479	0.0918	<.0001	0.0837	0.0002
	17	17	20	20	20	20	20	20
CBM	-0.38959	0.00000	-0.07695	-0.07695	-0.26936	-0.15494	-0.06419	0.08401
	0.4452	1.0000	0.8121	0.8121	0.3972	0.6306	0.8429	0.7952
	6	6	12	12	12	12	12	12

	COS	Cmant	CBM	Codos	CP	P	DA	DR
Pend	-0.65060	0.60992	-0.38959	0.00000	-0.61315	0.51699	-0.31789	0.41642
	<.0001	0.0093	0.4452	1.0000	0.0001	0.0009	0.0669	0.0143
	34	17	6	6	34	38	34	34
Exp	0.42779	-0.19407	0.00000	0.00000	0.13667	-0.34124	0.63590	-0.37985
	0.0116	0.4554	1.0000	1.0000	0.4409	0.0360	<.0001	0.0267
	34	17	6	6	34	38	34	34

Easy PDF Creator is professional software to create PDF. If you wish to remove this line, buy it now.

Gen	0.17785	-0.49888	-0.07695	0.00000	0.30559	-0.61318	0.36889	-0.43411
	0.2722	0.0251	0.8121	1.0000	0.0552	<.0001	0.0192	0.0051
	40	20	12	12	40	47	40	40
Esp	0.13924	-0.44754	-0.07695	0.00000	0.32442	-0.58505	0.23954	-0.40011
	0.3915	0.0479	0.8121	1.0000	0.0411	<.0001	0.1366	0.0105
	40	20	12	12	40	47	40	40
Alti	0.50214	-0.38705	-0.26936	0.00000	0.54902	-0.52706	0.37157	-0.28236
	0.0010	0.0918	0.3972	1.0000	0.0002	0.0001	0.0182	0.0775
	40	20	12	12	40	47	40	40
Nit	0.44136	-0.84807	-0.15494	-0.10532	0.43561	-0.70304	0.45669	-0.51050
	0.0044	<.0001	0.6306	0.7446	0.0050	<.0001	0.0031	0.0008
	40	20	12	12	40	40	40	40
pHkcl	-0.00868	-0.39627	-0.06419	0.02474	-0.17731	-0.11172	0.25668	-0.03483
	0.9576	0.0837	0.8429	0.9392	0.2737	0.4925	0.1099	0.8310
	40	20	12	12	40	40	40	40
CN	0.01942	0.74414	0.08401	-0.05194	-0.16460	0.45844	-0.18120	0.21562
	0.9053	0.0002	0.7952	0.8726	0.3101	0.0029	0.2631	0.1815
	40	20	12	12	40	40	40	40
COS	1.00000	-0.44930	0.10862	0.08569	0.84403	-0.59454	0.48003	-0.43066
		0.0469	0.7369	0.7912	<.0001	<.0001	0.0017	0.0055
	40	20	12	12	40	40	40	40
Cmant	-0.44930	1.00000	-0.27943	-0.27943	-0.58603	0.78757	-0.66580	0.42538
	0.0469		0.5918	0.5918	0.0066	<.0001	0.0014	0.0615
	20	20	6	6	20	20	20	20
CBM	0.10862	-0.27943	1.00000	0.92415	0.30758	-0.44055	-0.10452	-0.19135
	0.7369	0.5918		<.0001	0.3308	0.1517	0.7465	0.5513
	12	6	12	12	12	12	12	12

	EP	CE	Arci	Lim	Are	Nmant	Pman	Pt
Pend	0.36001	0.08724	-0.26250	0.53627	-0.21831	0.24804	-0.31709	0.00000
	0.0365	0.5427	0.3087	0.0265	0.3999	0.1572	0.0558	1.0000
	34	51	17	17	17	34	37	6
Exp	-0.62270	-0.20456	-0.36818	-0.89599	0.72911	-0.38065	0.07224	0.00000
	<.0001	0.1499	0.1459	<.0001	0.0009	0.0264	0.6709	1.0000
	34	51	17	17	17	34	37	6
Gen	-0.49708	0.28792	-0.25218	-0.17445	0.24853	-0.33459	0.40078	0.00000
	0.0011	0.0257	0.2834	0.4620	0.2907	0.0348	0.0064	1.0000
	40	60	20	20	20	40	45	12
Esp	-0.38890	0.34293	-0.10864	-0.01708	0.07056	-0.33541	0.36456	0.00000
	0.0131	0.0073	0.6485	0.9430	0.7675	0.0344	0.0138	1.0000
	40	60	20	20	20	40	45	12
Alti	-0.38085	0.01038	-0.18772	-0.44093	0.38057	-0.16435	-0.05312	0.00000
	0.0153	0.9373	0.4280	0.0517	0.0978	0.3109	0.7289	1.0000
	40	60	20	20	20	40	45	12
Nit	-0.60821	0.07691	-0.18671	-0.66919	0.52352	-0.42437	0.07438	-0.08599
	<.0001	0.6371	0.4306	0.0013	0.0178	0.0063	0.6483	0.7905
	40	40	20	20	20	40	40	12
pHkcl	-0.26353	-0.03969	-0.46890	-0.21976	0.39635	-0.03199	0.29193	0.00000
	0.1004	0.8079	0.0370	0.3519	0.0836	0.8446	0.0676	1.0000
	40	40	20	20	20	40	40	12
CN	0.28800	-0.08380	0.15611	0.12424	-0.16407	0.29158	0.08189	-0.05478
	0.0715	0.6072	0.5110	0.6018	0.4894	0.0679	0.6154	0.8657
	40	40	20	20	20	40	40	12
COS	-0.56540	0.23886	0.07905	-0.43844	0.23211	-0.37327	0.07022	-0.02347
	0.0001	0.1377	0.7404	0.0531	0.3248	0.0177	0.6668	0.9423
	40	40	20	20	20	40	40	12
Cmant	0.61145	-0.14587	0.42868	0.45912	-0.52469	0.42240	-0.31254	.
	0.0042	0.5395	0.0593	0.0417	0.0175	0.0635	0.1797	.
	20	20	20	20	20	20	20	6

Easy PDF Creator is professional software to create PDF. If you wish to remove this line, buy it now.

CBM	-0.29417	-0.07788	-0.44263	0.82219	-0.44526	-0.24864	0.49750	0.88521
	0.3533	0.8099	0.3794	0.0446	0.3762	0.4358	0.0998	0.0001
	12	12	6	6	6	12	12	12

	Pend	Exp	Gen	Esp	Alti	Nit	pHkcl	CN
CO_2	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	-0.10532	0.02474	-0.05194
	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	0.7446	0.9392	0.8726
	6	6	12	12	12	12	12	12
CP	-0.61315	0.13667	0.30559	0.32442	0.54902	0.43561	-0.17731	-0.16460
	0.0001	0.4409	0.0552	0.0411	0.0002	0.0050	0.2737	0.3101
	34	34	40	40	40	40	40	40
P	0.51699	-0.34124	-0.61318	-0.58505	-0.52706	-0.70304	-0.11172	0.45844
	0.0009	0.0360	<.0001	<.0001	0.0001	<.0001	0.4925	0.0029
	38	38	47	47	47	40	40	40
DA	-0.31789	0.63590	0.36889	0.23954	0.37157	0.45669	0.25668	-0.18120
	0.0669	<.0001	0.0192	0.1366	0.0182	0.0031	0.1099	0.2631
	34	34	40	40	40	40	40	40
DR	0.41642	-0.37985	-0.43411	-0.40011	-0.28236	-0.51050	-0.03483	0.21562
	0.0143	0.0267	0.0051	0.0105	0.0775	0.0008	0.8310	0.1815
	34	34	40	40	40	40	40	40
EP	0.36001	-0.62270	-0.49708	-0.38890	-0.38085	-0.60821	-0.26353	0.28800
	0.0365	<.0001	0.0011	0.0131	0.0153	<.0001	0.1004	0.0715
	34	34	40	40	40	40	40	40
CE	0.08724	-0.20456	0.28792	0.34293	0.01038	0.07691	-0.03969	-0.08380
	0.5427	0.1499	0.0257	0.0073	0.9373	0.6371	0.8079	0.6072
	51	51	60	60	60	40	40	40
Arci	-0.26250	-0.36818	-0.25218	-0.10864	-0.18772	-0.18671	-0.46890	0.15611
	0.3087	0.1459	0.2834	0.6485	0.4280	0.4306	0.0370	0.5110
	17	17	20	20	20	20	20	20
Lim	0.53627	-0.89599	-0.17445	-0.01708	-0.44093	-0.66919	-0.21976	0.12424
	0.0265	<.0001	0.4620	0.9430	0.0517	0.0013	0.3519	0.6018
	17	17	20	20	20	20	20	20
Are	-0.21831	0.72911	0.24853	0.07056	0.38057	0.52352	0.39635	-0.16407
	0.3999	0.0009	0.2907	0.7675	0.0978	0.0178	0.0836	0.4894
	17	17	20	20	20	20	20	20
Nmant	0.24804	-0.38065	-0.33459	-0.33541	-0.16435	-0.42437	-0.03199	0.29158
	0.1572	0.0264	0.0348	0.0344	0.3109	0.0063	0.8446	0.0679
	34	34	40	40	40	40	40	40

	COS	Cmant	CBM	CO_2	CP	P	DA	DR
CO_2	0.08569	-0.27943	0.92415	1.00000	0.23357	-0.28274	-0.03064	0.15904
	0.7912	0.5918	<.0001		0.4650	0.3732	0.9247	0.6215
	12	6	12	12	12	12	12	12
CP	0.84403	-0.58603	0.30758	0.23357	1.00000	-0.77663	0.40421	-0.48925
	<.0001	0.0066	0.3308	0.4650		<.0001	0.0097	0.0014
	40	20	12	12	40	40	40	40
P	-0.59454	0.78757	-0.44055	-0.28274	-0.77663	1.00000	-0.50446	0.78436
	<.0001	<.0001	0.1517	0.3732	<.0001		0.0009	<.0001
	40	20	12	12	40	47	40	40
DA	0.48003	-0.66580	-0.10452	-0.03064	0.40421	-0.50446	1.00000	-0.38672
	0.0017	0.0014	0.7465	0.9247	0.0097	0.0009		0.0137
	40	20	12	12	40	40	40	40
DR	-0.43066	0.42538	-0.19135	0.15904	-0.48925	0.78436	-0.38672	1.00000
	0.0055	0.0615	0.5513	0.6215	0.0014	<.0001	0.0137	
	40	20	12	12	40	40	40	40

Easy PDF Creator is professional software to create PDF. If you wish to remove this line, buy it now.

EP	-0.56540	0.61145	-0.29417	-0.03891	-0.48470	0.77899	-0.78177	0.81198
	0.0001	0.0042	0.3533	0.9044	0.0015	<.0001	<.0001	<.0001
	40	20	12	12	40	40	40	40
CE	0.23886	-0.14587	-0.07788	-0.13693	0.37485	-0.47748	-0.26946	-0.41319
	0.1377	0.5395	0.8099	0.6713	0.0172	0.0007	0.0927	0.0080
	40	20	12	12	40	47	40	40
Arci	0.07905	0.42868	-0.44263	-0.44263	0.24822	0.16351	-0.58949	0.11238
	0.7404	0.0593	0.3794	0.3794	0.2913	0.4910	0.0062	0.6371
	20	20	6	6	20	20	20	20
Lim	-0.43844	0.45912	0.82219	0.82219	-0.16617	0.49578	-0.67157	0.57668
	0.0531	0.0417	0.0446	0.0446	0.4838	0.0262	0.0012	0.0078
	20	20	6	6	20	20	20	20
Are	0.23211	-0.52469	-0.44526	-0.44526	-0.03221	-0.40172	0.74680	-0.42443
	0.3248	0.0175	0.3762	0.3762	0.8928	0.0791	0.0002	0.0622
	20	20	6	6	20	20	20	20
Nmant	-0.37327	0.42240	-0.24864	-0.52843	-0.55869	0.54669	-0.19254	0.12967
	0.0177	0.0635	0.4358	0.0774	0.0002	0.0003	0.2339	0.4252
	40	20	12	12	40	40	40	40

	EP	CE	Arci	Lim	Are	Nmant	Pman	Pt
CO_2	-0.03891	-0.13693	-0.44263	0.82219	-0.44526	-0.52843	0.31709	0.81650
	0.9044	0.6713	0.3794	0.0446	0.3762	0.0774	0.3152	0.0012
	12	12	6	6	6	12	12	12
CP	-0.48470	0.37485	0.24822	-0.16617	-0.03221	-0.55869	0.02308	0.22511
	0.0015	0.0172	0.2913	0.4838	0.8928	0.0002	0.8876	0.4818
	40	40	20	20	20	40	40	12
P	0.77899	-0.47748	0.16351	0.49578	-0.40172	0.54669	-0.33089	-0.53866
	<.0001	0.0007	0.4910	0.0262	0.0791	0.0003	0.0264	0.0708
	40	47	20	20	20	40	45	12
DA	-0.78177	-0.26946	-0.58949	-0.67157	0.74680	-0.19254	0.28753	0.10006
	<.0001	0.0927	0.0062	0.0012	0.0002	0.2339	0.0720	0.7570
	40	40	20	20	20	40	40	12
DR	0.81198	-0.41319	0.11238	0.57668	-0.42443	0.12967	-0.36955	-0.27152
	<.0001	0.0080	0.6371	0.0078	0.0622	0.4252	0.0189	0.3933
	40	40	20	20	20	40	40	12
EP	1.00000	-0.19303	0.47305	0.69829	-0.69948	0.18074	-0.42456	-0.38155
		0.2327	0.0352	0.0006	0.0006	0.2644	0.0063	0.2210
	40	40	20	20	20	40	40	12
CE	-0.19303	1.00000	-0.02583	0.24291	-0.13849	-0.25931	0.07493	-0.11180
	0.2327		0.9139	0.3021	0.5604	0.1061	0.6247	0.7294
	40	60	20	20	20	40	45	12
Arci	0.47305	-0.02583	1.00000	0.43556	-0.82446	-0.17563	-0.11904	.
	0.0352	0.9139		0.0549	<.0001	0.4589	0.6172	.
	20	20	20	20	20	20	20	6
Lim	0.69829	0.24291	0.43556	1.00000	-0.86852	0.16204	-0.49817	.
	0.0006	0.3021	0.0549		<.0001	0.4949	0.0254	.
	20	20	20	20	20	20	20	6
Are	-0.69948	-0.13849	-0.82446	-0.86852	1.00000	-0.00517	0.37874	.
	0.0006	0.5604	<.0001	<.0001		0.9827	0.0996	.
	20	20	20	20	20	20	20	6
Nmant	0.18074	-0.25931	-0.17563	0.16204	-0.00517	1.00000	-0.00153	-0.34371
	0.2644	0.1061	0.4589	0.4949	0.9827		0.9925	0.2740
	40	40	20	20	20	40	40	12

Easy PDF Creator is professional software to create PDF. If you wish to remove this line, buy it now.

	Pend	Exp	Gen	Esp	Alti	Nit	pHkcl	CN
Pman	-0.31709	0.07224	0.40078	0.36456	-0.05312	0.07438	0.29193	0.08189
	0.0558	0.6709	0.0064	0.0138	0.7289	0.6483	0.0676	0.6154
	37	37	45	45	45	40	40	40
Pt	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	-0.08599	0.00000	-0.05478
	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	0.7905	1.0000	0.8657
	6	6	12	12	12	12	12	12

	COS	Cmant	CBM	CO_2	CP	P	DA	DR
Pman	0.07022	-0.31254	0.49750	0.31709	0.02308	-0.33089	0.28753	-0.36955
	0.6668	0.1797	0.0998	0.3152	0.8876	0.0264	0.0720	0.0189
	40	20	12	12	40	45	40	40
Pt	-0.02347	.	0.88521	0.81650	0.22511	-0.53866	0.10006	-0.27152
	0.9423	.	0.0001	0.0012	0.4818	0.0708	0.7570	0.3933
	12	6	12	12	12	12	12	12

	EP	CE	Arci	Lim	Are	Nmant	Pman	Pt
Pman	-0.42456	0.07493	-0.11904	-0.49817	0.37874	-0.00153	1.00000	0.18493
	0.0063	0.6247	0.6172	0.0254	0.0996	0.9925		0.5650
	40	45	20	20	20	40	45	12
Pt	-0.38155	-0.11180	.	.	.	-0.34371	0.18493	1.00000
	0.2210	0.7294	.	.	.	0.2740	0.5650	
	12	12	6	6	6	12	12	12

Easy PDF Creator is professional software to create PDF. If you wish to remove this line, buy it now.

- *Apéndice C*

Coeficiente de correlación de Pearson para las variables determinadas en la Reserva de la Biosfera El Cielo.

Prob > |r| H0: Rho=0

Número de observaciones:

24 Variables: Pend Exp Gen Esp Alti Nit pH (KCl) C:N COS
Cmant CBM CO_2 CP P DA DR EP CE
Arci Lim Are Nmant Pman Pt

	Pend	Exp	Gen	Esp	Alti	Nit	pHkcl	CN
Pend	1.00000	-0.31969	0.40042	0.49042	-0.29625	0.72858	0.41689	-0.30620
		0.0004	<.0001	<.0001	0.0010	<.0001	<.0001	0.0071
	120	120	114	114	120	76	117	76
Exp	-0.31969	1.00000	-0.07976	-0.22107	0.16023	-0.50954	-0.09985	0.28819
	0.0004		0.3989	0.0181	0.0804	<.0001	0.2841	0.0116
	120	120	114	114	120	76	117	76
Gen	0.40042	-0.07976	1.00000	0.85462	-0.35639	0.24264	0.16502	-0.19048
	<.0001	0.3989		<.0001	<.0001	0.0347	0.0835	0.0993
	114	114	114	114	114	76	111	76
Esp	0.49042	-0.22107	0.85462	1.00000	-0.46035	0.30491	0.22476	-0.25718
	<.0001	0.0181	<.0001		<.0001	0.0074	0.0177	0.0249
	114	114	114	114	114	76	111	76
Alti	-0.29625	0.16023	-0.35639	-0.46035	1.00000	-0.17272	-0.02934	-0.00669
	0.0010	0.0804	<.0001	<.0001		0.1357	0.7535	0.9542
	120	120	114	114	120	76	117	76
Nit	0.72858	-0.50954	0.24264	0.30491	-0.17272	1.00000	0.62523	-0.58286
	<.0001	<.0001	0.0347	0.0074	0.1357		<.0001	<.0001
	76	76	76	76	76	76	74	76
pHkcl	0.41689	-0.09985	0.16502	0.22476	-0.02934	0.62523	1.00000	-0.32522
	<.0001	0.2841	0.0835	0.0177	0.7535	<.0001		0.0047
	117	117	111	111	117	74	117	74
CN	-0.30620	0.28819	-0.19048	-0.25718	-0.00669	-0.58286	-0.32522	1.00000
	0.0071	0.0116	0.0993	0.0249	0.9542	<.0001	0.0047	
	76	76	76	76	76	76	74	76
COS	0.47954	-0.07285	0.19609	0.22041	0.00671	0.70427	0.65547	-0.03294
	<.0001	0.5208	0.0896	0.0557	0.9529	<.0001	<.0001	0.7776
	80	80	76	76	80	76	78	76
Cmant	0.16430	-0.07381	0.06810	0.16682	-0.19084	-0.16742	0.20711	-0.09667
	0.1561	0.5263	0.5589	0.1498	0.0987	0.1483	0.0766	0.4061
	76	76	76	76	76	76	74	76
CBM	-0.42065	0.24568	-0.59670	-0.55067	0.35546	-0.40022	-0.44219	0.14266
	0.0077	0.1317	<.0001	0.0003	0.0264	0.0116	0.0048	0.3863
	39	39	39	39	39	39	39	39

	COS	Cmant	CBM	CO_2	CP	P	DA	DR
Pend	0.47954	0.16430	-0.42065	-0.04949	-0.15398	0.34393	-0.60807	-0.58854
	<.0001	0.1561	0.0077	0.6977	0.1726	0.0001	<.0001	<.0001
	80	76	39	64	80	120	90	90
Exp	-0.07285	-0.07381	0.24568	-0.24943	-0.26449	0.41267	0.04091	0.47507
	0.5208	0.5263	0.1317	0.0468	0.0177	<.0001	0.7018	<.0001
	80	76	39	64	80	120	90	90

Easy PDF Creator is professional software to create PDF. If you wish to remove this line, buy it now.

Gen	0.19609	0.06810	-0.59670	0.28243	-0.14735	0.29454	-0.22133	-0.17808
	0.0896	0.5589	<.0001	0.0237	0.2040	0.0015	0.0430	0.1051
	76	76	39	64	76	114	84	84
Esp	0.22041	0.16682	-0.55067	0.26004	-0.15749	0.29890	-0.24712	-0.23609
	0.0557	0.1498	0.0003	0.0380	0.1742	0.0012	0.0234	0.0306
	76	76	39	64	76	114	84	84
Alti	0.00671	-0.19084	0.35546	-0.08148	0.34611	-0.18382	-0.15953	-0.29671
	0.9529	0.0987	0.0264	0.5221	0.0017	0.0445	0.1331	0.0045
	80	76	39	64	80	120	90	90
Nit	0.70427	-0.16742	-0.40022	0.54744	0.25388	0.08535	-0.83044	-0.70697
	<.0001	0.1483	0.0116	<.0001	0.0269	0.4635	<.0001	<.0001
	76	76	39	64	76	76	76	76
pHkcl	0.65547	0.20711	-0.44219	0.49674	0.28482	0.36838	-0.58996	-0.44344
	<.0001	0.0766	0.0048	<.0001	0.0115	<.0001	<.0001	<.0001
	78	74	39	64	78	117	88	88
CN	-0.03294	-0.09667	0.14266	-0.29412	-0.02497	0.02554	0.31782	0.36500
	0.7776	0.4061	0.3863	0.0183	0.8305	0.8266	0.0051	0.0012
	76	76	39	64	76	76	76	76
COS	1.00000	-0.27397	-0.29693	0.43592	0.33529	0.35349	-0.84148	-0.51892
		0.0166	0.0664	0.0003	0.0024	0.0013	<.0001	<.0001
	80	76	39	64	80	80	80	80
Cmant	-0.27397	1.00000	-0.27273	-0.13645	-0.42897	0.23955	0.11843	0.14048
	0.0166		0.0930	0.2823	0.0001	0.0371	0.3082	0.2261
	76	76	39	64	76	76	76	76
CBM	-0.29693	-0.27273	1.00000	-0.92158	0.12762	-0.40094	0.38842	0.11560
	0.0664	0.0930		<.0001	0.4388	0.0114	0.0145	0.4834
	39	39	39	39	39	39	39	39

	EP	CE	Arci	Lim	Are	Nmant	Pman	Pt
Pend	-0.16708	0.58449	-0.46103	-0.03984	0.36250	0.46333	0.75013	0.53229
	0.1155	<.0001	0.0053	0.8203	0.0323	<.0001	<.0001	<.0001
	90	106	35	35	35	75	113	80
Exp	0.46286	-0.26237	-0.47311	0.77838	-0.19320	-0.56043	-0.14719	-0.08789
	<.0001	0.0066	0.0041	<.0001	0.2661	<.0001	0.1198	0.4382
	90	106	35	35	35	75	113	80
Gen	-0.02556	0.30346	-0.00804	0.12914	-0.07433	0.04748	0.42398	0.36676
	0.8175	0.0021	0.9646	0.4738	0.6810	0.6858	<.0001	0.0011
	84	100	33	33	33	75	113	76
Esp	-0.05500	0.36196	0.06191	0.02402	-0.06237	0.11869	0.53868	0.45715
	0.6193	0.0002	0.7322	0.8945	0.7302	0.3105	<.0001	<.0001
	84	100	33	33	33	75	113	76
Alti	-0.27486	0.08688	0.07931	0.18123	-0.18266	-0.06026	-0.44730	-0.24439
	0.0087	0.3758	0.6506	0.2975	0.2936	0.6076	<.0001	0.0289
	90	106	35	35	35	75	113	80
Nit	-0.26593	0.45866	-0.13792	-0.03584	0.12794	0.72566	0.23632	0.31971
	0.0202	<.0001	0.4440	0.8431	0.4780	<.0001	0.0399	0.0049
	76	74	33	33	33	75	76	76
pHkcl	0.02388	0.36701	-0.04513	0.01179	0.02466	0.36120	0.28233	0.33181
	0.8252	0.0001	0.7969	0.9464	0.8882	0.0017	0.0028	0.0030
	88	104	35	35	35	73	110	78
CN	0.22701	-0.34624	-0.38139	-0.05704	0.32758	-0.59392	-0.21423	-0.14546
	0.0486	0.0025	0.0285	0.7525	0.0627	<.0001	0.0631	0.2099
	76	74	33	33	33	75	76	76
COS	0.07771	0.19811	-0.22605	0.29285	-0.03777	0.41942	0.10826	0.41629
	0.4932	0.0821	0.1916	0.0878	0.8295	0.0002	0.3519	0.0001
	80	78	35	35	35	75	76	80
Cmant	0.14883	0.09510	-0.18542	-0.22291	0.28090	0.02569	0.54963	0.19718
	0.1995	0.4202	0.3016	0.2124	0.1133	0.8268	<.0001	0.0878
	76	74	33	33	33	75	76	76

Easy PDF Creator is professional software to create PDF. If you wish to remove this line, buy it now.

CBM	-0.15620	-0.41667	0.04849	0.25045	-0.14720	-0.00603	-0.55867	-0.52844
	0.3423	0.0093	0.8485	0.3162	0.5600	0.9713	0.0002	0.0005
	39	38	18	18	18	38	39	39

	Pend	Exp	Gen	Esp	Alti	Nit	pHkcl	CN
CO_2	-0.04949	-0.24943	0.28243	0.26004	-0.08148	0.54744	0.49674	-0.29412
	0.6977	0.0468	0.0237	0.0380	0.5221	<.0001	<.0001	0.0183
	64	64	64	64	64	64	64	64
CP	-0.15398	-0.26449	-0.14735	-0.15749	0.34611	0.25388	0.28482	-0.02497
	0.1726	0.0177	0.2040	0.1742	0.0017	0.0269	0.0115	0.8305
	80	80	76	76	80	76	78	76
P	0.34393	0.41267	0.29454	0.29890	-0.18382	0.08535	0.36838	0.02554
	0.0001	<.0001	0.0015	0.0012	0.0445	0.4635	<.0001	0.8266
	120	120	114	114	120	76	117	76
DA	-0.60807	0.04091	-0.22133	-0.24712	-0.15953	-0.83044	-0.58996	0.31782
	<.0001	0.7018	0.0430	0.0234	0.1331	<.0001	<.0001	0.0051
	90	90	84	84	90	76	88	76
DR	-0.58854	0.47507	-0.17808	-0.23609	-0.29671	-0.70697	-0.44344	0.36500
	<.0001	<.0001	0.1051	0.0306	0.0045	<.0001	<.0001	0.0012
	90	90	84	84	90	76	88	76
EP	-0.16708	0.46286	-0.02556	-0.05500	-0.27486	-0.26593	0.02388	0.22701
	0.1155	<.0001	0.8175	0.6193	0.0087	0.0202	0.8252	0.0486
	90	90	84	84	90	76	88	76
CE	0.58449	-0.26237	0.30346	0.36196	0.08688	0.45866	0.36701	-0.34624
	<.0001	0.0066	0.0021	0.0002	0.3758	<.0001	0.0001	0.0025
	106	106	100	100	106	74	104	74
Arci	-0.46103	-0.47311	-0.00804	0.06191	0.07931	-0.13792	-0.04513	-0.38139
	0.0053	0.0041	0.9646	0.7322	0.6506	0.4440	0.7969	0.0285
	35	35	33	33	35	33	35	33
Lim	-0.03984	0.77838	0.12914	0.02402	0.18123	-0.03584	0.01179	-0.05704
	0.8203	<.0001	0.4738	0.8945	0.2975	0.8431	0.9464	0.7525
	35	35	33	33	35	33	35	33
Are	0.36250	-0.19320	-0.07433	-0.06237	-0.18266	0.12794	0.02466	0.32758
	0.0323	0.2661	0.6810	0.7302	0.2936	0.4780	0.8882	0.0627
	35	35	33	33	35	33	35	33
Nmant	0.46333	-0.56043	0.04748	0.11869	-0.06026	0.72566	0.36120	-0.59392
	<.0001	<.0001	0.6858	0.3105	0.6076	<.0001	0.0017	<.0001
	75	75	75	75	75	75	73	75

	COS	Cmant	CBM	CO_2	CP	P	DA	DR
CO_2	0.43592	-0.13645	-0.92158	1.00000	0.45367	0.01257	-0.21260	-0.25991
	0.0003	0.2823	<.0001		0.0002	0.9215	0.0917	0.0381
	64	64	39	64	64	64	64	64
CP	0.33529	-0.42897	0.12762	0.45367	1.00000	-0.48406	-0.18971	-0.41902
	0.0024	0.0001	0.4388	0.0002		<.0001	0.0919	0.0001
	80	76	39	64	80	80	80	80
P	0.35349	0.23955	-0.40094	0.01257	-0.48406	1.00000	-0.31326	0.07754
	0.0013	0.0371	0.0114	0.9215	<.0001		0.0026	0.4676
	80	76	39	64	80	120	90	90
DA	-0.84148	0.11843	0.38842	-0.21260	-0.18971	-0.31326	1.00000	0.58202
	<.0001	0.3082	0.0145	0.0917	0.0919	0.0026		<.0001
	80	76	39	64	80	90	90	90
DR	-0.51892	0.14048	0.11560	-0.25991	-0.41902	0.07754	0.58202	1.00000
	<.0001	0.2261	0.4834	0.0381	0.0001	0.4676	<.0001	
	80	76	39	64	80	90	90	90

Easy PDF Creator is professional software to create PDF. If you wish to remove this line, buy it now.

EP	0.07771	0.14883	-0.15620	-0.05501	-0.38410	0.37762	-0.08988	0.70373
	0.4932	0.1995	0.3423	0.6659	0.0004	0.0002	0.3995	<.0001
	80	76	39	64	80	90	90	90
CE	0.19811	0.09510	-0.41667	0.26237	-0.02124	0.46327	-0.28527	-0.46380
	0.0821	0.4202	0.0093	0.0378	0.8535	<.0001	0.0078	<.0001
	78	74	38	63	78	106	86	86
Arci	-0.22605	-0.18542	0.04849	0.10575	0.49123	-0.33711	0.08442	-0.04647
	0.1916	0.3016	0.8485	0.5646	0.0027	0.0477	0.6297	0.7910
	35	33	18	32	35	35	35	35
Lim	0.29285	-0.22291	0.25045	-0.07728	0.11558	0.04383	-0.36398	0.19121
	0.0878	0.2124	0.3162	0.6742	0.5085	0.8026	0.0316	0.2712
	35	33	18	32	35	35	35	35
Are	-0.03777	0.28090	-0.14720	-0.03357	-0.43671	0.21473	0.18976	-0.09815
	0.8295	0.1133	0.5600	0.8553	0.0087	0.2154	0.2749	0.5749
	35	33	18	32	35	35	35	35
Nmant	0.41942	0.02569	-0.00603	0.17617	0.27036	-0.26019	-0.72107	-0.55053
	0.0002	0.8268	0.9713	0.1672	0.0190	0.0242	<.0001	<.0001
	75	75	38	63	75	75	75	75

	EP	CE	Arci	Lim	Are	Nmant	Pman	Pt
CO_2	-0.05501	0.26237	0.10575	-0.07728	-0.03357	0.17617	-0.12081	0.20226
	0.6659	0.0378	0.5646	0.6742	0.8553	0.1672	0.3416	0.1090
	64	63	32	32	32	63	64	64
CP	-0.38410	-0.02124	0.49123	0.11558	-0.43671	0.27036	-0.51440	-0.13294
	0.0004	0.8535	0.0027	0.5085	0.0087	0.0190	<.0001	0.2398
	80	78	35	35	35	75	76	80
P	0.37762	0.46327	-0.33711	0.04383	0.21473	-0.26019	0.58619	0.33859
	0.0002	<.0001	0.0477	0.8026	0.2154	0.0242	<.0001	0.0021
	90	106	35	35	35	75	113	80
DA	-0.08988	-0.28527	0.08442	-0.36398	0.18976	-0.72107	-0.32607	-0.51629
	0.3995	0.0078	0.6297	0.0316	0.2749	<.0001	0.0025	<.0001
	90	86	35	35	35	75	84	80
DR	0.70373	-0.46380	-0.04647	0.19121	-0.09815	-0.55053	-0.21360	-0.32386
	<.0001	<.0001	0.7910	0.2712	0.5749	<.0001	0.0511	0.0034
	90	86	35	35	35	75	84	80
EP	1.00000	-0.33463	-0.15698	0.42266	-0.17751	-0.19989	0.01792	0.06284
		0.0016	0.3678	0.0114	0.3076	0.0855	0.8715	0.5797
	90	86	35	35	35	75	84	80
CE	-0.33463	1.00000	0.22747	-0.28766	0.03316	0.06987	0.56611	0.18161
	0.0016		0.1888	0.0938	0.8500	0.5570	<.0001	0.1115
	86	106	35	35	35	73	99	78
Arci	-0.15698	0.22747	1.00000	-0.00400	-0.72392	0.06734	-0.08449	-0.09223
	0.3678	0.1888		0.9818	<.0001	0.7097	0.6402	0.5982
	35	35	35	35	35	33	33	35
Lim	0.42266	-0.28766	-0.00400	1.00000	-0.68698	-0.22139	-0.04312	0.28479
	0.0114	0.0938	0.9818		<.0001	0.2156	0.8117	0.0973
	35	35	35	35	35	33	33	35
Are	-0.17751	0.03316	-0.72392	-0.68698	1.00000	0.08642	0.09157	-0.12945
	0.3076	0.8500	<.0001	<.0001		0.6325	0.6123	0.4586
	35	35	35	35	35	33	33	35
Nmant	-0.19989	0.06987	0.06734	-0.22139	0.08642	1.00000	0.05140	0.18723
	0.0855	0.5570	0.7097	0.2156	0.6325		0.6614	0.1077
	75	73	33	33	33	75	75	75

Easy PDF Creator is professional software to create PDF. If you wish to remove this line, buy it now.

	Pend	Exp	Gen	Esp	Alti	Nit	pHkcl	CN
Pman	0.75013	-0.14719	0.42398	0.53868	-0.44730	0.23632	0.28233	-0.21423
	<.0001	0.1198	<.0001	<.0001	<.0001	0.0399	0.0028	0.0631
	113	113	113	113	113	76	110	76
Pt	0.53229	-0.08789	0.36676	0.45715	-0.24439	0.31971	0.33181	-0.14546
	<.0001	0.4382	0.0011	<.0001	0.0289	0.0049	0.0030	0.2099
	80	80	76	76	80	76	78	76

	COS	Cmant	CBM	CO_2	CP	P	DA	DR
Pman	0.10826	0.54963	-0.55867	-0.12081	-0.51440	0.58619	-0.32607	-0.21360
	0.3519	<.0001	0.0002	0.3416	<.0001	<.0001	0.0025	0.0511
	76	76	39	64	76	113	84	84
Pt	0.41629	0.19718	-0.52844	0.20226	-0.13294	0.33859	-0.51629	-0.32386
	0.0001	0.0878	0.0005	0.1090	0.2398	0.0021	<.0001	0.0034
	80	76	39	64	80	80	80	80

	EP	CE	Arci	Lim	Are	Nmant	Pman	Pt
Pman	0.01792	0.56611	-0.08449	-0.04312	0.09157	0.05140	1.00000	0.57013
	0.8715	<.0001	0.6402	0.8117	0.6123	0.6614		<.0001
	84	99	33	33	33	75	113	76
Pt	0.06284	0.18161	-0.09223	0.28479	-0.12945	0.18723	0.57013	1.00000
	0.5797	0.1115	0.5982	0.0973	0.4586	0.1077	<.0001	
	80	78	35	35	35	75	76	80

Easy PDF Creator is professional software to create PDF. If you wish to remove this line, buy it now.

- *Apéndice D*

Procedimiento del modelo lineal general (GLM). Número de observaciones: 356.

Variable dependiente		F	Pr> F
Nitrógeno		89.29	< 0.0001
	ANP	371.63	< 0.0001
	Pendiente	127.41	< 0.0001
	Exposición	66.92	< 0.0001
	Altitud	3.29	0.0127
C:N		14.90	< 0.0001
	ANP	7.62	0.0007
	Pendiente	19.67	< 0.0001
	Exposición	26.64	< 0.0001
	Altitud	9.49	< 0.0001
COS		14.90	< 0.0001
	ANP	550.11	< 0.0001
	Pendiente	61.47	< 0.0001
	Exposición	70.84	< 0.0001
	Altitud	18.30	< 0.0001
C total		52.89	< 0.0001
	ANP	433.27	< 0.0001
	Pendiente	58.71	< 0.0001
	Exposición	31.99	< 0.0001
	Altitud	7.49	< 0.0001
pH 2:1 (H_2O)		47.99	< 0.0001
	ANP	19.89	< 0.0001
	Pendiente	85.61	< 0.0001
	Exposición	9.19	< 0.0001
	Especie	4.30	< 0.0001
	Altitud	25.94	< 0.0001
pH 2:1 (KCl)		306.49	< 0.0001
	ANP	531.61	< 0.0001
	Pendiente	491.34	< 0.0001
	Exposición	156.80	< 0.0001
	Especie	13.26	< 0.0001
	Altitud	88.86	< 0.0001
C de mantillo		595.80	< 0.0001
	ANP	944.23	< 0.0001
	Pendiente	643.22	< 0.0001
	Exposición	996.96	< 0.0001
	Género	3.35	0.0223
	Especie	80.05	< 0.0001
	Altitud	910.80	< 0.0001
CBM		10.82	< 0.0001
	ANP	114.83	< 0.0001
	Pendiente	5.98	< 0.0001
	Exposición	7.35	< 0.0001

Easy PDF Creator is professional software to create PDF. If you wish to remove this line, buy it now.

Variable dependiente		F	Pr>F
CO_2		18.37	< 0.0001
	ANP	30.68	< 0.0001
	Pendiente	19.66	< 0.0001
	Exposición	22.28	< 0.0001
	Género	9.23	0.0002
	Especie	3.90	0.0008
	Altitud	43.15	< 0.0001
C:P		11.46	< 0.0001
	ANP	82.75	< 0.0001
	Pendiente	10.26	< 0.0001
	Exposición		< 0.0001
	Altitud		0.0009
P disponible		562.59	< 0.0001
	ANP	503.49	< 0.0001
	Pendiente	749.24	< 0.0001
	Exposición	657.70	< 0.0001
	Especie	32.04	< 0.0001
	Altitud	788.25	< 0.0001
D.A.		133.90	< 0.0001
	ANP	1659.62	< 0.0001
	Pendiente	111	< 0.0001
	Exposición	45.93	< 0.0001
	Especie	3.80	0.0004
	Altitud	22.49	< 0.0001
D.R.		17	< 0.0001
	ANP	9.83	< 0.0001
	Pendiente	26.94	< 0.0001
	Exposición	13.87	< 0.0001
	Altitud	10.09	< 0.0001
E.P.		13.85	< 0.0001
	ANP	84.63	< 0.0001
	Pendiente	13.60	< 0.0001
	Exposición	20.54	< 0.0001
	Altitud	4.89	0.0009
C.E.		24.07	< 0.0001
	ANP	148.68	< 0.0001
	Pendiente	34.91	< 0.0001
	Exposición	2.33	0.0258
Arcilla		137.79	< 0.0001
	ANP	1649.41	< 0.0001
	Pendiente	108.97	< 0.0001
	Exposición	59.78	< 0.0001
	Altitud	25.25	< 0.0001

Easy PDF Creator is professional software to create PDF. If you wish to remove this line, buy it now.

Variable dependiente		F	Pr>F
Limo		Infinita	< 0.0001
	ANP	Infinita	< 0.0001
	Pendiente	Infinita	< 0.0001
	Exposición	Infinita	< 0.0001
	Género	Infinita	< 0.0001
	Especie	Infinita	< 0.0001
	Altitud	Infinita	< 0.0001
Arena		310.62	< 0.0001
	ANP	3149.82	< 0.0001
	Pendiente	286.02	< 0.0001
	Exposición	106.93	< 0.0001
	Género	4.85	0.0047
	Especie	7.57	< 0.0001
	Altitud	148.56	< 0.0001
N de mantillo		21.32	< 0.0001
	ANP	132.51	< 0.0001
	Pendiente	19.27	< 0.0001
	Exposición	14.89	< 0.0001
	Especie	3.85	0.0004
	Altitud	39.70	< 0.0001
P de mantillo		91.77	< 0.0001
	ANP	374.35	< 0.0001
	Pendiente	99.73	< 0.0001
	Exposición	151.91	< 0.0001
	Especie	2.85	0.0047
	Altitud	43.11	< 0.0001
P total		3.68	< 0.0001
	ANP	32.56	< 0.0001
	Pendiente	3.56	< 0.0001
	Exposición	2.19	0.0478
Ácidos Húmicos		53.03	< 0.0001
	ANP	424.35	< 0.0001
	Pendiente	58.26	< 0.0001
	Exposición	3.85	0.0015
	Genero	5.25	0.0019
	Especie	3.45	0.0012
	Altitud	52.25	< 0.0001
Ácidos Fúlvicos		230.12	< 0.0001
	ANP	465.52	< 0.0001
	Pendiente	10.96	< 0.0001
	Exposición	7.71	< 0.0001

Easy PDF Creator is professional software to create PDF. If you wish to remove this line, buy it now.

- *Apéndice E*

Análisis de componentes principales.

Observaciones 55 Variables 23

Matriz de correlación

	Nit	pHacu	pHkcl	CN	COS	Cmant	CBM	Codos
Nit	1.0000	0.3144	0.1126	-.6341	0.5311	0.0368	-.1829	0.3642
pHacu	0.3144	1.0000	0.5757	-.3957	0.0674	-.1873	0.2076	0.0019
pHkcl	0.1126	0.5757	1.0000	-.0121	-.1263	0.3419	0.3626	-.3224
CN	-.6341	-.3957	-.0121	1.0000	-.1097	0.1864	0.1129	-.4249
COS	0.5311	0.0674	-.1263	-.1097	1.0000	-.1531	-.2946	0.1363
Cmant	0.0368	-.1873	0.3419	0.1864	-.1531	1.0000	-.1570	-.2620
CBM	-.1829	0.2076	0.3626	0.1129	-.2946	-.1570	1.0000	-.3818
Codos	0.3642	0.0019	-.3224	-.4249	0.1363	-.2620	-.3818	1.0000
CP	0.1893	-.0920	-.3507	-.2981	0.1816	-.3324	-.3705	0.3751
P	-.3166	-.1268	0.3241	0.3678	-.2923	0.3150	0.2021	-.3934
DA	-.0889	0.2430	0.1633	-.1071	-.5661	-.2993	0.5082	0.1900
DR	-.3707	-.3277	-.3528	0.0480	-.0699	-.1862	-.3076	0.2288
EP	-.1328	-.3869	-.4204	0.0234	0.2927	-.0428	-.4864	0.2292

	Nit	pHacu	pHkcl	CN	COS	Cmant	CBM	Codos
CE	0.3732	0.4539	0.2386	-.1440	0.3393	0.3102	-.2457	0.0753
Arci	-.0347	-.0310	0.0361	0.0184	0.2062	0.2231	-.4351	-.2040
Lim	-.3153	-.2277	-.1296	0.2424	0.0225	-.2495	-.0444	-.2198
Are	0.1810	0.1346	0.0408	-.1336	-.1486	-.0237	0.3121	0.2459
Nmant	0.3497	-.3332	-.0856	-.1760	0.0225	0.2452	0.1950	0.0865
Pman	0.2113	0.3289	0.4380	-.2592	-.1796	0.2033	0.2669	0.0586
Pt	-.1569	0.0272	0.4345	0.2480	-.3478	0.0351	0.5620	-.2210
Ctot	0.4670	0.0214	0.2314	0.0556	0.7551	0.4357	-.0151	-.1776
AH	0.0060	-.1056	-.3220	-.0186	0.3776	-.0800	-.4677	-.2513
AF	-.1192	0.2214	0.3019	0.0104	-.4540	-.2393	0.4194	-.1166

	CP	P	DA	DR	EP	CE	Arci	Lim
Nit	0.1893	-.3166	-.0889	-.3707	-.1328	0.3732	-.0347	-.3153
pHacu	-.0920	-.1268	0.2430	-.3277	-.3869	0.4539	-.0310	-.2277
pHkcl	-.3507	0.3241	0.1633	-.3528	-.4204	0.2386	0.0361	-.1296
CN	-.2981	0.3678	-.1071	0.0480	0.0234	-.1440	0.0184	0.2424
COS	0.1816	-.2923	-.5661	-.0699	0.2927	0.3393	0.2062	0.0225
Cmant	-.3324	0.3150	-.2993	-.1862	-.0428	0.3102	0.2231	-.2495
CBM	-.3705	0.2021	0.5082	-.3076	-.4864	-.2457	-.4351	-.0444
Codos	0.3751	-.3934	0.1900	0.2288	0.2292	0.0753	-.2040	-.2198
CP	1.0000	-.4803	0.0468	0.0852	0.2422	-.1882	0.3062	0.1142
P	-.4803	1.0000	-.2106	0.3509	0.2682	0.0059	0.1904	0.6102
DA	0.0468	-.2106	1.0000	-.1793	-.4589	-.3507	-.6292	-.3591
DR	0.0852	0.3509	-.1793	1.0000	0.7436	-.2728	0.1164	0.5380
EP	0.2422	0.2682	-.4589	0.7436	1.0000	-.0062	0.3684	0.5523
CE	-.1882	0.0059	-.3507	-.2728	-.0062	1.0000	0.2249	-.2024
Arci	0.3062	0.1904	-.6292	0.1164	0.3684	0.2249	1.0000	0.4576
Lim	0.1142	0.6102	-.3591	0.5380	0.5523	-.2024	0.4576	1.0000
Are	-.2612	-.4324	0.5990	-.3470	-.5220	-.0485	-.8954	-.8056
Nmant	-.1113	-.0418	-.0067	-.1779	-.0915	-.1099	-.2266	-.2660
Pman	-.2716	-.1772	0.3523	-.4092	-.5050	0.2689	-.2973	-.6514
Pt	-.6017	0.5710	0.2475	0.0147	-.3189	-.2373	-.3741	0.1579
Ctot	-.1750	-.0048	-.5488	-.3001	0.0747	0.4345	0.1808	-.1546
AH	0.3810	-.2655	-.5445	-.0202	0.2699	0.0653	0.7241	0.2941
AF	-.3569	-.0364	0.5931	-.1442	-.6318	-.4351	-.5212	-.3218

	Are	Nmant	Pman	Pt	Ctot	AH	AF
Nit	0.1810	0.3497	0.2113	-.1569	0.4670	0.0060	-.1192
pHacu	0.1346	-.3332	0.3289	0.0272	0.0214	-.1056	0.2214
pHkcl	0.0408	-.0856	0.4380	0.4345	0.2314	-.3220	0.3019
CN	-.1336	-.1760	-.2592	0.2480	0.0556	-.0186	0.0104

	Are	Nmant	Pman	Pt	Ctot	AH	AF
COS	-.1486	0.0225	-.1796	-.3478	0.7551	0.3776	-.4540
Cmant	-.0237	0.2452	0.2033	0.0351	0.4357	-.0800	-.2393
CBM	0.3121	0.1950	0.2669	0.5620	-.0151	-.4677	0.4194
Codos	0.2459	0.0865	0.0586	-.2210	-.1776	-.2513	-.1166
CP	-.2612	-.1113	-.2716	-.6017	-.1750	0.3810	-.3569

Easy PDF Creator is professional software to create PDF. If you wish to remove this line, buy it now.

P	-.4324	-.0418	-.1772	0.5710	-.0048	-.2655	-.0364
DA	0.5990	-.0067	0.3523	0.2475	-.5488	-.5445	0.5931
DR	-.3470	-.1779	-.4092	0.0147	-.3001	-.0202	-.1442
EP	-.5220	-.0915	-.5050	-.3189	0.0747	0.2699	-.6318
CE	-.0485	-.1099	0.2689	-.2373	0.4345	0.0653	-.4351
Arci	-.8954	-.2266	-.2973	-.3741	0.1808	0.7241	-.5212
Lim	-.8056	-.2660	-.6514	0.1579	-.1546	0.2941	-.3218
Are	1.0000	0.2842	0.5242	0.1702	-.0431	-.6298	0.5084
Nmant	0.2842	1.0000	0.2277	0.3215	0.2507	-.2273	0.0899
Pman	0.5242	0.2277	1.0000	0.0591	0.0560	-.3705	0.4498
Pt	0.1702	0.3215	0.0591	1.0000	-.1047	-.5874	0.5548
Ctot	-.0431	0.2507	0.0560	-.1047	1.0000	0.1395	-.4354
AH	-.6298	-.2273	-.3705	-.5874	0.1395	1.0000	-.4234
AF	0.5084	0.0899	0.4498	0.5548	-.4354	-.4234	1.0000

Eigenvalores de la matriz de correlación

	Eigenvalor	Diferencia	Proporción	Acumulativo
1	5.99625907	1.93462047	0.2607	0.2607
2	4.06163860	0.73980826	0.1766	0.4373
3	3.32183034	1.25095354	0.1444	0.5817
4	2.07087680	0.41091828	0.0900	0.6718
5	1.65995852	0.25321033	0.0722	0.7439
6	1.40674820	0.24016743	0.0612	0.8051
7	1.16658077	0.42616642	0.0507	0.8558
8	0.74041435	0.15690373	0.0322	0.8880
9	0.58351062	0.02326063	0.0254	0.9134
10	0.56024998	0.13130714	0.0244	0.9377
11	0.42894285	0.16287512	0.0186	0.9564
12	0.26606773	0.05492455	0.0116	0.9680
13	0.21114318	0.03211631	0.0092	0.9771
14	0.17902687	0.05026335	0.0078	0.9849
15	0.12876352	0.03243135	0.0056	0.9905
16	0.09633217	0.03745390	0.0042	0.9947
17	0.05887827	0.02242534	0.0026	0.9973
18	0.03645294	0.02401391	0.0016	0.9989
19	0.01243902	0.00239339	0.0005	0.9994
20	0.01004563	0.00620506	0.0004	0.9998
21	0.00384057	0.00384057	0.0002	1.0000
22	0.00000000	0.00000000	0.0000	1.0000
23	0.00000000		0.0000	1.0000

Eigenvectores

	Prin1	Prin2	Prin3	Prin4	Prin5	Prin6	Prin7	Prin8
Nit	0.021860	0.388103	0.056208	0.091380	0.252597	0.228988	0.215511	-.024449
pHacu	0.137539	0.175729	0.108443	-.465778	0.312547	0.042739	-.138376	-.029064
pHkcl	0.178457	-.004975	0.347336	-.256504	0.201163	-.032847	0.113437	0.120572
C:N	-.032336	-.285955	0.147999	0.092795	-.348730	-.043273	-.390535	0.136317
COS	-.183700	0.285781	0.103257	0.114191	0.061951	0.396142	-.318711	-.117020
Cmant	-.001862	0.027611	0.357431	0.223711	-.143949	-.448461	0.228361	0.147087
CBM	0.261543	-.157599	0.098521	-.059328	-.021761	0.369140	-.007504	0.365877
CO_2	-.008522	0.200901	-.320669	0.177639	0.351628	-.173174	-.028255	0.076934
CP	-.175228	0.155748	-.313657	-.147875	-.063590	0.071696	0.257622	0.427429
P	-.042321	-.348101	0.282140	0.065062	0.295166	-.065012	0.082257	0.067677
DA	0.303058	-.058079	-.254733	-.134386	0.026285	-.036881	0.032791	0.347609
DR	-.182972	-.239109	-.188853	0.149286	0.337970	-.144333	-.084198	-.227766
EP	-.313231	-.082204	-.086189	0.208669	0.258134	-.092513	-.086348	0.056391
CE	-.050040	0.262175	0.280982	-.082103	0.201673	-.267531	-.241901	0.047879
Arci	-.307277	0.009594	0.173958	-.245244	-.049708	-.084222	0.323746	-.046611
Lim	-.249583	-.303442	0.023615	-.102484	0.218323	0.244889	0.061613	0.082700
Are	0.329709	0.145538	-.127736	0.214724	-.076191	-.066495	-.246568	-.010349
Nmant	0.103813	0.079358	0.050984	0.478045	-.037907	0.197672	0.473467	-.031704
Pman	0.266104	0.175724	0.098507	-.036552	0.012473	-.256636	0.124055	-.174506
Pt	0.217170	-.277282	0.161689	0.134039	0.220516	0.233771	0.092849	-.126241
Ctot	-.081418	0.234466	0.364727	0.231321	-.040686	0.229813	-.162989	0.116701
AH	-.293039	0.096258	0.009204	-.234440	-.324548	0.122072	0.126159	-.286112
AF	0.316827	-.126276	-.089282	-.111125	-.034939	0.089505	0.084279	-.522375

Easy PDF Creator is professional software to create PDF. If you wish to remove this line, buy it now.

- Apéndice F

Cuadro de equivalencias de unidades de las cantidades de Materia Orgánica, C, N, P y Ácidos Húmicos y Fúlvicos.

ANP	Variable	%	ppm	Mg ha^{-1}
Izta-Popo	MOS	6	60000	110.85
Zoquiapan y A.	MOS	6	60000	110.56
RB El Cielo	MOS	16	160000	224.58
Izta-Popo	COS	3.24	32400	64.30
Zoquiapan y A.	COS	3.24	32400	64.12
RB El Cielo	COS	8.64	86400	130.25
Izta-Popo	N total	0.14	1400	2.5
Zoquiapan y A.	N total	0.088	880	1.58
RB El Cielo	N total	0.30	3000	3.79
Izta-Popo	P disponible	0.0016	16	0.031
Zoquiapan y A.	P disponible	0.016	160	0.29
RB El Cielo	P disponible	0.0023	23	0.032
Izta-Popo	Á. Húmicos	1.12	11200	22.18
Zoquiapan y A.	Á. Húmicos	0.3	3000	5.50
RB El Cielo	Á. Húmicos	3.7	37000	50.93
Izta-Popo	Á. Fúlvicos	6.08	60800	120.38
Zoquiapan y A.	Á. Fúlvicos	5.7	57000	103.74
RB El Cielo	Á. Fúlvicos	4.03	40300	55.56

Easy PDF Creator is professional software to create PDF. If you wish to remove this line, buy it now.

- Apéndice F

ÁCIDOS HÚMICOS

En los espectros (FT-IR) de AH de suelos bajo *Pinus* y *Abies* principalmente y en algunos casos asociados con *Quercus* del PN Izta-Popo, se tuvieron señales anchas entre 3411 y 2921 cm^{-1} asignadas a grupos OH- asociados con alcoholes, ácidos carboxílicos y fenoles. Entre 2921 y 2932 cm^{-1}, se tuvieron señales atribuibles a vibraciones por alargamientos simétrico y asimétrico de grupos –CH, $-CH_2$ y $-CH_3$ de cadenas alifáticas. A 1714 cm^{-1}, se presentó una absorción cuya señal es atribuible a una vibración de estiramiento de –C=O de grupos carbonilo de ácidos carboxílicos, a 1620 cm^{-1}, se tienen señales por alargamiento de enlace C=C que indica la presencia de alquenos no conjugados. A 1430 y 1387, se tienen señales que confirman la presencia de grupos –OH y C–O por que el espectro IR, muestra la presencia de vibraciones de deformaciones del radical –OH y de estiramiento de grupos C–O. En 1224 cm^{-1} hubo señales de deformación del grupo –OH de fenoles y en 1044 cm-1 se observaron señales de grupos -C–O de alcoholes primarios.

En todos los espectros FT-IR del gradiente altitudinal (2800-3000, 3000-3200,3200-3400, >3400 m), se tuvieron en general las mismas señales que indican, en todos los casos, la presencia de los grupos funcionales ya descritos con algunas diferencias en la intensidad de la señal. Por ejemplo entre 3200 y 3400 m la señal de C-O asociada a fenoles fue más intensa que su correspondiente a altitudes >3400 m lo que puede atribuirse al tipo de vegetación (Figura 39).

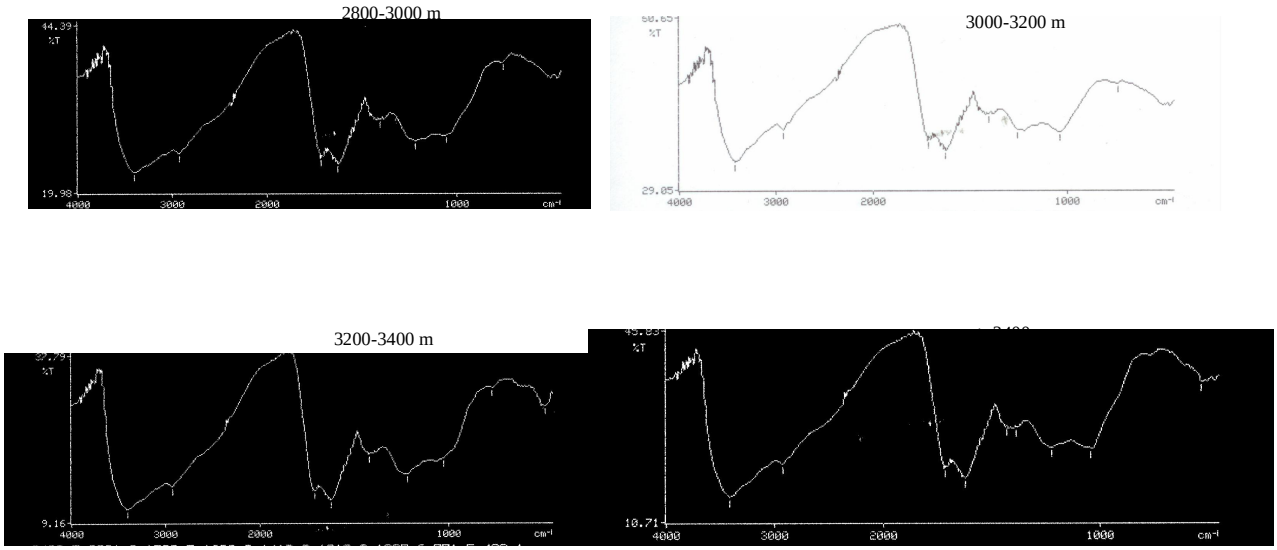


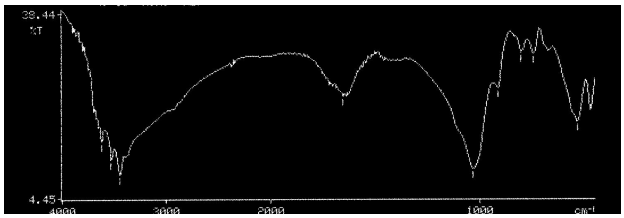
Figura 39. Espectros de los ácidos húmicos del suelo del PN Izta-Popo de distintos pisos altitudinales

Easy PDF Creator is professional software to create PDF. If you wish to remove this line, buy it now.

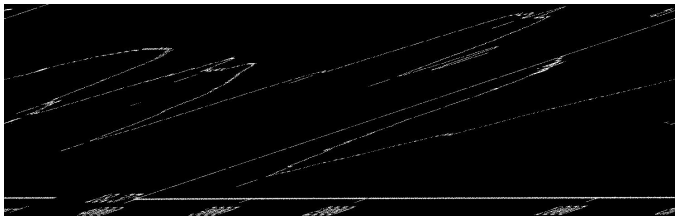
El gradiente altitudinal estudiado en la RB El Cielo, de 1300 a 2054 m, el tipo de vegetación desarrollada *Pinus, Quercus* principalmente y *Abies* en algunos sitios además de su sustrato de origen sedimentario rico en caliza pueden ser factores para que los procesos de degradación de la MOS tengan diferente dinámica a los que se tuvieron en el PN Izta-Popo, por ello en el espectro FT-IR, de la menor altitud (1300-1600 m) a 3619 cm^{-1} se observaron señales de grupos –OH libres y asociados a alcoholes, sin aparente presencia de fenoles, a 3527 cm^{-1} hubo señales que indican la presencia de aminas primarias, a 1654 cm^{-1} se tuvieron señales que indican vibraciones de alargamiento de C=O de quinonas y también la posibilidad de grupos amida (1650) por alta cantidad de N liberado en la amonificación, en los 1033 cm^{-1} la señal mostró la presencia de –OH de alcohol primario.

En los espectros FT-IR de altitudes > 1600 m, no se observaron las señales finas asignadas a grupos aminas primarias, pero sí, la señal ancha a 3444 cm^{-1} asignada a –OH asociados a ácido y alcoholes. En 1714 cm^{-1}, se observo una pequeña señal asignada a carbonilo de ácido carboxílico, lo cual indica una mayor oxidación de esta MOS, a 1034 cm^{-1} en proporción a la de 3444, fue menos intensa por lo que se puede inferir que existe una disminución de los grupos alcohol (Figura 40).

1300-1600 m



1600-1800 m



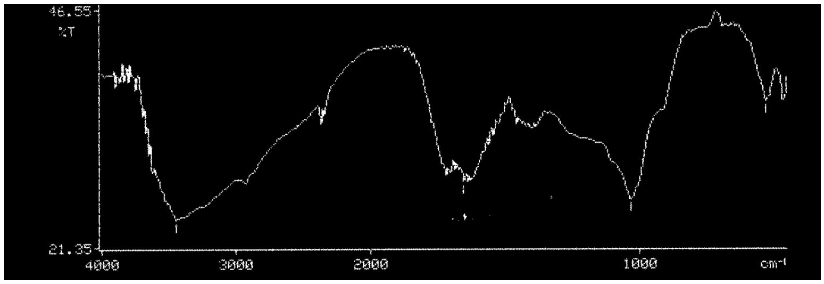


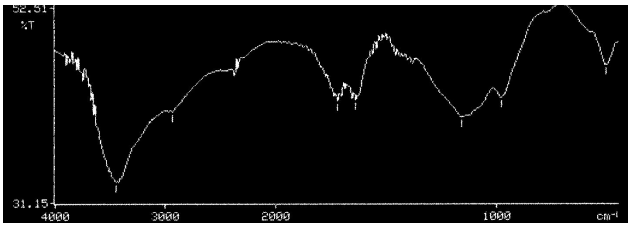
Figura 40. Espectros de los ácidos húmicos del suelo de la RB El Cielo de distintos pisos altitudinales

Easy PDF Creator is professional software to create PDF. If you wish to remove this line, buy it now.

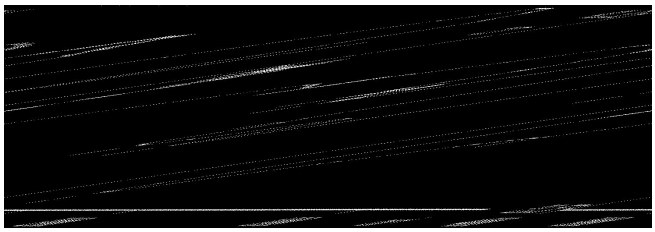
En los espectros (FT-IR) de AF de suelos bajo *Pinus, Abies* y *Quercus* del PN Izta-Popo, se tuvieron señales anchas entre 3421 y 3447 cm^{-1} asignadas a grupos OH- asociados con alcoholes, ácidos carboxílicos y fenoles. En 2932 cm^{-1}, se tuvieron señales atribuibles a vibraciones por alargamientos de grupos –CH, $-CH_2$ y $-CH_3$ de cadenas alifáticas. Entre 1720 y 1714 cm^{-1}, se presento una señal que se atribuye a una vibración de estiramiento de –C=O de grupos carbonilo de ácidos carboxílicos, a 1637 cm^{-1}, existen señales de alargamiento de enlace C=C de alquenos no conjugados. Las señales encontradas a 1637 y 980 cm^{-1} que se asignan vibraciones de alargamiento de C=C de alqueno no conjugado.

En todos los espectros FT-IR del gradiente altitudinal (2800-3000, 3000-3200,3200-3400, >3400 m), se encontraron algunas diferencias en la intensidad de algunas señales; al aumentar la altitud, la señal asignada a OH- asociados con alcoholes, ácidos carboxílicos y fenoles se hace ancha lo que se interpreta como una disminución de alcoholes y fenoles, pero mayor de ácidos por un mayor proceso de oxidación (Figura 41).

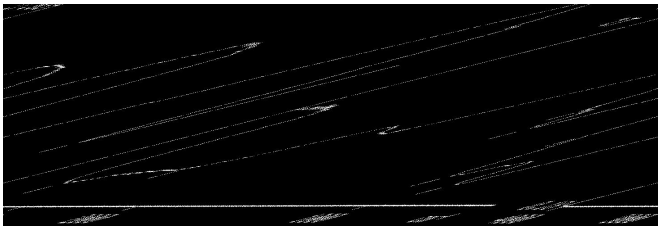
2800-3000 m



3000-3200 m



3200-3400 m



> 3400 m

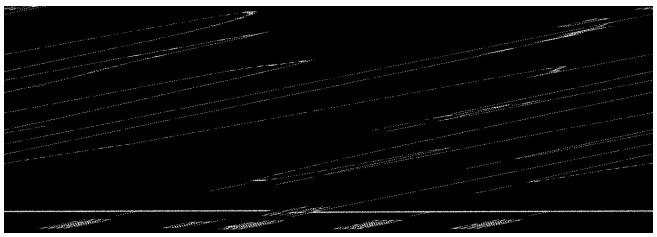


Figura 41. Espectros de los ácidos Fúlvicos del suelo del PN Izta-Popo de distintos pisos altitudinales

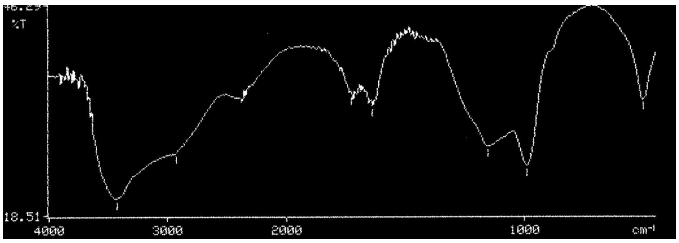
Easy PDF Creator is professional software to create PDF. If you wish to remove this line, buy it now.

En el espectro FT-IR, entre 3422 y 3448 cm^{-1} se observaron señales de grupos –OH asociados a fenoles, alcoholes y ácidos carboxílicos, entre 2932 y 2921 cm^{-1} hubo señales que indican la presencia de grupos C-H, CH_2 y CH_3, a 1725 y 1719 cm^{-1} se tuvieron señales que indican vibraciones de alargamiento de C=O de COOH o COOR; las señales encontradas a 1637 y 989 cm^{-1} indican vibraciones de alargamiento de C=C de alquenos.

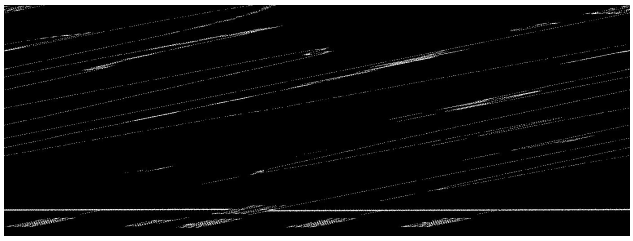
Las señales encontradas entre 3422 y 3448 cm^{-1} son anchas lo que indica que existen cantidades mayores de alcoholes en comparación a las de ácidos.

Se observó que a medida que aumenta la altitud la señal asignada a los dobles enlaces C=C (1637 y 989 cm^{-1}), se hace menos intensa por lo que se infiere que a mayores altitudes estos enlaces se van perdiendo (Figura 42).

1300-1600 m



1600-1800 m



1800-2000 m

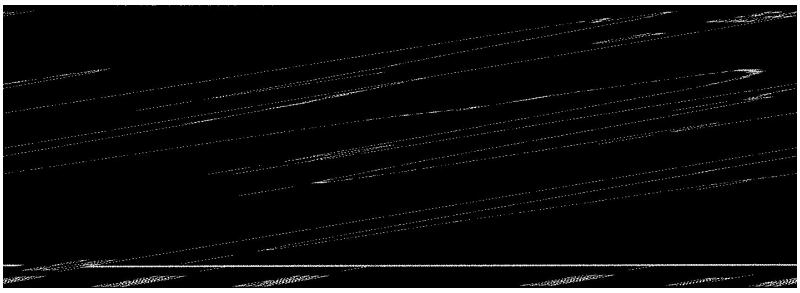


Figura 42. Espectros de los ácidos Fúlvicos del suelo de la RB El Cielo de distintos pisos altitudinales

Easy PDF Creator is professional software to create PDF. If you wish to remove this line, buy it now.