



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES ZARAGOZA

BIOMASA MICROBIANA DEL SUELO EN BOSQUES TEMPLADOS DE MÉXICO

T E S I S
QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE
B I Ó L O G A
P R E S E N T A:
ADRIANA MARCIAL GARCÍA

Director de tesis: Dr. Gerardo Cruz Flores

Proyecto financiado por DGAPA PAPIIT IN-228403



Marzo 2011



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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



...PORQUE EL DESTINO TE HA PUESTO EN MI CAMINO AUN Y A PESAR DE LAS MILES
DE PERSONAS QUE SOMOS EN ESTE PLANETA, POR ELLO SOY UNA MÁS DE LAS
AFORTUNADAS DE ESTE UNIVERSO ASTRAL, POR TENERTE A TÍ
iiiiSÍ, A TÍ UN SIN FIN DE GRACIAS!!!!

*Cuando dirigí la mirada hacia abajo, vi una artística rosa de
los vientos hecha de mármol rojo, verde y azul
que destacaba con el fondo blanco,
solo hasta entonces,
me encontré reconfortada con una seguridad nunca antes sentida.
Ahora realmente sabía a donde ir,
mis pasos serían más firmes y seguros para poder encontrar de nuevo el camino...
no el de regreso al lugar de donde provenía
más bien el anhelado desde hace tiempo...*



DEDICATORIA

A Dios

Por permitirme ser parte de este universo.

A ustedes padres

Jorge Marcial Flores y Delfa García

Por todos los momentos felices que me han dado, su cariño incondicional pero sobre todo las ganas de luchar y vivir cada momento de mi vida a pesar de las adversidades.

A Marítza Cítlalli

La razón de mi existencia.

Sin ti la dicha y la felicidad no serían completas, gracias amor por apoyarme todos los días.

A mis hermanos y hermana:

Jorge, Antonio, Javier y Claudia

A su lado he vivido hermosos momentos y malos ratos que han hecho de la vida una delicia; a sus esposas y esposo por ser el complemento de cada uno.

A mis sobrinos:

Los más esperados y queridos: Mónica, Jonathan, Omar, Areli, Axel, Brayán, Jorge, Perla, Yasmín y César.

Para tí Ubaldo:

Con cariño...desde el principio hasta el fin.

AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Nacional Autónoma de México

Por brindarme la oportunidad de ser parte de ella y permitirme crecer día con día en busca de un país mejor.

A la Facultad de Estudios Superiores Zaragoza

Por todos sus logros institucionales y de investigación además de ser parte de mi formación académica a nivel licenciatura.

A todos los profesores de la Carrera de Biología que me guiaron en el campo del conocimiento e investigación formando parte de mi educación y enseñanza dándome a probar las delicias de la Biología.

A los sinodales:

Biól. Elvia García Santos

Dr. Gerardo Cruz Flores

M. en C. Juana María de la Paz López

M. en C Miguel Castillo González

Biól. Juan Manuel Valderrábano Gómez

Por los comentarios hechos, los cuales ayudaron a enriquecer este trabajo.

Al Dr. Noé Manuel Montaña Arias por sus consejos y aportaciones para el mejoramiento del presente trabajo.

Al Biólogo Lucio Rodrigo Sánchez Durán por ser una persona extraordinaria, por su apoyo incondicional y toda su buena vibra. Mi más sincero agradecimiento por tu ayuda, tus comentarios y consejos, por compartir conmigo tus conocimientos pero más aún por ser una persona especial y saber que cuento contigo.

A los compañeros del Laboratorio de Análisis Químico y Bioquímico de Suelos y Plantas (L-8 PA) por el apoyo académico y experimental brindado pero especialmente al Dr. Gerardo Cruz Flores que ha sido más que mi mentor, un amigo, consejero y un gran contrafuerte que me ha permitido seguir de pie ¡¡MUCHAS GRACIAS!!

A mis amigos de toda la vida: Eduardo, Natividad, Fernando, Xochitl y las Zánganas, Guillermo Javier, Daniel (Joy) Brisa, Marta Santander (sin ti no lo habría logrado nena), Rosario y Lalo, Mari, Cande, Senovia, Elizabeth Morales, Gabi y Adriana que de alguna manera siempre han estado presentes, A TODOS los no mencionados en estas líneas pero que tienen un lugar en mi corazón. A los viejos y nuevos amigos por aceptarme tal cual soy.

Con cariño a ti Maria del Carmen Gonzáles, a tu familia por brindarme su amistad y confianza.

ÍNDICE TEMÁTICO

Temas	Página
Índice de Figuras	iv
Índice de Cuadros	vi
1. RESUMEN	1
2. ABSTRACT	2
3. INTRODUCCIÓN	3
4. MARCO TEÓRICO	5
4.1 Producción de CO ₂	5
4.2 Biomasa microbiana	6
4.3 Carbono orgánico del suelo	10
4.4 Materia orgánica del suelo	12
4.5 Coeficiente metabólico	13
4.6 Método por estimación cuantitativa	14
4.7 Calidad del suelo	15
4.8 Bosques templados	16
4.9 Características de los géneros <i>Abies</i> y <i>Pinus</i>	17
5. ANTECEDENTES	19
6. JUSTIFICACIÓN	20
7. HIPÓTESIS	20
8. OBJETIVO GENERAL	20
8.1 Objetivo particular	20
9. ZONAS DE ESTUDIO	21
9.1 Parque Nacional Iztaccíhuatl-Popocatepetl	21
9.1.1 Aspectos biológicos	21
9.2 Parque Nacional Benito Juárez	21
9.2.1 Aspectos biológicos	22
9.3 Reserva de la Biósfera Sierra de Manantlán	22
9.3.1 Aspectos biológicos	23
9.3.2 Bosque húmedo montano alto	23

9.3.3 Bosque húmedo montano bajo	23
9.4 Reserva de la Biósfera El Cielo	24
9.4.1 Aspectos biológicos	24
10. MATERIALES Y MÉTODOS	26
10.1 TRABAJO DE CAMPO	26
10.1.1 Selección de los sitios de muestreo	26
10.2.1 Muestreo	26
10.2 TRABAJO DE LABORATORIO	26
10.2.1 Análisis físicos de suelo	27
10.2.2 Análisis químicos de suelo	27
10.2.3 Análisis microbiológico de suelo	27
10.2.5 Diagrama de flujo	30
11. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	31
11.1 Descripción general de las condiciones fisiográficas en los sitios de estudio	31
a) Parque Nacional Iztaccíhuatl-Popocatepetl	31
b) Parque Nacional Benito Juárez	32
c) Reserva de la Biósfera Sierra de Manantlán	34
d) Reserva de la Biósfera El Cielo	36
11.2 Indicadores físicos del suelo	37
a) Parque Nacional Iztaccíhuatl-Popocatepetl	37
b) Parque Nacional Benito Juárez	38
c) Reserva de la Biósfera Sierra de Manantlán	39
d) Reserva de la Biósfera El Cielo	41
11.3 Indicadores químicos del suelo	45
a) Parque Nacional Iztaccíhuatl-Popocatepetl	45
b) Parque Nacional Benito Juárez	46
c) Reserva de la Biósfera Sierra de Manantlán	48
d) Reserva de la Biósfera El Cielo	49

11.4 Indicadores microbiológicos del suelo	54
a) Parque Nacional Iztaccíhuatl-Popocatepetl	54
b) Parque Nacional Benito Juárez	55
c) Reserva de la Biósfera Sierra de Manantlán	56
d) Reserva de la Biósfera El Cielo	57
12. CONCLUSIONES	64
13 BIBLIOGRAFÍA	65
14. ANEXOS	71
15. APÉNDICE	75

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura	Página
1. Diagrama esquemático de los almacenes y flujos de CO ₂ en el suelo	7
2. La radiación solar y la posición del paisaje	9
3. Microorganismos y disponibilidad del carbono	11
4. Representación del flujo de la materia orgánica del suelo y del carbono	13
5. Mapa que indica la localización de las zonas de estudio	25
6. Submuestras para la determinación de parámetros físicos, químicos y microbiológicos.	28
7. Destilador en serie para N-Kjeldhal	29
8. Medición del pH	29
9. Muestras de suelo para la determinación de CO ₂ y del carbono de la biomasa	29
10. Titulación del KOH con HCl	29
11. Bosque de <i>Pinus</i> y <i>Abies</i> . Parque Nacional Benito Juárez	32
12. Entrada a la Reserva de la Biosfera Sierra de Manantlán y la Estación Biológica "Las Joyas"	34
13. Vegetación secundaria y bosque de <i>Pino</i> y <i>Abies</i> . Parque Nacional Iztaccíhuatl-Popocatepetl	38
14. Porcentajes de arcilla-limo-arena y de espacio poroso	42
15. Conductividad eléctrica y porcentaje de humedad de las cuatro Áreas Naturales Protegidas	43
16. Grupos de suelo de las cuatro Áreas Naturales Protegidas	44
17. pH acuoso de las cuatro Áreas Naturales Protegidas	51
18. Nitrógeno total de las cuatro Áreas Naturales Protegidas	52
19. Porcentaje de Materia orgánica de las cuatro Áreas Naturales Protegidas	52

20. Carbono de la biomasa microbiana y producción de CO ₂ de las cuatro Áreas Naturales Protegidas	59
21. Producción de CO ₂ y contenido de carbono de la biomasa microbiana en base a las especies de pino localizadas en las cuatro Áreas Naturales Protegidas.	61
22. Razón C:N de las cuatro Áreas Naturales Protegidas	62

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro	Página
1. Influencia de los microorganismos sobre el ciclo de los nutrimentos y la estructura del suelo	8
2. Características principales de los sitios de trabajo en el Parque Nacional Iztacíhuatl-Popocatepetl	31
3. Características principales de los sitios estudiados del Parque Nacional Benito Juárez. Oaxaca	33
4. Principales características de los sitios de estudio en la Reserva de la Biósfera Sierra de Manantlán. Jalisco	35
5. Principales características de los sitios de trabajo de la Reserva de la Biosfera El Cielo. Tamaulipas	36
6. Parámetros físicos del suelo del Parque Nacional Iztaccíhuatl-Popocatepetl	37
7. Parámetros físicos de suelo del Parque Nacional Benito Juárez. Oaxaca	39
8. Propiedades físicas del suelo de la Reserva de la Biósfera Sierra de Manantlán. Jalisco	41
9. Parámetros físicos del suelo de la Reserva de la Biósfera El Cielo. Tamaulipas	42
10. Propiedades físicas del suelo de las cuatro Áreas Naturales Protegidas.	45
11. Parámetros químicos del suelo del Parque Nacional Iztaccíhuatl-Popocatepetl	46
12. Parámetros químicos del Parque Nacional Benito Juárez	47
13. Parámetros químicos de suelo de la Reserva de la Biósfera Sierra de Manantlán	49
14. Parámetros químicos de suelo de la Reserva de la Biósfera El Cielo	50
15. Promedios de los parámetros químicos de las Áreas Naturales Protegidas	53
16. Parámetros microbiológicos del Parque Nacional Iztaccíhuatl-Popocatepetl	54

17. Parámetros microbiológicos del Parque Nacional Benito Juárez.	55
18. Parámetros microbiológicos de la Reserva de la Biósfera Sierra de Manantlán	56
19. Parámetros microbiológicos de la Reserva de la Biósfera El Cielo	57
20. Parámetros microbiológicos de las cuatro Áreas Naturales Protegidas	58
21. Especies de Pino observados en las cuatro Áreas Naturales Protegidas	61

1. RESUMEN

La biomasa microbiana del suelo tiene una gran importancia en los ecosistemas forestales debido a su influencia en la regulación del carbono (C), la descomposición de la materia orgánica, la nitrificación, el ciclo de los nutrientes y como indicador de prácticas de manejo y uso del suelo. Con el objetivo de determinar si el Carbono de Biomasa Microbiana (CBM) y la producción de CO₂ pueden considerarse como indicadores de calidad del suelo, se llevó a cabo el presente estudio en los Parques Nacionales Iztaccíhuatl-Popocatepetl (Eje Neovolcánico) y Benito Juárez (Sierra Madre del Sur) y en las Reservas de la Biósfera El Cielo (Sierra Madre Oriental) y Sierra de Manantlán (Sierra Madre Occidental y Eje Neovolcánico) entre 800 y 3900 en sitios con dominancia de los géneros *Pinus* y *Abies*.

Del horizonte de “actividad biológica” se tomaron muestras de 0 a 10 cm de profundidad, para determinar el Carbono de la Biomasa Microbiana y producción de CO₂ por medio del método fumigación-incubación. Para el estudio de las propiedades físicas y químicas las muestras se colectaron a una profundidad de 0 a 20 cm del horizonte de “actividad geoquímica”.

Al comparar las zonas de estudio, los resultados reflejaron que los contenidos de CBM y la producción de CO₂ fueron altos en el Parque Nacional Iztaccíhuatl-Popocatepetl y en la Reserva de la Biósfera Sierra de Manantlán, ambas Áreas Naturales se desarrollan sobre material geológico volcánico y tienen grupos de suelo semejantes, el contenido de materia orgánica y carbono orgánico del suelo resultaron bajos. Por otra parte, la Reserva de la Biósfera El Cielo y el Parque Nacional Benito Juárez tuvieron altos contenidos de materia orgánica y carbono orgánico pero presentaron contenido de CBM y producción de CO₂ bajo, tienen grupos de suelo diferente y se desarrollan sobre material geológico sedimentario. La especie arbórea que se localizó en las cuatro zonas de trabajo fue *P. pseudostrobus*.

Palabras clave: *Materia orgánica, Carbono orgánico, Nitrógeno total, Carbono de la Biomasa Microbiana, producción de CO₂, bosques de Pinus y Abies y Calidad del suelo.*

2. ABSTRACT

Soil microbial biomass has important functions in forest ecosystems because its contribution to biogeochemical cycles, organic matter mineralization and nitrification so can be used as indicator of management practices and land use.

In order to determine whether microbial biomass carbon (MBC) and the production of CO₂ can be considered as indicators of soil quality, was conducted this study in the National Parks Iztaccíhuatl-Popocatepetl (Neovolcanic) and Benito Juárez (Sierra Madre del Sur) and the Biosphere Reserve El Cielo (Sierra Madre Oriental) and Sierra de Manantlán (Sierra Madre Occidental and Neovolcanic) between 800 and 3900 m and dominance of *Pinus* and *Abies*. Soil samples were taken from the most biologically active horizon (0 to 10 cm depth).

To evaluate the production of CO₂ and determine microbial biomass carbon content with fumigation-incubation method, soil samples were collected from the skyline with biological activity (0 to 10 cm deep). To study the physical and chemical properties, soil samples were collected skyline with geochemical activity (0 to 20 cm deep).

In Iztaccíhuatl-Popocatepetl National Park and Biosphere Reserve of Sierra de Manantlán, both geologic material of volcanic origin and similar soil group, the CBM content and CO₂ production were high and organic matter content and organic carbon soil were low. In Biosphere Reserve El Cielo and Benito Juárez National Park had high organic matter and organic carbon content but low production CBM and CO₂, in different soil groups with sedimentary geological material. The tree species was found in the four areas of work was *P. pseudostrobus*.

Keywords: *Organic matter, organic carbon, total nitrogen, microbial biomass carbon, CO₂ production, Pinus and Abies forests and soil quality.*

3. INTRODUCCIÓN

La medición de la biomasa microbiana del suelo, puede ser utilizada como un detector de estrés dentro de los ecosistemas forestales (Thirukkumaran *et al.*, 2002). El proceso de mineralización del carbono, la producción de CO₂ y la actividad de varias enzimas son indicadores de la actividad microbiana (Joergensen *et al.*, 1995; Law *et al.*, 1999; Powlson *et al.*, 2001). La actividad y biomasa microbiana están fuertemente relacionados con los parámetros químicos del suelo como pH, CIC, descomposición de la materia orgánica del suelo (MOS), movimiento y transformación de nutrimentos y también con los parámetros físicos, como temperatura, densidad y textura (Kye-Han y Shibu, 2003).

El carbono de la biomasa microbiana (CBM) representa del 1 al 3% del C-orgánico total y la respiración del suelo puede considerarse como una alternativa para la evaluación del CBM y de los cocientes metabólicos ($q\text{CO}_2$, $\text{C-CO}_2/\text{C-biomasa}$), mientras que el CO₂, producto del proceso de mineralización del C del suelo representa del 40 al 80% de la respiración del bosque (Blagodatskaya y Anderson 1998; Sparling *et al.*, 1992).

Los bosques templados, después de las zonas áridas (desiertos), son el ecosistema con mayor cobertura en México (20% de la superficie territorio nacional que representa aproximadamente 410,000 km²). La mayoría de los bosques templados se distribuyen de 1,200 a 3,000 msnm, principalmente en las grandes cadenas montañosas, como la Sierra Madre Oriental y la Sierra Madre Occidental, el Eje Neovolcánico (que incluye al volcán Ajusco y Chichinautzin al sur de la Ciudad de México) y la Sierra del Sur en Oaxaca y Chiapas. Los bosques más cerrados y sólidos, compuestos por encinos y pinos están a lo largo de la Sierra Madre Occidental, desde Chihuahua y Durango hasta el Eje Neovolcánico en el centro del país. La diversidad de materiales geológicos y fenómenos tectónicos presentes en estos sistemas orográficos han propiciado una diversidad de condiciones morfológicas, topográficas y edáficas que no limitan el desarrollo de bosques de pino, los cuales actualmente sufren una fuerte explotación y presión por deforestación, tala

clandestina, incendios forestales, plagas y enfermedades que reducen el rendimiento maderable y la conservación de la biodiversidad.

Por desarrollarse en climas sub-húmedos, los bosques templados, incluyen otras especies muy importantes de coníferas como los oyameles, juníperos y cipreses (Vargas, 1984; Patrick *et al.*, 2005).

La estimación de la biomasa microbiana se puede utilizar para detectar pequeños cambios en la materia orgánica total del suelo, producidos por los cambios en el manejo del suelo. En particular los cocientes C-microbiano:N total, C-orgánico:N son considerados como fáciles indicadores para el monitoreo en los cambios de la calidad del suelo (Vance *et al.*, 1987; Mahía *et al.*, 2006). La calidad del suelo incluye las propiedades de éste y los procesos funcionales que mantienen su fertilidad. La construcción de índices facilita la comparación entre indicadores con unidades disímiles con la finalidad de detectar suelos con mejor calidad por lo que en este trabajo se busca determinar si el CBM y la mineralización de C (producción de CO₂) son buenos indicadores de calidad del suelo en bosques templados de México que se han desarrollado sobre distinto material geológico.

4. MARCO TEÓRICO

4.1 PRODUCCIÓN DE CO₂

La producción de CO₂ del suelo es importante porque representa de 40 a 80% de la respiración del bosque y es uno de los principales procesos a considerar para determinar el balance de C. Esta producción esta determinada por la suma y tipo de fuente (respiración autótrofa y heterótrofa) así como por la distribución en el perfil del suelo, materia orgánica y raíces. En general la producción de CO₂ disminuye en suelos con muy bajo o muy alto contenido de agua. La disminución en suelos con bajo contenido de agua se da por la inhibición microbiana del suelo y por la baja actividad metabólica de las raíces, mientras que en un suelo con alto contenido de agua, la reducción se debe a la falta de oxígeno o a la alta acumulación de CO₂ en el espacio poroso del suelo, el cual está ocupado por agua (Joergensen *et al.*, 1995; Law *et al.*, 1999).

La difusión de CO₂ decrece con la profundidad del suelo y estación del año (época de sequía o lluvia). Los valores de difusión para algunos suelos forestales varían desde 7 mm² s⁻¹ sobre la superficie del suelo hasta 2 mm² s⁻¹ a 50 cm de profundidad. La difusión de CO₂ en suelos de bosque es relativamente rápida comparado con los cambios en la producción de CO₂. En ecosistemas con suelo podzólico y pH bajo la difusión líquida manifiesta un menor efecto en el transporte de CO₂.

La producción y el transporte de CO₂ dependen, tanto de las características de la región, como de la heterogeneidad y variabilidad temporal. La mayor parte del CO₂ es producido por respiración de bacterias, actinomicetos, algas, hongos micorrízicos y no-micorrízicos además de las raíces. Los procesos como la producción de CO₂ y las actividades de varias enzimas como la deshidrogenasa o la fosfatasa pueden ser usadas también como indicadores de actividad microbiana (Powlson *et al.*, 2001, Sandoval-Pérez *et al.*, 2009).

Diversos autores han desarrollado relaciones empíricas para predecir los flujos de CO₂ relacionando la temperatura, el contenido de agua y la fracción mineral del suelo; mientras que otros han mostrado que el déficit de humedad reduce la

respiración de las raíces hasta un 17% y también han indicado que la respiración heterotrófica disminuye más que la respiración autotrófica durante amplias sequías en bosques templados (Jassal *et al.*, 2004).

En la mineralización del C están implicados el CO₂ atmosférico y el almacenado en la MOS, posteriormente éste formará parte del almacén de carbono del suelo permaneciendo en él por largos periodos de tiempo al estabilizarse en el interior de los micro-agregados.

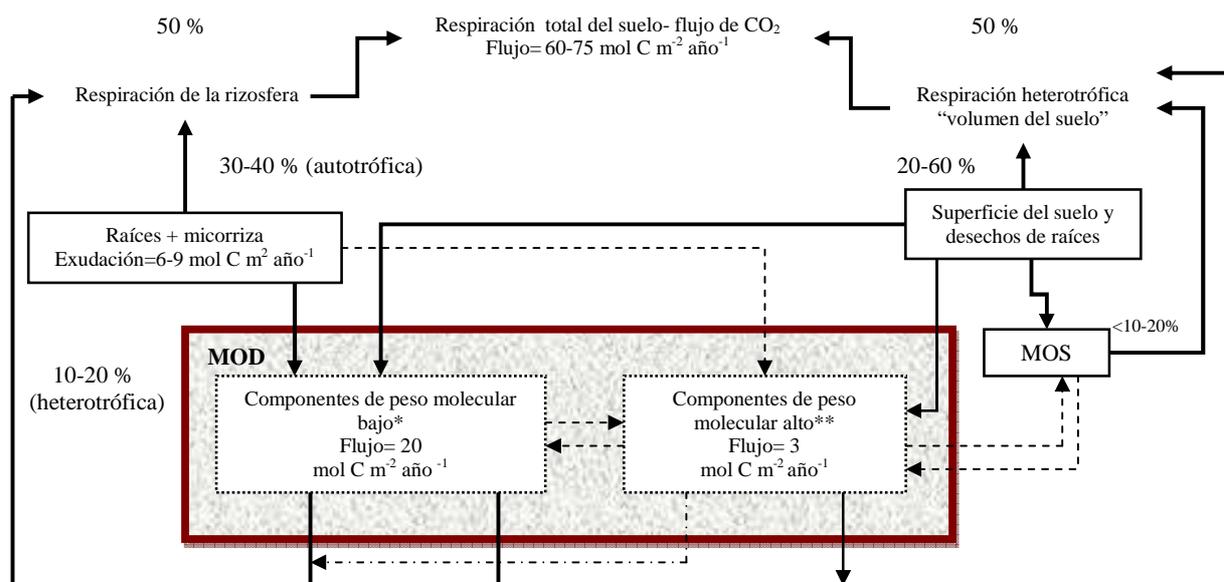
4.2 BIOMASA MICROBIANA

La biomasa microbiana es el tamaño total de la población de microorganismos del suelo (Powlson *et al.*, 2001). La respiración del suelo puede ser funcionalmente dividida en respiración autotrófica en donde el CO₂ es asimilado a través de la fotosíntesis que lleva acabo la vegetación, posteriormente este C es emitido o desprendido durante la respiración de la biomasa, raíces y micorrizas mientras que en la respiración heterotrófica, el CO₂ es desprendido por los microorganismos y animales durante la descomposición de los substratos de C.

La respiración total del suelo (autotrófica + heterotrófica) se encuentra en los rangos de 60-75 mol C m⁻² año⁻¹ que corresponden al 70% del total de la respiración del ecosistema y equivale del 0.5-1% de C en el perfil del suelo (3000-10 000 mol C m⁻² para una profundidad de 0-100 cm) (Figura 1). La mayor parte de la respiración heterotrófica, normalmente se atribuye al tamaño de las raíces libres del suelo. El C producto de esta respiración proviene de hojas, raíces muertas y humificación de la MOS. La difusión de compuestos bio-aprovechables para la rizósfera y la suma de las exudaciones de los hongos y bacterias permite una adición a esta respiración. La contribución relativa de las diferentes fracciones de MOS a la producción de CO₂ del suelo es limitada, los almacenes de C lábil y activo incluyen como principales aportadores a los aminoácidos, lípidos, azúcares, ácidos nucleicos y productos de la descomposición de la MO (Patrick *et al.*, 2005).

La respiración basal bajo condiciones controladas indica el rango potencial de mineralización, mientras que la respiración del suelo es un indicador para el rango real de mineralización de la MOS en los ecosistemas forestales.

Sin embargo la respiración del suelo es solamente un parámetro semi-cuantitativo debido a que el contenido de nutrientes es variable y las proporciones de MO degradada está principalmente sobre el perfil del suelo (Borken *et al.*, 2002).



MOD=materia orgánica disuelta

*Componentes de bajo peso molecular: ácidos orgánicos, aminoácidos, azúcares simples etc.

**Componentes de alto peso molecular: compuestos recalcitrantes.

Figura 1. Diagrama esquemático de los almacenes (cajas) y flujos de CO₂ (flechas) en el suelo (Patrick, 2005).

Al combinar la medición de la biomasa microbiana del suelo y producción de CO₂ se obtienen índices sensibles para medir la actividad microbiana y la respiración del suelo. Ambas pueden usarse como indicadores de estrés; por ejemplo, en la contaminación causada por metales (Thirukkumaran *et al.*, 2002). Además, la biomasa microbiana del suelo representa un almacén lábil de nutrientes provenientes de la MOS y puede ser utilizada como índice del estatus biológico y de la fertilidad del suelo, pero también como un indicador en prácticas de manejo (Aslam *et al.*, 1999).

Los microorganismos del suelo contribuyen al flujo del nitrógeno (N), al cambio del ambiente y a controlar las poblaciones de otros organismos; así la micro, meso y macrofauna son claramente esenciales ya que tiene un impacto importante en el suelo (Powlson *et al.*, 2001) (Cuadro 1).

Cuadro 1. Influencia de los microorganismos sobre el ciclo de los nutrimentos y la estructura del suelo (Linden *et al.*, 1994).

	Ciclo de los nutrimentos	Estructura del suelo
Microflora	Cataboliza la materia orgánica. Mineraliza e inmoviliza nutrimentos.	Produce compuestos orgánicos, que hace que los agregados se peguen. Las hifas enredan las partículas en los agregados.
Microfauna	Regula la población bacteriana y fúngica. Altera el cambio en los nutrimentos.	Puede que afecte la estructura de los agregados complementando las interacciones con la microflora.
Mesofauna	Regula las poblaciones fúngicas y de la micro fauna. Altera el cambio en los nutrimentos. Fragmenta los residuos.	Produce pelotitas fecales. Crea bio-poros. Promueve la humificación.
Macrofauna	Fragmenta los residuos. Estimula la actividad microbiana	Mezcla las partículas orgánicas y minerales. Redistribuye la materia orgánica y los microorganismos. Crea bio-poros. Promueve la humificación. Produce pelotitas fecales.

Las poblaciones de microorganismos disminuyen con la acidificación del suelo, así; los cambios de acidez en la comunidad microbiana promueven el aumento de los hongos y la disminución de las bacterias esto debido principalmente a que no encuentran competencia alguna y pueden ocupar nuevos nichos (Borken *et al.*, 2002).

La fauna microbiana actúa como escavadora, origina la descomposición de MOS y transforma los nutrimentos que afectan el crecimiento y vitalidad de los árboles.

El papel de la micro fauna (protozoa y nemátoda) ha sido extensamente estudiada y muchos de estos estudios indican que la predación estimula el aumento del N a partir de N ya mineralizado, siempre y cuando la protozoa estuviera presente, sin embargo esto no se ha observado universalmente (Powlson *et al.*, 2001) por otra parte la lombriz de tierra puede aumentar la producción de CO₂, decrecer la biomasa microbiana e incrementar la mineralización del suelo.

La calidad y cantidad del mantillo en los pisos forestales puede afectar el estatus, las sustancias y textura para el crecimiento de la biomasa microbiana en suelos naturales. La humedad y la temperatura afectan la actividad microbiana y como consecuencia el regreso de su biomasa al suelo (Figura 2).

Los terrenos escarpados se caracterizan por tener pocos espacios para el agua del suelo y bajas concentraciones de carbono orgánico disuelto (COD) por lo que éstas pueden ser dos razones que limitan la actividad microbiana. De la misma forma, la posición del paisaje influye en el agua del suelo y en la concentración de agregados de C en suelos volcánicos, afectando de este modo la dinámica del C. Esto puede explicar la razón de un bajo aprovechamiento de C microbiano que ocurre en suelos inclinados y acantilados en donde predominan las comunidades de *pino-encino*. Estudios anteriores han demostrado que los almacenes de CBM en el suelo responden a entradas de material orgánico exógeno y a prácticas de manejo del suelo. Cuando el suelo permanece en condiciones estables por largos periodos, el tamaño del almacén del CBM puede alcanzar el equilibrio con el abastecimiento del sustrato que esta en el suelo (Xu *et al.*, 2006).

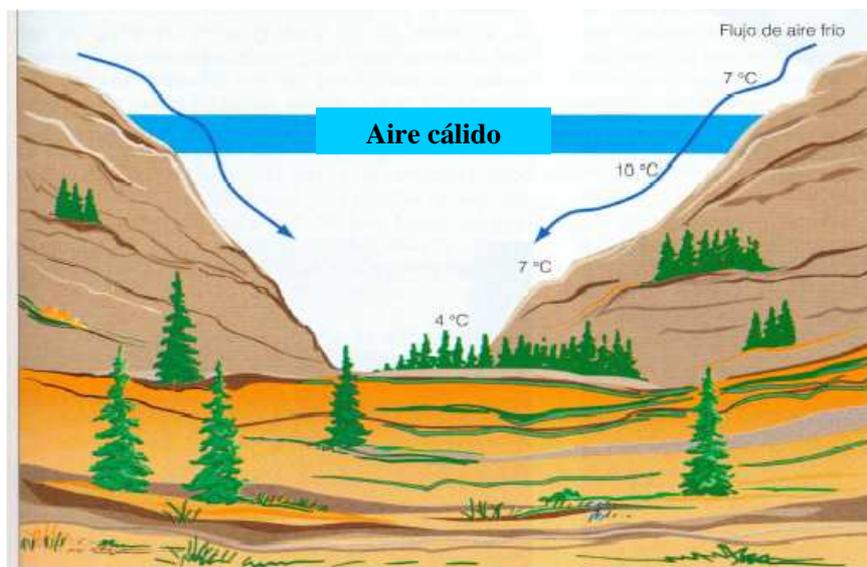


Figura 2. La radiación solar (temperatura-humedad) y la posición del paisaje influyen en el aprovechamiento del carbono orgánico del suelo (Smith y Smith 2001).

4.3 CARBONO ORGÁNICO DEL SUELO

El C del suelo, especialmente en su forma orgánica es un extenso almacén que globalmente excede al de la biomasa y al que esta en la atmósfera. Sin embargo éste se dispersa sobre amplias áreas disolviéndose (COD) y rara vez rebasa concentraciones mayores al 3%.

El COS es determinante en la fertilidad del suelo. Mantener una alta concentración de COS es importante por numerosas razones. Directamente afecta el ciclo de los nutrientes, la producción de biomasa e indirectamente al nitrógeno total del suelo (NTS) y también influye en la retención de agua, crecimiento de las plantas y la calidad ambiental; impacta en la capacidad de intercambio de cationes, en razones estequiométricas con el N, es susceptible a la mineralización; en su forma orgánica es convertido a CO₂ que retorna a la atmósfera en proporción con el desprendimiento del N del suelo (Holeplass *et al.*, 2004; Tieszen *et al.*, 2004).

La concentración de COS en la superficie del estrato por lo general aumenta con el incremento de bio-sólidos aunque también depende de la composición del suelo, los regimenes de temperatura, el aprovechamiento de los nutrientes (N, P, K, S), la textura del suelo y el clima.

La biomasa microbiana es la reserva lábil de C-orgánico; por su rápido recambio es fuente de nutrimentos para las plantas por lo que es una variable importante para evaluar en la relación suelo-planta (Jenkinson y Ladd, 1981; Xu y Inubushi, 2004) (Figura 3). La razón entre C microbiano con COS (C-microbiano:C-orgánico), tiene una función clave en la disponibilidad de C en suelos de bosques, ambos responden rápidamente a efectos de disturbio y previenen con eficacia del calentamiento y el deterioro de la calidad del suelo (Blagodatskaya y Anderson, 1998). El total de COS en los reservorios del suelo se ha estimado en 1550×10^{15} g C y hasta 750×10^{15} g presentes como C inorgánico (Patrick *et al.*, 2005). Se ha observado que las comunidades microbianas desprenden más C-CO₂ por unidad biomasa y por unidad tiempo bajo condiciones de suelos forestales ácidos que en comunidades con rangos de pH más neutro.

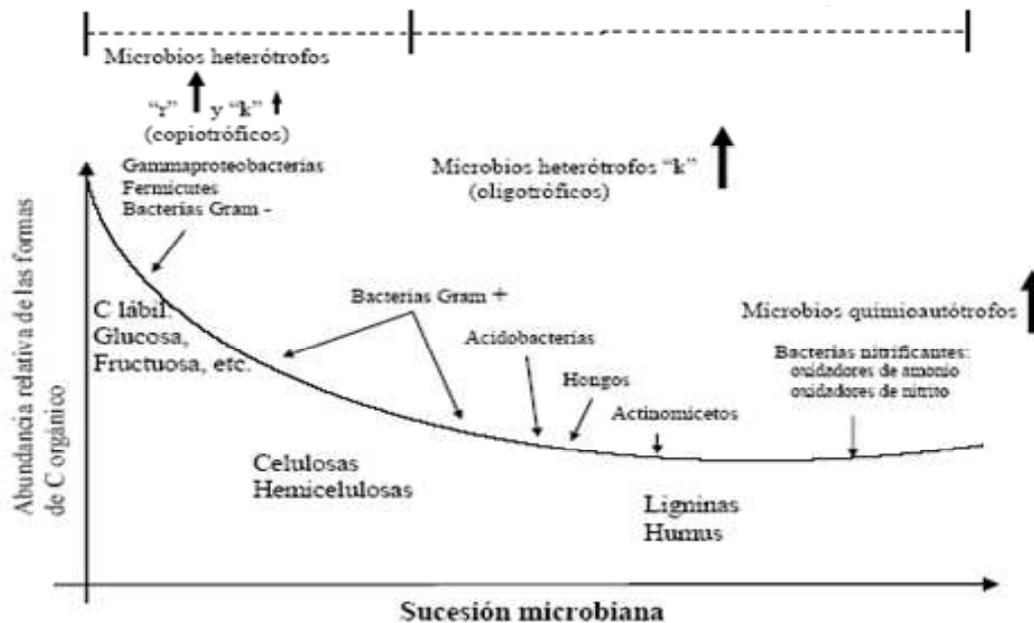


Figura 3. Microorganismos y disponibilidad de carbono lábil y recalcitrante (Montaño *et al.*, 2008).

Al igual que otros factores, los ecosistemas con alta biodiversidad secuestran más C en el suelo y en la biota que aquellos con reducida biodiversidad, por lo que ésta tiene un impacto positivo en el almacén de C.

En investigaciones recientes, una de las opciones para incrementar el secuestro del C en el suelo es aumentar su entrada al interior del mismo dado que una elevada presión parcial de CO₂ (pCO₂) atmosférico aumenta la producción de las plantas y distribución de fotosintatos hacia los componentes que están por debajo del suelo, sin embargo; estos incrementos son muy pequeños para los almacenes de C del suelo (Xie *et al.*, 2005).

4.4 MATERIA ORGÁNICA DEL SUELO

El carbono en la MOS constituye más del 80% del reservorio del C terrestre. El secuestro del C en la materia orgánica del suelo ha sido identificado por el Panel Intergubernamental del Cambio Climático (IPCC por sus siglas en inglés) como una opción para moderar el incremento de CO₂ atmosférico. Bajo un potencial elevado pCO₂ se incrementa la producción neta primaria, la relación C:N y el empuje de C al suelo proporcionando oportunidades para secuestrar CO₂-C en el suelo y mitigar el CO₂ antropogénico (Lal, 2004; Xie *et al.*, 2005; Xingkai *et al.*, 2006).

El volumen contenido de MOS se puede medir fácilmente por métodos convencionales en diferentes grados de tiempo. Sin embargo, el contenido de materia orgánica total del suelo (MOTS) en los minerales del suelo equilibrada en el interior por décadas o siglos ha sido alterado por cambios ambientales y condiciones inducidas por el uso y manejo de la tierra incrementando o disminuyendo los reservorios de C del suelo y son estadísticamente difíciles de diferenciar junto con la extensa MOS que no es afectada. Por lo tanto, la identificación de fracciones de MOS más sensibles ayuda a dilucidar cambios y trayectorias en el uso y manejo del suelo. La identificación de cada fracción puede servir como indicador o herramienta de verificación para las transformaciones del COS en un cierto periodo y dar respuesta a los almacenes de C según el Protocolo de Kyoto.

Las fracciones de MOS retornan a través del tiempo como materia orgánica particulada (MOP) o fracción de luz (FL) y materia orgánica disuelta (MOD), a menudo responden más rápidamente a cambios de manejo inducidos en el almacén de COS que son más estables con la fracción mineral. Las fracciones de MOD y MOP son representantes en cierto modo del material de las plantas que se descomponen y la descomposición avanzada; estas características permiten un escenario en el proceso de humificación (Figura 4).

Al unir los resultados del volumen, densidad de separación de los suelos y dinámica de los agregados, se fortalece el potencial de flujo de la MOD y la MOP, útiles indicadores para los cambios en el C del suelo (Leifeld y Kögel-Knabner, 2005).

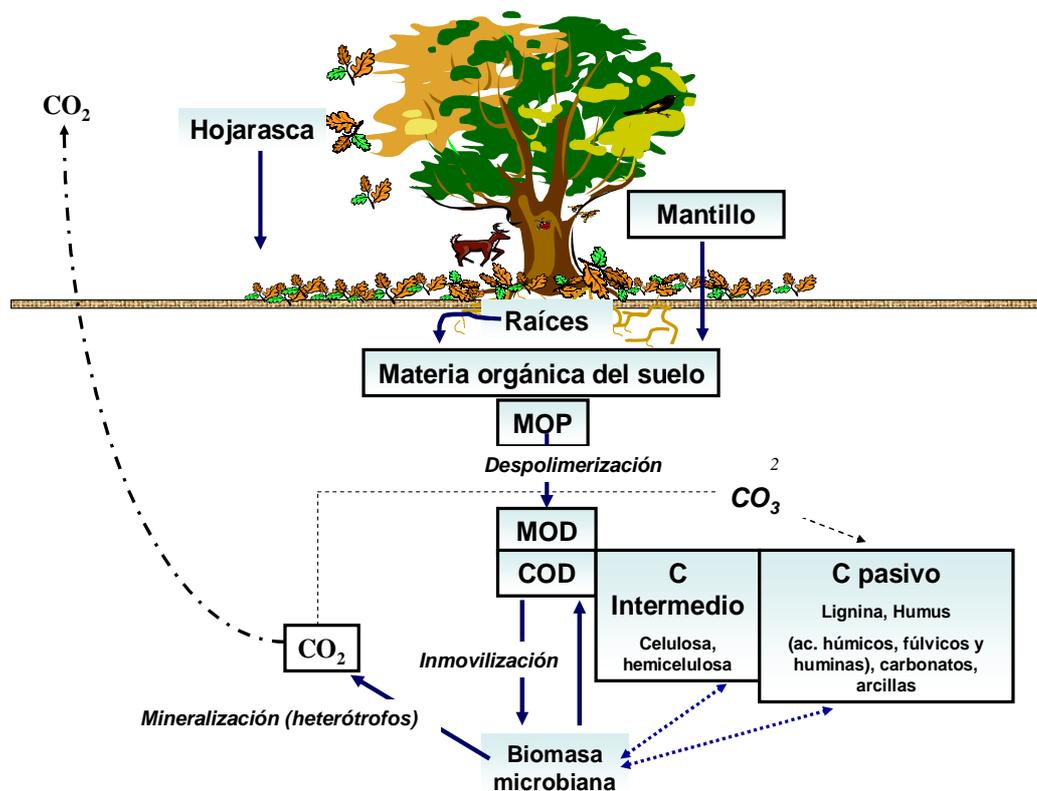


Figura 4. Representación del flujo de la materia orgánica del suelo y del carbono (Montaño *et al.*, 2009).

4.5 COCIENTE METABÓLICO

El cociente metabólico ($q\text{CO}_2$) indica la eficiencia microbiana en el uso de C para intensificar la mineralización de materia orgánica con impacto sobre la fertilidad del suelo y la misma estructura de la comunidad microbiana, pero este cociente no puede reflejar desarrollo y disturbios del ecosistema. El CBM puede ser 1 a 3% del C-orgánico total y la respiración del suelo puede considerarse como alternativa de evaluación del CBM y de los cocientes metabólicos ($q\text{CO}_2$, $\text{C-CO}_2/\text{C-biomasa}$) (Blagodatskaya y Anderson 1998; Sparling *et al.*, 1992).

En suelos de origen volcánico se sabe que los complejos metal-húmicos son resistentes a la descomposición microbiana por lo que pueden formar como una especie de protección física contra una crisis microbiana.

En suelos forestales de origen volcánico el $q\text{CO}_2$ varía de 31.7 a 78.3 mg C- CO_2 g⁻¹ C-biomasa d⁻¹ sin embargo, se ha observado que los valores de $q\text{CO}_2$ menores proponen cocientes metabólicos 95 mg C- CO_2 g⁻¹ C-biomasa d⁻¹ en suelos arables desarrollados en depósitos volcánicos recientes (Xu *et al.*, 2006), Por su parte, valores altos de $q\text{CO}_2$, C:N y C-orgánico soluble reflejan dificultades en el uso del sustrato orgánico por la biomasa microbiana. En este sentido una biomasa microbiana baja puede ser característica de estrés o disturbio y ambos factores pueden inducir el aumento de $q\text{CO}_2$. También un aumento del $q\text{CO}_2$ debido a la acidez puede ser considerado como indicativo de estrés en comunidades microbianas de suelos forestales. La calidad y descomposición del mantillo en el suelo se asocia con el pH, C-orgánico soluble y relación C:N parámetros que afectan al $q\text{CO}_2$. La composición de la población microbiana es otro factor que puede explicar; a través de las relaciones hongo/bacteria y autóctonos/zimogénos como se afecta al valor de $q\text{CO}_2$ (Mahía *et al.*, 2006).

4.6 MÉTODO POR ESTIMACIÓN CUANTITATIVA

El método por estimación cuantitativa de CBM está basado originalmente en el uso de la fumigación con cloroformo, el cual mata las células vivas del suelo, siguiendo después una incubación durante la cual una nueva población descompone las células muertas que les proporciona suficiente C para sus actividades y que es devuelto posteriormente como CO_2 , en otras palabras la respiración del suelo en un corto plazo y en suma la rápida descomposición del sustrato dan los rangos de la producción de CO_2 que esta correlacionado con el C contenido en la biomasa.

La biomasa microbiana es usada para detectar pequeñas variaciones en la materia orgánica total del suelo como resultado de cambios en su manejo (Vance *et al.*, 1987, Powlson *et al.*, 2001). Uno de los principales problemas para calcular la respiración del suelo es que está influenciada por varios factores que interaccionan entre sí (temperatura del suelo, textura, cantidad de C, densidad de raíces, tamaño y estructura de la comunidad microbiana; además del tipo de vegetación, estado nutrimental y rango de crecimiento) por lo que en la mayor parte del ecosistema

forestal los rangos de respiración del suelo son temporalmente elevados y espacialmente variables (Patrick *et al.*, 2005).

4.7 CALIDAD DEL SUELO

La preocupación por la calidad del suelo no es nueva. Numerosos autores se han preocupado por el tema, en el pasado los suelos de buena calidad eran considerados como aquellos que permitían maximizar la producción y minimizar la erosión entre otros efectos ambientales adversos (Doran *et al.*, 1994). Recientemente se ha tenido la necesidad de calcular las propiedades del suelo debido al aumento del interés público por determinar las consecuencias de las prácticas de manejo del suelo relacionadas con la sustentabilidad de los ecosistemas forestales y la productividad de las plantas. Las características que han sido propuestas como indicadores de calidad del suelo son numerosas (físicas, químicas, bioquímicas y biológicas), por ello su identificación e interpretación se favorece mediante el uso de estadística multivariada herramienta importante en el análisis de datos.

El concepto de la calidad del suelo es un indicador de sustentabilidad debido a que incluye la valoración de las propiedades físicas y químicas del suelo y los procesos relacionados a la capacidad del mismo para llevar a cabo y con eficacia las funciones que mantienen en buen estado al ecosistema, además de que estas propiedades representan cambios y oportunidades para la elaboración de programas enfocados al manejo sustentable (Doran y Parkin, 1994; Schoenholtz *et al.*, 2000).

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

- ↳ La productividad, que es la capacidad de un suelo para mantener la producción vegetal y biológica sin perder sus propiedades físicas, químicas y biológicas;
- ↳ La calidad ambiental que tiene que ver con la disposición del suelo para atenuar los efectos relacionados con los contaminantes ambientales, patógenos, y cualquier posible daño hacia el exterior del sistema y

- ↳ La salud que se refiere a la capacidad de un suelo para producir alimentos sanos para los seres humanos y otros organismos.

Un indicador de calidad de suelos se concibe como una herramienta de medición que debe dar información sobre las propiedades, procesos y características. Los indicadores se miden para dar seguimiento a los efectos del manejo sobre el funcionamiento del suelo en un periodo dado. Ellos pueden ser variables cualitativas o cuantitativas o índices compuestos por la relación entre diferentes variables.

El índice de la calidad el suelo es requerido para la identificación de problemas en áreas de producción, elaborar estimaciones reales de la producción de alimentos, cambios en el monitoreo, sustentabilidad y calidad del ambiente como el relacionado al manejo de la agricultura y valoración del uso de políticas sobre el uso de suelo (Aon *et al.*, 2001).

Algunas dificultades en la valoración de la calidad del suelo y de sus propiedades que pueden servir como indicadores de su funcionamiento son muy complicados por la multiplicidad biológica y factores físico-químicos que controlan los procesos biogeoquímicos y que varían en el tiempo y espacio.

4.8 BOSQUES TEMPLADOS

Entre los ecosistemas forestales más estudiados se encuentran los bosques boreal y templado y su importancia radica en que se encuentra una considerable cantidad de C almacenado en sus suelos en una proporción aproximada de 440-620X10¹⁵ g C en forma de carbonatos (Patrick *et al.*, 2005). El C en la atmósfera ha aumentado enormemente desde la Revolución Industrial debido al incremento de actividades contaminantes que el ser humano lleva a cabo y que contribuyen al calentamiento global del planeta.

Los bosques, por lo tanto, son importantes reguladores de la calidad del aire, disminuyen el calentamiento global, son proveedores de agua, la cual captan de la atmósfera al atraer la lluvia y captar la humedad del ambiente. Son importantes productores de suelo, a través de la interacción y desarrollo de la biota que al morir genera desechos (hojas, animales muertos, frutos, ramas) que caen al suelo y son descompuestos por los microorganismos.

Los bosques templados son el segundo ecosistema de mayor cobertura en México, éste incluye varios tipos de vegetación, pero predominan las comunidades de pino y encino o una mezcla de ambos. Se calcula que existen alrededor de 50 especies diferentes de pinos y cerca de 150 especies de encinos. A estas regiones de bosque también se les denomina zonas templadas y dentro de ellas hay regiones muy limitadas como son la vegetación alpina, que se ubican por encima de 3,100 metros de altitud en las faldas de los grandes volcanes como el Popocatepetl, el Iztaccíhuatl y el Citlatepetl.

La mayoría de los bosques templados se distribuyen de 1,200 a 3,000 msnm y esto hace que se encuentren distribuidos en las grandes cadenas montañosas, como la Sierra Madre Oriental y la Occidental, el Eje Neovolcánico (que incluye al volcán Ajusco y Chichinautzin al sur de la Ciudad de México) y las sierras del sur en Oaxaca y Chiapas. Los bosques más cerrados y sólidos, compuestos por encinos y pinos están a lo largo de la Sierra Madre Occidental, desde Chihuahua y Durango hasta el Eje Neovolcánico en el centro del país. Por desarrollarse en climas sub-húmedos los bosques templados, incluyen otras especies de coníferas como los oyameles, juníperos y cipreses. La altura del dosel es variable, pero en general oscila entre 8 y 25 metros pero pueden llegar a alcanzar los 40 metros. También hay pinos enanos que viven en ciertas zonas aisladas y sujetas a fuertes vientos. Este es el caso del *Pinus culminicola*, que vive en el cerro del Potosí en Nuevo León y que forma un bosque único en el mundo (Vargas, 1984).

4.9 CARACTERÍSTICAS DE LOS GÉNEROS *ABIES* Y *PINUS*

Género *Abies*

Presenta ramas verticales y extendidas que se cortan gradualmente formando una copa piramidal o cónica. Su corteza es áspera y agrietada de color grisáceo. Generalmente alcanza una altura de 35 a 45 m y diámetros de 1 a 1.5 m.

El desarrollo de conos en *Abies religiosa* se efectúa en un año porque las yemas florales aparecen en diciembre, alcanzando su desarrollo en marzo y abril con su polinización, la maduración es en agosto y septiembre. La producción de conos masculinos de *Abies religiosa* es lateral en las ramillas de la parte baja del árbol. Los

conos femeninos se observan en la misma época en las ramillas más altas, son cilíndricos-oblongos, de aproximadamente 7 cm de largo. El embrión es lineal, cilíndrico, de color crema y colocado longitudinalmente en el centro de la semilla. Los cotiledones son mucho más cortos que la radícula, la cual está dirigida al micrópilo. La semilla presenta abundante endospermo, haploide, externo, carnoso, resinoso y opaco.

El bosque de *Abies* está confinado a sitios de alta montaña, por lo común de 2,400 a 3,600 msnm, pues entre estas cotas se localiza más o menos el 95% de la superficie que ocupa, a menudo en laderas de cerros, protegido de vientos fuertes y de insolación intensa. También se hallan entre cañadas o barrancas que ofrecen un microclima especial (Challenger, 1998).

Género *Pinus*

Las especies de los pinos se caracterizan por la disposición de sus hojas perennes en fascículos, en las plántulas están implantadas de forma independiente, dispuestas en espiral sobre el tallo. Después de uno o dos años de crecimiento producen sus hojas en haces o fascículos, que contienen cada uno un número característico de hojas alargadas y aciculares. Un fascículo de agujas es una rama de crecimiento limitado (Rivera, 1989). Los frutos son piñas formadas por escamas leñosas insertadas en un eje, estas escamas encierran dos semillas que se abren a los dos o tres años para diseminarlas. Las semillas o piñones tienen forma ovoide y están provistos, generalmente, por un ala membranosa. Los bosques de coníferas ocupan el 15% del territorio del país y más de 9 de cada 10 de estos corresponden a los bosques de *Pinus* y *Pinus-Quercus*, más que de *Juníperus* y *Abies* (Rzedowski, 1978).

5. ANTECEDENTES

Es bien conocido que los microorganismos del suelo responden directamente a los cambios ambientales y son capaces de crecer rápidamente en condiciones favorables. Sin embargo, la vegetación forestal puede afectar los procesos microbianos asociados con los ciclos del C, N y P en suelos desarrollados sobre cenizas volcánicas debido a las discrepancias en la calidad y cantidad de mantillo y las propiedades del suelo (Xu *et al.*, 2006).

Los microorganismos del suelo son agentes transformadores de la MOS y ésta es de gran importancia debido a que influye en las propiedades químicas, físicas y bioquímicas del suelo, crea un medio favorable para las reacciones biológicas y es soporte de la vida; además representa un almacén importante de carbono orgánico (CO); el cual es determinante en la fertilidad del suelo porque impacta en la capacidad de intercambio de cationes y en razones estequiométricas del N, es susceptible a la mineralización, y en su forma orgánica es convertido a CO₂ que retorna a la atmósfera en proporción con el desprendimiento del N del suelo (Tieszen *et al.*, 2004; Montaña *et al.*, 2007).

El CBM y la respiración basal del suelo ($q\text{CO}_2$), pueden ser consideradas como una alternativa para medir los cambios en la biomasa microbiana como respuesta a perturbaciones y modificaciones ambientales. El $q\text{CO}_2$ indica la relativa eficiencia de los microorganismos del suelo para hacer uso del C durante un periodo corto de incubación y de su intensidad de mineralización por lo que se espera pueda ser utilizado como un índice de calidad en suelos asociados con bosques templados en México de una manera simple y eficiente, permitiendo comparar una condición específica de calidad con otra, donde haya ocurrido una u otra condición aun siendo muy diferentes en su naturaleza, por lo que el índice debe ser sensible al cambio e indiferente al agente que lo provoca.

6. JUSTIFICACIÓN

La actividad biológica del suelo impacta favorablemente en su estructura y contribuye a equilibrar el contenido de C en los diferentes componentes de la biósfera terrestre. Dicho balance se ve reflejado en la productividad del ecosistema. Lal (2004) y Patrick *et al.* (2005) establecieron que la pérdida de suelo debido a las prácticas de manejo y su uso están consideradas dentro de las principales causas del cambio climático debido a que modifican la población de los microorganismos edáficos, afectan la calidad y cantidad de MO que retorna al suelo y como consecuencia la entrada y permanencia del carbono en el almacén del suelo por periodos más prolongados, por lo que con ésta investigación se pretende conocer la importancia de realizar estudios de la actividad microbiana del suelo a través de la producción de CO₂ en ecosistemas forestales.

7. HIPÓTESIS

El carbono de la biomasa microbiana y la producción de CO₂ son parámetros sensibles a los cambios de manejo sobre el suelo y vegetación, por lo que pueden utilizarse como indicadores de la calidad del suelo de diferentes bosques templados.

8. OBJETIVO GENERAL

Determinar el contenido de carbono de la biomasa microbiana y la producción de CO₂ y su aplicación en la determinación de la calidad de suelos forestales en cuatro bosques templados bajo una cobertura de *Pinus* y *Abies*.

8.1 OBJETIVO PARTICULAR

- ❖ Comparar el contenido de la biomasa microbiana y la producción del CO₂ emitido por los microorganismos del suelo en cada una de las cuatro Áreas Naturales Protegidas, considerando las especies arbóreas predominantes y grupos de suelo.

9. ZONAS DE ESTUDIO

9.1 PARQUE NACIONAL IZTACCÍHUATL-POPOCATÉPETL

Se ubica dentro del Eje Volcánico Transversal y cuenta con 25,679 ha de extensión, limita al Norte y al Oeste con Tlalmanalco, Atlautla y Ecatzingo, municipios del Estado de México, al Este con San Salvador el Verde, Domingo Arenas, San Nicolás de los Ranchos y Tochimilco municipios de Puebla y al Sur con Tétela del Volcán, estado de Morelos (Figura 5). Los suelos presentes en esta zona son el Regosol dístico, Andosol mólico y Cambisol eútrico. La zona presenta dos tipos de clima: 1) ETH Muy frío, con lluvias en verano y temperatura media anual menor de -2 °C, 2) Semifrío subhúmedo, temperatura media anual de 5 a 12 °C y en el mes más frío de 3 a 18 °C (FAO, 1994).

9.1.1 Aspectos biológicos

En una porción del Estado de México la vegetación que se encuentra en el Parque Nacional Iztaccíhuatl-Popocatepetl esta compuesta por *Abies religiosa*, *Pinus hartwegii*, *P. pseudostrobus*, *P. rudis*, *P. teocote*, *P. leiophylla*, *Quercus laurina*; otras especies son: *Cornus disciflora*, *Garrya laurifolia*, *Ilex toluhana*, *Meliosa dentata*, *Oreopanax xalapensis*, y *Prunus brachybotrya*. Vegetación de zacatal: *Festuca toluhensis*, *F. livida*, *F. amplissima*, *Calamagrotis toluhensis*, *Muhlenbergia quadridentata*, *Trisetum spicatum*, *Agrostis toluhensis* y *Poa orizabensis*. En el estado de Puebla existe *Pinus ayacahuite*, *Alnus mexicana*, *Abies religiosa*, bosques de *Pinus-Quercus* y zacatonal (Vargas, 1984; Chávez y Trigo, 1996).

9.2 PARQUE NACIONAL BENITO JUÁREZ

Se ubica en la Sierra Madre del Sur e incluye los municipios San Pablo Etlá, San Agustín Etlá, San Andrés Huayapan y Oaxaca; con una superficie de 3,180 ha. Tiene una altitud que va de 1,650 a 3,050 msnm. Presenta clima semicálido subhúmedo y Templado subhúmedo (SARH, 1993a). Los suelos más representativos son los Regosoles, Cambisoles, Phaeozem, Andosoles y Vertisoles.

9.2.1 Aspectos biológicos

En el parque se encuentran varios tipos de vegetación: Bosque de pino y encino en las partes altas de la serranía, con *Pinus michoacana*, *P. oocarpa*, *P. teocote*, *P. montezumae*, *Quercus sp*, *Arbutus* y *Alnus*. Mientras que en las faldas se encuentran matorrales de encino, y en las cañadas existe selva baja caducifolia. A pesar de que el bosque de pino-encino del parque es de crecimiento secundario, conserva áreas no muy perturbadas (Vargas, 1997).

En cuanto a la fauna silvestre, en este parque aún se pueden observar diversos géneros de aves y mamíferos, como conejos, ardillas, calandrias y chinitos, estos últimos representando poblaciones relictuales de buen tamaño; sin embargo, la cacería que se realiza en zonas muy cercanas a los límites del parque, han disminuido notablemente la fauna silvestre, sin contar las pérdidas por modificaciones del hábitat, incendios y sequía.

9.3 RESERVA DE LA BIÓSFERA SIERRA DE MANANTLÁN

Ubicada en el estado de Jalisco y Norte de Colima, en la Sierra Madre Occidental, forma parte de las cuencas de los ríos Armería, Marabasco y Purificación con relieve accidentado y altitudes que van de 400 a 2,860 msnm, esta sierra es representativa de las condiciones ecológicas de las montañas. Los principales climas son el Cálido subhúmedo (AW), Semicálido A (Cw) y Templado subhúmedo, según la clasificación de Köppen.

Los órdenes de suelos existentes son Vertisoles, Regosoles, Fluvisoles, Acrisoles, Gleysoles, Feozems, Luvisoles, Castañozems, Andosoles, Cambisoles, Chernozems, Rendzinas¹ y Litosoles². Del total de suelos existentes, 66% está cubierta por Litosoles y Regosoles, que son suelos someros, de poca fertilidad, textura arenosa y muy susceptible a la erosión. Los Cambisoles, que son suelos de desarrollo incipiente y coloración rojiza representan 17.5%. Los Andosoles cubren 5.4%, concentrados en la meseta de Cerro Grande, con fuerte influencia del Volcán de Colima por la deposición de cenizas volcánicas. Los Fluvisoles, Gleysoles y

¹ Tienen su origen en suelos calcáreos de textura más o menos fina y bajo cubierta de bosque (INEGI, 2006).

² Ahora Leptosol (WRP, 2006)

Feozems; que constituyen 5.1%, son los suelos dedicados a la actividad agrícola de riego y temporal con presencia de pendientes relativamente planas. Los Acrisoles y Luvisoles, suelos forestales, constituyen 4.2% de la superficie y se encuentran principalmente en la parte central de la sierra.

9.3.1 Aspectos biológicos

La región presenta una biodiversidad muy rica, tanto en plantas como animales, esto es debido a la enorme complejidad de las condiciones físicas como son el clima, la topografía, la humedad, el tipo de suelo, entre otras. Por lo que se pueden encontrar en espacios relativamente cortos, comunidades vegetales de clima cálido y bosques de clima templado-frío. A continuación se mencionan algunas de las asociaciones vegetales de la Sierra de Manantlán (INE, 2000; Martínez y Ramírez, 2008).

9.3.2 Bosque húmedo montano alto. Este bosque se encuentra a altitudes mayores de 2,500 m, en la parte central de la Sierra, y está caracterizada por la dominancia de coníferas de los géneros *Pinus* y *Abies* con mezcla de *Quercus*. Las especies del género *Abies* no forman, en el área de estudio, rodales puros y extensos como en el Eje Neovolcánico, sino que son componentes del bosque codominantes o simplemente presentes con los pinos y encinos. La asociación de *Abies religiosa*-*Pinus*, *P. pseudostrobus*-*Quercus laurina* es la vegetación característica de los sitios altos de la Sierra en la parte central. Se encuentran también *Cupressus lusitanica* y *P. duranguensis*.

9.3.3 Bosque húmedo montano bajo. Bosque de *Pinus-Quercus* se encuentra entre los 1,500 y 2,500 m de altitud, correspondiendo al piso montano bajo y a la provincia húmeda. Los géneros dominantes en estos bosques son *Pinus* (60-90% de la cobertura de copas) y *Quercus* (10-40% de la cobertura de copas). Se encuentra *P. douglasiana* como la especie dominante, apareciendo con ella *Quercus praineana*, *Q. scitophylla*, *Arbutus xalapensis* y *P. herrerae*, y en sitios relativamente más cálidos o secos (por su exposición o posición topográfica) *P. oocarpa*.

9.4 RESERVA DE LA BIÓSFERA EL CIELO

Se ubica en la vertiente Este de la Sierra Madre Oriental, esta constituida principalmente por masas calcáreas secundarias de origen sedimentario, que se formaron durante el Cretácico inferior y que pertenecen a la formación Tamaulipas.

Las altitudes van de 300 hasta 2,200 msnm. La orografía y su cercanía al Golfo de México inducen lluvia o niebla casi todo el año. Existen tres tipos de clima: 1) Semicálido húmedo, estación seca corta, 2) Templado subhúmedo y 3) estación seca. La temperatura media del mes más frío es mayor de 18 °C y la precipitación anual entre 1,500 y 2,000 mm (SARH, 1993b).

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, Luvisol-crómico, Regosol-calcárico y Xerosol-cálcico³ y háplico (INEGI, 2000). Los órdenes de suelos existentes en la zona de estudio son el Litosoles y Rendzinas.

9.4.1 Aspectos biológicos

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 700 y 1,000 m; el bosque mesófilo de montaña predomina de 700 a 1,400 m; en el bosque de coníferas dominan varias especies de pinos y de encinos ubicándose 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.

³ Ahora Aridisol cálcico (WRP, 2006)

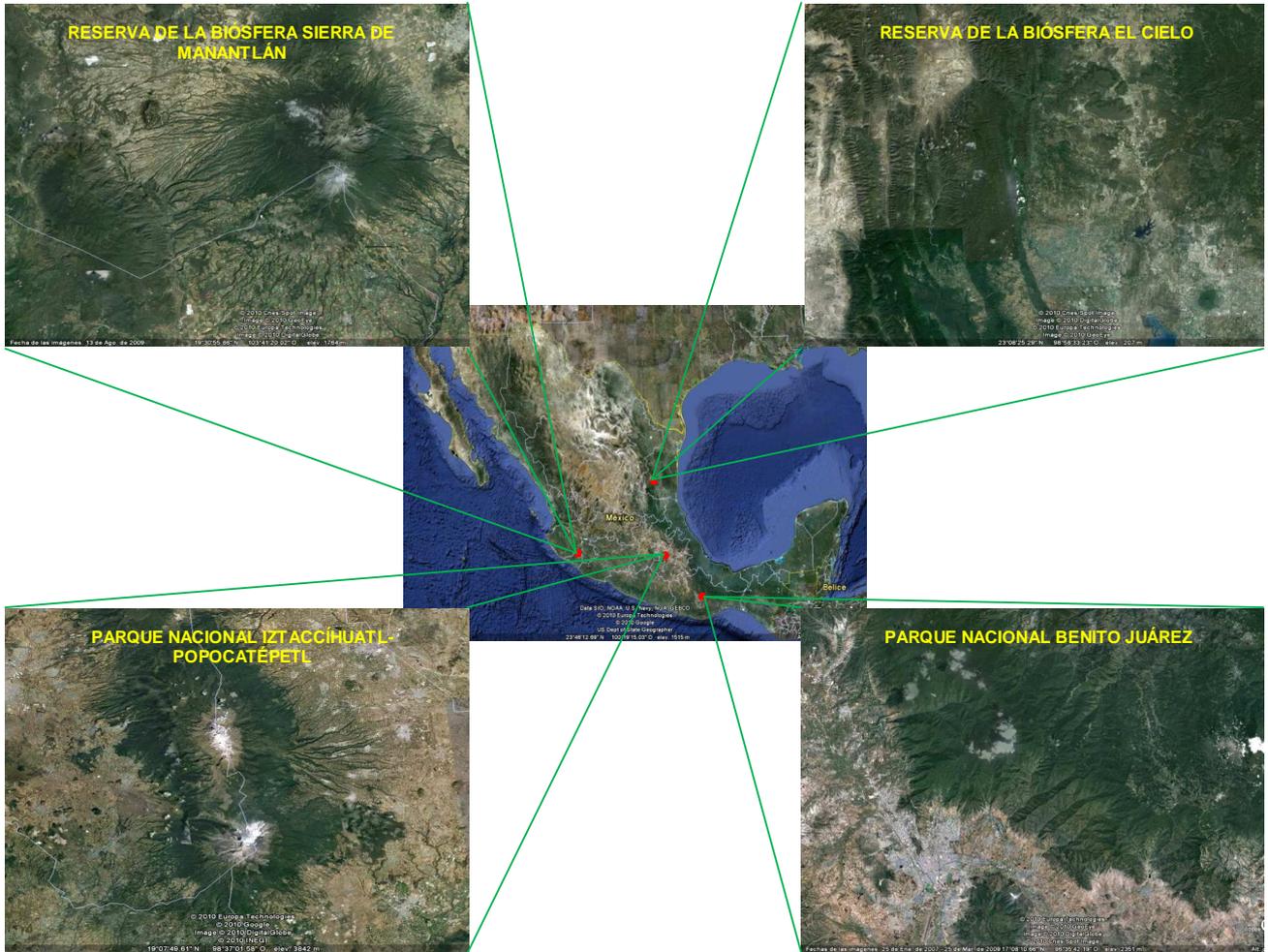


Figura 5. Mapa que indica la localización de las zonas de estudio. Los datos que se utilizaron para crear este mapa proceden de U.S Dep of State Geographer. Programa Google Eart, 2010.

10. MATERIALES Y METÓDOS

10.1 TRABAJO DE CAMPO

10.1.1 Selección de los sitios de muestreo

Se delimitaron los sitios de estudio y las unidades ambientales con el apoyo de mapas topográficos y fotografías aéreas en base a un gradiente de precipitación y madurez del bosque. Se utilizó un Geoposicionador (GPS) marca GARMIN para localizar en campo los sitios, que debían de presentar principalmente vegetación arbórea de *Abies*, *Pino-encino* o los tres.

10.2.1 Muestreo

En cada sitio se delimito un cuadrante de 50x20 m para la obtención de 2 muestras compuesta, la primera a una profundidad de 0 a 0.2 m para el análisis de las propiedades físicas y químicas, la segunda de 0 a 0.1 m para evaluar el contenido de carbono de la biomasa microbiana y la producción de CO₂ (Figura 6). Se tomaron cuatro muestras de suelo que se obtuvieron por medio de cuarteos diagonales en forma de círculo, se homogenizaron y fueron colocadas en una bolsa, posteriormente se tomaron otras seis muestras de suelo, se mezclaron para homogenizarlas y se coloco dentro de otra bolsa de plástico de cierre hermético. Cada muestra se registro con: lugar, fecha de colecta, altitud, exposición, pendiente y vegetación arbórea dominante para su posterior traslado al Laboratorio. La toma de las muestra se fundamenta en que el objetivo es caracterizar física y químicamente a los suelos en el horizonte de mayor actividad biológica y no para efectuar su clasificación.

La pendiente y exposición se obtuvieron utilizando una brújula con clisímetro marca LUFT.

10.2 TRABAJO DE LABORATORIO

Las muestras de 0 a 0.2 m fueron secadas al aire (temperatura ambiente) por dos semanas y tamizadas a través de una malla de 2 mm, se refrigeraron a 4 °C junto con las muestras de 0 a 0.1 m de profundidad estas últimas para minimizar la actividad microbiana (Ross, 1989).

10.2.1 Análisis físicos de suelo

- Densidad aparente (DA), utilizando la probeta y densidad real con el método del picnómetro, el porcentaje del espacio poroso (EP) se obtuvo con los valores de la DA y DR aplicados en una fórmula (Domínguez y Aguilera, 1982).
- Contenido de humedad (Método gravimétrico).
- Conductividad eléctrica del suelo (relación suelo/agua 1:5) para medir la salinidad de las muestras en condiciones de saturación (Richards, 1990).
- Textura (Bouyoucos, 1963 citado por Palmer y Truoch, 1989)

10.2.2 Análisis químicos de suelo

- pH activo (suelo-agua, 1:2) y pH potencial (KCl 1N-suelo 2:1) (Jackson, 1964) (Figura 7 y 8).
- Materia orgánica (Walkley y Black, 1934 citado por Jackson, 1964) (**Anexo A**).
- Carbono orgánico del suelo (COS). Una vez obtenido el contenido de Materia orgánica se utilizó el valor de carbono reportado en la literatura para determinar el COS.
- Nitrógeno total por el método semimicro-Kjeldahl (Bremner, 1965).

10.2.3 Análisis microbiológico de suelo

- Determinación de Carbono de la biomasa microbiana y producción de CO₂ y mediante el método de Fumigación Incubación y medición estequiométrica de CO₂ (Powlson *et al.*, 1987).

Para este método se dividió el suelo en dos fracciones: suelo natural (fracción 1) y suelo fumigado (fracción 2). La determinación de CO₂ en el suelo natural se hizo por duplicado y por triplicado para el fumigado. Se colocaron 20 g de suelo en frascos con tapa de cierre hermético. Se agregan 5 mL de agua libre de CO₂, a la fracción 1 y 5 mL de cloroformo a la fracción 2 dejando el efecto fumigante por 48 hrs. Después de este tiempo se abrieron los frascos y colocaron en baño María a 40 °C hasta eliminar el cloroformo. Se reinocularon ambas fracciones con 1 g de suelo natural.

A las dos fracciones se les agregó la cantidad necesaria de agua (esterilizada) para llevar las muestras a capacidad de campo y se les introdujo un tubo de ensaye con 7 mL de KOH 0.5N con una tira de papel filtro. Para la corrección de la normalidad se colocó un blanco absoluto (se hizo por duplicado). Las muestras se incubaron por 7 días a 35 °C.

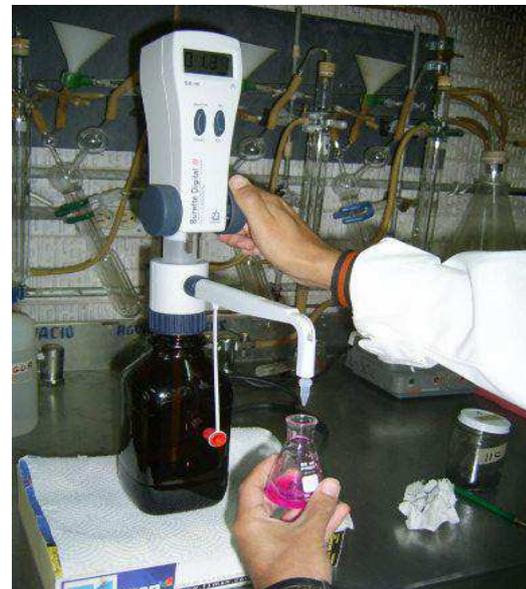
Para las determinaciones de CO₂, el contenido del tubo de ensaye fue transferido a un matraz Erlenmeyer que fue enjuagado con 1 mL de agua libre de CO₂, se añadieron 2 gotas de fenolftaleína como indicador y se tituló con HCl 0.5N, se incluyeron dos blancos en la titulación para cada 10 muestras (Figura 9 y 10) (**Anexo B**).



Figura 6. Submuestras para la determinación de parámetros físicos, químicos y microbiológicos a) suelo de 0-10 cm y b) suelo de 0-20 cm. *Laboratorio de Edafología y Nutrición Vegetal (FES Zaragoza-UNAM).*

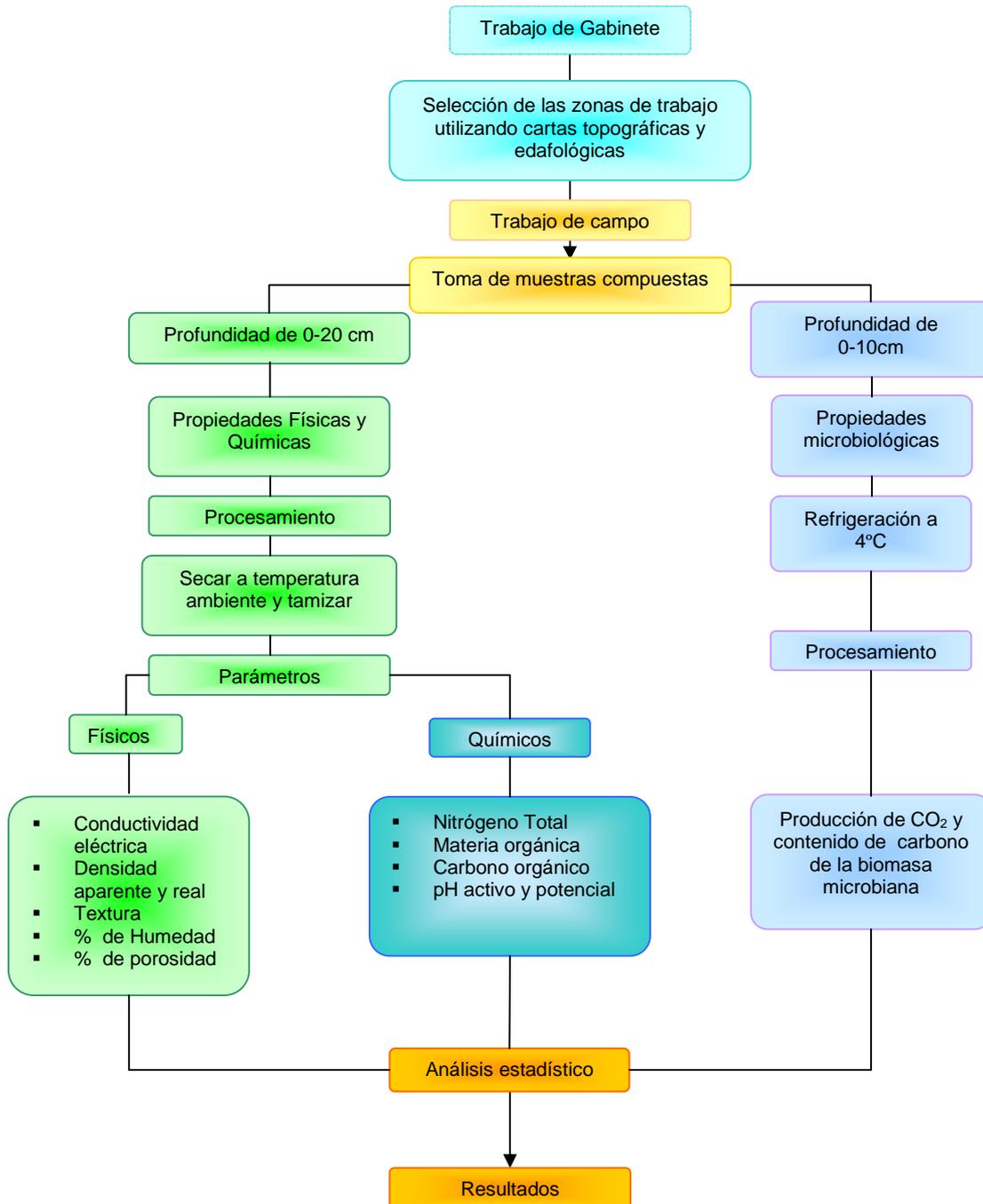


Figuras 7 y 8. Destilador en serie para N-Kjeldhal (izquierda) y medición del pH (derecha). *Laboratorio de Edafología y Nutrición Vegetal (FES Zaragoza-UNAM).*



Figuras 9 y 10. Muestras de suelo para la determinación de CO₂ y del carbono de la biomasa microbiana (izquierda) y titulación del KOH con HCl (derecha). *Laboratorio de Edafología y Nutrición Vegetal (FES Zaragoza-UNAM).*

10.2.5 Diagrama de flujo: muestreo, recolecta y análisis de datos de los sitios de estudio.



11. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

11.1 DESCRIPCIÓN GENERAL DE LAS CONDICIONES FISIOGRÁFICAS EN LOS SITIOS DE ESTUDIO

a) Parque Nacional Iztaccíhuatl-Popocatepetl

En este Parque se trabajó entre 2,400 a 3,900 m de altitud. La región cuenta con pendientes suavemente inclinadas (<7%) a muy fuertemente inclinadas; el piso forestal está cubierto por un amplio manto de hojarasca, musgo y pequeños matorrales que impiden el arrastre de suelo a lugares bajos, retienen la humedad, permiten la captación de agua y recarga de mantos acuíferos. La vegetación arbórea dominante que se encontró se compone principalmente de distintas especies de *Pinus* (Cuadro 2). La exposición fue variable. En cuanto a suelos los más característicos fueron los Andosoles y Regosoles.

Cuadro 2. Características principales de los sitios de trabajo en el Parque Nacional Iztaccíhuatl-Popocatepetl.

Localidad	Norte	Este	Altitud	Pendiente	Exposición	Vegetación	Grupo de Suelo
	___ UTM ___		m	%			
Santa Cruz	2088140	536566	2426	25	NW	<i>Pinus sp.</i> <i>A. religiosa</i>	Regosol y Andosol
Tétela del Volcán	2141497	521387	2636	0	W	<i>Pinus sp.</i> <i>A. religiosa</i>	Regosol y Andosol
Xalixintla	2111090	543253	3232	20	NE	<i>P.</i> <i>montezumae</i>	Cambisol
Apatlaco	2112713	539300	3582	7	S	<i>P. hartwegii</i>	Andosol y Regosol
Paso de Cortés	2111090	503852	3621	17.5	E	<i>P. hartwegii</i> <i>Pinus sp</i>	Regosol y Andosol
La Joya	2116219	536501	3902	40	N	<i>P.</i> <i>pseudostrobus</i>	Regosol y Litosol*

Sitios de estudio ordenados en forma ascendente respecto a la altitud.

UTM proyección NAD 27

El grupo de suelo es el que reporta León, 2007.

* Ahora Leptosol

b) Parque Nacional Benito Juárez

En esta área se trabajó entre 1,800 y 3,300 m de altitud. Las especies arbóreas dominantes pertenecieron al género *Pinus*, que se encontró en casi todo el gradiente altitudinal principalmente en exposiciones norte y noreste, mientras que *Abies* y *Quercus* se encontraron representados a partir de 1,900 msnm. En algunos sitios se observaron árboles relativamente jóvenes no mayores a los treinta años de edad.



Figura 11. Bosque de *Pinus* (izquierda) y *Abies* (derecha). Parque Nacional Benito Juárez

El piso forestal se compone principalmente de musgo, herbáceas, helechos, líquenes y un espeso mantillo de entre 4-9 cm de profundidad (Figura11). Los sitios estudiados exhibieron relieve con pendientes de 25 a 70%, es decir; de fuertemente a extremadamente inclinados, lo que provoca pérdidas de sales y MO a causa de la infiltración, escurrimiento y arrastre del material en época de lluvia, esto en parte contribuye a favorecer un carácter ácido del suelo de estos lugares (Cuadro 3). En cuanto al material geológico se encontraron perfiles rocosos de riolita-andesita.

Cuadro 3. Características principales de los sitios estudiados del Parque Nacional Benito Juárez. Oaxaca.

Localidad	Norte	Este	Altitud	Pendiente	Exposición	Vegetación	Grupo de Suelo
	___ UTM ___		m	%			
Tepelmeme	1918730	707421	1806	50	N	<i>P. montezumae</i>	<i>Regosol</i>
San Jerónimo Xola	1918646	707559	1818	50	N	<i>P. ayacahuite</i> <i>var. oaxacana,</i> <i>P. teocote</i> y <i>Juniperus</i>	<i>Regosol</i>
Parque Nacional Benito Juárez	1898886	740190	1900	23	W	<i>Pinus sp. A. religiosa,</i> <i>Quercus</i> y <i>mezquite</i>	<i>Cambisol</i> y <i>Phaeozem</i>
Guelatao	1911918	714640	2003	50	N	<i>P. teocote,</i> <i>Abies</i> y <i>Quercus</i>	<i>Cambisol,</i> <i>Regosol</i> y <i>Vertisol</i>
San Pablo Huitzo	1412185	714971	2039	35	SW	<i>P. oocarpa,</i> <i>Quercus</i>	<i>Andosol</i>
La Cumbre	ND	ND	2119	ND	NW	<i>A. religiosa</i>	<i>Cambisol</i> <i>húmico</i>
San Felipe del agua	1896410	743159	2258	40	NW	<i>P. pseudostrobus,</i> <i>P. montezumae</i>	<i>Vertisol</i>
Santa Catarina Ixtepeji	1900065	757632	2673	21	NW	<i>P. oaxacana</i> <i>P. michoacana</i> <i>P. teocote,</i> <i>Pinus sp,</i> <i>Quercus,</i> <i>Arbutus</i> <i>jalapensis</i>	<i>Regosol</i> y <i>Andosol</i>
Yuvilia	1899152	755813	2755	70	NW	<i>P. teocote</i>	ND
Antena	1900178	749490	3047	45	NW	<i>A. religiosa</i>	<i>Regosol</i> y <i>Andosol</i>
Tlaxico	1897552	754441	3215	45	N	<i>P. teocote, P. ayacahuite, var. Oaxacana</i> y <i>P. hartwegii.</i>	ND
Oaxaca	1900134	749525	3290	25	S	<i>Arbutus</i> y <i>rodal maduro</i> <i>de 30 años de</i> <i>Pinus sp.</i>	<i>Vertisol</i> y <i>Cambisol</i>

Sitios de estudio ordenados en forma ascendente respecto a la altitud.

UTM proyección NAD 27

El tipo de suelo es el observado en campo.

ND = no determinado

c) Reserva de la Biósfera Sierra de Manantlán

En esta área los sitios estudiados se ubicaron dentro de la Estación Biológica “Las Joyas” localizada en las cercanías de la zona núcleo de la Reserva de la Biósfera en la Sierra de Manantlán y en las faldas del Nevado de Colima. El intervalo altitudinal del primero fue de 1,900 a 2,300 m, mientras que el del segundo de 800 m a 2,600 m. La Estación Biológica “Las Joyas”, es un área fuertemente protegida y con una elevada humedad ambiental, lo que permite la existencia de vegetación exuberante y bien conservada (Figura 12). El estrato arbóreo esta conformado principalmente por *Pinus*, *Quercus*, y en menor cantidad de *Cupressus*, *Alnus* y *Abies*. Cabe mencionar que sobre los árboles abundan numerosas epífitas como bromelias y orquídeas, así como un espeso sotobosque.



Figura 12. Entrada a la Reserva de la Biósfera Sierra de Manantlán (izquierda) y la Estación Biológica “Las Joyas” (derecha), Jalisco.

En comparación con el Parque Nacional Iztaccíhuatl-Popocatépetl y el Parque Nacional Benito Juárez en esta zona se encontraron los géneros *Pinus* y *Abies* en altitudes menores a 1,000 m. En las faldas del Nevado de Colima, el estrato arbóreo estuvo constituido por los géneros *Pinus*, *Quercus* y en menor cantidad por *Abies*.

El suelo estaba cubierto por una abundante capa de mantillo y el material parental era derivado de ceniza volcánica.

El terreno mostró pendientes de ligeras a muy pronunciadas, mayores a 30% y con exposición noreste principalmente. La estación “Las Joyas” tuvo la mayor diversidad de suelos, ya que se presentaron los Leptosoles, Regosoles, Cambisoles y Phaeozem, mientras que Ejido Ahuacapan y Jalisco solo presentaron un tipo (Cuadro 4).

Martínez (1998) reportó Acrisoles y Luvisoles suelos forestales que constituyen el 4.2% de la superficie de la Reserva de la Biosfera Sierra de Manantlán. Por su parte los Andosoles se encontraron en el Nevado de Colima y el Tajo debido a la influencia que ejerce el Volcán de Colima por la deposición de cenizas volcánicas

Cuadro 4. Principales características de los sitios de estudio en la Reserva de la Biósfera Sierra de Manantlán. Jalisco.

Localidad	Norte	Este	Altitud	Pendiente	Exposición	Vegetación	Grupo de Suelo
	___ UTM ___		m	%			
El Tajo	2161808	569947	852	35	NW	<i>A. religiosa</i>	Andosol
La Capulinera	2163217	569401	960	29	NW	<i>Pinus sp.</i>	Regosol
Cuzalapa	2163613	596287	1029	11	NW	<i>Alnus, Abies y poca regeneración de Pinus sp.</i>	Cambisol y Regosol
Las Tablas	2164084	568858	1062	35	S	<i>P. moctezumae</i>	ND
Ejido Ahuacapan	ND	ND	2177	20	N	<i>A. religiosa</i> <i>Pinus sp.</i>	Regosol
Las joyas	2165754	576104	1952	30	NE	<i>P. hartwegii,</i> <i>Pinus sp., P. teocote, P. pseudostrobus,</i> <i>P. oocarpa, Abies</i>	Regosol, Leptosol, Cambisol y Phaeozem
Jalisco	2172585	646467	2222	35	W	<i>P. oocarpa</i>	Regosol
Nevado de Colima	2168664	649984	2682	55	N	<i>Pinus sp,</i> <i>Abies, P. pseudostrobus,</i> <i>P. oocarpa P. montezumae</i>	Andosol Regosol y Fluvisol

Sitios de estudio ordenados en forma ascendente respecto a la altitud.

UTM proyección NAD 27

El grupo de suelo es el reportado por Martínez, 2009.

ND = no determinado

d) Reserva de la Biósfera El Cielo

El intervalo altitudinal trabajado en esta Reserva fue de 1,500 a 2,000 m. Esta región geográfica difiere de las otras tres áreas naturales protegidas debido a las condiciones climáticas relacionadas con la temperatura y precipitación (presenta climas cálido y templado subhúmedo con promedio de precipitación que va de los 1,500 a 2,000 mm al año), lo que influye en las propiedades generales del suelo. El material parental y la génesis del suelo también son distintos, además de las diferencias del relieve del terreno que presenta pendientes menores al 15%; sin embargo, León (2007) reportó pendientes de hasta 90% para esta Área Natural Protegida. El grupo de suelo que predominó en los sitios de estudio fue el Leptosol.

Las asociaciones vegetales predominantes en el intervalo altitudinal estuvieron representadas en su mayoría por especies de *Pinus*. La distribución del género *Abies*, se observó solo a los 1,600 m y asociado con exposición noroeste (Cuadro 5).

Cuadro 5. Principales características de los sitios de trabajo de la Reserva de la Biósfera El Cielo. Tamaulipas.

Localidad	Norte	Este	Altitud	Pendiente	Exposición	Vegetación	Grupo de Suelo
	___ UTM ___		m	%			
Níspero	2558656	477924	1563	10	NE	<i>P. Patula, P. pseudostrabus</i>	Luvisol, Rendzina* y Litosol**
Cielo	2557042	476839	1774	6	NE	<i>P. pseudostrabus</i>	Litosol
La Lamillosa	2557042	476839	1774	6	NE	<i>P. pseudostrabus, Abies</i>	Rendzina Litosol
El puerto	2557302	475198	2054	9	NE	<i>P. pseudostrabus</i>	Rendzina, Litosol

Sitios de estudio ordenados en forma ascendente respecto a la altitud.

UTM proyección NAD 27

* reportado por León, 2007.

** Actualmente Leptosol

Otra diferencia de esta zona es que la degradación de la MO se da de una manera más rápida por lo que la superficie del suelo no contiene gran acumulación de ella pero sí la suficiente para mantener la humedad y no permitir la entrada de los rayos solares de manera directa.

11.2 INDICADORES FÍSICOS DEL SUELO

a) Parque Nacional Iztaccíhuatl-Popocatepetl

La densidad aparente (DA) varió entre 0.7 y 1.0 g cm⁻³ y la densidad real (DR) de 1.8 a 2.6 g cm⁻³, lo cual coincide con los valores de DR reportados por García (2003) para esta zona (2.0 a 2.6 g cm⁻³).

Tomando en cuenta que la porosidad guarda una relación inversa con la DA, en la mayoría de los sitios el porcentaje de espacio poroso (EP) fue alto (47.15 a 65.78%) (Cuadro 6), por lo que en general estos suelos no están compactados permitiendo a las raíces de las plantas y árboles que puedan penetrar sin problema a más profundidad en busca de agua y nutrimentos.

Con respecto a la conductividad eléctrica (CE), esta tuvo valores de 0.02 dSm⁻¹ (rumbo Xalixintla) a 0.17 dSm⁻¹ (Tétela del Volcán), lo que indicó que estos suelos no presentan problemas de salinidad.

El grupo textural que se encontró en estos sitios fue arenoso-migajonoso (textura gruesa). Bockheim (1991), reportó que los suelos forestales con vegetación de *Pino* y *Encino*, se caracterizan por sus texturas gruesas. El porcentaje de arcilla fue el más bajo de las cuatro Áreas Naturales.

Cuadro 6. Parámetros físicos del suelo del Parque Nacional Iztaccíhuatl-Popocatepetl.

Localidad	DA g cm ⁻³	DR	CE dS m ⁻¹	EP	Arcilla %	Limo	Arena	Grupo textural USDA
Santa Cruz	0.9	2.4	0.08	59.9	4.2	26.6	69.1	Arena migajonosa
Tétela del Volcán	0.8	2.1	0.17	57.3	5.5	20.4	73.9	Arena migajonosa
Xalixintla	1.0	2.4	0.02	57.7	6.8	18	75	Arena migajonosa
Apatlaco	1.0	2.6	0.12	59	4.8	24	71	Arena migajonosa
Paso de Cortés	1.0	1.9	0.04	47	4.8	18.7	76	Arena migajonosa
La Joya	0.7	2.0	0.07	65.7	4.8	24.7	70	Arena migajonosa

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



Figura 13. Vegetación secundaria y bosque de *Pino* y *Abies*. Parque Nacional Iztaccíhuatl-Popocatepetl.

b) Parque Nacional Benito Juárez

En los suelos de este Parque Nacional la CE presentó valores de 0.02 a 0.16 con promedio de 0.06 dS m^{-1} , lo que muestra características de baja salinidad. Por su parte la DA se encontró de 0.7 g cm^{-3} (sitio Antena) a 1.4 g cm^{-3} (San Jerónimo Xola) observándose datos parecidos a los del Parque Nacional Iztaccíhuatl-Popocatepetl.

El porcentaje mínimo de EP del suelo fue de 39.4%, cabe destacar que el grupo de suelo encontrado en este sitio fue el Andosol (San Pablo Huitzo) mientras que el máximo fue de 79.3% (Antena) en donde además de estar presentes el Andosol también se observó el Cambisol que es arenoso. El porcentaje promedio de EP fue de mayor al 50%.

En cuanto el contenido de humedad del suelo (HS), éste se encontró entre 0.6% (San Pablo Huitzo) y 32.6% (Parque Nacional Benito Juárez) con promedio de 12.7%. A pesar de que ambos sitios contaron con un manto escaso de MO el segundo presento menor pendiente y un mayor porcentaje de arcilla y limo que

permiten retener por más tiempo el agua de lluvia mediante la infiltración siendo el drenaje más lento.

Respecto a las partículas que constituyen el suelo, la arena fue la fracción más importante en proporción ya que represento más del 40%, por lo que la clase textural (CT) de la mayoría de estos suelos fue Migajón-arenoso (Cuadro 7).

Cuadro 7. Parámetros físicos de suelo del Parque Nacional Benito Juárez. Oaxaca.

Localidad	DA g cm ⁻³	DR	CE dS m ⁻¹	EP	Arcilla %	Limo	Arena	Grupo textural USDA
Tepelmeme	1.2	2.2	0.05	46.2	9.4	20	70.5	Migajón arenoso
San Jerónimo Xola	1.4	2.2	0.05	46.1	5.4	28	66.5	Migajón arenoso
Parque Nacional Benito Juárez	1.2	2.4	0.02	48.1	36.1	20	43.8	Migajón arenoso
Guelatao	1.0	2.3	0.04	50.8	6.4	20	71.5	Migajón arenoso
San Pablo Huitzo	1.3	2.2	0.02	39.4	22.5	13.2	64.1	Migajón arenoso
La Cumbre	1.2	1.4	0.02	46.5	36.5	17.2	46.1	Migajón
San Felipe del agua	1.0	2.0	0.03	42.2	46.1	37	16.8	Migajón arenoso
Santa Catarina Ixtepeji	0.8	2.0	0.04	59.4	41.8	24.6	33.5	Migajón arenoso
Yuvilia	1.0	2.3	0.16	55.8	42.5	29.3	28.1	Migajón arenoso
Antena	0.7	2.0	0.15	63.3	6.1	31.3	62.5	Migajón arenoso
Tlalixco	0.8	2.1	0.04	61.4	9.4	34.7	55.8	Migajón arenoso
Oaxaca	0.8	1.7	0.08	47.3	29.0	26	44.8	Migajón

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

c) Reserva de la Biósfera Sierra de Manantlán

Los valores encontrados de DA fueron de 0.8 a 1.2 g cm⁻³. Pritchett (1991) indica que la DA de suelos forestales varía desde 0.2 g cm⁻³ en algunas capas orgánicas hasta casi 1.9 g cm⁻³ en las arenas gruesas, como es el caso de las dos

anteriores Áreas Naturales Protegidas y en los sitios de esta Reserva; mientras que los valores de la DR se hallaron entre 1.7 y 2.8 g cm⁻³. Al considerar la relación de ambas densidades; que determinan el espacio poroso, los valores encontrados estuvieron de 31 a 60% y el contenido de humedad entre 8 y 33%.

La CE del suelo encontrada fue de 0.03 a 0.13 dS m⁻¹, con una media de 0.07 dS m⁻¹. Valores semejantes fueron reportados por Ramírez (2008) para estos suelos, que no mantienen condiciones salinas debido a que la infiltración del agua es excesiva, las sales no se acumulan en la capa superficial del mismo al estar continuamente lixiviándose o al pasar a formar parte de la solución del suelo.

Las fracciones de arena, limo y arcilla fueron muy variables, pero se puede observar que en los lugares de menor altitud predominaron las arcillas, mientras que en los más altos el porcentaje de arena fue el que predominó (Cuadro 8). El grupo textural encontrado fue el migajón-arcilloso para la mayoría de sitios lo que permite una retención de agua por parte de los coloides inorgánicos del suelo (arcillas).

Cuadro 8. Propiedades físicas del suelo de la Reserva de la Biósfera Sierra de Manantlán. Jalisco.

Localidad	DA	DR	CE	EP	Arcilla	Limo	Arena	Grupo textural
	___ g cm ⁻³ ___		dS m ⁻¹		% _____			USDA
El Tajo	1.0	1.7	0.03	36.2	60.5	15.2	24.1	Arcillosa
La Capulinera	1.0	2.2	0.02	52.1	68.5	17.2	14.1	Arcillosa
Cuzalapa	1.0	2.1	0.02	47.9	50.5	16.6	32.8	Migajón-arcilloso
Las Tablas	1.1	2.8	ND	60.8	64.5	11.2	24.1	Arcillosa
Ejido Ahuacapan	0.8	1.9	0.03	57.8	36.5	32.0	31.4	Migajón-arcilloso
Las Joyas	0.9	2.0	0.07	53.6	21.1	26.9	47.0	Migajón-arenoso
Jalisco	1.2	2.0	0.07	38.0	ND	ND	ND	ND
Nevado de Colima	1.2	1.8	0.13	31.6	14.5	8.0	77.4	Arena migajonosa

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

d) Reserva de la Biósfera El Cielo

La CE del suelo encontrada fue de 0.03 a 0.11 dS m⁻¹, y a pesar del origen calcáreo del suelo de esta región, las condiciones no son ácidas. Los valores encontrados de DA van de 0.6 a 0.8 g cm⁻³, estos valores bajos se deben al alto contenido de materia orgánica, que es arrastrada por agua de los sitios altos hacia estos que se localizan a menor altitud y relieve no accidentado, por otra parte también están protegidos de fuertes vientos, impidiendo pérdidas por erosión eólica por lo que la MO se acumula. En cuanto a los valores de DR éstos se encontraron de 1.7 a 2.6 g cm⁻³ y el suelo presentó textura migajonosa en su mayoría (Cuadro 9).

A causa de la rápida degradación de la MO y su integración al suelo el porcentaje de EP fue el más alto de las cuatro Áreas Naturales Protegidas, gracias a las continuas incorporaciones de ésta que ayudan a la estructura del suelo, a su mejoramiento, a la formación de sustancias de crecimiento y disposición continua de nutrimentos.

Cuadro 9. Parámetros físicos del suelo de la Reserva de la Biósfera El Cielo, Tamaulipas.

Localidad	DA g cm ⁻³	DR	CE dS m ⁻¹	EP	Arcilla	Limo	Arena	Grupo textural USDA
					%			
Nispero	0.7	1.8	0.05	60.9	25	27	48	Migajón arcillo-arenoso
Cielo	0.6	2.5	0.11	70	22	25	53	Migajón
La Lamillosa	0.8	2.6	0.05	70.5	23	29	48	Migajón
El puerto	0.7	1.7	0.03	51.23	32	32	36	Migajón

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

El grupo textural que se encontró con más frecuencia en cada zona fue el Migajón-arcilloso (Reserva de la Biosfera Sierra de Manantlán), migajón arenoso (Parque Nacional Benito Juárez), migajón (Reserva de la Biósfera El Cielo) y arena-migajonosa (Parque Nacional Iztaccíhuatl-Popocatépetl) (Figura 14 A).

Al comparar los valores experimentales entre las zonas de estudio, se observó que el porcentaje de EP fue mayor en suelos de la Reserva de la Biósfera El Cielo seguido del Parque Nacional Iztaccíhuatl-Popocatepetl teniendo el menor porcentaje la Reserva de la Biósfera Sierra de Manantlán debido a su contenido de arcilla, lo anterior muestra una mayor interacción entre el grado de aireación con el contenido de humedad del suelo (Figura 14 B).

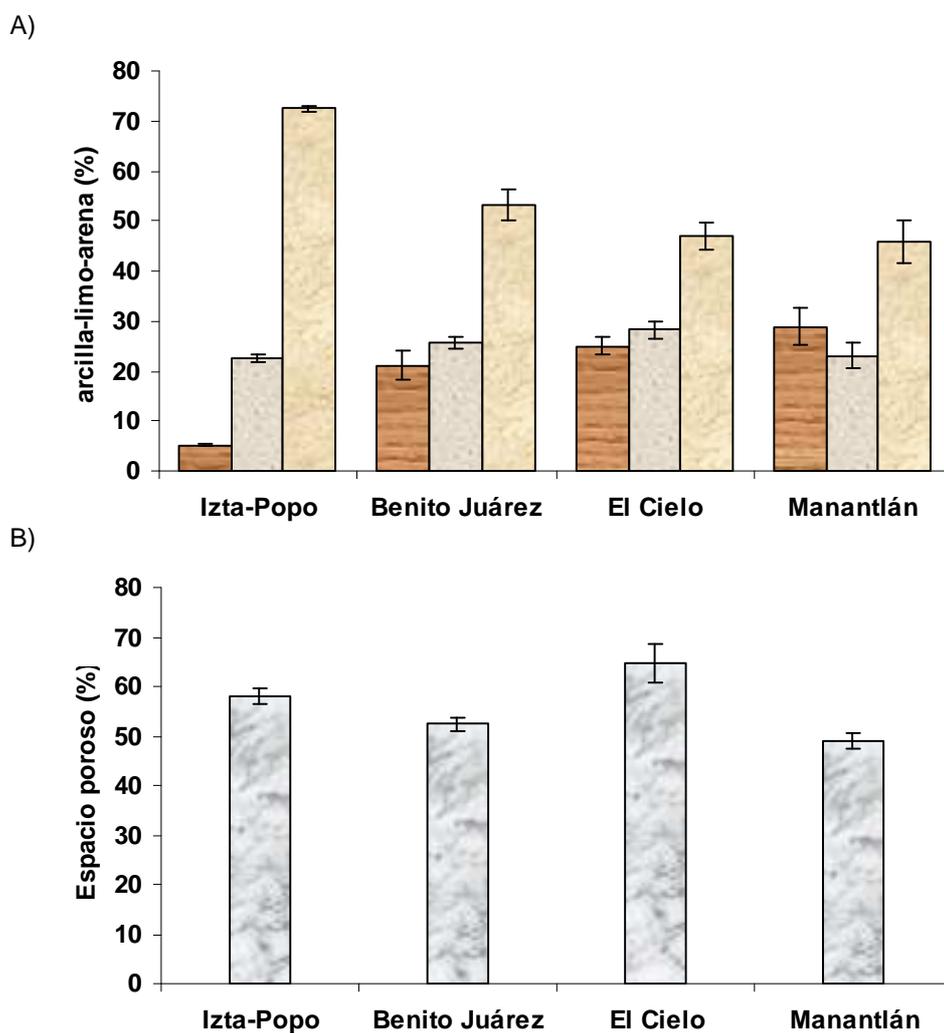


Figura 14. A) Porcentaje de arcilla-limo-arena y B) porcentaje de espacio poroso de las cuatro Áreas Naturales Protegidas.

Los suelos de las cuatro Áreas Naturales Protegidas no mostraron propiedades salinas ni sódicas de acuerdo a Jackson (1964). El Parque Nacional Iztaccíhuatl-Popocatepetl presentó el promedio más alto de CE (0.09 dS m^{-1}) (Figura 15 C) generalmente esta condición tiene que ver con la cantidad de MO, el origen ígneo del suelo de tendencia ácida y al régimen hídrico predominante en la zona con una precipitación pluvial menor al año en comparación con la Reserva de la Biosfera El Cielo en donde las precipitaciones son más abundantes a lo largo de éste y el contenido de humedad tanto en el aire como en el suelo también es alta (Figura 15 D).

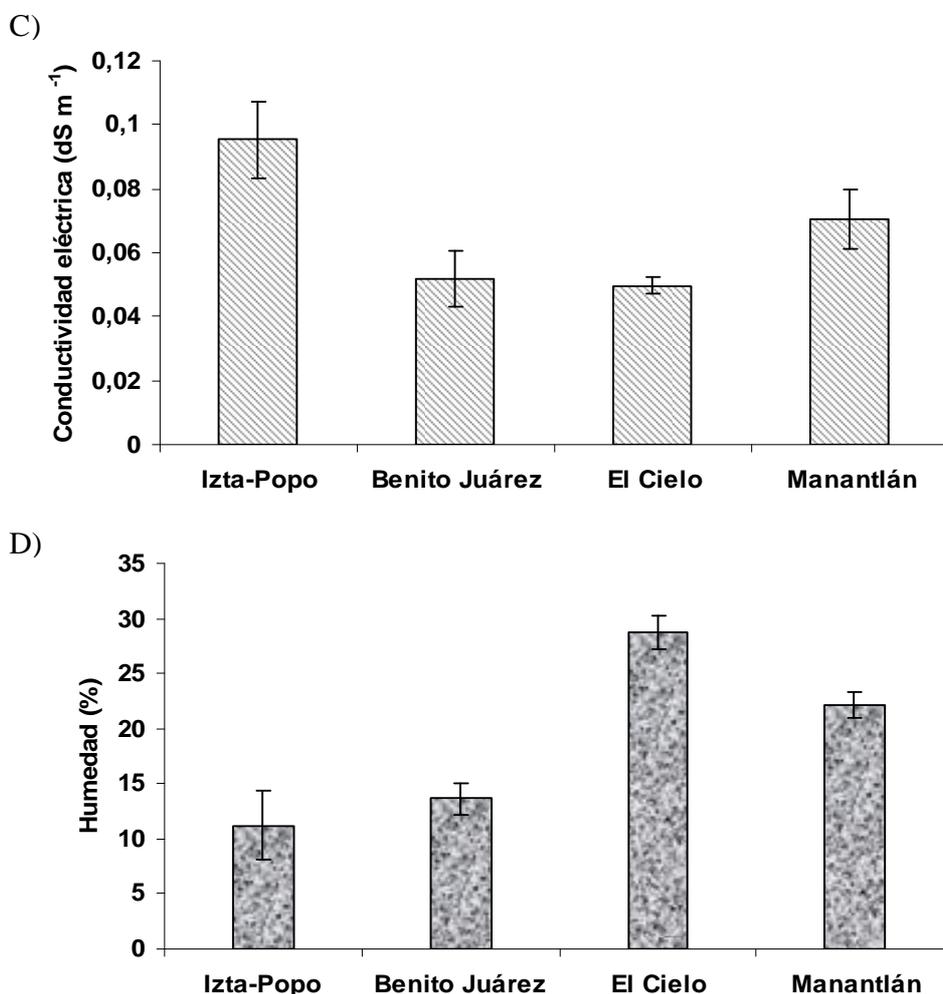


Figura 15. C) Conductividad eléctrica y D) porcentaje de humedad de las cuatro Áreas Naturales Protegidas.

Los grupos de suelo característicos de las cuatro zonas fueron los Andosoles, Leptosoles, Regosoles, Luvisoles y Cambisoles (Figura 16) (Anexo C).

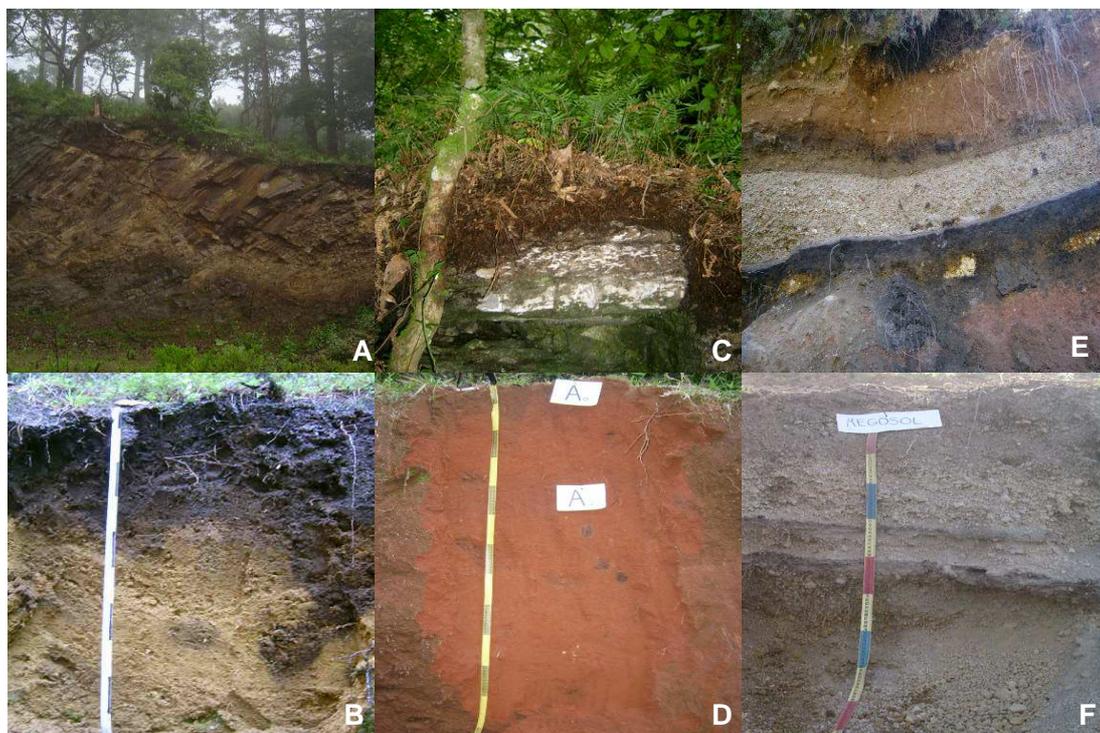


Figura 16. Grupos de suelo. **A)** Andosol ócrico (Parque Nacional Benito Juárez, **B)** Cambisol eútrico (Reserva de la Biósfera Sierra de Manantlán, **C)** Leptosol lítico y **D)** Luvisol (Reserva de la Biósfera El Cielo), **E)** Andosol y **F)** Regosol (Leptosol) (Parque Nacional Iztaccíhuatl-Popocatepetl). Laboratorio de Edafología y Nutrición Vegetal (FES Zaragoza-UNAM).

La mayor parte de los sitios del Parque Nacional Iztaccíhuatl-Popocatepetl contaron con suelos arenosos por lo que el agua se infiltra rápidamente sin ser retenida por más tiempo en el suelo, presentando un porcentaje bajo de humedad (11.4%) además en esta zona se tomaron las muestras en época de sequía, cabe señalar que un suelo arenoso (85% de arena) puede ser tan duro como una arcilla existiendo la posibilidad de su vitrificación si no cuenta con suficiente MO.

En general las cuatro Áreas Naturales Protegidas no mostraron problemas de compactación, de presentar suelos sódicos o salinos y humedades relativamente bajas que impidan la movilización de los nutrientes (Cuadro 10).

Se observaron diferencias significativas entre Áreas Naturales Protegidas para CE ($R^2=0.76$, $F=9.1$, $P<0.0001$), DA ($R^2=0.98$, $F=322.6$, $P<0.0001$), EP ($R^2=0.81$, $F=14.38$, $P<0.0001$), HS ($R^2=0.97$, $F=278.8$, $P<0.0001$), arcilla ($R^2=0.99$, $F=1030.14$, $P<0.0001$), limo ($R^2=0.99$, $F=89.63$, $P<0.0001$) y arena ($R^2=0.99$, $F=8875.3$, $P<0.0001$).

Cuadro 10. Propiedades físicas del suelo de las cuatro Áreas Naturales Protegidas.

ANP	DA	DR	CE	HS	EP	Arcilla	Limo	Arena
	g cm ⁻³		dS m ⁻¹			%		
PN Izta-Popo	0.94 ±0.11	2.27 ±0.32	0.09 ±0.05	11.4 ±11.2	55.8 ±6.24	5.3 ±1.02	22.9 ±3.96	72.9 ±3.22
PN Benito Juárez	1.02 ±0.25	2.09 ±0.38	0.05 ±0.05	13.6 ±9.90	52.7 ±10.7	21.5 ±16.9	25.9 ±7.16	53.1 ±18.29
RB Sierra de Manantlán	1.01 ±0.14	2.07 ±0.29	0.07 ±0.04	22.6 ±7.55	49.7 ±10.2	31.4 ±20.4	24.9 ±13.9	41.1 ±22.0
RB El Cielo	0.78 ±0.05	2.24 ±0.43	0.05 ±0.01	28.1 ±0.48	64.6 ±8.55	25 ±4.14	28.1 ±4.02	46.8 ±6.70

DA, Densidad aparente; DR, Densidad Real; EP, Espacio Poroso; CE, Conductividad Eléctrica; HS, humedad del suelo.
ND = no determinado.

11.3 INDICADORES QUÍMICOS DEL SUELO

a) Parque Nacional Iztaccíhuatl-Popocatepetl

La cantidad de MOS se encontró entre 4 y 10%, dándole a estos suelos un carácter ácido junto con el material parental derivado de ceniza volcánica y rico en Al y Fe. Los valores de pH activo fueron de 5.4 a 6.8 y el pH potencial de 4.0 a 5.0, donde el más bajo se ubicó en Tétela del Volcán y Paso de Cortés, ubicados a más de 3,000 msnm, mientras que Xalixintla presentó el mayor valor de pH potencial. Un factor importante que favorece la acidificación es el proceso de mineralización de la MOS y la oxidación biológica que llevan a cabo los microorganismos al igual que los exudados de las raíces del suelo liberando considerables cantidades de anhídrido carbónico. En este sentido el sitio que tuvo el mayor contenido de MOS fue La Joya, se observó que el porcentaje de MOS estuvo estrechamente relacionado con el COS y el nitrógeno total del suelo que aumentaron al ir ascendiendo dentro del parque encontrándose valores más altos en sitios con una mayor altitud.

Con respecto al N-total del suelo, éste fue de 2 a 8 con promedio de 4.8 Mg ha⁻¹. En cuanto a la relación C:N, ésta disminuyó al ir ascendiendo lo que indica una mayor concentración de nitrógeno en altitudes mayores (Cuadro 11).

Cuadro 11. Parámetros químicos de suelo del Parque Nacional Iztaccíhuatl-Popocatepetl.

Localidad	C/N	MOS	N-Total	COS	pH H ₂ O	pH KCl 1 N
		%	Mg ha ⁻¹		1:2	
Santa Cruz	24.5	4.9	2.2	61.3	6.0	4.7
Tétela del Volcán	20.3	6.5	3.3	66.1	5.4	4.3
Xalixintla	8.9	5.8	7.9	70.8	6.8	5.0
Apatlaco	11.4	7.4	7.8	89.2	6.0	4.5
Paso de Cortés	14.8	5.4	4.2	62.4	5.6	4.0
La Joya	11.2	9.7	6.9	78.4	6.0	4.4

C/N; razón carbono:nitrógeno, MOS; Materia Orgánica del suelo, COS; Carbono Orgánico del Suelo, N-Total; nitrógeno Total.

Las comunidades de *Pinus* encontradas a lo largo del gradiente altitudinal presentaron tolerancia y eficiencia para desarrollarse en estos suelos ácidos.

b) Parque Nacional Benito Juárez

Al evaluar las propiedades químicas de estos suelos, se encontró al pH activo de 3.3 a 6.3; el sitio que presentó una fuerte acidez, correspondió a La Cumbre (2,119 m), mientras que diez de los sitios presentaron una acidez moderada y solo Yuvilia tuvo un pH ligeramente ácido. Por su parte el pH potencial estuvo entre 3.1 a 5.2. A lo largo de todo el gradiente altitudinal se encontró *P. montezumae*, *P. teocote*, *P. oocarpa*, *P. pseudostrobus*, *P. hartwegii*, *P. ayacahuite variedad oaxacana* y *michoacana*, que de acuerdo con Pritchett (1991), son tolerantes a suelos ácidos y presentan un buen desarrollo.

En cuanto a la cantidad de MOS, en algunos sitios el contenido fue alto, pero también hubo sitios muy pobres, por lo que el intervalo de MOS se encontró de 2 a 21.0% con promedio de 8.9%. El COS y la MOS aumentaron al ascender en altitud. Con respecto al N-total del suelo éste fue de 0.5 a 11 Mg ha⁻¹, con un promedio de 3.7 Mg ha⁻¹. En general se observaron ligeras variaciones en las cantidades de N-total, conforme se incrementa la altitud, el valor máximo se localizó a 1,806 m (Tepelmeme), mientras que el valor mínimo fue a 3,215 msnm (Tlaxico) (Cuadro 12). La relación C:N fue alta en San Jerónimo, Guelatao, Yuvilia y Tlaxico.

Cuadro 12. Parámetros químicos del Parque Nacional Benito Juárez.

Localidad	C/N	MOS %	N-Total Mg ha ⁻¹	COS	pH H ₂ O	pH KCl 1N
Tepelmeme	4.6	3.6	11.2	51.6	5.9	5.19
San Jerónimo	121	21.0	3.0	149.5	5.6	4.25
Parque Nacional Benito Juárez	11.7	2.3	2.7	30.4	5.6	3.69
Guelatao	266	4.16	3.1	119	5.6	4.18
San Pablo Huitzo	13.9	3.3	4.0	54.5	4.2	ND
La Cumbre	23.2	4.0	2.4	57.2	3.3	ND
San Felipe	22.7	3.8	2.3	48.6	5.2	3.48
Santa Catarina Ixtepeji	23.7	8.0	3.8	73.2	4.5	3.78
Yuvilia	55.3	11.3	2.5	139	6.3	ND
Antena	25.7	20.1	6.5	168	4.2	3.35
Tlaxico	96.1	5.6	0.5	54.7	5.17	4.19
Oaxaca	33.9	12.6	5.4	123	4.86	4.02

C/N; razón carbono:nitrógeno, MOS; Materia Orgánica del suelo, COS; Carbono Orgánico del Suelo, N-Total; nitrógeno Total.

ND = no determinado.

A medida que aumenta la altitud, la disminución de la temperatura da lugar a una sucesión de pisos de vegetación y de suelos, baja la tasa de descomposición global de la MO, de tal forma que los perfiles son cada más humíferos y la actividad biológica es suficiente para la formación de humus mor de bastante espesor por lo que aumenta la concentración de N-total, así mismo las pendientes actúan enérgicamente sobre la edafogénesis modificando la orientación de los canalillos de agua que penetran en el suelo, parte de esta agua fluye lateralmente; a su vez la infiltración se encuentra limitada, en beneficio de la escorrentía, potente agente de erosión dando lugar a una variedad de suelos de un punto a otro y a un flujo de nutrimentos. El arrastre de suelo desde la cima hacia la base da como resultado que toda la parte superior de la pendiente se empobrezca y se acidifique mientras que la parte baja se enriquece en elementos y arcillas que por diferencia de cargas se satura con cationes, por lo tanto se muestra un aumento del pH (Teuscher y Adler, 1980; Xu *et al.*, 2006).

c) Reserva de la Biósfera Sierra de Manantlán

En esta Reserva el pH activo fue de 4 (Las Tablas) a 6.7 (Nevado de Colima) encontrándose que los sitios con menor altitud fueron más ácidos que los de mayor altitud, el pH potencial se encontró de 3 a 6. En lo que se refiere al contenido de MOS, ésta se encontró entre 2 y 10% con promedio de 7.4%, mientras que el N-total fue de 1.7 a 3.9 Mg ha⁻¹, con promedio de 3.2 Mg ha⁻¹. En cuanto al COS el valor más bajo (24.8 Mg ha⁻¹) se reportó para el Tajo y el más alto (153 Mg ha⁻¹) en el Nevado de Colima a 2,682 msnm.

En los sitios con alta acidez el porcentaje de MOS se encontró en menor cantidad al igual que el COS lo que dio como resultado una baja en el contenido de N-total, cabe destacar que estos sitios con menor altitud presentaron un porcentaje alto de arcillas a diferencia de los sitios que se localizaron a más altitud y que fueron de textura arenosa-migajonosa.

Cuadro 13. Parámetros químicos de suelo de la Reserva de la Biósfera Sierra de Manantlán.

Localidad	C/N	MOS	N-Total	COS	pH H ₂ O	pH KCl 1 N
		%	Mg ha ⁻¹		1:2	
El Tajo	12.3	2.0	2.0	24.8	4.5	3.82
La Capulinera	24.1	2.9	1.7	35.8	4.4	3.67
Cuzalapa	25.9	6.0	2.8	76.5	4.4	3.47
Las Tablas	22.8	4.9	3.1	61.3	4.0	3.09
Ejido Ahuacapan	41.5	10.4	2.2	95	ND	ND
Las Joyas	47.4	8.2	3.9	85	5.8	5.39
Jalisco	40.1	9.8	3.6	144	5.7	5.21
Nevado de Colima	56.4	10.5	2.7	152	6.7	5.9

C/N; razón carbono:nitrógeno, MOS; Materia Orgánica del suelo, COS; Carbono Orgánico del Suelo, N-Total; nitrógeno Total.

ND = no determinado.

d) Reserva de la Biósfera El Cielo

Los porcentajes de MOS se encontraron entre 11 a 16%, lo que demuestra la existencia de suelos orgánicos por la constante incorporación de hojarasca aportada por la vegetación, esta acumulación permite un incremento en la producción anual de MOS. Estos suelos son delgados y están en proceso de desarrollo por lo que en algunos lugares ésta es una fracción dominante en su perfil.

De acuerdo con Foth y Turk (1981), existe un aumento en la MOS a medida que aumenta la precipitación ya que los microorganismos bajan su actividad por el exceso de agua que se comienza acumular en algunos suelos debido a que el oxígeno es desplazado de los poros y son ocupados por el agua creando condiciones anaeróbicas en éstos, además el exceso de agua impide su absorción por las plantas aun cuando exista gran cantidad de ella debido a la sobresaturación de tal forma que las plantas no son capaces de absorber los nutrimentos por falta de oxígeno.

Los contenidos de N-total van de 2.6 en el Puerto a 8 Mg ha⁻¹ en el Níspero. 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. Se observó que las cantidades de N-total del suelo, decrecieron conforme aumentaba la altitud (máxima de 2,054 m) mientras que la MO y el COS aumentaron a mayor altitud (Cuadro 14).

Cuadro 14. Parámetros químicos de suelo en la Reserva de la Biósfera El Cielo.

Localidad	C/N	MOS	N-Total	COS	pH H ₂ O	pH KCl 1 N
		%	Mg ha ⁻¹		1:2	
Níspero	12.3	11.8	8.4	100	5.5	4.3
Cielo	18.1	14	2.7	137	5.1	4
La Lamillosa	36.3	16.1	4.8	147	5.53	4.25
El Puerto	45.8	12	2.6	120	5.1	4.4

C/N; razón carbono:nitrógeno, MOS; Materia Orgánica del suelo, COS; Carbono Orgánico del Suelo, N-Total; nitrógeno Total.

El Área Natural Protegida con el pH activo muy fuertemente ácido fue el Parque Nacional Benito Juárez (5.0) (NOM-021-RECNAT-2000) y el de menor acidez o moderada correspondió al Parque Nacional Iztaccíhuatl-Popocatepetl (6.0) (Figura 17). La mayor parte de los suelos forestales van de moderada a extremadamente ácidos, como resultado de la liberación de ácidos orgánicos durante la descomposición de la capa de mantillo y la consiguiente lixiviación de las base del suelo mineral superficial. Especies como *Tsuga*, *Picea*, *Abies* y *Pinus* crecen mejor en suelos muy ácidos y, en consecuencia el mantillo es ácido. La mayor parte de los suelos forestales están en una escala de pH entre 3.5 a 6.5 aproximadamente. Otra característica de la acidez es que ésta varía sólo de manera ligera con los cambios estacionales, pero estos raramente son superiores a 1.0 de pH (Pritchett, 1991). En suelos orgánicos éstos llegan a ser ácidos aun de materiales parentales alcalinos por el lavado de cationes y el reemplazo de muchos de ellos por el H⁺ del ácido carbónico (H₂CO₃) formado por carbonatos o dióxido de carbono disuelto y también por hidróxido de el disueltos.

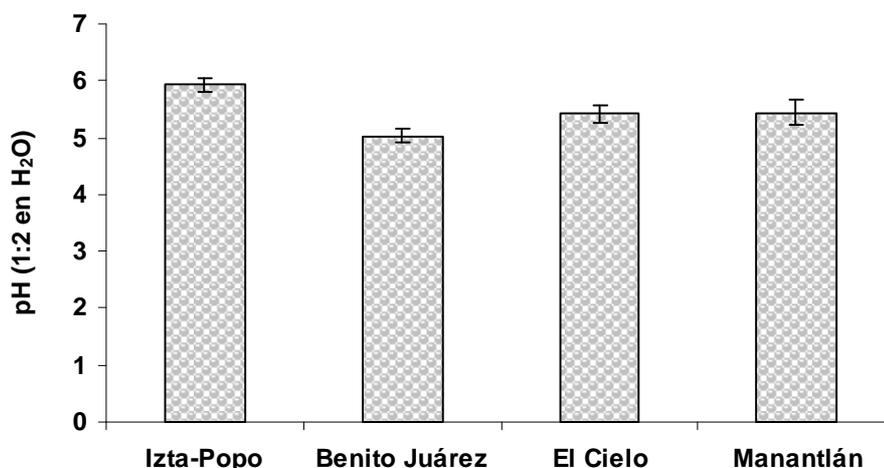


Figura 17. pH acuoso de las cuatro Áreas Naturales Protegidas.

En condiciones de estabilidad en la relación C:N 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, además de que la razón C:N tiende a disminuir en las regiones áridas, al revés que en las húmedas (Buckman y Brady, 1991).

El área, con el menor contenido de N-total fue la Reserva de la Biósfera Sierra de Manantlán con un promedio de 2.9 Mg ha⁻¹ y con un valor bajo de COS y MO debido a que el N-total depende de la MOS como una de sus principales fuentes (Figura 18). Las tasas de mineralización en los suelos ácidos son sumamente bajas en los bosques no perturbados, sin embargo a pesar de esto, la adsorción de N se ve favorecida por el clima frío y por una gran humedad del suelo. En estudios de fraccionamiento físico de la MOS muestran que la mayor parte del C está asociado a las partículas de arcilla y limo, los porcentajes de C son normalmente de 1 a 4 veces mayores en las fracciones de limo y arcilla que en el total del suelo. Estos resultados permiten afirmar que posiblemente en estos sitios no se ha llegado a una degradación completa de la MO añadida, además de que esta degradación es mucho mayor en suelos básicos que en ácidos (Ruipérez *et al.*, 2004).

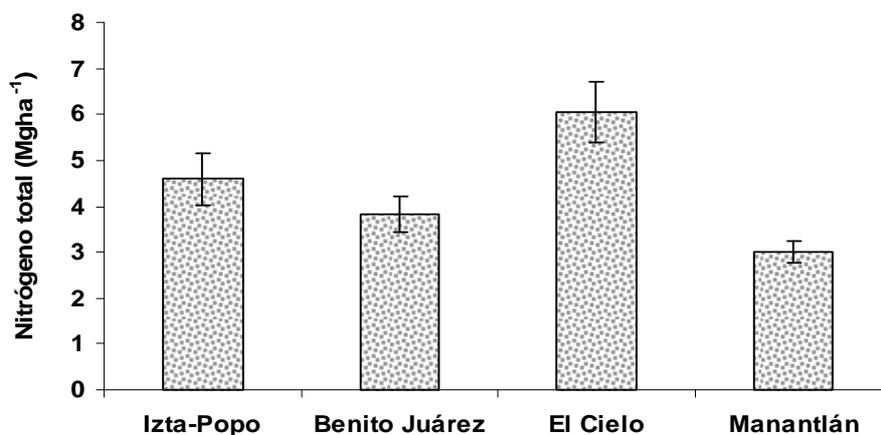


Figura 18. Nitrógeno total de las cuatro Áreas Naturales Protegidas

El Parque Nacional Iztaccíhuatl-Popocatepetl presento el contenido más bajo de MOS (6.71%) y el más alto fue en la Reserva de la Biósfera El Cielo (13.7%) en donde el N-total y el COS fueron elevados (Figura 19). El contenido de MOS está estrechamente relacionado con la humedad y las deficiencias de N-total en bosques de coníferas en climas fríos, condición que favorece la acumulación de un manto espeso de humus ácido.

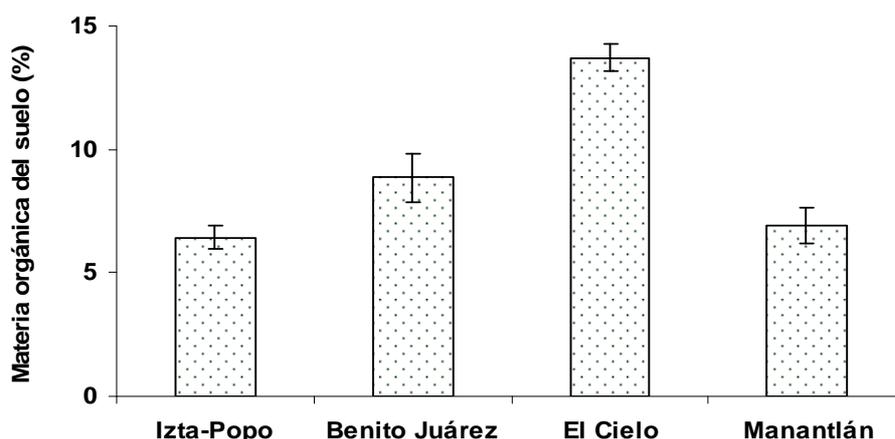


Figura 19. Porcentaje de Materia orgánica de las cuatro Áreas Naturales Protegidas.

Los contenidos de COS ($R^2=0.98$, $F=100.85$, $P<0.0001$), MOS ($R^2=0.99$, $F=140.08$, $P<0.0001$) y N-total ($R^2=0.98$, $F=113$, $P<0.0001$) mostraron diferencias significativas entre Áreas Naturales Protegidas (Cuadro 15).

Los materiales orgánicos como celulosa y hemicelulosa, son mas ricos en C que en N, los organismos que realizan esta descomposición utilizan el C como fuente de energía y en presencia de grandes cantidades de tales sustancias su número aumenta rápidamente; este rápido desarrollo requiere de volúmenes considerables de N que por no existir en cantidad suficiente en la materia en descomposición, es sustraído casi todo del suelo, el cual sufre de un empobrecimiento temporal. Se observaron diferencias significativas entre Áreas Naturales en cuanto a la relación C:N ($R^2=0.99$, $F=135.5$, $P<0.0001$)

Mientras más amplia sea la relación C:N, menor cantidad de amoníaco será liberado, porque la proporción de C presente es mayor que la de N. A medida que avanza la descomposición se va perdiendo C en forma de CO_2 , pero se conserva el N, el cual pasa a formar parte de las proteínas microbianas y así descende el valor de la relación C:N.

Cuadro 15. Promedios de los parámetros químicos de las Áreas Naturales Protegidas.

ANP	C:N	MOS	N-Total	COS	pH H ₂ O	pH KCl 1 N
		%	Mg ha ⁻¹		1:2	
PN- Izta-Popo	17.39 ±10.08	6.43 ±2.44	4.6 ±2.37	69.09 ±27.62	6.0 ±0.45	4.5 ±0.33
PN Benito Juárez	52.54 ±104.3	8.93 ±6.63	3.8 ±2.74	94.91 ±75.3	5.0 ±0.77	3.9 ±0.48
RB El Cielo	26.87 ±15.72	13.7 ±2.27	6.03 ±2.80	124 ±22.3	5.41 ±0.59	4.28 ±0.36
RB Sierra de Manantlán	40.64 ±54.58	6.95 ±4.56	2.99 ±1.38	79.12 ±49.7	5.5 ±0.47	4.5 ±1.05

MOS; Materia Orgánica del suelo, COS; Carbono Orgánico del Suelo, N-Total; nitrógeno Total.

11.4 INDICADORES MICROBIOLÓGICOS DEL SUELO

a) Parque Nacional Iztaccíhuatl-Popocatepetl

Se observó una alta producción de CO_2 $\text{mg g}^{-1} \text{ día}^{-1}$ en Paso de Cortés (3,621 m) con un contenido de carbono de la biomasa microbiana (CBM) bajo, de todos los sitios de este Parque Nacional, éste fue el que contó con menor cantidad de MOS y COS, la relación C:N fue de 14:1, con suelo moderadamente ácido y presencia de *Pinus sp* mientras que Apatlaco (3,582 m) presentó el valor más alto de CBM, un contenido alto de MOS, COS, N-total, su relación C:N fue de 11:1 con pH ligeramente ácido y presencia de *P. hartwegii*. La producción de CO_2 está influenciada por altos valores de COS, en su estado de degradación y de las condiciones ambientales predominantes en cada una de las unidades ecológica (Cuadro 16).

Cuadro 16. Parámetros microbiológicos del Parque Nacional Iztaccíhuatl-Popocatepetl.

LOCALIDAD	CBM	CO_2
	mg g^{-1}	$\text{mg g}^{-1} \text{ día}^{-1}$
Santa Cruz	0.39	0.06
Tétela del Volcán	0.51	0.05
Xalitzintla	0.41	0.05
Apatlaco	0.76	0.06
Paso de Cortés	0.14	0.08
La Joya	0.55	0.05

CBM; Carbono de la biomasa microbiana, CO_2 ; dióxido de carbono (producción).

El suelo es enriquecido por adición de carbohidratos, lípidos, proteínas además de restos de tejidos vegetales y animales que dan el aporte principal de nutrimentos, que mediante una despolimerización a formas mas simples de éstos sustratos son mineralizados por los microorganismos para su posterior utilización, durante éste 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 actúan como sustrato carbonado y durante su descomposición desprenden CO₂, además estas células muertas pueden descomponerse fácilmente por la mineralización hecha por otros microorganismos (Schimel y Bennett, 2004).

b) Parque Nacional Benito Juárez

En lo referente al contenido de CBM el más alto fue en el sitio Parque Nacional Benito Juárez con un valor de 1.1 mg g⁻¹, presentó una elevada producción de CO₂ mg g⁻¹ día⁻¹ (cuadro 17), lo que indica que la MOS está siendo descompuesta rápidamente por los microorganismos por otra parte la relación C:N fue de 11:1, las especies arbóreas dominantes fueron *Pinus sp*, *A. religiosa*, *Quercus* y mezquite.

Cuadro 17. Parámetros microbiológicos del Parque Nacional Benito Juárez.

LOCALIDAD	CBM	CO ₂
	mg g ⁻¹	mg g ⁻¹ día ⁻¹
Tepelmeme	0.13	0.02
San Jerónimo Xola	0.11	0.02
Parque Nacional Benito Juárez	1.10	0.07
Guelatao	0.22	0.02
San Pablo Huitzo	0.34	0.03
La Cumbre	0.58	0.05
San Felipe del agua	0.45	0.05
Santa Catarina Ixtepeji	0.20	0.03
Yuvilia	0.59	0.04
Antena	0.10	0.01
Tlalixco	0.03	0.01
Oaxaca	0.30	0.04

CBM; Carbono de la biomasa microbiana, CO₂; bióxido de carbono (producción).

La actividad microbiana más baja se encontró en Tlalixco que tuvo la menor cantidad de N-total y una relación alta de C:N (96:1) con presencia de *P. teocote*, *P. ayacahuite* y *P. hartwegii*. El CBM y la producción de CO₂ mostraron una disminución al ir ascendido.

c) Reserva de la Biósfera Sierra de Manantlán

El contenido de CBM en esta zona de trabajo se encontró entre los rangos de 0.15 mg g⁻¹ (sitio Jalisco) a 0.73 mg g⁻¹ (El Tajo). En la Capulinera, la producción de CO₂ fue baja (0.02 mg g día⁻¹) en contraste con Ejido Ahuacapan que fue la más elevada (0.1 mg g día⁻¹). La producción de CO₂ aumentó ligeramente al incrementarse la altitud mientras que el contenido de CBM disminuyó, éste se encuentra relacionado con los cambios de temperatura, la cantidad de MO, HS y pH que influyen en las poblaciones de los microorganismos así como en su metabolismo permitiendo una degradación rápida o lenta de la MOS y el uso de los nutrientes (cuadro 18). La relación C:N fue elevada en el Nevado de Colima (56:4) en donde la vegetación arbórea fue de *Pinus sp*, *Abies*, *P. pseudostrobus*, *P. oocarpa* y *P. montezumae*.

Cuadro 18. Parámetros microbiológicos de la Reserva de la Biósfera Sierra de Manantlán.

Localidad	CBM	CO ₂
	Mg g ⁻¹	mg g ⁻¹ día ⁻¹
El Tajo	0.73	0.05
La Capulinera	0.22	0.02
Cuzalapa	0.30	0.02
Las Tablas	0.53	0.04
Ejido Ahuacapan	0.31	0.11
Las Joyas	0.58	0.06
Jalisco	0.15	0.08
Nevado de Colima	0.36	0.03

CBM; Carbono de la biomasa microbiana, CO₂; dióxido de carbono (producción).

d) Reserva de la Biósfera El Cielo

El sitio que mostró el contenido de CBM más elevado fue El Cielo (0.46 mg g^{-1}) y el de menor contenido fue el Puerto (0.14 mg g^{-1}). La mayor producción de CO_2 se encontró en sitios con menor altitud, esto se puede atribuir a un mayor metabolismo por parte de los microorganismos que influyen en la oxidación de compuestos de carbono (Cuadro 19). En esta Área Natural a diferencia de la anterior a altitudes elevadas tanto el CBM como la producción de CO_2 disminuyeron.

El suelo de esta Reserva se encuentra en proceso de desarrollo, por lo que la incorporación de MO se lleva a cabo a una mayor velocidad, el clima es el más cálido de las cuatro zonas; una razón de esto es por la entrada de vientos marítimos por ello existe una mayor precipitación pluvial anual, esto favorece el desarrollo de los microorganismos que metabolizan la materia carbonada, desprendiendo CO_2 y multiplicándose rápidamente. 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.

Cuadro 19. Parámetros microbiológicos de la Reserva de la Biósfera El Cielo.

Localidad	CBM	CO_2
	mg g^{-1}	$\text{mg g}^{-1}\text{día}^{-1}$
Níspero	0.31	0.03
Cielo	0.46	0.04
La Lamillosa	0.30	0.03
El Puerto	0.14	0.02

CBM; Carbono de la biomasa microbiana, CO_2 ; dióxido de carbono (producción).

Al comparar las cuatro zonas de estudio se obtuvo que el contenido de Carbono de la biomasa microbiana presentó diferencias significativas entre Áreas Naturales Protegidas ($R^2=0.83$, $F=10.24$, $P<0.0001$) (**Apéndice**).

El Parque Nacional Iztaccíhuatl-Popocatepetl fue el Área Natural Protegida con el más alto contenido de CBM (0.46 mg g^{-1}) y producción de CO_2 ($0.06 \text{ mg g día}^{-1}$) seguida de la Reserva de la Biósfera Sierra de Manantlán que presentó un valor de 0.46 mg g^{-1} y una producción de CO_2 de $0.05 \text{ mg g día}^{-1}$. Estas dos Áreas Naturales Protegidas pertenecen al Eje Neovolcánico tienen unidades de suelos muy semejantes y material de origen volcánico. Aquí las condiciones climatológicas (veranos calientes e inviernos fríos) con precipitación moderada no originan lavado excesivo, poseen muy poco humus ácido superficial y perfil poco desarrollado, se puede encontrar de un 6-10% de humus coloidal que le imparte al suelo el característico color negro.

Cuadro 20. Parámetros microbiológicos de las cuatro Áreas Naturales Protegidas.

Localidad	CBM	CO_2
	mg g^{-1}	$\text{mg g}^{-1}\text{día}^{-1}$
PN- Izta-Popo	0.46 ± 0.22	0.06 ± 0.02
PN Benito Juárez	0.34 ± 0.35	0.03 ± 0.02
RB Sierra de Manantlán	0.46 ± 0.27	0.05 ± 0.03
RB El Cielo	0.30 ± 0.15	0.03 ± 0.01

CBM; Carbono de la biomasa microbiana, CO_2 ; dióxido de carbono (producción).

Por otra parte el Parque Nacional Benito Juárez y la Reserva Biósfera El Cielo, presentaron valores bajos de CO_2 ($0.03 \text{ mg g día}^{-1}$) y contenido de CBM de 0.34 mg g^{-1} y 0.30 mg g^{-1} respectivamente, presentaron órdenes de suelo distinto y material de origen sedimentario (Cuadro 20). En estas dos zonas con precipitación abundante que alterna con periodos de sequía y temperatura altas se produce un lavado excesivo que alcanza gran profundidad. En tales condiciones la MO se descompone muy rápidamente y el CO_2 que se produce en abundancia disuelve y lixivía el sodio y el potasio, además en la descomposición de los silicatos, la sílice es parcialmente o totalmente lixiviada en forma coloidal quedando entonces el hierro y el aluminio como sesquióxidos.

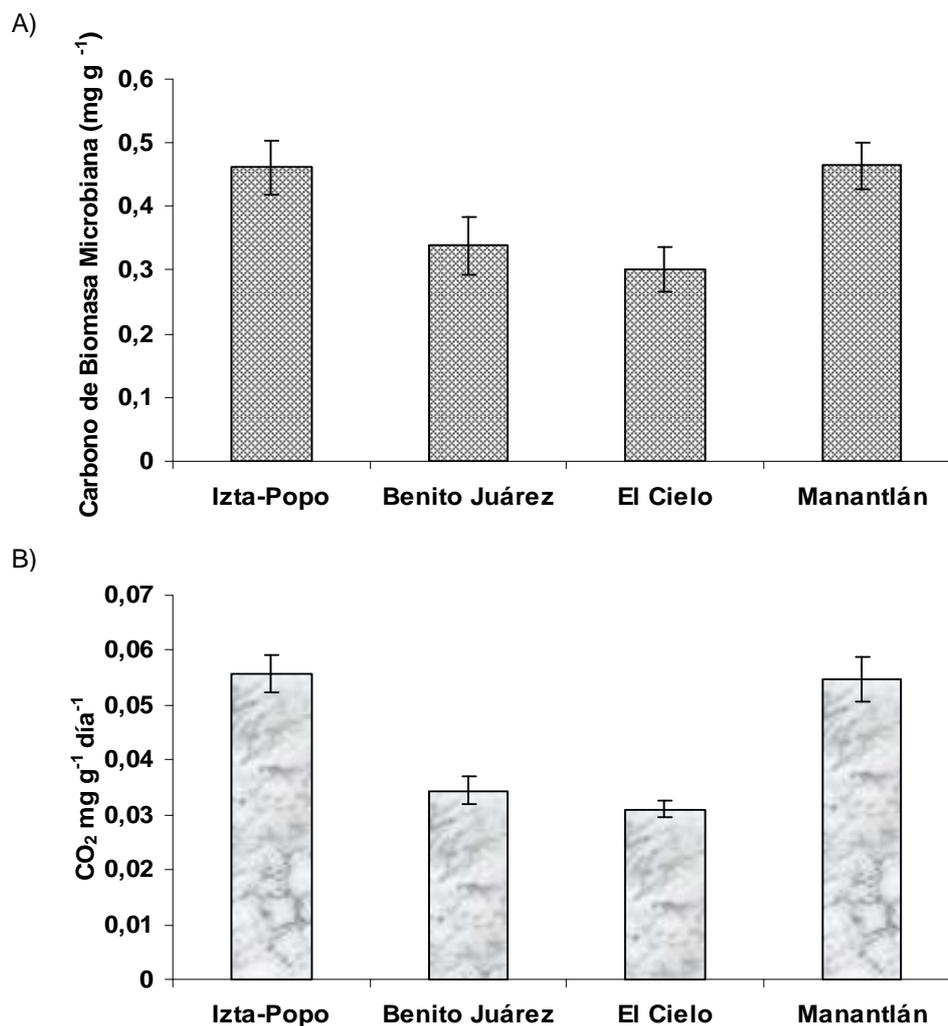


Figura 20. A) Carbono de la biomasa microbiana y B) producción de CO₂ de las cuatro Áreas Naturales Protegidas.

Las zonas con una alta biomasa microbiana dieron como resultado una mayor respiración por lo que en estas zonas la producción de CO₂ fue también alta (Figura 20).

El CBM y la producción de CO₂ están directamente ligados a la estación del año, es decir a la época de lluvia-sequía que hace variar la comunidad microbiana manteniéndola inactiva o decrecer por falta de humedad y alimento, entonces la

mayor producción de CO₂ será generada por las plantas, que pueden soportar condiciones menos favorables por periodos prolongados.

Los flujos de CO₂-C (C respirado) por parte de los microorganismos son el producto de la disponibilidad del C lábil. Por lo tanto la magnitud de la tasa de respiración microbiana puede indicar cuanto C orgánico disponible hay en el suelo debido a que esta fuertemente ligada a la química y cantidad de MOS, no obstante esta medida incluye también fracciones menos lábiles de C (Montaño *et al.*, 2008).

Así mismo, las especies vegetales establecen dinámicas particulares de la MO del suelo y condicionan su actividad microbiológica, especialmente por las cantidades y naturaleza de los residuos aportados. La vegetación interviene en la formación, conservación y regeneración del suelo. El suelo puede actuar como depurador natural frente a ciertos vertidos gracias a la acción y a la mezcla de materiales desarrollados por los microorganismos. También se ha observado que la transformación de la hojarasca es más rápida en suelos básicos que en ácidos, se relaciona con el mayor contenido de C en las fracciones más pequeñas, en suelos tratados con hojarasca de tipo básico se alcanza antes el nivel máximo de biomasa microbiana y C fácilmente oxidable que los suelos a los que se les ha incorporado hoja de Pino. Por esto la proporción del C en estas fracciones puede ser un índice del estado en el que se encuentra la MO.

Las tasas de descomposición de la MO están reguladas por tres grupos de variables: factores físicos, composición química y calidad del sustrato y los organismos que se definen en función de la relativa descomposición del mantillo y dependen de la mezcla de compuestos lábiles, recalcitrantes e inhibitorios. Cuando existe un aporte de MO con alta razón C:N (mayor cantidad de lignina cuyo contenido de C es de un 47-50%) y se dan modificaciones o se presentan cambios en las condiciones del suelo, los microorganismos se pueden reproducir activamente desprendiendo CO₂ en grandes cantidades (Teuscher y Adler, 1980).

En las cuatro zonas de estudio se observaron asociaciones de *Pino*, *Abies*, *Quercus* y en menor cantidad *Cupressus*, *Juníperus* y *Arbutus*. Al relacionar todas las especies arbóreas del genero *Pinus* encontradas en las cuatro zonas de estudio se obtuvo que los suelos con cobertura vegetal de *P. pseudostrobus*, *P. oocarpa* y *P. hartwegii* tuvieron los valores más altos en cuanto a producción de CO₂ (Figura 21).

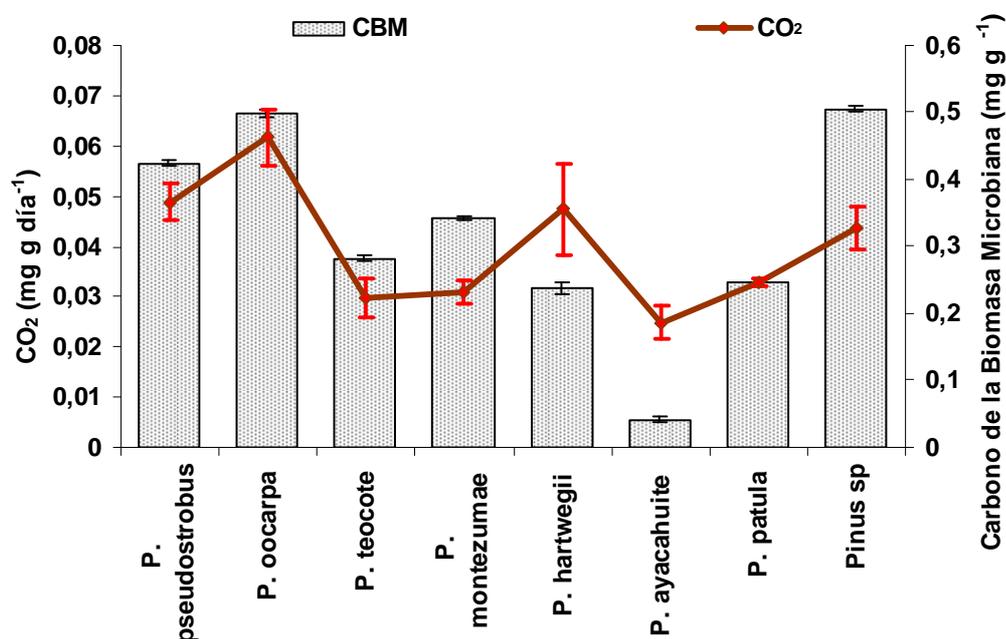


Figura 21. Producción de CO₂ y contenido de carbono de la biomasa microbiana en base a las especies de pino localizadas en las cuatro Áreas Naturales Protegidas.

En el Parque Nacional Iztaccíhuatl-Popocatepetl y la Reserva de la Biosfera El Cielo se observaron menor cantidad de especies de pino en comparación con el Parque Nacional Benito Juárez y la Reserva de la Biósfera Sierra de Manantlán que tuvieron mayor cantidad y presentaron una razón C:N elevada (Cuadro 21).

Cuadro 21. Especies de Pino observados en las cuatro Áreas Naturales Protegidas.

ESPECIES	<i>P. pseudostrabus</i>	<i>P. oocarpa</i>	<i>P. teocote</i>	<i>P. montezumae</i>	<i>P. hartwegii</i>	<i>P. patula</i>	<i>Pinus sp.</i>	<i>P. ayacahuite</i>
PN Izta-Popo	x			x	xx		xxx	
PN Benito Juárez	x	x	xxxx	xx	x		xx	xxx
RB El Cielo	xxxx					x		
RB Sierra de Manantlán	xx	xxx	x	xx	xx		xxxx	

La x indica la abundancia de especies de pino observadas en cada zona.
x, poco abundante; xx, abundante, xxx, muy abundante, xxxx, predomina.

Las especies vegetales cuyas hojas, se caracterizan por una relación C:N baja dan una hojarasca que se descompone activamente, mientras que las especies acidificantes, cuyas hojas son pobres en N, tienen tendencia a formar un humus moderado. De acuerdo con 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.

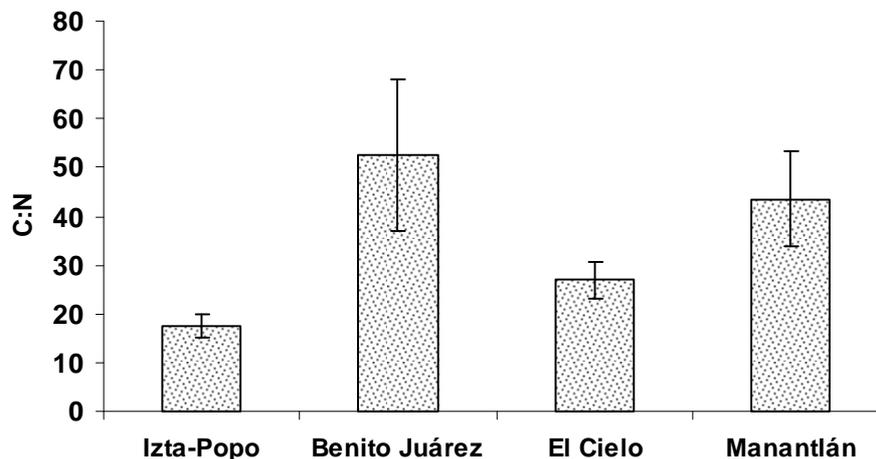


Figura 22. Razón C:N de las cuatro Áreas Naturales Protegidas.

Las especies arbóreas cuentan con poblaciones de microorganismos que dependen de las fluctuaciones de cada una de las estaciones a lo largo de todo el año, la capacidad que tengan las mismas para obtener su alimento y su relación directa con la vegetación del lugar, además la existencia de taninos, resinas y terpenos inhiben el crecimiento de las bacterias nitrificantes por lo que en estos suelos las micorrizas son el principal sostén de las coníferas utilizando el N en forma de compuestos amoniacales más no los nitratos, toleran muy bien los periodos severos de sequía entablando relaciones entre sí (Teuscher y Adler, 1980).

12. CONCLUSIONES

- *P. pseudostrobus* fue la especie arbórea que se localizó con frecuencia en las cuatro zonas de trabajo.
- Bajo cobertura forestal de *P. oocarpa* tanto el contenido de carbono microbiano del suelo como la producción de CO₂ resultaron ser los más altos, mientras que los más bajos fueron para los suelos con *P. ayacahuite*.
- Las cuatro Áreas Naturales Protegidas no tuvieron suelos compactados, ni presentaron problemas por acumulación de sales (elevada salinidad) o condiciones anaerobias, lo que permitió un micro ambiente húmedo, aireado y con una adecuada estructura para el crecimiento y desarrollo óptimo de la vegetación y de los microorganismos del suelo.
- El Parque Nacional Iztaccíhuatl-Popocatepetl tuvo suelos con ligera acidez, mientras que la Reserva de la Biósfera Sierra de Manantlán, la Reserva de la Biósfera El Cielo y el Parque Nacional Benito Juárez presentaron sitios con suelos fuertemente ácidos.
- La Materia orgánica, el Carbono orgánico y el Nitrógeno total del suelo presentaron diferencias significativas entre Áreas Naturales Protegidas. Los contenidos más altos se obtuvieron en la Reserva de la Biósfera El Cielo que por su clima cálido y alta humedad dan lugar a una rápida descomposición, quedando disponibles los nutrientes para su uso y movilización. Por el contrario el Parque Nacional Benito Juárez, la Reserva de la Biósfera Sierra de Manantlán y el Parque Nacional Iztaccíhuatl-Popocatepetl cuentan con un clima frío y periodos de lluvia-sequía que dan como resultado una degradación lenta de la materia orgánica.
- En los suelos del Parque Nacional Iztaccíhuatl-Popocatepetl y la Reserva de la Biósfera Sierra de Manantlán el mayor contenido de carbono se encontró en la biomasa microbiana por lo que al quedar liberado y ser utilizado por otros microorganismos se obtuvo una alta producción de CO₂, mientras que en Parque Nacional Benito Juárez y la Reserva de la Biósfera El Cielo el carbono se encontró en la Materia orgánica del suelo y no en la biomasa microbiana.

- Debido a que la biomasa microbiana es un almacén lábil de nutrimentos provenientes del aporte de la Materia orgánica se puede utilizar como índice del estatus biológico y de la fertilidad del suelo al determinar su contenido de carbono y su actividad por medio de la producción de CO₂.
- En la mayoría de los sitios de estudio de las cuatro zonas, el carbono de la biomasa microbiana disminuyó al aumentar la altitud.
- Los sitios del Parque Nacional Benito Juárez y la Reserva de la Biosfera El Cielo tuvieron una disminución en la producción de CO₂ y la cantidad de N-total del suelo al ir ascendiendo sobre el gradiente altitudinal.
- En los sitios de la Reserva de la Biosfera Sierra de Manantlán y el Parque Nacional Iztaccíhuatl-Popocatepetl a mayor altitud se obtuvo una mayor producción de CO₂ y de N-total.

Comentario: Estos datos pueden ayudar en la elaboración de un diagnóstico sobre el estado del ecosistema y el potencial que puede alcanzar con un manejo adecuado.

Recomendación: La captura de C puede aumentar o mantenerse en equilibrio si se lleva a cabo buen manejo de los recursos forestales.

13. BIBLIOGRAFÍA

1. Aon, M.A., M.N. Cabello, D.E. Sarena, A.C. Colaneri, M.G. Franco, J.L. Burgos y S. Cortassa. 2001. Spatio-temporal patterns of soil microbial and enzymatic activities in an agricultural soil. *Applied Soil Ecology*. 18: 239-254.
2. Aslam, T., M.A. Choudhary y S. Saggar. 1999. Tillage impacts on soil microbial biomass C, N y P, earthworms and agronomy after two years of cropping following permanent pasture in New Zealand. *Soil & Tillage Research* 51: 103-111.
3. Borcken, W., A. Muhs y F. Beese. 2002. Application of compost in spruce forests: effects on soil respiration, basal respiration and microbial biomass. *Forest Ecology and Management* 159:49-58.
4. Blagodatskaya, E.V. y T.H. Anderson. 1998. Interactive effects of pH and substrate quality of the fungal-to-bacterial ratio and qCO_2 of microbial communities in forest soils. *Soil Biol. Biochem.* 30: 1269-1274.
5. Bremner, J.M. 1965. Total nitrogen. Pp.1149-1178. In: C.A. Black (ed). *Methods of soil analysis*. Art 2, Agronomy 9. American Society of Agronomy, Madison, Wisconsin. U.S.A.
6. Buckman, H. O y Brady, N. C. 1991. *Naturaleza y propiedades de los suelos*. Ed. Limusa. México.
7. Cruz-Flores, G. 2006. *Ecología del suelo, un enfoque hacia la nutrición mineral de las plantas superiores*. Laboratorio de Edafología y nutrición vegetal. UNAM. FES Zaragoza 104 pp.
8. 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.
9. Chávez C. y Trigo B.N. 1996. Programa de manejo para el PN Iztaccihuatl y Popocatepetl. Colección ecología y planeación UAM-Xochimilco.
10. Domínguez, R.I. y N. Aguilera. 1982. Metodología de análisis físicos y químicos de suelos. UNAM. Facultad de Ciencias-Biología 34 p.
11. Doran, J.W. y T.B. Parkin. 1994. Defining and Assessing Soil Quality. Pp. 3-22. In: Doran J., Coleman D, Bezdicek D. y Stewart B. (Ed.). *SSA Special Publication no. 35*. Wisconsin, U.S.A.

12. Duchaufour, P. y B. Souchier. 1984. Edafología, 1. Edafogénesis y Clasificación. Masson, S.A. Barcelona España.
13. FAO-ISRIC-ISSS-AISS-IBG. 1994. World Reference Base for Soil Resources, Wageningen, Rome. 161 p.
14. Foth, H. D y L. M. Turk. 1981. Fundamentos de la Ciencia del Suelo. Ed. Continental. México.
15. García, H.M. 2003. Indicadores de la calidad del suelo y estado nutrimental de *Abies religiosa* (H. B. K) Schl. et Cham; en la exposición occidente de los volcanes Iztaccíhuatl y Popocatepetl. FES Zaragoza, UNAM, México. Tesis de licenciatura.
16. Holeplass, H., B.R. Singh y R. Lal. 2004. Carbon sequestration in soil aggregates under different crop rotations and nitrogen fertilization in an inceptisol in southeastern Norway. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*. 70: 167-177.
17. INE. 2000. "Programa de Manejo Reserva de la Biosfera Sierra de Manantlán México", ed. Instituto Nacional de Ecología, México, D.F.
18. INE. 2001. "Programa De Manejo De La Reserva De La Biosfera Mariposa Monarca México", ed. Instituto Nacional de Ecología, México, D.F., pp. 159
19. INEGI, 2006. Instituto Nacional de Ecología. <http://www.ine.gob.mx> (5 de Noviembre de 2006).
20. Jackson, M.L. 1964. Análisis químico de suelos. Traducción al español de J. Beltrán. Omega. Barcelona, España.
21. Jassal, R.S., T.A. Black, G.B. Drewitt, M.D. Novak, D. Gaumon-Guay y Z. Nestic. 2004. A model of the production and transport of CO₂ in soil: predicting soil CO₂ concentrations and CO₂ efflux from a forest floor. *Agricultural and forest meteorology*. 124: 219-236.
22. Jenkinson, D.S. y J.N. Ladd. 1981. Microbial biomass in soils: Measurements and turnover. *In*: Paul, E. A., and Ladd, J. N. (eds), *Soil Biol. Biochem.* 5: 357-396.
23. Joergensen, R.G., T.H. Anderson, y V. Wolters. 1995. Carbon and nitrogen relationships in the microbial biomass of soils in beech (*Fagus sylvatica* L.) forests. *Biol. Fertil. Soils* 19: 141-147.

24. Kye-Han, L. y J. Shibu. 2003. Soil respiration, fine root production, and microbial biomass in cottonwood and loblolly pine plantations along a nitrogen fertilization gradient. *Forest Ecology and Management* 185:263-273.
25. Lal, R. 2004. Soil Carbon sequestration to mitigate climate change. *Geoderma*. 123: 1-22
26. Law, B.E., M.G. Ryan, y P.M. Anthoni. 1999. Seasonal and annual respiration of ponderosa pine ecosystem. *Global Change Biol.* 5: 169-182.
27. Leifeld, J. y I. Kögel-Knabner. 2005. Soil organic matter fractions as early indicators for carbon stock changes under different land-use? *Geoderma*. 124: 143-155.
28. León, H.M. 2007. Estimación del contenido de C en suelos de bosques templados y su relación con la calidad del suelo. FES Zaragoza, UNAM, México. Tesis de licenciatura.
29. Mahía, L., Pérez-Ventura, A. Cabaneiro y M. Díaz-Raviña. 2006. Soil Microbial biomass under pine forests in the north-western Spain: Influence of stand age, site index and parent material. *Invest Agrar: Sist Recur For.* 15 (2): 152-159.
30. Martínez, C. J. 2009. Contenido foliar N, P, Ca, Mg y K en especies arbóreas de bosques templados y calidad del suelo en la Sierra de Manantlán y la Sierra de Juárez. FES Zaragoza, UNAM, México. Tesis de licenciatura.
31. Martínez, L. y J.M. Ramírez. 1998. Unidades fisiográficas de la Reserva de la Biosfera Sierra de Manantlán bajo un sistema de información geográfica. *Terra*. Vol 16, No 3; pp.195-203.
32. Montaña, N.M., García-Oliva F, V.J. Jaramillo. 2007. Dissolved organic carbon affects soil microbial activity and nitrogen dynamics in a Mexican tropical deciduous forest. *Plant Soil*. 295: 265-277.
33. Montaña, N.M. 2008. Efecto del carbono orgánico sobre la disponibilidad de fósforo y nitrógeno en el suelo de un ecosistema tropical estacional mexicano. Tesis de Doctorado, Posgrado en Ciencias Biológicas, Universidad Nacional Autónoma de México. Distrito Federal, México; 135 pp.
34. Montaña, N.M. y S.L. Camargo-Ricalde. 2009. Apuntes del Curso de Actualización "Ecología de ecosistemas y bioquímica terrestre" Material en versión digital (CD), Universidad Metropolitana-Iztapalapa. México D.F.
35. Norma Oficial Mexicana PROY-NOM-021-RECNAT-2000. Especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de suelos. Estudios, muestreo y análisis. SEMARNAT.

<http://www.semarnat.gob.mx/leyesynormas/Normas%20Oficiales%20Mexicanas%20vigentes/NOM-021-RECNAT-2000.pdf>

36. Palmer, R. G. y Truch. 1989. Introducción a la Ciencia del Suelo. Manual de laboratorio AGT Eds. México.
37. Patrick, A.W., V. Hess, L.D. Jones, F. Finlay, Godbold y S. Lundström. 2005. The carbon we do not see –the impact of low molecular weight compounds on carbon dynamics and respirations in forest soils: a review. *Soil Biol. Biochem* 37:1-13.
38. Powlson, S.D., 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 incorporation. *Soil Biol. Biochem.* 19 (2): 159-164. Great Britain.
39. Powlson, S.D., R. Penny, Hirsch & Philip y C. Brookes. 2001. The role of soil microorganisms in soil organic matter conservation in the tropics. *Nutrient Cycling in Agroecosystems* 61:41-51.
40. Pritchett, W.L. 1991. Suelos forestales. Propiedades, conservación y mejoramiento. Ed. Limusa. 2°ed. México.
41. Ramírez, A. 2008. Densidad de la fauna edáfica como indicador de calidad del suelo en bosques templados y zonas adyacentes en México. FES Zaragoza, UNAM, México. Tesis de licenciatura.
42. Rivera, G. 1989. Contribución al estudio fitoecológico del Parque Cultural y Recreativo Desierto de los Leones. Tesis de Licenciatura. ENEP Zaragoza. UNAM. México.
43. Richards, L.A. 1990. Diagnóstico y rehabilitación de suelos salinos y sódicos. Departamento de Agricultura de los Estados Unidos de América, Limusa, México.
44. Ross, D.J. 1989. Estimation of soil microbial C by fumigation-extraction procedure: influence of soil moisture content. *Soil Biol. Biochem.* 21(6):767-772.
45. Ruipérez C., R. C. González, R. M. Fernández, F. Lafuente, O. L. Carcelén y M.B. Turrión Nieves. 2004. El fraccionamiento granulométrico de la materia orgánica como índice de su comportamiento y evolución en los suelos. *Actas de la I Reunión sobre Ecología, Ecofisiología Suelos Forestales. Cuad. Soc. Esp. Cienc. For.* 20:221-226.
46. Rzedowski, J. 1978. Vegetación de México. Limusa. México.

47. Rzedowski, J. 1994. Vegetación de México. Limusa. México. 432 pp.
48. SARH. 1993a. Cuestionario de información general sobre parques nacionales, zonas protectoras forestales y reservas forestales (Parque Nacional Benito Juárez, Oax). Subdelegación Forestal Oaxaca. 7 páginas.
49. SARH. 1993b. Diagnóstico del Parque Nacional Benito Juárez en el Estado de Oaxaca. Delegación Estatal Oaxaca. Mayo. Oaxaca, Oax. 6 páginas.
50. Sandoval-Pérez, A.L., M.E Gavito, F. García-Oliva and V.J Jaramillo. 2009. Carbon, nitrogen, phosphorus and enzymatic activity under different land uses in a tropical dry ecosystem. *Soil Use and Management*. 25: 419-426.
51. Schimel J. P., J. Bennett. 2004. Nitrogen mineralization: challenges of a changing paradigm. *Ecology* 85:591-602.
52. Shoenholtz, S.H., H. Van Miegroet y J.A. Burger. 2000. A review of chemical and physical properties as indicator of forest soil quality: challenges and opportunities *Forest Ecology and Management* 138:335-356.
53. Smith, R y Smith T. 2001. Ecología. Addison Wesley. Iberoamericana.
54. Sparling, G.P., T.G. Shepherd y H.A. Kettles. 1992. Changes in soil organic C, microbial C and aggregate stability under continuous maize and cereal cropping, and after restoration to pasture in soil from the Manawatu Region. *New Zealand Soil Till. Res.* 24: 225-241.
55. Teuscher, H y Adler R. 1980. El suelo y su fertilidad. Ed. Continental.
56. Thirukkumaran, M., Chandini y D. Parkinson. 2002. Microbial activity, nutrient dynamics and litter decomposition in a Canadian Rocky mountain pine forest as affected by N and P fertilizers. *Forest Ecology and Management* 159:187-204.
57. Tieszen, L.L., G.G. Tappan y A. Touré. Sequestration of carbon in soil organic matter in Senegal: an overview. *Journal of Arid Environments*. 59; 409-425.
58. Vance, E.D., D.C. Brookes y D.S. Jenkinson. 1987. Microbial biomass measurements in forest soil: the use of the chloroform fumigation- incubation method in strongly acid soils. *Soil Biol. Biochem.* Vol 19, No 6; pp.697-702.
59. Vargas, M.F. 1984. Parques Nacionales de México y Reservas Equivalentes. Pasado, presente y futuro. Colección: Grandes Problemas Nacionales. Serie: Los Bosques de México. Instituto de Investigaciones Económicas. UNAM. 266 páginas, más 34 de fotografías y mapa.

60. Vargas Márquez, Fernando, (1997) PARQUES NACIONALES DE MÉXICO: Aspectos físicos, sociales, legales, administrativos, recreativos, biológicos, culturales, situación actual y propuestas en torno a los parques nacionales de México, ed. Instituto Nacional de Ecología, México, D.F
61. WRB, 2006. www.fao.org/rnr/land/soils/soil/en
62. Xie, Z., G. Cadisch, G. Edwards, M.E. Baggs y H. Blum. 2005. Carbon dynamics in a temperate grassland soil after 9 years exposure to elevated CO₂ (Swiss FACE). *Soil Biol. Biochem.* 37:1387-1395.
63. Xu, X. y K. Inubushi. 2004. Effects of N sources and methane concentrations on methane uptake potential of a typical coniferous forest and its adjacent orchard soil. *Biol. Fertil. Soil* 40: 215-221.
64. Xu, X., K. Inubushi y K. Sakamoto. 2006. Effect of vegetations and temperatura on microbial biomasa carbon and metabolic quotients of temperate volcanic forest soils. *Geoderma* xx:xxx-xx

14. 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 agita y se deja enfriar.

Se agregan 5 mL de ácido fosfórico concentrado, 0.05 g de fluoruro de sodio y 10 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 fórmula 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)

Anexo B. Método de fumigación e incubación, para la determinación de CO_2 y CBM. (Powlson et al., 1987)

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 desprenderán CO_2 . Midiendo el CO_2 desprendido por determinadas células microbianas añadidas al suelo, en condiciones normalizadas y utilizando un factor, se permite el cálculo de la biomasa microbiana.

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 hará 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 CO₂.

Colocar 2 o 3 gotas de fenolftaleina como indicador y proceder a titular con HCl 0.5 N. incluir un blanco de titulación.

Realizar los cálculos para determinar los mg de CO₂ 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 K₂CO₃
meq del blanco – meq muestra = meq K₂CO₃

Igualar unidades a equivalentes químicos.
meq K₂CO₃ / 1000 = eq K₂CO₃

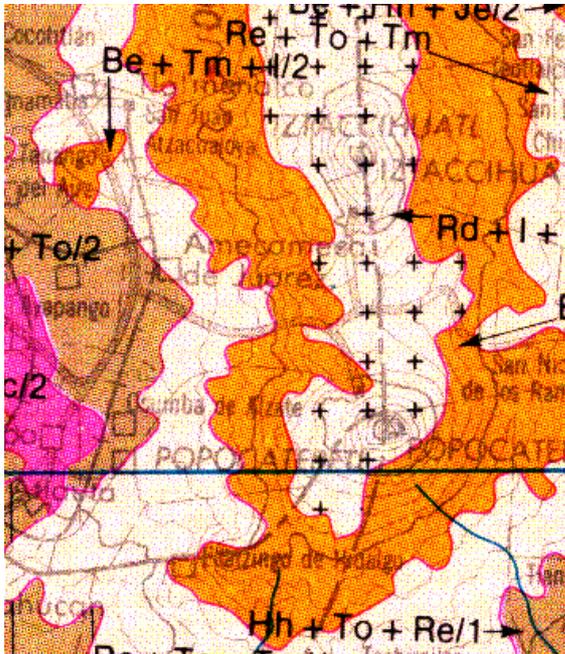
A partir de esto, obtener gramos de K₂CO₃ formados.
(eq de K₂CO₃) (PM K₂CO₃/# H sustituibles) = g de K₂CO₃

Por estequiometría se obtienen los miligramos de CO₂.
[(g de K₂CO₃) (PM CO₂) / PM K₂CO₃] 1000 = mg CO₂

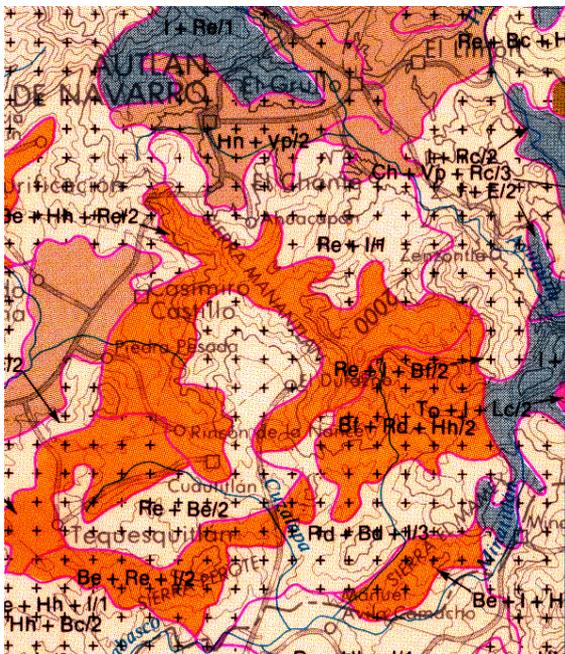
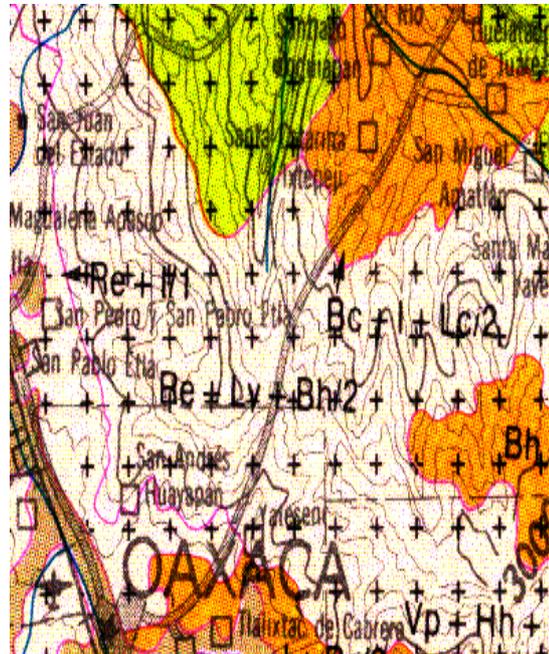
Por último obtener el peso del C en Biomasa Microbiana (CBM).
(mg CO₂ suelo fumigado – mg CO₂ suelo natural) / 0.45 = CBM mg

Anexo C. Grupos de suelo de cada una de las zonas de estudio (INEGI, 2006).

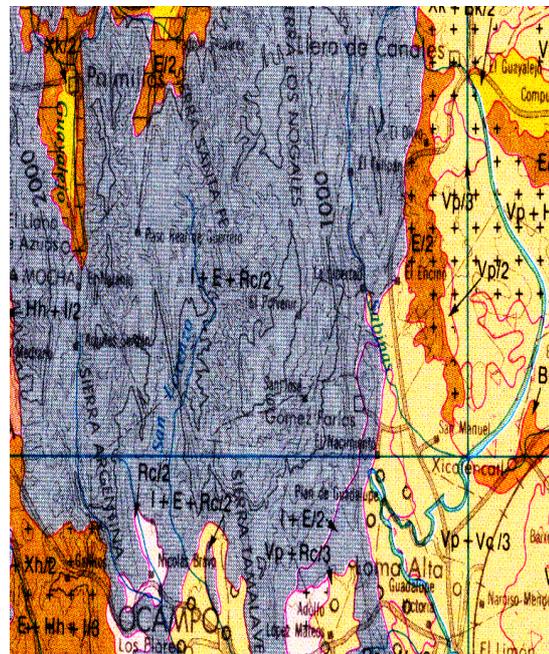
1. Parque Nacional Iztaccíhuatl-Popocatepetl



2. Parque Nacional Benito Juárez



3. Reserva de la Biósfera Sierra de Manantlán



4. Reserva de la Biosfera El Cielo

CLAVES: Be-Cambisol, Tm-Andosol, Re-Regosol, Hh-pheozem, I-Litosol, Lc-Luvisol, Vp-Vertisol, E-Rendzina.

15. APÉNDICE

Sistema SAS
Procedimiento GLM
Información del nivel de clase

Clase	Niveles	Valores
ANP	4	1 3 4 5
Sitio	52	1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20 21 22 23 24 25 26 27 28 29 30 31 33 34 35 36 37 38 39 40 41 42 43 44 45 46 47 48 49 50 51 52 53
Altitud	50	852 960 1029 1062 1208 1563 1672 1774 1806 1818 1900 1952 1972 2003 2024 2039 2054 2114 2117 2119 2120 2133 2134 2177 2222 2258 2326 2327 2387 2426 2486 2576 2636 2673 2682 2755 2844 2879 2883 3047 3101 3180 3215 3232 3290 3316 3320 3582 3621 3902

Número de observaciones 158

Variables dependientes con modelos de valores ausentes equivalentes

Pattern	Observación	Variables dependientes
1	95	pHaq
2	96	pHpot
3	105	CE
4	140	massuel DAGcm3
5	126	DR
6	123	pEP
7	104	pHumSue
8	85	p_arcilla
9	88	p_limo p_Arena
10	132	Nt
11	121	NtMgha
12	122	pMOS
13	112	MOSTha COSTha1
14	114	MOSMgha COSMgha
15	110	rCN
16	155	CBMmggdia
17	53	CBMtha CO2mg CO2mggdia CO2thadia

NOTA: Variables in each group are consistent with respect to the presence or absence of missing values.

Sistema SAS
Procedimiento GLM

Variable dependiente: pHaq

Fuente	DF	Suma de cuadrados	Cuadrado de la media	F-Valor	Pr > F
Modelo	39	48.10360719	1.23342583	18.78	<.0001
Error	55	3.61268333	0.06568515		
Total correcto	94	51.71629053			

R-cuadrado	Coef Var	Raiz MSE	pHaq Media
0.930144	4.765827	0.256291	5.377684

Fuente	DF	Tipo I SS	Cuadrado de la media	F-Valor	Pr > F
ANP	3	13.05688481	4.35229494	66.26	<.0001
Sitio	36	35.04672238	0.97352007	14.82	<.0001
Altitud	0	0.00000000	.	.	.

Procedimiento GLM

Nivel de ANP	N	Media	Dev std
1	18	5.92777778	0.45268552
3	18	5.41222222	0.59616969
4	45	5.02577778	0.77095127
5	14	5.75714286	0.47889984

Sistema SAS

Procedimiento GLM

Prueba del rango estudentizado de Tukey (HSD) para pHaq

NOTA: Este test controla el índice de error de experimentwise de tipo I.

Alfa	0.05
Error de grados de libertad	55
Error de cuadrado medio	0.065685
Valor crítico del rango estudentizado	3.74677

Las comparaciones importantes del nivel 0.05 están indicadas por ***.

ANP Comparación	Diferencia entre medias	Simultáneo 95% Límites de confianza	
1 - 5	0.17063	-0.07133	0.41260
1 - 3	0.51556	0.28922	0.74189 ***
1 - 4	0.90200	0.71263	1.09137 ***
5 - 1	-0.17063	-0.41260	0.07133
5 - 3	0.34492	0.10296	0.58688 ***
5 - 4	0.73137	0.52357	0.93916 ***
3 - 1	-0.51556	-0.74189	-0.28922 ***
3 - 5	-0.34492	-0.58688	-0.10296 ***
3 - 4	0.38644	0.19708	0.57581 ***
4 - 1	-0.90200	-1.09137	-0.71263 ***
4 - 5	-0.73137	-0.93916	-0.52357 ***
4 - 3	-0.38644	-0.57581	-0.19708 ***

Sistema SAS
Procedimiento GLM

Variable dependiente: pHpot

Fuente	DF	Suma de cuadrados	Cuadrado de la media	F-Valor	Pr > F
Modelo	41	44.76051096	1.09171978	44.25	<.0001
Error	54	1.33225000	0.02467130		
Total correcto	95	46.09276096			

R-cuadrado	Coef Var	Raiz MSE	pHpot Media
0.971096	3.686445	0.157071	4.260771

Fuente	DF	Tipo I SS	Cuadrado de la media	F-Valor	Pr > F
ANP	3	5.69951371	1.89983790	77.01	<.0001
Sitio	38	39.06099725	1.02792098	41.66	<.0001
Altitud	0	0.00000000	.	.	.

Procedimiento GLM

Nivel de ANP	N	Media	Dev std
1	18	4.52133333	0.33598022
3	18	4.27722222	0.36644244
4	33	3.94242424	0.48409729
5	27	4.46518519	1.05049941

Sistema SAS

Procedimiento GLM

Prueba del rango estudentizado de Tukey (HSD) para pHpot

NOTA: Este test controla el índice de error de experimentwise de tipo I.

Alfa 0.05
Error de grados de libertad 54
Error de cuadrado medio 0.024671
Valor crítico del rango estudentizado 3.74886

Las comparaciones importantes del nivel 0.05 están indicadas por ***.

ANP Comparación	Diferencia entre medias	Simultáneo 95% Límites de confianza	
1 - 5	0.05615	-0.07055	0.18285
1 - 3	0.24411	0.10532	0.38290 ***
1 - 4	0.57891	0.45691	0.70091 ***
5 - 1	-0.05615	-0.18285	0.07055
5 - 3	0.18796	0.06127	0.31466 ***
5 - 4	0.52276	0.41471	0.63081 ***
3 - 1	-0.24411	-0.38290	-0.10532 ***
3 - 5	-0.18796	-0.31466	-0.06127 ***
3 - 4	0.33480	0.21279	0.45680 ***
4 - 1	-0.57891	-0.70091	-0.45691 ***
4 - 5	-0.52276	-0.63081	-0.41471 ***
4 - 3	-0.33480	-0.45680	-0.21279 ***

Sistema SAS

Procedimiento GLM

Variable dependiente: CE

Fuente	DF	Suma de cuadrados	Cuadrado de la media	F-Valor	Pr > F
Modelo	44	0.21892238	0.00497551	4.18	<.0001
Error	60	0.07148333	0.00119139		
Total correcto	104	0.29040571			

R-cuadrado 0.753850
Coef Var 52.75448
Raiz MSE 0.034517
CE Media 0.065429

Fuente	DF	Tipo I SS	Cuadrado de la media	F-Valor	Pr > F
ANP	3	0.03234460	0.01078153	9.05	<.0001
Sitio	41	0.18657778	0.00455068	3.82	<.0001
Altitud	0	0.00000000	.	.	.

Procedimiento GLM

Nivel de ANP	N	Media	Dev std
1	22	0.09545455	0.05646130
3	18	0.04944444	0.01211330
4	44	0.05318182	0.05709123
5	21	0.07333333	0.04922736

Sistema SAS

Procedimiento GLM

Prueba del rango estudentizado de Tukey (HSD) para CE

NOTA: Este test controla el índice de error de experimentwise de tipo I.

Alfa 0.05
Error de grados de libertad 60
Error de cuadrado medio 0.001191
Valor crítico del rango estudentizado 3.73709

Las comparaciones importantes del nivel 0.05 están indicadas por ***.

ANP Comparación	Diferencia entre medias	Simultáneo 95% Límites de confianza	
1 - 5	0.022121	-0.005705	0.049948

```

1 - 4      0.042273      0.018456      0.066089      ***
1 - 3      0.046010      0.017021      0.074999      ***
5 - 1      -0.022121      -0.049948      0.005705
5 - 4      0.020152      -0.004040      0.044343
5 - 3      0.023889      -0.005409      0.053186
4 - 1      -0.042273      -0.066089      -0.018456      ***
4 - 5      -0.020152      -0.044343      0.004040
4 - 3      0.003737      -0.021782      0.029257
3 - 1      -0.046010      -0.074999      -0.017021      ***
3 - 5      -0.023889      -0.053186      0.005409
3 - 4      -0.003737      -0.029257      0.021782
    
```

Sistema SAS

Procedimiento GLM

Variable dependiente: **massuel**

Fuente	DF	Suma de cuadrados	Cuadrado de la media	F-Valor	Pr > F
Modelo	52	22756312.88	437621.40	115.32	<.0001
Error	87	330155.33	3794.89		
Total correcto	139	23086468.22			

R-cuadrado	Coef Var	Raiz MSE	massuel Media
0.985699	3.155759	61.60267	1952.072

Fuente	DF	Tipo I SS	Cuadrado de la media	F-Valor	Pr > F
ANP	3	3651244.78	1217081.59	320.72	<.0001
Sitio	48	19105014.10	398021.13	104.88	<.0001
Altitud	1	54.00	54.00	0.01	0.9053

Procedimiento GLM

Variable dependiente: **DAgcm3**

Fuente	DF	Suma de cuadrados	Cuadrado de la media	F-Valor	Pr > F
Modelo	52	5.66773381	0.10899488	116.23	<.0001
Error	87	0.08158333	0.00093774		
Total correcto	139	5.74931714			

R-cuadrado	Coef Var	Raiz MSE	DAgcm3 Media
0.985810	3.137095	0.030623	0.976143

Fuente	DF	Tipo I SS	Cuadrado de la media	F-Valor	Pr > F
ANP	3	0.90777625	0.30259208	322.68	<.0001
Sitio	48	4.75995756	0.09916578	105.75	<.0001
Altitud	1	0.00000000	0.00000000	0.00	1.0000

Procedimiento GLM

Nivel de ANP	N	-----massuel-----		-----DAgcm3-----	
		Media	Dev std	Media	Dev std
1	18	1862.26000	232.403455	0.93000000	0.11606286
3	18	1559.77778	100.321574	0.78111111	0.05028026
4	58	2045.02310	501.410180	1.02310345	0.25008916
5	46	2023.52174	298.717313	1.01130435	0.14940785

Sistema SAS

Procedimiento GLM

Prueba del rango estudentizado de Tukey (HSD) para **massuel**

NOTA: Este test controla el índice de error de experimentwise de tipo I.

Alfa	0.05
Error de grados de libertad	87
Error de cuadrado medio	3794.889

Valor crítico del rango estudentizado 3.70438

Las comparaciones importantes del nivel 0.05 están indicadas por ***.

ANP Comparación	Diferencia entre medias	Simultáneo 95% Límites de confianza	
4 - 5	21.50	-10.36	53.36
4 - 1	182.76	139.23	226.30 ***
4 - 3	485.25	441.71	528.78 ***
5 - 4	-21.50	-53.36	10.36
5 - 1	161.26	116.40	206.12 ***
5 - 3	463.74	418.88	508.61 ***
1 - 4	-182.76	-226.30	-139.23 ***
1 - 5	-161.26	-206.12	-116.40 ***
1 - 3	302.48	248.70	356.27 ***
3 - 4	-485.25	-528.78	-441.71 ***
3 - 5	-463.74	-508.61	-418.88 ***
3 - 1	-302.48	-356.27	-248.70 ***

Sistema SAS

Procedimiento GLM

Prueba del rango estudentizado de Tukey (HSD) para DAGcm3

NOTA: Este test controla el índice de error de experimentwise de tipo I.

Alfa	0.05
Error de grados de libertad	87
Error de cuadrado medio	0.000938
Valor crítico del rango estudentizado	3.70438

Las comparaciones importantes del nivel 0.05 están indicadas por ***.

ANP Comparación	Diferencia entre medias	Simultáneo 95% Límites de confianza	
4 - 5	0.011799	-0.004038	0.027636
4 - 1	0.093103	0.071461	0.114745 ***
4 - 3	0.241992	0.220350	0.263634 ***
5 - 4	-0.011799	-0.027636	0.004038
5 - 1	0.081304	0.059004	0.103605 ***
5 - 3	0.230193	0.207893	0.252494 ***
1 - 4	-0.093103	-0.114745	-0.071461 ***
1 - 5	-0.081304	-0.103605	-0.059004 ***
1 - 3	0.148889	0.122151	0.175626 ***
3 - 4	-0.241992	-0.263634	-0.220350 ***
3 - 5	-0.230193	-0.252494	-0.207893 ***
3 - 1	-0.148889	-0.175626	-0.122151 ***

Sistema SAS

Procedimiento GLM

Variable dependiente: DR

Fuente	DF	Suma de cuadrados	Cuadrado de la media	F-Valor	Pr > F
Modelo	50	11.18165238	0.22363305	4.00	<.0001
Error	75	4.18898333	0.05585311		
Total correcto	125	15.37063571			

R-cuadrado	Coef Var	Raiz MSE	DR Media
0.727468	11.19681	0.236333	2.110714

Fuente	DF	Tipo I SS	Cuadrado de la media	F-Valor	Pr > F
ANP	3	0.48148993	0.16049664	2.87	0.0418
Sitio	46	10.70014579	0.23261186	4.16	<.0001
Altitud	1	0.00001667	0.00001667	0.00	0.9863

Nivel de ANP	N	Media	Dev std
1	18	2.23777778	0.32206239
3	5	2.24800000	0.43372803
4	58	2.09086207	0.38897655
5	45	2.07022222	0.29190198

Sistema SAS

Procedimiento GLM

Prueba del rango estudentizado de Tukey (HSD) para DR

NOTA: Este test controla el índice de error de experimentwise de tipo I.

Alfa	0.05
Error de grados de libertad	75
Error de cuadrado medio	0.055853
Valor crítico del rango estudentizado	3.71596

Las comparaciones importantes del nivel 0.05 están indicadas por ***.

ANP Comparación	Diferencia entre medias	Simultáneo 95% Límites de confianza
3 - 1	0.01022	-0.30370 0.32414
3 - 4	0.15714	-0.13230 0.44657
3 - 5	0.17778	-0.11496 0.47051
1 - 3	-0.01022	-0.32414 0.30370
1 - 4	0.14692	-0.02063 0.31446
1 - 5	0.16756	-0.00563 0.34074
4 - 3	-0.15714	-0.44657 0.13230
4 - 1	-0.14692	-0.31446 0.02063
4 - 5	0.02064	-0.10272 0.14400
5 - 3	-0.17778	-0.47051 0.11496
5 - 1	-0.16756	-0.34074 0.00563
5 - 4	-0.02064	-0.14400 0.10272

Sistema SAS

Procedimiento GLM

Variable dependiente: pEP

Fuente	DF	Suma de cuadrados	Cuadrado de la media	F-Valor	Pr > F
Modelo	49	10783.91667	220.07993	6.39	<.0001
Error	73	2513.11730	34.42626		
Total correcto	122	13297.03397			

R-cuadrado	Coef Var	Raiz MSE	pEP Media
0.811002	11.08447	5.867390	52.93341

Fuente	DF	Tipo I SS	Cuadrado de la media	F-Valor	Pr > F
ANP	3	1485.293151	495.097717	14.38	<.0001
Sitio	45	9298.594115	206.635425	6.00	<.0001
Altitud	1	0.029400	0.029400	0.00	0.9768

Procedimiento GLM

Nivel de ANP	N	Media	Dev std
1	18	57.9522222	6.2402588
3	5	64.6500000	8.5533385
4	55	52.4503636	10.7537005
5	45	50.2144444	10.2385594

Sistema SAS

Procedimiento GLM

Prueba del rango estudentizado de Tukey (HSD) para pEP

NOTA: Este test controla el índice de error de experimentwise de tipo I.

Alfa	0.05
Error de grados de libertad	73
Error de cuadrado medio	34.42626
Valor crítico del rango estudentizado	3.71827

Las comparaciones importantes del nivel 0.05 están indicadas por ***.

ANP Comparación	Diferencia entre medias	Simultáneo 95% Límites de confianza
--------------------	-------------------------------	---

3 - 1	6.698	-1.101	14.496	
3 - 4	12.200	4.994	19.405	***
3 - 5	14.436	7.163	21.708	***
1 - 3	-6.698	-14.496	1.101	
1 - 4	5.502	1.313	9.691	***
1 - 5	7.738	3.436	12.040	***
4 - 3	-12.200	-19.405	-4.994	***
4 - 1	-5.502	-9.691	-1.313	***
4 - 5	2.236	-0.865	5.337	***
5 - 3	-14.436	-21.708	-7.163	***
5 - 1	-7.738	-12.040	-3.436	***
5 - 4	-2.236	-5.337	0.865	

Sistema SAS

Procedimiento GLM

Variable dependiente: pHumSue

Fuente	DF	Suma de cuadrados	Cuadrado de la media	F-Valor	Pr > F
Modelo	42	10456.66632	248.96825	62.74	<.0001
Error	61	242.06647	3.96830		
Total correcto	103	10698.73278			

R-cuadrado	Coef Var	Raiz MSE	pHumSue Media
0.977374	11.71184	1.992060	17.00894

Fuente	DF	Tipo I SS	Cuadrado de la media	F-Valor	Pr > F
ANP	2	2213.168938	1106.584469	278.86	<.0001
Sitio	39	8243.497379	211.371728	53.27	<.0001
Altitud	1	0.000000	0.000000	0.00	1.0000

Procedimiento GLM

Nivel de ANP	N	Media	Dev std
1	13	11.1884615	11.2269162
4	47	13.6463830	9.9086592
5	44	22.3204545	7.5585925

Sistema SAS

Procedimiento GLM

Prueba del rango estudentizado de Tukey (HSD) para pHumSue

NOTA: Este test controla el índice de error de experimentwise de tipo I.

Alfa	0.05
Error de grados de libertad	61
Error de cuadrado medio	3.968303
Valor crítico del rango estudentizado	3.39726

Las comparaciones importantes del nivel 0.05 están indicadas por ***.

ANP Comparación	Diferencia entre medias	Simultáneo 95% Límites de confianza		
5 - 4	8.6741	7.6702	9.6779	***
5 - 1	11.1320	9.6214	12.6426	***
4 - 5	-8.6741	-9.6779	-7.6702	***
4 - 1	2.4579	0.9583	3.9575	***
1 - 5	-11.1320	-12.6426	-9.6214	***
1 - 4	-2.4579	-3.9575	-0.9583	***

Sistema SAS

Procedimiento GLM

Variable dependiente: p_arcilla

Fuente	DF	Suma de cuadrados	Cuadrado de la media	F-Valor	Pr > F
Modelo	48	26920.22449	560.83801	206.02	<.0001
Error	36	98.00000	2.72222		
Total correcto	84	27018.22449			

R-cuadrado	Coef Var	Raiz MSE	p_arcilla Media
------------	----------	----------	-----------------

0.996373 8.251909 1.649916 19.99435

Fuente	DF	Tipo I SS	Cuadrado de la media	F-Valor	Pr > F
ANP	3	8412.83396	2804.27799	1030.14	<.0001
Sitio	45	18507.39052	411.27534	151.08	<.0001
Altitud	0	0.00000	.	.	.

Procedimiento GLM

Nivel de ANP	N	Media	Dev std
1	23	5.1478261	1.0283568
3	6	25.0000000	4.1472883
4	32	21.1325000	16.9035104
5	24	31.4533333	20.4711213

Sistema SAS
Procedimiento GLM

Prueba del rango estudentizado de Tukey (HSD) para p_arcilla

NOTA: Este test controla el índice de error de experimentwise de tipo I.

Alfa	0.05
Error de grados de libertad	36
Error de cuadrado medio	2.722222
Valor crítico del rango estudentizado	3.80880

Las comparaciones importantes del nivel 0.05 están indicadas por ***.

ANP Comparación	Diferencia entre medias	Simultáneo 95% Límites de confianza	
5 - 3	6.4533	4.4251	8.4815 ***
5 - 4	10.3208	9.1209	11.5207 ***
5 - 1	26.3055	25.0089	27.6021 ***
3 - 5	-6.4533	-8.4815	-4.4251 ***
3 - 4	3.8675	1.8906	5.8444 ***
3 - 1	19.8522	17.8152	21.8892 ***
4 - 5	-10.3208	-11.5207	-9.1209 ***
4 - 3	-3.8675	-5.8444	-1.8906 ***
4 - 1	15.9847	14.7700	17.1994 ***
1 - 5	-26.3055	-27.6021	-25.0089 ***
1 - 3	-19.8522	-21.8892	-17.8152 ***
1 - 4	-15.9847	-17.1994	-14.7700 ***

Sistema SAS

Procedimiento GLM

Variable dependiente: p_limo

Fuente	DF	Suma de cuadrados	Cuadrado de la media	F-Valor	Pr > F
Modelo	49	7264.462236	148.254331	176.05	<.0001
Error	38	32.000000	0.842105		
Total correcto	87	7296.462236			

R-cuadrado	0.995614
Coef Var	3.706436
Raiz MSE	0.917663
p_limo Media	24.75864

Fuente	DF	Tipo I SS	Cuadrado de la media	F-Valor	Pr > F
ANP	3	226.425475	75.475158	89.63	<.0001
Sitio	46	7038.036761	153.000799	181.69	<.0001
Altitud	0	0.000000	.	.	.

Procedimiento GLM

Variable dependiente: p_Arena

Fuente	DF	Suma de cuadrados	Cuadrado de la media	F-Valor	Pr > F
Modelo	49	36088.59043	736.50185	1554.84	<.0001
Error	38	18.00000	0.47368		

Total correcto 87 36106.59043

R-cuadrado Coef Var Raiz MSE p_Arena Media
0.999501 1.272128 0.688247 54.10205

Fuente	DF	Tipo I SS	Cuadrado de la media	F-Valor	Pr > F
ANP	3	12612.26392	4204.08797	8875.30	<.0001
Sitio	46	23476.32652	510.35492	1077.42	<.0001
Altitud	0	0.00000	.	.	.

Procedimiento GLM

Nivel de ANP	N	-----p_limo-----		-----p_Arena-----	
		Media	Dev std	Media	Dev std
1	23	22.3930435	3.9670580	72.4591304	3.2244716
3	6	28.1666667	4.0207794	46.8333333	6.7057190
4	32	25.6825000	7.1653211	53.1850000	18.2970070
5	27	24.9214815	13.9385751	41.1666667	22.0685645

Sistema SAS

Procedimiento GLM

Prueba del rango estudentizado de Tukey (HSD) para p_limo

NOTA: Este test controla el índice de error de experimentwise de tipo I.

Alfa 0.05
Error de grados de libertad 38
Error de cuadrado medio 0.842105
Valor crítico del rango estudentizado 3.79925

Las comparaciones importantes del nivel 0.05 están indicadas por ***.

ANP Comparación	Diferencia entre medias	Simultáneo 95% Límites de confianza	
3 - 4	2.4842	1.3874	3.5809 ***
3 - 5	3.2452	2.1325	4.3579 ***
3 - 1	5.7736	4.6435	6.9037 ***
4 - 3	-2.4842	-3.5809	-1.3874 ***
4 - 5	0.7610	0.1168	1.4052 ***
4 - 1	3.2895	2.6155	3.9634 ***
5 - 3	-3.2452	-4.3579	-2.1325 ***
5 - 4	-0.7610	-1.4052	-0.1168 ***
5 - 1	2.5284	1.8289	3.2280 ***
1 - 3	-5.7736	-6.9037	-4.6435 ***
1 - 4	-3.2895	-3.9634	-2.6155 ***
1 - 5	-2.5284	-3.2280	-1.8289 ***

Sistema SAS

Procedimiento GLM

Prueba del rango estudentizado de Tukey (HSD) para p_Arena

NOTA: Este test controla el índice de error de experimentwise de tipo I.

Alfa 0.05
Error de grados de libertad 38
Error de cuadrado medio 0.473684
Valor crítico del rango estudentizado 3.79925

Las comparaciones importantes del nivel 0.05 están indicadas por ***.

ANP Comparación	Diferencia entre medias	Simultáneo 95% Límites de confianza	
1 - 4	19.2741	18.7687	19.7796 ***
1 - 3	25.6258	24.7782	26.4734 ***
1 - 5	31.2925	30.7678	31.8171 ***
4 - 1	-19.2741	-19.7796	-18.7687 ***
4 - 3	6.3517	5.5291	7.1742 ***
4 - 5	12.0183	11.5352	12.5015 ***
3 - 1	-25.6258	-26.4734	-24.7782 ***
3 - 4	-6.3517	-7.1742	-5.5291 ***
3 - 5	5.6667	4.8322	6.5012 ***

```

5 - 1      -31.2925      -31.8171      -30.7678      ***
5 - 4      -12.0183      -12.5015      -11.5352      ***
5 - 3      -5.6667       -6.5012       -4.8322      ***

```

Sistema SAS

Procedimiento GLM

Variable dependiente: NtMgha

Fuente	DF	Suma de cuadrados	Cuadrado de la media	F-Valor	Pr > F
Modelo	51	766.0659201	15.0209004	113.56	<.0001
Error	69	9.1268667	0.1322734		
Total correcto	120	775.1927868			

R-cuadrado	Coef Var	Raiz MSE	NtMgha Media
0.988226	8.980835	0.363694	4.049669

Fuente	DF	Tipo I SS	Cuadrado de la media	F-Valor	Pr > F
ANP	3	112.5308972	37.5102991	283.58	<.0001
Sitio	48	653.5350229	13.6153130	102.93	<.0001
Altitud	0	0.0000000	.	.	.

Procedimiento GLM

Nivel de ANP	N	Media	Dev std
1	18	4.59666667	2.37351564
3	18	6.03944444	2.80201917
4	50	3.81820000	2.74119942
5	35	3.07571429	1.38504892

Sistema SAS
Procedimiento GLM

Prueba del rango estudentizado de Tukey (HSD) para NtMgha

NOTA: Este test controla el índice de error de experimentwise de tipo I.

Alfa	0.05
Error de grados de libertad	69
Error de cuadrado medio	0.132273
Valor crítico del rango estudentizado	3.72329

Las comparaciones importantes del nivel 0.05 están indicadas por ***.

ANP Comparación	Diferencia entre medias	Simultáneo 95% Límites de confianza	
3 - 1	1.44278	1.12360	1.76195 ***
3 - 4	2.22124	1.95805	2.48444 ***
3 - 5	2.96373	2.68600	3.24146 ***
1 - 3	-1.44278	-1.76195	-1.12360 ***
1 - 4	0.77847	0.51527	1.04166 ***
1 - 5	1.52095	1.24323	1.79868 ***
4 - 3	-2.22124	-2.48444	-1.95805 ***
4 - 1	-0.77847	-1.04166	-0.51527 ***
4 - 5	0.74249	0.53146	0.95351 ***
5 - 3	-2.96373	-3.24146	-2.68600 ***
5 - 1	-1.52095	-1.79868	-1.24323 ***
5 - 4	-0.74249	-0.95351	-0.53146 ***

Sistema SAS

Procedimiento GLM

Variable dependiente: pMOS

Fuente	DF	Suma de cuadrados	Cuadrado de la media	F-Valor	Pr > F
Modelo	51	3463.958698	67.920759	140.08	<.0001
Error	70	33.940050	0.484858		
Total correcto	121	3497.898748			

R-cuadrado	Coef Var	Raiz MSE	pMOS Media
------------	----------	----------	------------

0.990297 8.077313 0.696317 8.620656

Fuente	DF	Tipo I SS	Cuadrado de la media	F-Valor	Pr > F
ANP	3	653.511205	217.837068	449.28	<.0001
Sitio	48	2810.447493	58.550989	120.76	<.0001
Altitud	0	0.000000	.	.	.

Procedimiento GLM

Nivel de ANP	N	Media	Dev std
1	26	6.4330769	2.44712692
3	18	13.7000000	2.27337531
4	45	8.8591111	6.63981956
5	33	7.2484848	4.56542654

Sistema SAS

Procedimiento GLM

Prueba del rango estudentizado de Tukey (HSD) para pMOS

NOTA: Este test controla el índice de error de experimentwise de tipo I.

Alfa 0.05
Error de grados de libertad 70
Error de cuadrado medio 0.484858
Valor crítico del rango estudentizado 3.72198

Las comparaciones importantes del nivel 0.05 están indicadas por ***.

ANP Comparación	Diferencia entre medias	Simultáneo 95% Límites de confianza	
3 - 4	4.8409	4.3298	5.3520 ***
3 - 5	6.4515	5.9145	6.9885 ***
3 - 1	7.2669	6.7050	7.8288 ***
4 - 3	-4.8409	-5.3520	-4.3298 ***
4 - 5	1.6106	1.1906	2.0306 ***
4 - 1	2.4260	1.9746	2.8775 ***
5 - 3	-6.4515	-6.9885	-5.9145 ***
5 - 4	-1.6106	-2.0306	-1.1906 ***
5 - 1	0.8154	0.3348	1.2960 ***
1 - 3	-7.2669	-7.8288	-6.7050 ***
1 - 4	-2.4260	-2.8775	-1.9746 ***
1 - 5	-0.8154	-1.2960	-0.3348 ***

Sistema SAS

Procedimiento GLM

Variable dependiente: COSMgha

Fuente	DF	Suma de cuadrados	Cuadrado de la media	F-Valor	Pr > F
Modelo	51	376172.7406	7375.9361	100.85	<.0001
Error	62	4534.5603	73.1381		
Total correcto	113	380707.3009			

R-cuadrado 0.988089
Coef Var 9.320676
Raiz MSE 8.552080
COSMgha Media 91.75386

Fuente	DF	Tipo I SS	Cuadrado de la media	F-Valor	Pr > F
ANP	3	31547.1589	10515.7196	143.78	<.0001
Sitio	48	344625.5817	7179.6996	98.17	<.0001
Altitud	0	0.0000	.	.	.

Procedimiento GLM

Nivel de ANP	N	Media	Dev std	Media	Dev std
1	18	119.128333	47.628078	69.095000	27.6242490
3	18	213.952778	38.520556	124.092222	22.3416021
4	45	163.640667	129.589413	94.912222	75.1619896
5	33	141.667273	85.737332	82.167273	49.7279060

Procedimiento GLM

Procedimiento GLM

Prueba del rango estudentizado de Tukey (HSD) para COSMgha

NOTA: Este test controla el índice de error de experimentwise de tipo I.

Alfa 0.05
Error de grados de libertad 62
Error de cuadrado medio 73.13807
Valor crítico del rango estudentizado 3.73367

Las comparaciones importantes del nivel 0.05 están indicadas por ***.

ANP Comparación	Diferencia entre medias	Simultáneo 95% Límites de confianza		
3 - 4	29.180	22.883	35.477	***
3 - 5	41.925	35.309	48.541	***
3 - 1	54.997	47.471	62.523	***
4 - 3	-29.180	-35.477	-22.883	***
4 - 5	12.745	7.570	17.920	***
4 - 1	25.817	19.520	32.114	***
5 - 3	-41.925	-48.541	-35.309	***
5 - 4	-12.745	-17.920	-7.570	***
5 - 1	13.072	6.456	19.688	***
1 - 3	-54.997	-62.523	-47.471	***
1 - 4	-25.817	-32.114	-19.520	***
1 - 5	-13.072	-19.688	-6.456	***

Sistema SAS
Procedimiento GLM

Variable dependiente: rCN

Fuente	DF	Suma de cuadrados	Cuadrado de la media	F-Valor	Pr > F
Modelo	51	585493.1356	11480.2576	240.98	<.0001
Error	58	2763.1566	47.6406		
Total correcto	109	588256.2921			

R-cuadrado 0.995303
Coef Var 17.49370
Raiz MSE 6.902219
rCN Media 39.45545

Fuente	DF	Tipo I SS	Cuadrado de la media	F-Valor	Pr > F
ANP	3	19365.7886	6455.2629	135.50	<.0001
Sitio	48	566127.3469	11794.3197	247.57	<.0001
Altitud	0	0.0000	.	.	.

Procedimiento GLM

Nivel de ANP	N	Media	Dev std
1	18	17.3938889	10.086562
3	18	26.8711111	15.724750
4	45	52.5477778	104.395763
5	29	40.6441379	54.584299

Sistema SAS

Procedimiento GLM

Prueba del rango estudentizado de Tukey (HSD) para rCN

NOTA: Este test controla el índice de error de experimentwise de tipo I.

Alfa 0.05
Error de grados de libertad 58
Error de cuadrado medio 47.64063
Valor crítico del rango estudentizado 3.74075

Las comparaciones importantes del nivel 0.05 están indicadas por ***.

ANP Comparación	Diferencia entre medias	Simultáneo 95% Límites de confianza		
4 - 5	11.904	7.556	16.251	***
4 - 3	25.677	20.585	30.768	***
4 - 1	35.154	30.062	40.246	***

5 - 4	-11.904	-16.251	-7.556	***
5 - 3	13.773	8.295	19.251	***
5 - 1	23.250	17.772	28.729	***
3 - 4	-25.677	-30.768	-20.585	***
3 - 5	-13.773	-19.251	-8.295	***
3 - 1	9.477	3.392	15.563	***
1 - 4	-35.154	-40.246	-30.062	***
1 - 5	-23.250	-28.729	-17.772	***
1 - 3	-9.477	-15.563	-3.392	***

Procedimiento GLM

Prueba del rango estudentizado de Tukey (HSD) para CBMgg

NOTA: Este test controla el índice de error de experimentwise de tipo I.

Alfa	0.05
Error de grados de libertad	102
Error de cuadrado medio	2.967E16
Valor crítico del rango estudentizado	3.69378

Las comparaciones importantes del nivel 0.05 están indicadas por ***.

ANP Comparación	Diferencia entre medias	Simultáneo 95% Límites de confianza	
5 - 1	46409	-107398689	107491507
5 - 4	36619873	-49527857	122767604
5 - 3	418409901	294746459	542073342 ***
1 - 5	-46409	-107491507	107398689
1 - 4	36573464	-67684741	140831670
1 - 3	418363492	281465761	555261223 ***
4 - 5	-36619873	-122767604	49527857
4 - 1	-36573464	-140831670	67684741
4 - 3	381790028	260885226	502694830 ***
3 - 5	-418409901	-542073342	-294746459 ***
3 - 1	-418363492	-555261223	-281465761 ***
3 - 4	-381790028	-502694830	-260885226 ***