



# UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

---

---

## FACULTAD DE CIENCIAS

**Efecto del cambio en la cobertura vegetal sobre la captura de carbono  
en suelo en la Reserva de la Biosfera Mariposa Monarca,  
Estado de México y Michoacán**

TESIS

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE

**BIÓLOGA**

P R E S E N T A:

**MAVIAEL SARAI VELÁZQUEZ QUINTANA**

Asesor:

**DR. JOSÉ LÓPEZ GARCÍA**

2012





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.

**1.- DATOS DEL ALUMNO**

Maviael Sarai  
Velázquez  
Quintana  
58632685  
Universidad Nacional Autónoma de México  
Facultad de Ciencias  
Biología  
30529358-7

**2.- DATOS DEL TUTOR**

Doctor  
José  
López  
García

**3.- DATOS DEL SINODAL 1**

Doctor  
Homero Julio  
Campo  
Alves

**4.- DATOS DEL SINODAL 2**

Doctora  
Lilia de Lourdes  
Manzo  
Delgado

**5.- DATOS DEL SINODAL 3**

Doctor  
Gustavo  
Álvarez  
Arteaga

**6.- DATOS DEL SINODAL 4**

M. en C.  
María del Socorro  
Galicía  
Palacios

**7.- DATOS DEL TRABAJO ESCRITO**

Efecto del cambio en la cobertura vegetal sobre la captura de carbono en suelo en la Reserva de la Biosfera Mariposa Monarca, Estado de México y Michoacán  
107 pp.  
2012



UNIVERSIDAD NACIONAL  
AUTÓNOMA DE  
MÉXICO

FACULTAD DE CIENCIAS  
Secretaría General  
División de Estudios Profesionales  
  
Votos Aprobatorios

**DR. ISIDRO ÁVILA MARTÍNEZ**  
**Director General**  
**Dirección General de Administración Escolar**  
**Presente**

Por este medio hacemos de su conocimiento que hemos revisado el trabajo escrito titulado:

**Efecto del cambio en la cobertura vegetal sobre la captura de carbono en suelo en la Reserva de la Biosfera Mariposa Monarca, Estado de México y Michoacán**

realizado por **Velázquez Quintana Mavíael Sarai** con número de cuenta **3-0529358-7** quien ha decidido titularse mediante la opción de tesis en la licenciatura en **Biología**. Dicho trabajo cuenta con nuestro voto aprobatorio.

Propietario Dr. Homero Julio Campo Alves

Propietario Dra. Lilia de Lourdes Manzo Delgado

Propietario Tutor Dr. José López García

Suplente Dr. Gustavo Álvarez Arteaga

Suplente M. en C. María del Socorro Galicia Palacios

**Atentamente**  
**"POR MI RAZA HABLARÁ EL ESPÍRITU "**  
**Ciudad Universitaria, D. F., a 04 de septiembre de 2012**  
**EL JEFE DE LA DIVISIÓN DE ESTUDIOS PROFESIONALES**

**ACT. MAURICIO AGUILAR GONZÁLEZ**

Señor sinodal: antes de firmar este documento, solicite al estudiante que le muestre la versión digital de su trabajo y verifique que la misma incluya todas las observaciones y correcciones que usted hizo sobre el mismo.

MAG/mdm

## Agradecimientos Institucionales

A la **Universidad Nacional Autónoma de México** por las valiosas horas de alegría que pase en sus instalaciones esforzándome por ser merecedora de un lugar entre sus muros de concreto y de gloria, por todo lo que sus profesores intentaron compartirme al transcurso de mi formación académica para vivir diferente.

A la **Facultad de Ciencias** por enaltecer el sentido de la ciencia, forjando una historia que involucra múltiples facetas de la definición misma de vida cubierta de complejidad y esplendor, enseñándome que la Biología es simplemente maravillosa.

Al **Proyecto PAPIIT IN 303010** "Pago por servicios ambientales y multifuncionalidad en la Reserva de la Biosfera Mariposa Monarca" por el apoyo necesario para llevar a cabo el de trabajo en campo, gabinete y en el laboratorio para concluir esta tesis.

Al **Laboratorio de Edafología "Nicolás Aguilera"** por permitirme realizar las pruebas de suelos requeridas.

A mi asesor de tesis el **Dr. José López García** por confiar en mí y en este trabajo, por apoyarme no sólo con su inmenso conocimiento sino por alentarme a superarme y ser mejor, además de esto agradezco que haya sido mi profesor durante la carrera ya que, sin darse cuenta me contagio su pasión por lo que hace, dimensionándome en lugares que parecieran corresponder algún cuento fantástico.

A la **Dra. Lilia de Lourdes Manzo** por creer en mi capacidad, por el apoyo académico a seguir aprendiendo, por su confianza, por sus consejos y por sus muy certeros comentarios en este trabajo y por todo lo demás muchas gracias.

Agradezco a mis sinodales **Dr. Julio Campo** y **Dr. Gustavo Álvarez** por las observaciones, recomendaciones, el tiempo brindado y por compartir su conocimiento para culminar una tesis mejor, así como a la **M. en C. María del Socorro Palacios** por enseñarme los diferentes métodos para la evaluación de los suelos, por su confianza, paciencia y comentarios sobre este trabajo.

A **Diego González** y a su familia por todo el apoyo en campo, por sus experiencias compartidas y su gentileza. Al señor **Erasto Martínez** quien colaboro brindando información relevante sobre la región para llevar a cabo esta tesis.

## *Agradecimientos y dedicatorias personales*

A las dos personas que más amo en todo el mundo mis queridos padres **Marcos Velázquez Martínez** y **Margarita Quintana Durán** en primer instancia por brindarme la oportunidad de venir a este mundo, por todo el apoyo que me han proporcionado sin condición alguna; dándome amor puro el cual me cobija todos los días de mi vida y noches haciéndome sentir tan especial, por jamás dejarme sola, por escuchar atentamente lo que digo y vuelo a decir, orientándome a que esta historia de vida no sea tan difícil, dándome consejos para caminar hacia mis sueños sin importar los obstáculos, pues jamás me ensañaron a rendirme, por todo lo que hemos vivido juntos (realmente glorioso), por ser tan especiales y únicos, de verdad ni todo el tiempo de la misma eternidad, ni todo el espacio del universo me bastaría para agradecerles y demostrarles lo importantes que son para mí.

A mis hermosos hermanos **Yeri Magali** y **Marco Hugo** por ser mis ejemplos a seguir, por amarme y protegerme, por apoyarnos siempre, por enseñarme a vivir a su manera y extra, además de incluirme en sus vidas, sus sentimientos y en su tiempo, por jamás jamás dejarme, por todos los momentos de exaltación, porque también me enseñaron que la vida no siempre debe ser de un sólo color, por haberme enseñado tanto tanto les agradezco muchísimo y no tengo más con que pagarles que amándoles en demasía.

A toda mi familia empezando por mis abuelitos, tíos, tías, primos y primas que me han compartido no sólo su vida sino muchas enseñanzas y cariño.

A mi súper mejor amigo **Alfonso Carbajal** por todos los momentos y aventuras que pasamos en los últimos años en la Facultad, Instituto de Geografía y Reserva de la Biosfera Mariposa Monarca, por todo su apoyo académico y personal para superar los malos momentos. Espero que el triunfo nos cobije siempre y que la amistad traspase cual haz de luz cualquier medición de tiempo.

A mis amigos y compañeros de la Facultad de Ciencias **Alma Flores**, **Mauricio Vargas** (mi primer mejor amigo en la facultad), **Elizabeth Farías**, **Iván Flores**, **Iris Coronado**, **Gabriela Romo**, **Meztlí Gutiérrez**, **Edna Mandujano**, **Isaí Arista**, **Iván Ransom**, **Aurea Martínez**, **Israel García**, **María del Carmen** y **Alejandra Fernández**, sin ustedes la instancia en la Facultad no hubiera sido la misma; como olvidar los todas las materias que cursamos juntos, las desveladas un día antes para entregar los reportes de prácticas, los trabajos finales, los exámenes, los estudios en equipo, las practicas de campo y todos los conocimientos nuevos que adquirimos juntos, pero no todo lo que vivimos fue académico también pasamos ratos muy agradables festejando los cumpleaños, las despedidas o cualquier cosa que se pudiera festejar, así como hubo momentos de máxima alegría también hubo de tristeza, gracias por su apoyo siempre y por permitirme pasar esta etapa madurando y creciendo juntos para dirigirnos a ser los mejores profesionistas de la nueva generación.

Agradezco a mis compañeros Biólogos y Geógrafos de la sala de cómputo del Instituto de Geografía: **Pablo Leautaud, Hazziel Padilla, Antonio Contreras, Jesús Domínguez, Guadalupe Hernández, Alejandro Galindo, Matilde Cruz, Gabriela Soriano y Graciela** por su apoyo en la elaboración de la tesis, por compartir su experiencia y conocimiento, realmente todo lo que vivimos y superamos fue muy espacial.

A mi mejor amigo de siempre **Rodrigo Tecaxco** por ser tan único, por estar conmigo en las buenas y mejores, por hacerme saber que puedo contar con tu presencia por las mañanas y por las noches, por compartir los 10 años más maravilloso, realmente fuiste importante en cada etapa, por hacerme ver mis errores pero también mis aciertos, sé que la distancia se torna pálida ante tantos recuerdos y vivencias haciendo que los kilómetros se conviertan en simples lazos que unen más esta amistad.

Y por último pero no menos importantes a mis mejores amigos de siempre, de la vida: **Ana Karen Camacho, Roberto Abraham Trejo, Lourdes Garduño, Nazareth Velázquez, Leticia García, Antonio Sosa y Nazaret Soto** con los que he paso un largo camino, instantes felices y difíciles son los mejores amigos que la vida pudo poner en mi camino, gracias por estar conmigo por compartirme sus vivencias y espero nunca defraudarlos, confié en que seguiremos estando juntos hasta que las estrellas dejen de brillar.



---

Alas color monarquía revoloteando al compas del silbido del viento,  
recorrido que parece interminable, interminable y sofocante,  
traspasando fronteras políticas para llegar a un lugar mejor,  
las energías debilitadas por esfuerzos sobrenaturales  
no son obstáculo suficiente para detenerse,  
quisiera encontrar una explicación a tan magnífica osadía,  
la respuesta viene con las almas que transportan la migración,  
ahí mezclada entre las esencias, entre lo terrenal y lo sublime,  
el cielo y la tierra, viaja la mariposa monarca

MSVQ

## Índice

<b>Resumen</b> .....	1
<b>I.Marco teórico</b> .....	2
1.1. Cambio climático .....	2
1.1.2.Efecto invernadero.....	4
1.2.El ciclo del carbono .....	6
1.3.Almacenes y dinámica de carbono en los bosques.....	11
1.4.Almacenen de carbono en suelos forestales .....	13
1.5.Captura de carbono orgánico del suelo (COS) en los bosques secundarios .....	15
1.6.Cambio de uso de suelo en los bosques forestales en México.....	17
1.6.1. Cambio de uso de suelo en la Reserva de la Biosfera Mariposa Monarca (RBMM) .....	21
<b>II.Planteamiento del problema</b> .....	22
<b>III.Justificación</b> .....	24
<b>IV.Objetivos</b> .....	25
<b>V.Método y materiales</b> .....	26
5.1. Descripción de la área de estudio RBMM .....	26
5.1.2. Aspectos fisiográficos.....	29
5.1.3.Geología .....	30
5.2. Clima.....	30
5.3.Edafología.....	32
5.3.1. Asociaciones de suelo y características.....	34
5.4. Vegetación.....	36
5.5. Fauna .....	39
<b>VI.Selección de los puntos de muestreo</b> .....	39
6.2. Diseño para colecta de material edáfico en el campo .....	41
<b>VII.Determinación de la Biomasa aérea</b> .....	41
7.1.Determinación frecuencias diamétricas (árboles /ha).....	42
<b>VIII.Métodos analíticos de suelos</b> .....	43
8.1. Color del suelo.....	43



8.2.Densidad aparente .....	43
8.3.Textura .....	43
8.4.Contenido gravimétrico de agua.....	43
8.5. pH .....	44
8.6.Estimación de carbono orgánico del suelo (COS) .....	44
8.7. Nitrógeno total.....	46
8.8. Capacidad de Intercambio Catiónico total.....	46
<b>IX.Resultados</b> .....	<b>47</b>
9.1.Densidad de cobertura y uso de suelo 1971-2010.....	47
9.1.2. Cambios en la cobertura forestal durante el período 1971-2010.....	52
9.2.Biomasa aérea .....	55
9.3.Frecuencias diamétricas (árboles /ha) presentes en las coberturas vegetales .....	56
9.4. Almacén de carbono en la biomasa aérea .....	57
9.5.Carbono orgánico del suelo (COS) .....	59
9.6.Carbono edáfico almacenado en cada clase de cobertura vegetal .....	59
9.7.Propiedades físicas y químicas del suelo para los sitios de muestreo .....	63
9.8.Carbono orgánico del suelo (COS) y propiedades físicas y químicas del suelo.....	67
9.9. Relación entre el Carbono orgánico del suelo COS y Carbono en la biomasa aérea en las diferentes Coberturas Vegetales.....	69
9.10. Capital total de carbono (COS y carbono en la biomasa aérea).....	70
<b>X.Discusión</b> .....	<b>71</b>
<b>XI. Conclusión</b> .....	<b>80</b>
<b>XII.Referencias</b> .....	<b>81</b>
<b>XII.Anexos</b> .....	<b>88</b>

## Resumen

El incremento en la concentración de CO<sub>2</sub> atmosférico y su relación con el cambio climático, han promovido un interés en el estudio de la fijación de carbono en los ecosistemas (Houghton, 1996). Dada esta situación el conocimiento del ciclo global del carbono así como sus implicaciones es de suma importancia, para entender su dinámica de captura, flujos y distribución en los diferentes sistemas geoplanetarios.

El presente trabajo se llevó a cabo en la Reserva de la Biosfera Mariposa Monarca; en un relieve montañoso y suelos de origen volcánico que se caracterizan por tener en condiciones naturales una resistencia intrínseca al deterioro, pero bajo cultivo se tornan frágiles y algunas de sus propiedades más notorias cambian drásticamente (Shoji et al., 1993). El estudio consistió en evaluar los almacenes de carbono edáfico y en biomasa aérea, bajo diferentes coberturas vegetales, así como las propiedades físicas y químicas del suelo; instalando de esta manera muestreos circulares de 1000 m<sup>2</sup>, en el bosque de Oyamel sin perturbación durante el período 1971-2010, bosque de Pino sin perturbar durante el mismo período, y en bosques de Pino bajo diferentes edades de recuperación después de ser empleados en la agricultura.

El carbono orgánico en el suelo COS en el bosque de Oyamel sin perturbación tuvo una importante acumulo en promedio de 269 Mg/ha, por otra parte el almacén de carbono en la biomasa aérea fue en promedio de 193 Mg/ha. Los sitios evaluados también tienen un alto porcentaje en la humedad capilar de hasta 128%, lo cual hace evidente la importancia de la conservación de estos bosques de oyamel como sumideros de carbono orgánico, por su participación en los ciclos bioenergéticos, en la recarga de acuíferos y en el establecimiento de las colonias de mariposas monarca, lo que coadyuva a reducir los efectos de cambio climático,

Para el bosque de Pino el almacén de carbono edáfico fue en promedio de 241.3 Mg/ha y el carbono en la biomasa aérea que presento fue igual a 151.6 Mg/ha, en particular en el bosque de pino sin perturbación se obtuvo una capacidad de almacén de 364 Ton/ ha de COS, Nitrógeno total de hasta 1.52 % y capacidad de intercambio catiónico CIC 90 cmol/kg. En el bosque de Pino con un período de recuperación de 55 años se encontró un almacén de COS de 302 Mg/ha, Nitrógeno total 1% y CIC 64 cmol/kg. Por otro lado el Bosque con 14 años de recuperación sólo almacenó un total de 57.7 Ton/ ha, Nitrógeno total de 0.7%, CIC 65 cmol/kg, humedad aprovechable de 51% y aumento en la densidad aparente. La pérdida del COS y el aumento de la densidad aparente han contribuido a la disminución del porcentaje humedad en el suelo. La conversión de bosque a cultivo modifica no sólo la capacidad de almacenaje de COS sino otras propiedades físicas y químicas del suelo, reduciendo la calidad del suelo y a su vez la dinámica del propio ecosistema donde se localizan se ve alterada.

## I. Marco teórico

### 1.1. Cambio climático

El clima depende de un gran número de factores que interactúan de manera compleja. A diferencia del concepto tradicional de clima, como el promedio de alguna variable, hoy en día se piensa en éste como un estado cambiante de la atmósfera, mediante sus interacciones con el mar, y el continente en diversas escalas de tiempo y espacio. Cuando un parámetro meteorológico como la precipitación o la temperatura sale de su valor medio de muchos años, se habla de una anomalía climática ocasionada por forzamientos internos, como inestabilidad en la atmósfera y el océano; o por forzamientos externos, como puede ser algún cambio en las características del planeta (concentraciones de gases de efecto invernadero, cambios en el uso de suelo, etc.) resultado principalmente de la actividad humana. Las formas de variabilidad del clima son muchas y por tanto pronosticar a largo plazo no es fácil (Magaña, 2004).

Distinguir que las fuentes de cambios como se mencionó en el clima de un año a otro o en escalas mayores de tiempo constituye un reto científico, por ello *el Panel Intergubernamental sobre el cambio climático IPCC* ha llevado la labor desde su fundación en 1988 junto con la *Organización Meteorológica Mundial (OMM)* y *el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA)* de analizar la información científica necesaria para abordar el problema del cambio climático y evaluar sus consecuencias medioambientales y socioeconómicas, y de formular estrategias con respuesta realistas.

El calentamiento global es una realidad incontestable, evidenciada por numerosas observaciones en torno al aumento de las temperaturas atmosféricas y oceánicas, el derretimiento generalizado de nieve, hielo y el aumento del nivel medio global del mar.

El *Tercer Informe de Evaluación (TIE)* del IPCC publicó que de los doce últimos años (1995-2006), once figuran entre los doce más cálidos en los registros instrumentales de la temperatura de la superficie mundial (desde 1850). La tendencia lineal a 100 años (1906-2005), cifrada en  $0,74^{\circ}\text{C}$  [entre  $0,56^{\circ}\text{C}$  y  $0,92^{\circ}\text{C}$ ]<sup>1</sup> es superior a la tendencia correspondiente de  $0,6^{\circ}\text{C}$  [entre  $0,4^{\circ}\text{C}$  y  $0,8^{\circ}\text{C}$ ] (1901-2000). Este aumento de temperatura está distribuido por todo el planeta y es más acentuado en las latitudes septentrionales superiores. Las regiones terrestres se han calentado más aprisa que los océanos.<sup>1</sup>

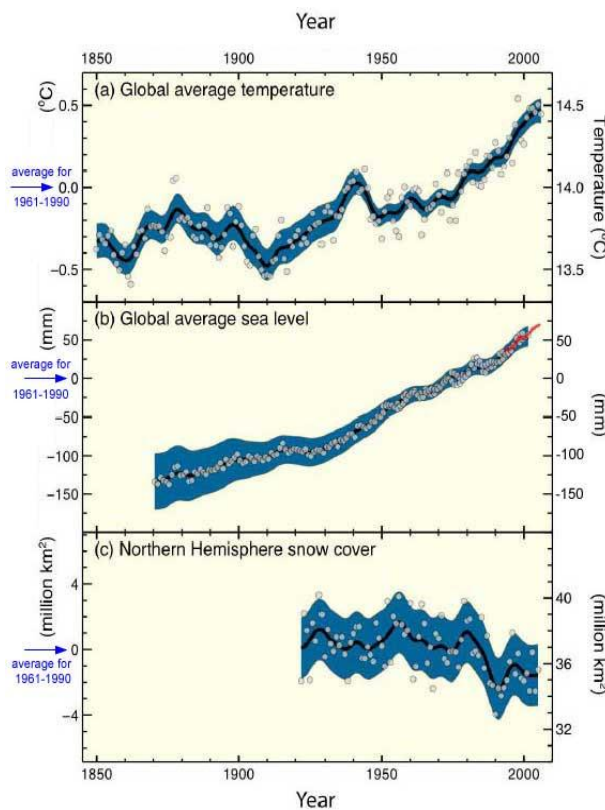
---

1.- Las cifras entre corchetes indican un intervalo de incertidumbre del 90% en torno a una estimación óptima; es decir, una probabilidad estimada de 5% de que se valor real supere el intervalo señalado entre corchetes, y una probabilidad de 5% de que dicho valor sea inferior.

2.-Las palabras en cursiva representan expresiones de incertidumbre y confianza calibradas

También han aumentado las temperaturas de la estratosfera y de los océanos (con profundidades de 3,000 m como mínimo), así como la cantidad de vapor de agua que se encuentra en la atmósfera. En ambos hemisferios se ha reducido el porcentaje de glaciares de montaña, campos de hielo y glaciares de meseta, contribuyendo parcialmente al aumento mundial del nivel del mar.

El aumento de nivel del mar concuerda con este calentamiento (Figura 1b). En promedio, el nivel de los océanos mundiales ha aumentado desde 1961 en promedio de 1.8 mm/año y desde 1993 a 3.1 mm/año, en parte por efecto de la dilatación térmica y del deshielo de los glaciares, de los casquetes de hielo y de los mantos polares <sup>1</sup>. No es posible dilucidar hasta que punto esa mayor rapidez evidenciada entre 1993 y 2003 refleja una variación decenal, o bien un aumento de la tendencia a largo plazo. (IPCC, 2007)



**Figura 1.** Variación observada de: a) el promedio mundial de las temperaturas en superficie; b) el promedio mundial del nivel del mar a partir de datos mareométricos (azul) y satelitales (rojo); y c) la cubierta de nieve del Hemisferio Norte durante marzo-abril. Todas las diferencias han sido calculadas respecto de los promedios correspondientes durante el período 1961-1990. Las curvas alisadas representan los valores promediados decenalmente, mientras que los círculos denotan los valores anuales. Las áreas sombreadas representan los intervalos de incertidumbre estimados a partir de un análisis completo de las incertidumbres conocidas (a y b) y de la serie temporal c) (Fuente IPCC, 2007)

La disminución observada de las extensiones de nieve y de hielo concuerda también con el calentamiento global (Figura 1c). Datos satelitales obtenidos desde 1978 indican que el promedio anual de la extensión de los hielos marinos árticos ha disminuido en un 2.7% [entre 2.1 y 3.3] por decenio, con disminuciones estivales aun más acentuadas, de 7.4% [entre 5.0 y 9.8] por decenio<sup>2</sup>. Los cambios experimentados por la nieve, el hielo y el terreno congelado han incrementado (IPCC, 2007).

1.- Las cifras entre corchetes indican un intervalo de incertidumbre del 90% en torno a una estimación óptima; es decir, una probabilidad estimada de 5% de que se valor real supere el intervalo señalado entre corchetes, y una probabilidad de 5% de que dicho valor sea inferior.

2.-Las palabras en cursiva representan expresiones de incertidumbre y confianza calibradas

El cambio climático producirá probablemente algunos impactos irreversibles. Con un *grado de confianza medio*, entre el 20 y el 30% aproximadamente de las especies consideradas hasta la fecha estarán probablemente más amenazadas de extinción si el calentamiento promedio mundial aumenta en más de 1.5-2.5°C (respecto del período 1980-1999). Si el promedio de la temperatura mundial aumentara en más de 3.5°C, las proyecciones de los modelos indican que podrían sobrevenir extinciones masivas (entre el 40% y el 70% de las especies estudiadas) en todo el mundo (IPCC, 2007).

Según las simulaciones de modelos actuales, la Circulación de Renuevo Meridional (CRM) del Océano Atlántico sería muy probablemente más lenta durante el siglo XXI; con todo, las temperaturas sobre el Atlántico y en Europa aumentarían. La CRM experimentaría muy improbablemente una transición sustancial y abrupta durante el siglo XXI. No es posible evaluar con cierto grado de confianza los cambios de la CRM a más largo plazo. El impacto de un cambio de la CRM persistente y en gran escala afectaría probablemente a la productividad de los ecosistemas marinos, a las pesquerías, a la incorporación de CO<sub>2</sub> al océano, a las concentraciones de oxígeno en el océano y a la vegetación terrestre. Las alteraciones de la incorporación terrestre y oceánica de CO<sub>2</sub> podrían producir un retroefecto sobre el sistema climático (IPCC, 2007).

### **1.1.2. Efecto invernadero**

De manera natural, la atmósfera está compuesta en un 78.1% de Nitrógeno (N<sub>2</sub>), un 20.9% de oxígeno (O<sub>2</sub>), 0.93 % de Argón (Ar), algunos gases de efecto invernadero (GEI), como 0.035%, bióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), metano (CH<sub>4</sub>) con 0.00015%, el óxido nitroso (NO<sub>x</sub>) con 0.0000016%, el vapor de agua (0.7%) y otros gases, los cuales se encuentran distribuidos en la homósfera (capa con una composición constante de aire la cual llega hasta los 80 km de altura).

En los últimos trescientos años la cantidad de los gases que están involucrados en el fenómeno *Efecto Invernadero (EI)* han incrementado, desde la era preindustrial, en un 70% entre 1970 y 2004. Encontrando entre los principales al CO<sub>2</sub> sus emisiones anuales de 1979 a 2004 han aumentado en aproximadamente un 80%, pasando de 210 a 380 gigatoneladas (Gt), y en 2004 representaban un 77% de las emisiones totales de GEI antropógenos.

Durante el reciente decenio 1995- 2004, la tasa de crecimiento de las emisiones de CO<sub>2</sub> fue mucho mayor (0,92 GtCO<sub>2</sub>-eq anuales) que durante el período anterior de 1970-1994 (0,43 GtCO<sub>2</sub>-eq anuales) (IPCC, 2007).

El efecto invernadero involucra la propiedad de absolutamente todos los cuerpos de emitir radiación; estos rayos o fotones son ondas electromagnéticas que no necesitan ningún medio material para propagarse, más bien la materia dificulta su avance (Garduño, 1998). La radiación emitida depende de la temperatura del cuerpo emisor en dos aspectos: por un lado, la cantidad de radiación aumenta tremendamente conforme lo hace la temperatura, y por otro, su longitud de onda disminuye cuando la temperatura sube. En la atmósfera y el clima actúan dos tipos de radiación claramente distintas: la luz visible originada en el sol y la radiación emitida por los cuerpos, el sol emite su radiación a 6 mil grados centígrados (°C) en cambio los elementos de la Tierra (el suelo, el mar, los casquetes polares, las capas atmosféricas, las nubes, etc.) lo hacen a temperaturas que *andan alrededor de 0 °C*.

Gran diferencia en sus longitudes de onda, a la radiación solar se le llama de onda corta y a la terrestre de onda larga, constituyendo espectros francamente ajenos (Toharia, 1989; Voituriez, 1994). Por estar a una cierta distancia del Sol y tener un determinado albedo, la Tierra debería tener una temperatura característica de equilibrio llamada efectiva. Los valores concretos del albedo planetario y de la distancia del planeta a la estrella determinan para la Tierra una temperatura efectiva de -18 C, un valor muy diferente a la temperatura real cuyo valor promedio global es de +15 C. Esta gran diferencia entre la temperatura efectiva y la real se debe al efecto invernadero (EI) que se da en cualquier planeta o satélite natural que tenga atmósfera (Cosgrove, 1994; Rivera, 1994; Suplee, 1998 y Voituriez 1994).

El efecto invernadero resulta de que el aire es transparente para la radiación de onda corta y muy opaco a la onda larga. Es decir la atmósfera es un filtro radiativo, que deja pasar los rayos solares; unos de ellos son absorbidos por la superficie terrestre (y por los demás componentes de la Tierra), que se calienta (n) en consecuencia emite la radiación terrestre, que es detenida (absorbida) por la atmósfera y las nubes. Las capas atmosféricas y las nubes van absorbiendo, calentándose y remitiendo radiación térmica procedente de la parte inferior. El resultado de este complejo mecanismo es sencillo: la atmósfera superficial es cálida y se va enfriando conforme aumenta la altitud. En realidad el complejo dispositivo esbozado se complica más por mecanismos termodinámicos no radiacionales. En primer lugar la convección atmosférica, consiste en que el aire inferior, al calentarse por contacto directo con la superficie y por la radiación procedente de ella, se

dilata, aligera y sube, al tiempo que las porciones frías descienden, en un proceso continuo de mezcla vertical. En segundo lugar está el mecanismo de cambio de fase del agua, consiste en que el aire ascendente se enfría (principalmente porque la densidad y al presión de la atmosfera disminuye con la altura) y entonces el vapor de agua contenido en él se condensa, pasando de la fase gaseosa a la liquida. Este proceso libera calor.

Es decir, aunque en última instancia el sol es la fuente original de energía térmica contenida en la atmósfera, ésta no se calienta por arriba sino desde abajo. Por supuesto y debido al albedo planetario, no toda la radiación solar incidente es absorbida por la Tierra; una porción considerable es reflejada hacia el espacio exterior. Tampoco toda la radiación terrestre es atrapada por la atmosfera; una parte se fuga hacia el espacio. El *EI* es producido por la fracción absorbida de ambas radiaciones ([Garduño 1998](#); [Hardy et al., 1986](#); [Voituriez 1994](#)).

La atmósfera es una mezcla de gases y de aerosoles (partículas solidas y liquidas suspendidas en ella) sin embargo no todos participan en el *EI*; los aerosoles aumentan el albedo planetario, ya que reflejan la radiación solar y reducen la cantidad de ella que penetra a las capas inferiores y llega a la superficie. Consecuentemente este efecto se debe principalmente a los gases llamados justamente gases de invernadero (GI) o termoactivos. Los gases efecto invernadero están dentro del 1% restante de la composición atmosférica. Los más importantes son el vapor de agua y el bióxido de carbono; de los demás GI (CH<sub>4</sub>, NO<sub>x</sub>, CFCS, etc.) se llaman gases traza por su presencia es muy pequeña en la atmósfera ([Hardy et al., 1986](#)).

## **1.2. El ciclo del carbono**

El carbono es el cuarto elemento de mayor abundancia en el universo y es absolutamente esencial para la vida. En realidad, el carbono constituye la definición propia de vida y su presencia o ausencia ayuda a definir la historia del planeta. Cada organismo sobre la tierra necesita del carbono para su estructura, su energía y funcionamiento.

En sus diferentes formas, el movimiento del carbono en la atmósfera, océanos, biosfera, y geoesfera está descrito en el ciclo del carbono (Figura 2). Este ciclo consiste de varias formas de almacenamiento de carbono y los procesos de distribución a nivel planetario. Si la cantidad de carbono que penetra en un manto es mayor de la que sale, el manto está considerado un pozo neto de carbono. Si la cantidad de carbono que sale de un manto es mayor de la que entra, el manto está considerado una fuente neta de carbono.

El carbono en la Tierra se distribuye en cuatro grandes reservorios: Atmósfera, Hidrósfera, Litosfera y Biosfera terrestre (Holmén, 2000).

En la atmósfera principalmente se encuentra al carbono como CO<sub>2</sub> y es aquí donde se encuentra el más pequeño y dinámico de esos reservorios (700-760 Gt C), que interactúa con los océanos y los ecosistemas terrestres, reabasteciéndose constantemente debido a los procesos de fotosíntesis y respiración. (Chapin et al., 2002).

La atmósfera gana CO<sub>2</sub>, en escalas de tiempo largas, principalmente gracias a las erupciones volcánicas. Durante el transcurso de la historia geológica, las chimeneas volcánicas y las grietas tectónicas han ido arrojando CO<sub>2</sub> desde el interior de la Tierra hacia la atmósfera. El ritmo de emisión ha sido variable, cambiando de forma proporcional a la actividad tectónica y a la velocidad de separación o de choque entre las placas.

Según la teoría clásica (Fischer, 1981) esta desgasificación de CO<sub>2</sub> del interior de la tierra producida por el vulcanismo ha sido fundamental en los cambios climáticos, cuando se consideran estos en escalas de tiempo largas. Se ha comprobado que durante los últimos 500 millones de años ha existido una buena correlación, aunque no perfecta, entre las épocas de clima cálido y las épocas de mayor abundancia de rocas ígneas, que son a su vez buenas indicadores de un aumento de la expulsión de CO<sub>2</sub> a la atmósfera, Fischer (1981) sugirió que, en escalas de tiempo muy largas (de decenas o centenas de millones de años), la Tierra ha ido pasando de "períodos-invernadero" a "períodos-nevera", según haya sido el alcance de la actividad tectónica y la liberación de CO<sub>2</sub>. El CO<sub>2</sub> arrojado por los volcanes no es un CO<sub>2</sub> primigenio atrapado en el interior de la Tierra desde los tiempos de su formación, sino es un CO<sub>2</sub> reciclado, proveniente de un carbonato de calcio (CaCO<sub>3</sub>) precipitado previamente en el océano y metamorfizado después en las profundidades de la litosfera.

En los océanos el carbono se encuentra cerca de 50 veces más que la atmósfera, principalmente como carbono inorgánico disuelto. Anualmente se intercambian alrededor de 90 Gt C año<sup>-1</sup> entre la atmósfera y los océanos. La asimilación de carbono por los océanos está limitada por la solubilidad del CO<sub>2</sub> en el agua del mar, el tiempo en que se mezclan las aguas superficiales y profundas y la cantidad de cationes disponibles entre otros factores (Falkowski et al., 2000). Sin embargo este CO<sub>2</sub> proviene de largas escalas temporales, debido a un proceso geológico denominado meteorización.



El proceso de formación de los sedimentos calcáreos en los fondos oceánicos que supone una absorción de CO<sub>2</sub> atmosférico comienza con la meteorización continental, que consiste en una desintegración física y química de las rocas debido a la actuación de los elementos meteorológicos: lluvia, viento y cambios térmicos. El ataque de los minerales silicatados, como el CaSiO<sub>3</sub> muy abundante en la superficie terrestre por el CO<sub>2</sub> disuelto en el agua del suelo.

El CO<sub>2</sub> atmosférico forma parte de la materia orgánica a través de la fotosíntesis de las plantas y es devuelto al suelo por la descomposición microbiana de la materia orgánica (Berner, 1997).

La meteorización de las rocas es más intensa a) cuanto más CO<sub>2</sub> contenga el aire; b) cuanto más humedad haya en el suelo; y c) cuanto más alta sea la temperatura ambiente, ya que todo ello favorece la acción de los hongos y de las bacterias.

La meteorización puede también afectar al carbonato de calcio CaCO<sub>3</sub>; por ejemplo, cuando las rocas calizas, quedan a la intemperie debido a un descenso del nivel del mar o a una orogenia que las eleva por encima de él. En este caso, en la reacción de meteorización la atmósfera sólo pierde una molécula de CO<sub>2</sub> (CaCO<sub>3</sub> + CO<sub>2</sub> + H<sub>2</sub>O ---- > Ca<sup>2+</sup> + 2HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>), pérdida que queda compensada en el mar por la precipitación de la calcita, con lo cual al final no se produce ni pérdida ni ganancia de CO<sub>2</sub> en la atmósfera.

Gran parte de los iones disueltos y arrastrados en las aguas de los ríos precipitan en el mar. Los iones se recombinan, formando CaCO<sub>3</sub> (caliza) y soltando de nuevo a la atmósfera una molécula de CO<sub>2</sub>, según la reacción: 2HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> + Ca<sup>2+</sup> ----- > CaCO<sub>3</sub> + H<sub>2</sub>O + CO<sub>2</sub>. Por lo tanto, en el resultado neto de las dos reacciones ----- > meteorización de los silicatos y precipitación de la caliza donde la atmósfera pierde una molécula de CO<sub>2</sub>.

Las especies marinas que construyen caparazones y esqueletos protectores de carbonato cálcico (CaCO<sub>3</sub>) como ostras y almeja, precipitan iones de calcio (Ca<sup>2+</sup>) junto a iones de carbonato (CO<sub>3</sub> o de bicarbonato (H<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>), la mayor parte del carbonato cálcico oceánico es producido por algas microscópicas del fitoplancton (coccolitóforos) y por especies animales del zooplancton (foraminíferos y pterópodos). La calcita y el aragonito, constituyen los esqueletos y los caparazones con que se protegen gran parte de los microorganismos; diatomeas, una importante variedad de algas fitoplanctónicas, y los radiolarios, una variedad de zooplancton, con caparazones silíceos.

Cuando los organismos marinos calcáreos mueren, o se desprenden de las placas calizas que forman sus caparazones, la calcita cae hacia las profundidades. En el proceso de precipitación de carbono inorgánico, al igual que ocurre con el enterramiento de la materia orgánica, la litosfera va restando carbono a los otros reservorios, el mar y el aire. Lo hace a un ritmo global de unos 0,5 PgC (PgC: petagramos de carbono) al año. A lo largo de toda la historia geológica, el carbono así acumulado, contenido en los espesos estratos de rocas calizas, ha creado su mayor reservorio terrestre, del orden de un millón de petagramos.

Pero no siempre la calcita alcanza el fondo, pues, a una cierta profundidad, el carbonato de calcio  $\text{CaCO}_3$  de nuevo se disuelve en iones  $\text{Ca}^{2+}$  e iones  $\text{CO}_3^{2-}$ . En esta reacción, inversa a la de la precipitación, se absorbe  $\text{CO}_2$  disuelto en el agua. Esta disolución de la calcita es debida a razones químicas complejas relacionadas con el incremento en profundidad de la acidez (carga positiva del agua) que requiere más iones de carbonato (de carga eléctrica doblemente negativa) que la neutralicen.

El mar en donde la cantidad de  $\text{CaCO}_3$  que llega de arriba es la misma que la que se disuelve (CCD: carbonate compensation depth) varía según los océanos entre unos 3, 000 y unos 5, 000 metros de profundidad. Por eso, en las zonas de fondos más profundos que la CCD, los sedimentos no son calizos sino arcillosos, pues la calcita (o el aragonito, que es otra variedad del carbonato cálcico, pero más soluble) se disuelve antes de tocar el fondo oceánico. En los fondos oceánicos menos profundos que la CCD, los caparazones planctónicos se depositan formando barros calcáreos, blancuzcos, cuya posterior compactación y diagénesis forma estratos de roca caliza. La biota marina representa un almacén pequeño (2 Gt C), aunque por ella circula anualmente tanto carbono como en la vegetación terrestre; los restos orgánicos de carbonato de calcio se hundan lenta pero constantemente en las aguas profundas de los océanos, este proceso conocido como “bomba biológica” transporta el carbono a depósitos donde permanece almacenado por cientos o miles de años.

El carbono contenido en la litósfera representa el 99% del total en el planeta (Schlesinger, 1991), el carbono de este almacén circula de manera muy lenta, en escalas de tiempo de millones de años. Los factores que gobiernan estos procesos son de tipo geológico (deriva continental, vulcanismo, metamorfismo e intemperismo).

La biósfera terrestre es el reservorio biológico de carbono más importante del planeta, el carbono contenido en la vegetación y en los suelos es tres veces superior al contenido en la atmósfera; el carbono se intercambia con la atmósfera mediante la fotosíntesis, la respiración y la descomposición de la materia orgánica (Watson et al., 2000).

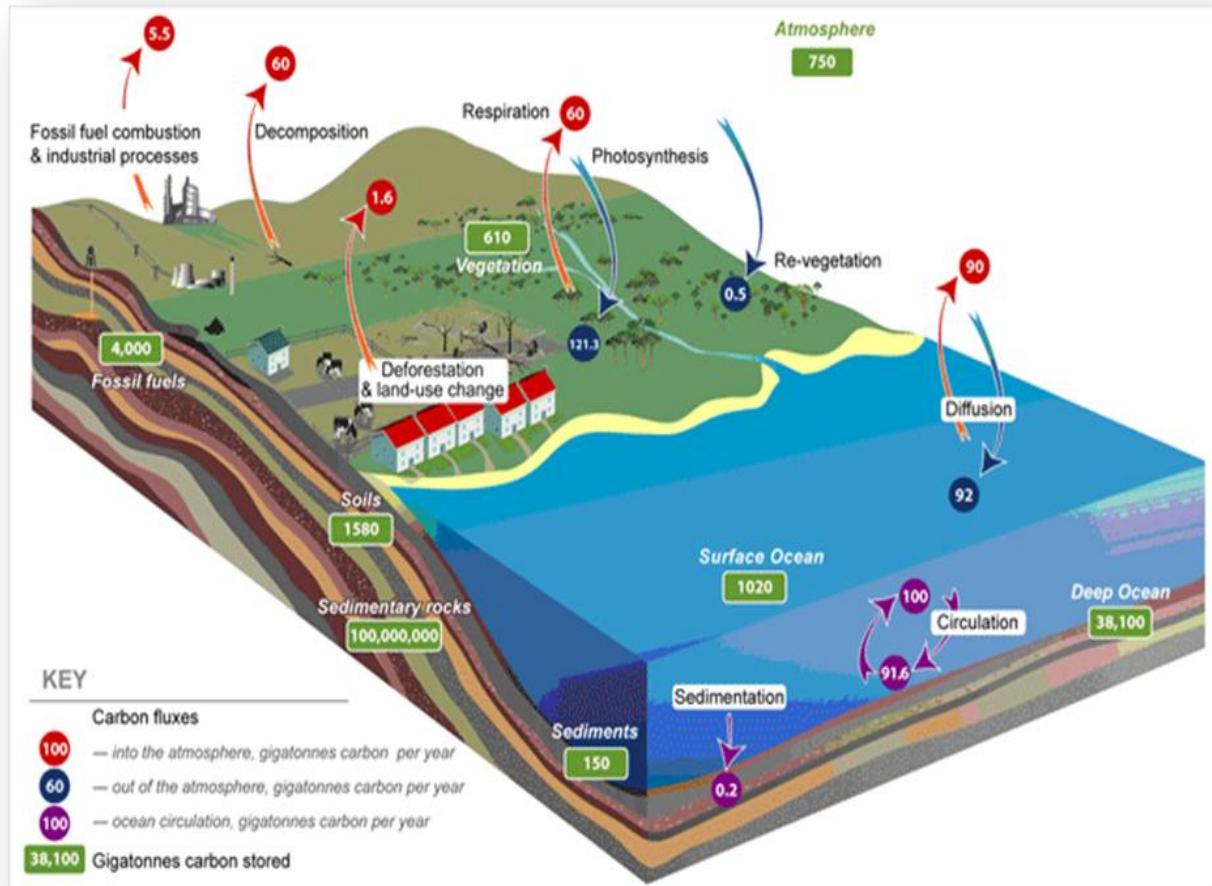


Figura 2. Esquema de flujos y almacenamientos de carbono (Fuente: NASA, 2008)

### 1.3. Almacenes y dinámica de carbono en los bosques

Los bosques representan un importante reservorio de carbono que corresponde al 80% del total contenido en los ecosistemas terrestres (Kolhmaier et al., 1998), encontrando a los bosques templados un almacén total de 159 PgC (Bolin et al., 2000).

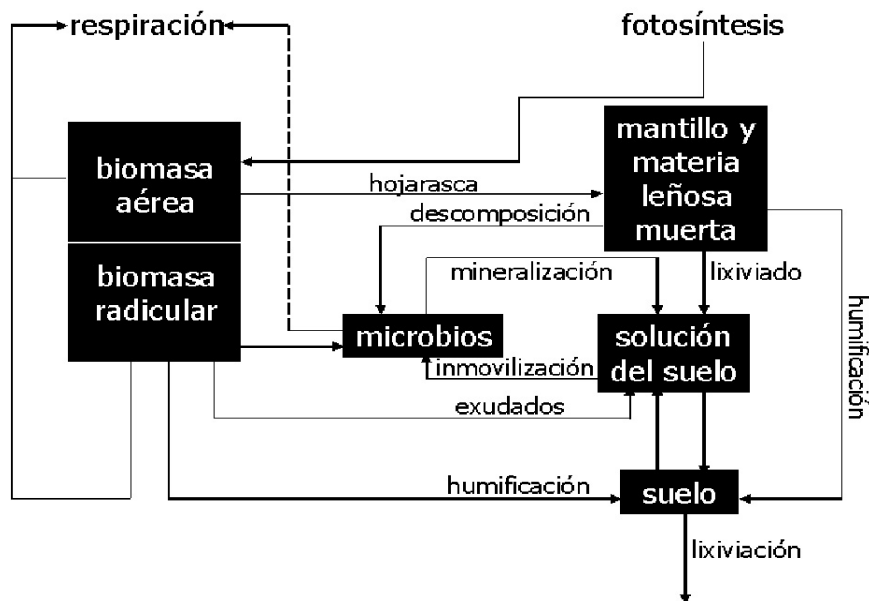
Los principales almacenes de carbono en los bosques son: a) la vegetación (biomasa aérea y biomasa radicular), b) la materia en descomposición (mantillo y materia leñosa muerta) y c) los suelos (Ordóñez y Masera, 2001).

Bioma	Área (10 <sup>6</sup> Km <sup>2</sup> )	Reservas de Carbono (Pg C)		
		Vegetación	Suelos	Total
Bosques tropicales	17.6	212	216	428
Bosques templados	10.4	59	100	159
Bosques boreales	13.7	88	471	559
Sabanas tropicales	22.5	66	264	330
Pastizales templados	12.5	9	295	304
Desiertos y semidesiertos	45.5	8	191	199
Tundra	9.5	6	121	127
Humedales	3.5	15	225	240
Tierras agrícolas	16.0	3	128	131
<b>Total</b>	<b>151.2</b>	<b>466</b>	<b>2,011</b>	<b>2,477</b>

**Cuadro 1.** Almacenes globales de carbono en la vegetación y en el primer metro de profundidad en suelos (Fuente: Bolin y Sukumar, 2000) (IPg = 10<sup>15</sup> g)

El gas carbónico del aire (CO<sub>2</sub>), presente a una concentración de 0.03 % (300 mmol por mol de aire), es la única fuente de carbono para las plantas, las cuales lo capturan incorporándolo a sus tejidos. El paso de este gas a las plantas tiene lugar por difusión desde el medio en el que está más concentrado (el aire), hacia el menos concentrado (el líquido intracelular) a través de los estomas. La materia seca vegetal tiene un contenido bastante estable de cadenas de C, que constituye el esqueleto de todas las sustancias orgánicas de las células (proteínas lípidos y carbohidratos) (Goudriaan, 1992). Según Hoen y Solberg (1994), la producción forestal influencia el flujo del C, en forma de CO<sub>2</sub>, desde y hacia la atmósfera por dos procesos, la fijación y la emisión. El primero representa el incremento en biomasa en árboles mediante la fotosíntesis, mientras que el segundo representa la descomposición de la biomasa como una consecuencia de la mortalidad natural o inducida por el hombre.

A través de la fotosíntesis, las plantas capturan  $\text{CO}_2$  de la atmósfera, fijando C en la biomasa y liberando oxígeno ( $\text{O}_2$ ) (Ortiz, 1997). La síntesis de la materia orgánica (MO) a través de la fotosíntesis por las plantas verdes en un ecosistema es llamada producción primaria del ecosistema. La suma total de MO producida por el mismo proceso es llamada producción bruta ( $P_b$ ). Las plantas consumen una parte de lo fotosintetizado en la respiración ( $r$ ), el resto es incorporado a la planta y llamado producción neta ( $P_n$ ) (Satoo y Madgwick, 1982; Ramírez y Shultz, 1997).



**Figura 3.** Principales rutas del carbono en un ecosistema terrestre. (Modificado a partir de Oliva y García-Oliva, 1998, Chapin et al., 2002)

Las plantas transfieren carbono hacia el suelo por diferentes vías, las más importantes son la hojarasca (desprendimiento de hojas y partes muertas de las plantas), los exudados (secreciones de compuestos orgánicos solubles de las raíces al suelo) y la transferencia de carbono a los organismos que están asociados simbióticamente con las raíces (micorrizas y bacterias fijadoras de nitrógeno). Las hojas, ramas y frutos agregan 1,500 a 5,000 kg de materia orgánica seca a la superficie de una hectárea completa en solo un año (Bray y Gorham 1964).

El carbono de la madera de las coníferas arbóreas está entre un 50 y 53 %, mientras que en las especies de hoja ancha varía entre 47 y 50 % (Barres, 1993 citado por Lopera y Gutiérrez, 2000). No obstante, existen variaciones importantes entre los distintos ecosistemas y tipos de bosque la causa principal de esta diferencia es la influencia de la temperatura y disponibilidad de agua en los índices relativos de producción y descomposición de la materia orgánica; las temperaturas más cálidas y húmedas provocan la rápida mineralización de la materia orgánica del suelo.

#### 1.4. Almacenen de carbono en suelos forestales

El carbono en el suelo puede estar presente en dos formas, Carbono Orgánico del Suelo (COS) y Carbono Inorgánico del Suelo (CIS). El COS es el componente principal de la Materia Orgánica del suelo (MOS), la cual juega un papel importante en la productividad de los suelos tropicales como reserva de nutrimentos (González et al., 2008). Los suelos almacenas 1580 GT de carbono según la NASA (2008).

La materia orgánica del suelo MOS tiene una composición muy compleja, heterogénea y está es mezclada o asociada con los constituyentes minerales del suelo. Los diferentes reservorios de carbono que existen en el suelo tienen distintos tiempos medios de residencia variando de uno a pocos años, dependiendo de la composición bioquímica por ejemplo, la lignina es más estable que la celulosa, a décadas o a más de 1 000 años (fracción estable).

La MOS tiene un papel importante dando protección a las partículas edáficas: *protección física* significa un encapsulado de los fragmentos de la materia orgánica por las arcilla o por los macro o microagregados del suelo (Puget et al., 1995 y Balesdent et al., 2000); *protección química* se refiere a uniones especiales de la materia orgánica con otros constituyentes del suelo coloides o arcillas, pero más a menudo esto concierne compuestos orgánicos del suelo muy estables, de esta manera el COS está compuesto por tres compartimentos físicos; un compartimento libre de compuestos minerales (Fracción ligera), otro unido a partículas minerales (Fracción organomineral) y la biomasa microbiana (Christensen, 1996).

La fracción ligera y la biomasa microbiana que constituyen la fracción no-húmica son formas lábiles o activas del carbono orgánico del suelo y en ellas se encuentra la mayor concentración de carbono que se puede reciclar dentro del suelo a escalas de tipo mensuales a anuales.

Dentro de la fracción ligera del C se puede identificar la Materia Orgánica Particulada (POM) constituida por los residuos de origen vegetal provenientes de hojas y raíces y los productos generados a partir de su descomposición. También se encuentran sustancias orgánicas metabolizables como exudados de raíces, enzimas extracelulares y carbono disuelto en la solución del suelo.

La biomasa microbiana representa del 1 al 5% del carbono orgánico total del suelo, es la responsable de la transformación de las formas orgánicas de carbono como:

- La mineralización del carbono, produciendo CO<sub>2</sub> el cual regresa a la atmósfera.
- Formación de compuestos orgánicos más simples, aprovechables por otras poblaciones microbianas.
- Producción de biomasa (inmovilización) y compuestos microbianos, como enzimas y otros metabolitos.

La fracción húmica constituye cerca del 95% del COS, es la fracción químicamente más estable (Oliva y García-Oliva, 1998). El humus es la fracción de la materia orgánica del suelo de color pardo a negro relativamente resistente a la degradación biológica y está constituido por ácidos húmicos, ácidos fúlvicos y huminas. Estas sustancias se forman por reacciones de síntesis biogeoquímica (humificación) y poseen propiedades fisicoquímicas muy diferentes a las moléculas biológicas de los organismos (Oliva y García-Oliva, 1998).

Sin embargo la estabilidad y la concentración del COS está relacionada con otras variables como los factores climáticos, la tasa de degradación de los materiales, la microbiota del suelos entre otros; por ejemplo cuando se tala un bosque y se cultiva sobre ese suelo, el contenido de carbono orgánico es el suelo disminuye considerablemente (Jenny, 1941; Schlesinger, 1985; Mann y Davidson, 1986; Ackerman, 1993; Post y Mann, 1990).

Esto se debe a varios factores; a la menor biomasa (aérea y subterránea) que se incorpora al suelo, a la mayor capacidad de descomposición de los residuos de los cultivos, a cambios en las condiciones de humedad y temperatura del suelo y a las prácticas de cultivo. Estas prácticas conllevan a la ruptura de agregados del suelo, aumentan la exposición de los complejos organominerales a la descomposición y generan una mayor erosión (Schlesinger, 1985; Lal, 2005). Si un suelo se cultiva de 30 a 50 años, el COS puede disminuir en promedio en un 50 % del valor original en los primeros 20 cm de profundidad (Schlesinger, 1990).

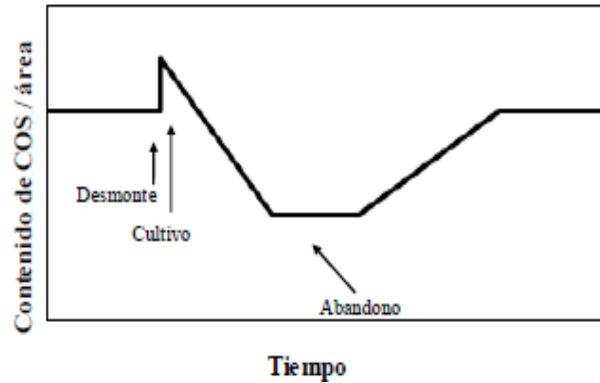
### **1.5. Captura de carbono orgánico del suelo (COS) en los bosques secundarios**

Un bosque secundario es definido como una sucesión de vegetación que surgió de la destrucción hecha por el hombre o natural, de la vegetación primaria (más del 90%), que cubre un área lo suficientemente grande como para crear otro microclima y las nuevas condiciones de regeneración que conducen a una estructura de soporte, la composición de especies de árboles son dinámicamente distintas a la posición original y que no ha vuelto a su estado original (difiere perceptiblemente a partir de la masa original) ([United Nations Conference on Environment and Development, 1992](#)).

La acumulación de COS producida por la regeneración forestal es un tema en discusión, no obstante varios autores han demostrado que se genera un almacenamiento importante de carbono en el suelo por el establecimiento de vegetación secundaria en tierras abandonadas ([Post y Kwon, 2000](#); [Silver et al., 2000](#); [Gou; Gifford, 2002](#); [Vaccaro et al., 2003](#); [Lal, 2005](#)). Cuando las tierras agrícolas dejan de ser cultivadas, la vegetación secundaria se desarrolla, los materiales orgánicos al suelo aumenta y el carbono orgánico puede volver a acumularse en el suelo a niveles similares a los del bosque primigeno ([Brown y Lugo, 1990](#); [Hughes et al., 1999](#); [Silver et al., 2000](#); [Health y Smith, 2000](#)).

En la Figura 4 se muestra un modelo de la captura de carbono en el suelo después del abandono de un suelo cultivado. El pico posterior al desmonte corresponde a la transferencia de carbono proveniente de restos vegetales o raíces muertas dejadas después de la tala. El reservorio de carbono en el suelo regresa a un estado de equilibrio mediante un proceso de tres fases. La primera fase inicia con un decremento de COS debido a las actividades agrícolas; en esta fase el carbono se libera a la atmosfera a través de la oxidación, disminución del carbono acumulado por la poca acumulación de materiales orgánicos. La segunda fase describe en el abandono del cultivo al comienzo del crecimiento de la vegetación sucesional. En la tercer faceta inicia la ganancia de carbono, el ingreso de la materia orgánica al suelo va incrementando el COS hasta que se alcanza el equilibrio.

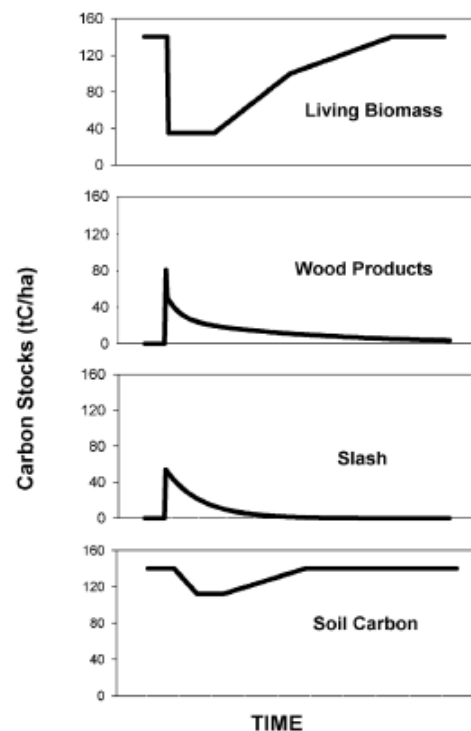




**Figura 4.** Trayectoria generalizada del COS después de un desmonte, cultivo y regeneración forestal posterior al abandono. Adaptado de Moore et al., (1981) en Heath y Smith (2000)

Otro modelo propone que la cantidad de carbono en la vegetación, tala, los productos de madera, el suelo antes y después de un cambio en el uso del suelo, así como las tasas de descomposición y las de regeneración, se definen en el modelo por una serie de curvas de respuesta que varían con la región geográfica, tipo de ecosistema, y el de cambio de uso de la tierra.

El modelo es impulsado anualmente por el número de hectáreas que experimenten un cambio en el uso de la tierra, es decir, las áreas deforestadas, que se cultivan, abandonadas, la cosecha y se queman cada año. Cada cambio en el uso de la tierra comienza una cohorte de hectáreas a lo largo de una de las curvas de respuesta. Por ejemplo, los suelos pueden seguir perdiendo carbono durante varias décadas después del cultivo inicial, y los bosques pueden continuar acumulando carbono durante siglos después de la cosecha. Así, los cambios en uso de suelo tienen un legado que perdura mucho después de que el cambio inicial (Foster et al., 2003).



**Figura 5.** Curvas idealizadas de respuesta mostrando el cambio por hectárea en el carbono después del claramiento del bosque por agricultura y, subsecuentemente, el recobro del bosque sobre las tierras abandonadas de agricultura (Foster et al., 2003)

El decremento de COS una vez que el uso de suelo cambiado a tierras de cultivo según el IPCC (1996) se da en los 30 cm de profundidad del suelo. Sin embargo en otros trabajos se ha analizado el proceso a más detalle e indican que es en los primeros 10 cm de profundidad en donde se presenta el mayor cambio (West y Post, 2002; Nicoloso et al., 2009; Foote y Gragan, 2010).

### **1.6. Cambio de uso de suelo en los bosques forestales en México**

Los ecosistemas forestales son de importancia estratégica debido a la gran diversidad de especies que albergan; así como por los servicios ambientales que ofrecen (la estabilización de los suelos y su potencial de captura de carbono, la regulación del ciclo hídrico, la estabilidad de los suelos y el clima, etcétera). Los árboles almacenan carbono en su tejido vegetal, al quemarse un bosque, el carbono del tejido se convierte en CO<sub>2</sub>, lo que contribuye al cambio climático. El balance global entre tala de madera, deforestación y reforestación, resultó en los años noventa en una emisión anual neta de entre 800 (±200) y 2,200 (±800) millones de toneladas de carbono, lo que corresponde a 10-25 por ciento de las emisiones globales de carbono por humanos (Santilli et al., 2005).

El informe más reciente del *Intergovernmental Panel on Climate Change* calcula que el 20 por ciento de las emisiones mundiales de carbono se debe al cambio de uso de la tierra, mientras que el 80 por ciento restante proviene de la quema de energía fósil (IPCC, 2007).

El área total de bosque en el mundo es de algo más de 4 000 millones de hectáreas, que corresponde a un promedio de 0,6 hectáreas per cápita, sin embargo el cambio en el uso de suelo sigue, presentando aumentos cerca de 13 millones de hectáreas de bosques fueron convertidos en tierras destinadas a otros usos o se han perdido debido a causas naturales todos los años durante el último decenio, en comparación con 16 millones de hectáreas por año en la década de 1990. Tanto Brasil como Indonesia, que registraban la mayor pérdida neta de bosques en la década de 1990, han reducido de forma significativa sus tasas de pérdida, mientras que en Australia las graves sequías e incendios forestales exacerbaron la pérdida de bosques desde 2000.

La superficie total de México alcanza  $197 \times 10^6$  ha. Alrededor de  $116 \times 10^6$  hectáreas son de bosques nativos, aproximadamente 25,5 millones de ellos son templadas, 24 millones tropical (Masera et al. 1997a) y  $66 \times 10^6$  ha se encuentran con vegetación semi-árida en 1990. Además, hay  $21 \times 10^6$  ha clasificado como tierras forestales degradadas.

Los bosques gestionados llegan a  $7,3 \times 10^6$  ha, los bosques protegidos y  $7,1 \times 10^6$  ha, con gran diferencias según los tipos de bosques. La agricultura y los pastizales ocupan  $51 \times 10^6$  ha. Alrededor del 80% de las tierras forestales totales son de propiedad social de las comunidades rurales. Aproximadamente el 95% de la cosecha total de madera se lleva a cabo principalmente en bosques templado (SEMARNAP, 1996). Una situación alarmante es que México se encuentre entre los 10 países con mayor pérdida de bosques durante el período 2000-2010 con 311, 000 ha/año (FAO, 2010).

Se estima que la cantidad de carbono en los bosques y selvas de México se ubica entre 4,361 y 5,924 millones de toneladas (Gibbs et al., 2007). Estas cifras pueden compararse con las emisiones totales de México de 398.25 millones de toneladas en 2005, 1.4 por ciento del total mundial, que lo sitúa en el lugar 16 de los principales emisores (Rogers y McCormick, 2007). Es decir, los bosques y selvas de México almacenan una cantidad de carbono equivalente a 11-15 años de sus emisiones anuales.

**Cuadro 2.** Almacén de carbono por cobertura vegetal y uso de suelo en México

Land use/cover class	Total carbon (Mg C ha <sup>-1</sup> )	Vegetation carbon (Mg C ha <sup>-1</sup> )	Soil carbon (Mg C ha <sup>-1</sup> )
<b>Unmanaged forests</b>			
Temperate conifer	257	118	120
Temperate broadleaf	236	105	126
Tropical evergreen	305	186	115
Tropical deciduous	154	54	100
Semi-arid forests	80	19	60
Degraded forest lands	122	42	81
<b>Plantations</b>			
Long rotation	191	78	108
Short rotation	154	42	96
Restoration plantations	180	89	84
Bioenergy plantations	281	42	96
<b>Managed forests</b>			
Temperate conifer	234	118	120
Tropical evergreen	309	180	115
<b>Protected forests</b>			
Temperate	240	134	123
Tropical evergreen	305	223	115
Tropical deciduous	154	64	100
Wetlands	282	223	115
Semi-arid forests	97	49	60
<b>Other uses</b>			
Agriculture	89	9	81
Pasture	95	16	81
Agroforestry	159	63	97

Notes: Total C is not the sum of C in vegetation plus C in soils, because it also includes C in decomposing matter, forest products and in fossil fuel substitution, where appropriate. Source, own estimates based on: Masera et al. 1995, 1997a; De Jong et al. 1997; Ordóñez et al. 1998; Hughes et al. 1999, 2000; Rentería 1997; Castellanos 1991; Ordóñez 1998; Ordóñez and Escandón 1999.

Para la estimación de almacenes de carbono en México [Masera et al., \(2001\)](#) han descrito modelos basados en dos escenarios el primero “escenario de referencia” que consiste en una combinación de un escenario de negocios con penetración limitada de opciones de mitigación. Se supone que las tasas de deforestación constante en cada uno de los cinco principales tipos de bosque e iniciativas de gobierno para ampliar las áreas protegidas, así como para restaurar las tierras degradadas con un ritmo limitado y “escenario de mitigación” donde los esfuerzos actuales continuarán en el futuro; programas de restauración tendrán tasas de aplicación más exitosas, especialmente a través de una mejor tasa de supervivencia de los árboles plantados, los esfuerzos de conservación será sostenido, hasta alcanzar al menos el 10% de la superficie total de bosques por tipo de bosques en 2030, Manejo de bosques con un mejor sistemas de cosecha, lo que ayudará a reducir el área actual, Plantaciones autosuficiente para la producción de papel, celulosa y un intenso esfuerzo para restaurar las tierras degradadas. Como resultado de estos esfuerzos combinados las tasas de deforestación se reducirán, llegando a una cuarta parte de las tasas actuales para el 2030.

Bajo estos supuestos, el total de reservas de C en los ecosistemas de México se espera que disminuya de 24,0 a 22,6 Pg C entre 1990 y 2030 en el escenario de referencia, mientras que se mantuvo prácticamente al nivel de 1990 en el escenario de mitigación (Cuadro 4). En este último escenario, el total de reservas de C primero disminuye como resultado de la inercia en el proceso de deforestación y se recupera gradualmente como la diferente las opciones de mitigación se implementan .El secuestro neto, es decir, la diferencia entre la referencia y el escenario de mitigación alcanza  $37 \times 10^6$  Mg C en el año 2000 y aumenta hasta  $1.382 \times 10^6$  Mg C en 2030. El secuestro neto promedio en el período de 30 años es de  $46 \times 10^6$  Mg o  $12,5 \times 10^6$  Mg C año<sup>-1</sup> en el período de 2008 a 2012.

**Cuadro 3.** Estimación de almacenes de carbono en México por tipo de vegetación y uso de suelo “escenario referencia” (Masera et al., 2001)

Evolution of total C stock Reference Scenario 1990–2030 ( $\times 10^3$  Mg C)

Land use/cover class	1990	2000	2008	2012	2030
<b>Unmanaged forests</b>					
Temperate conifer	2,561,802	1,986,509	2,213,500	2,219,417	1,854,677
Temperate broadleaf	1,981,390	1,785,414	1,658,795	1,601,437	1,363,180
Tropical evergreen	1,741,945	1,412,643	1,082,275	938,807	360,667
Tropical deciduous	2,366,531	1,934,035	1,644,192	1,516,083	1,050,571
Semi-arid forests	5,007,736	4,822,342	4,734,466	4,699,512	4,553,012
Degraded forest lands	2,616,152	2,616,524	2,536,105	2,451,751	1,777,202
<b>Plantations</b>					
Long rotation	573	573	4,749	9,098	27,130
Short rotation	2	624	17,049	44,827	157,898
Restoration plantations	26,513	110,487	260,770	370,831	1,277,328
Bioenergy plantations	28	3,822	15,844	26,548	112,717
<b>Managed forests</b>					
Temperate conifer	1,509,829	1,830,695	1,489,585	1,423,132	1,500,906
Tropical evergreen	277,812	113,792	153,234	177,819	347,357
<b>Protected forests</b>					
Temperate	160,993	286,178	338,405	356,664	431,112
Tropical evergreen	537,760	603,135	627,243	633,424	652,351
Tropical deciduous	16,355	19,897	23,276	24,449	29,192
Wetlands	85,363	118,869	136,810	142,970	167,580
Semi-arid forests	307,470	484,546	552,918	576,261	668,924
<b>Other uses</b>					
Agriculture	2,313,326	2,401,034	2,452,827	2,476,158	2,561,967
Pasture	2,374,377	2,711,594	2,942,685	3,047,195	3,443,242
Agroforestry	143,454	153,815	178,829	191,256	249,451
<b>TOTAL</b>	<b>24,029,412</b>	<b>23,396,528</b>	<b>23,063,556</b>	<b>22,927,639</b>	<b>22,586,465</b>

**Cuadro 4.** Estimación de almacenes de carbono en México por tipo de vegetación y uso de suelo “escenario de mitigación” (Masera et al., 2001)

Evolution of total carbon stock Mitigation Scenario 1990–2030 ( $\times 10^3$  Mg C)

Land use/cover class	1990	2000	2008	2012	2030
<b>Unmanaged forests</b>					
Temperate conifer	2,561,802	1,994,453	2,057,381	2,009,332	1,358,327
Temperate broadleaf	1,981,390	1,791,924	1,699,445	1,662,978	1,509,660
Tropical evergreen	1,741,945	1,429,980	1,190,204	1,096,044	658,621
Tropical deciduous	2,366,531	1,953,605	1,755,622	1,677,553	1,390,486
Semi-arid forests	5,007,736	4,824,331	4,747,401	4,712,134	4,552,548
Degraded forest lands	2,616,152	2,613,747	2,434,493	2,256,760	1,144,812
<b>Plantations</b>					
Long rotation	573	573	8,269	17,361	33,913
Short rotation	15	624	22,679	64,352	236,847
Restoration plantations	26,513	110,487	350,397	536,330	1,842,704
Bioenergy plantations	28	3,822	41,513	88,495	375,722
<b>Managed forests</b>					
Temperate conifer	1,509,829	1,830,402	1,677,045	1,683,425	2,120,987
Tropical evergreen	277,812	113,792	153,234	177,819	347,357
<b>Protected forests</b>					
Temperate	160,993	286,178	369,973	412,158	611,163
Tropical evergreen	537,760	603,135	653,476	678,443	793,844
Tropical deciduous	16,355	19,897	68,140	101,873	238,289
Wetlands	85,363	118,869	136,810	142,970	167,580
Semi-arid forests	307,470	484,546	558,856	595,755	768,356
<b>Other uses</b>					
Agriculture	2,313,326	2,387,739	2,380,856	2,368,029	2,271,008
Pasture	2,374,377	2,696,018	2,815,983	2,851,803	2,974,686
Agroforestry	143,454	169,754	242,702	283,878	520,421
<b>TOTAL</b>	<b>24,029,426</b>	<b>23,433,877</b>	<b>23,364,478</b>	<b>23,416,737</b>	<b>23,891,014</b>

### **1.6.1 Cambio de uso de suelo en la Reserva de la Biosfera Mariposa Monarca (RBMM)**

Los procesos de degradación forestal han estado afectando a la región montañosa de la Reserva de la Biosfera Mariposa Monarca entre los estados de México y Michoacán, reduciendo la densidad de la cobertura forestal.

El monitoreo forestal dentro de la Reserva de la Biosfera Mariposa Monarca RBMM permite cuantificar los cambios en la región, como lo reporta [López \(2011\)](#) para el período 2003-2009 se presentó un cambio de degradación y deforestación en la cobertura vegetal de 1,987 hectáreas. Estos cambios se han producido en cuatro áreas bien definidas localizadas dentro de varios ejidos: de La Mesa (64 ha), Francisco Serrato (156 ha), Crescencio Morales (607 ha) y Nicolás Romero (5 ha) y las comunidades Indígenas de Francisco Serrato (59 ha), Crescencio Morales (249 ha) y Nicolás Romero (255 ha), y en una finca propiedad del Gobierno Federal (75 hectáreas).

La degradación de los bosques y la deforestación que ha sufrido esta región es atribuible a la confusión derivada de la expansión oficial de la RBMM y el establecimiento de pago por servicios ambientales sin un consenso que incluya a todos los involucrados. La inclusión a posteriori de casi todas las tierras dentro del programa y la prestación de apoyo para las actividades productivas se ha traducido en una considerable reducción de daños, sin embargo el trabajo social y el pago de los servicios ambientales han dado lugar a una clara tendencia a la recuperación de estos bosques ([López, 2011](#)).

## II. Planteamiento del problema

En los últimos siglos, el hombre ha ejercido un papel importante en cuanto al impacto que tiene sobre la naturaleza ya que ha venido modificando su ambiente desde su presencia en el planeta. Algunos autores como [Daily \(1995\)](#) y la [FAO \(1995\)](#) consideran que el 50% de la superficie terrestre ha sido modificada removiendo o transformando las comunidades vegetales naturales, por otro lado [Lambin \(1997\)](#) menciona que a nivel global, la degradación del terreno inducido por el hombre ha afectado aproximadamente el 69.5% de la superficie terrestre, ocasionando una drástica reducción de la diversidad biológica como afirma [Lee et al., \(1995\)](#).

En México el estudio del cambio en el uso del suelo es una de las tareas prioritarias, ya que se encuentra entre los países con mayor deforestación a nivel mundial de acuerdo a [Myers, 1991; Bocco et al., 2001](#).

El área de estudio que comprende este trabajo la Reserva de la Biosfera Mariposa Monarca *RBMM* cuenta con programas de apoyo para su conservación dirigidos por la World Wildlife Fund (WWF) y Fondo Monarca, sin embargo la deforestación y degradación forestal continúan presentándose, una de las principales causas son; la explotación clandestina, o tala ilegal, motivada principalmente por la presión que ejercen varias industrias sobre los recursos forestales, los escasos estímulos para hacer un buen manejo de los bosques, las malas prácticas de algunos técnicos forestales y la capacidad de la institución correspondiente para combatirlos ([Merino y Hernández, 2004](#)). La tala clandestina la causa principal de deforestación y degradación del bosque ([FAO-UNEP,1990; Lambin 1994 y 1997, Dale et al., 1993; Mas et al., 1996](#)), entendiéndolo por deforestación como “cambio físico en la cobertura del bosque incorporando factores ambientales sociales y económicos que promueven este cambio, mientras que [Landa et al., \(1997\)](#), la define como “la transformación del ambiente causada por fenómenos naturales o humanos, que conllevan a la reducción o pérdida completa de sus propiedades físicas y biológicas, cuya última consecuencia es un decremento en la disponibilidad de bienes y servicios que brindan los ecosistemas a los seres humanos.

Además de estos acontecimientos se presentan otros que alteran el equilibrio de dicho ecosistemas como los incendios forestales, los cuales suceden de forma natural y en ocasiones son necesarios para el bosque (germinación de algunas semillas del *Pinus halepensis*). Sin embargo el hombre puede aumentar su frecuencias o bien puede intervenir en su recuperación ocupando estas aéreas para la vivienda, agricultura, ganadería, etc.

La disminución de estas aéreas naturales, como el incremento de CO<sub>2</sub> en la atmósfera han contribuido al cambio climático global por tanto resulta de vital importancia estudiar la influencia de los procesos de cambio de uso del suelo en la dinámica de las comunidades y poblaciones, pues la deforestación y degradación del recurso forestal en el país con información detallada de los patrones de cambio de uso del suelo (multitemporal) son pocos. Los estudios existentes específicamente para los bosques templados del centro y sur de México son escasos, los cuales presentan un acelerado proceso de deforestación y degradación actualmente, con tasas de cambio comparables a las de las selvas del país (Maser, 1996) y pocos son los trabajos que competen los almacenes de carbono bajo estas condiciones en estas regiones.

Por lo tanto este trabajo pretende generar información sobre la potencialidad del suelo dentro de la RBMM para capturar carbono en diferentes condiciones, considerando regiones donde el bosque no ha sido perturbado y regiones donde si lo ha sido (bosque secundario), además de contribuir en el conocimiento para reconocer la distribución de los almacenes aéreos, subterráneos y caracterizar en qué condiciones se presentan estos almacenes aunado a sus principales propiedades física y químicas edáficas para reforzar la importancia de conservar estos ecosistemas o bien a partir de esto implementar mejores medidas para su manejo, así como un impulso para realizar los trabajos requeridos para obtener la certificación de pago por captura de carbono dentro de la RBMM.



### III. Justificación

Desde la implementación del mundo globalizado nuestras actividades más y más se concentra en la producción en masa, en ocasiones casi de manera instantánea, con la única finalidad de generar bienes a partir de los recursos naturales sin contemplar siquiera que éstos no pertenecen a nadie, pues son parte de lo esencial, de lo que una vez existió aun y mucho antes de que el hombre pisara el planeta, es por ello que se deben disminuir acciones que ocasionan la desertificación, deforestación y agotamiento de acuíferos entre otros, ya que todos estos están contribuyendo directa o indirectamente sobre el cambio en nuestro clima y han propiciado también problemas ambientales muy severos y que pareciera de los más cotidianos en la vida moderna.

Este trabajo aportará información importante para revalorar estos servicios invaluable que recibimos gratuitamente y que lo menos que podemos hacer es retribuir con acciones que garanticen su conservación y desarrollo. Si bien en la Reserva de la Biosfera Mariposa Monarca viven poblaciones que dependen del uso de la madera de los bosque y de programas para su conservación, así como obtienen ingresos de las actividades alternas como el ecoturismo de ahí la importancia del mantenimiento y conservación de los ecosistemas naturales, sin embargo además de esto surge como alternativa el secuestro del carbono como una posibilidad de ingresos adicionales como se planteó en el [Programa de Manejo RBMM \(2000\)](#). Por lo tanto en nuestro país, el pago por captura de carbono puede contribuir a mantener y conservar estas aéreas naturales.

## **IV. Objetivos**

### **Objetivo general**

- Estimar almacenes de carbono en suelo bajo diferentes coberturas vegetales en la Reserva de la Biosfera Mariposa Monarca.

### **Objetivos específicos**

- Determinar los cambios en la cobertura forestal durante el periodo 1971-2010.
- Evaluar los almacenes de carbono edáficos y en biomasa aérea en bosques de Oyamel, Pino conservados y bosques secundarios con diferentes edades en recuperación.
- Descripción de las propiedades físicas y químicas de los suelos y su relación con los almacenes de carbono en suelo.
- Determinar las frecuencias diamétricas de los árboles y su relación con carbono orgánico del suelo.

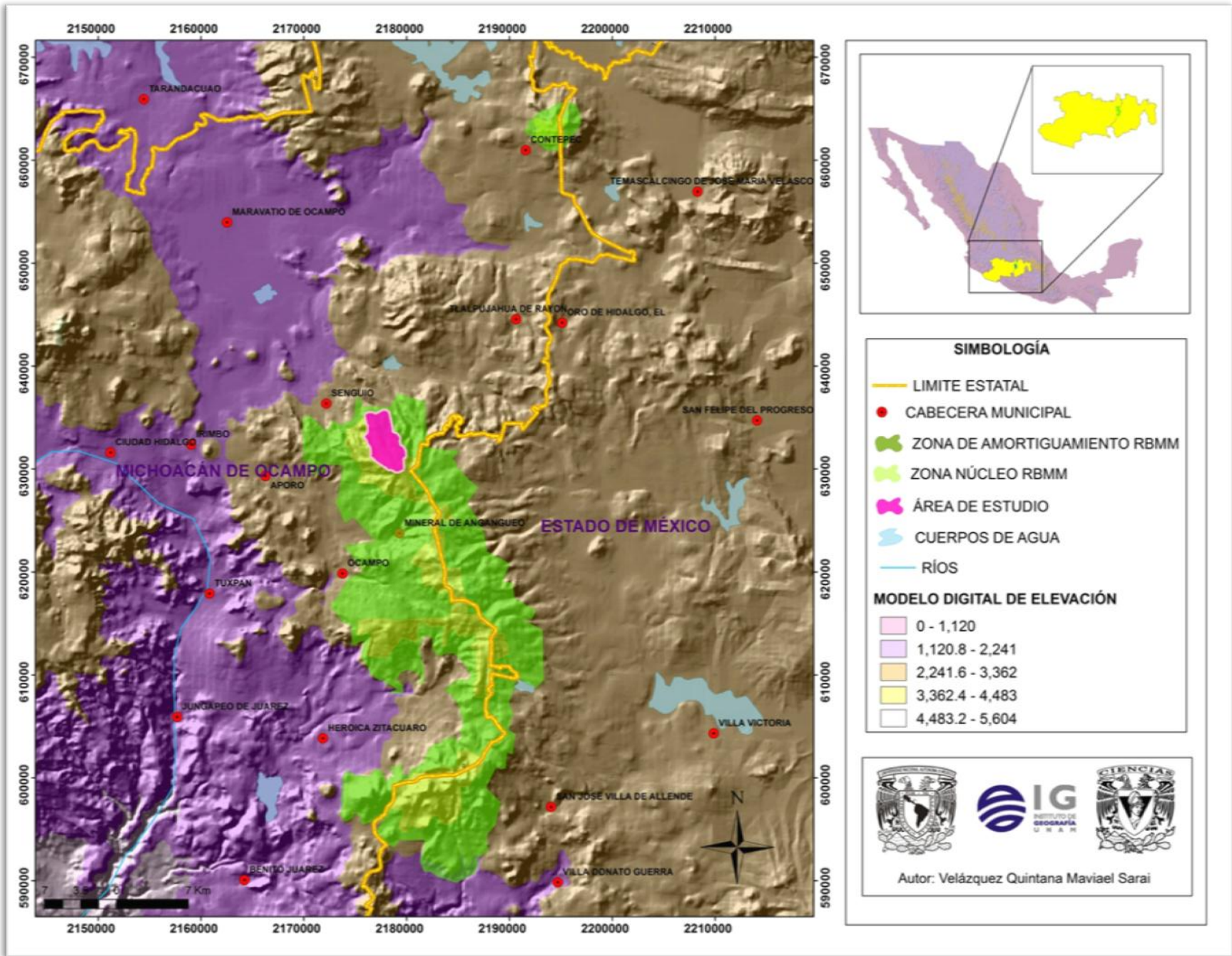
## V. Método y materiales

### 5.1. Descripción de la área de estudio RBMM

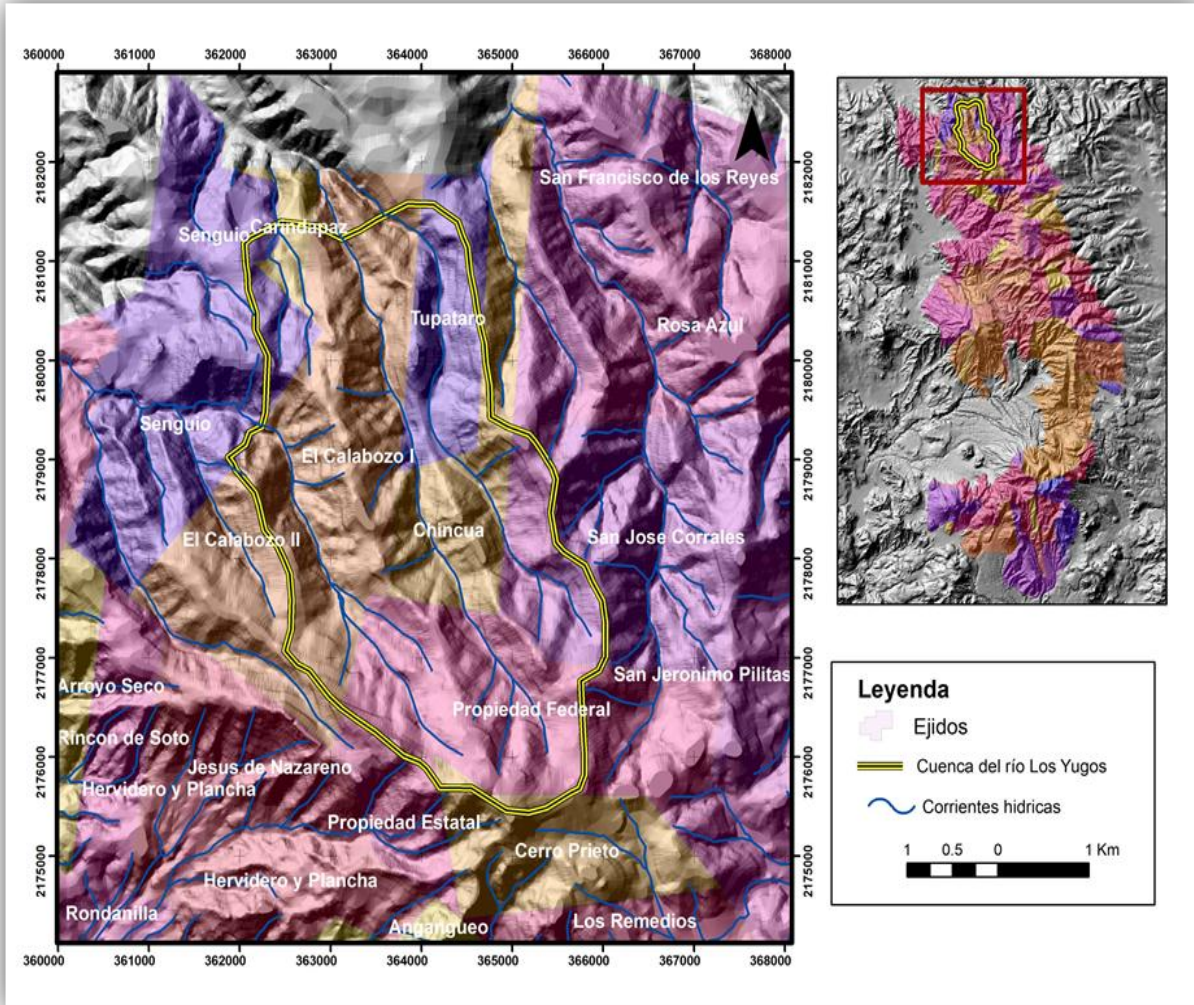
Actualmente la Reserva cubre 56,259 hectáreas en el límite de los Estados de México y Michoacán sus coordenadas geográficas extremas son: para Altamirano 19° 59' 42" y 19° 57' 07" latitud norte y 100° 09' 54"; y 100° 06' 39" longitud oeste y para el corredor Chincua-Cerro Pelón son 19° 44' 27" y 19° 18' 32" latitud norte y 100° 22' 26" y 100° 09' 07" longitud oeste. Está conformada por la zona núcleo (bosques donde hiberna la Monarca) y la zona de amortiguamiento (en donde puede haber aprovechamiento forestal sostenible) cuya función es disminuir las presiones humanas sobre el hábitat de hibernación de esta mariposa (López, J. 2006).

Con base a la fotointerpretación realizada previamente al muestreo y a los objetivos propios de este trabajo, se estableció como base para realizar la selección de los sitios para la evaluación de almacenes de carbono una cuenca hidrográfica. Se eligió como área de estudio la cuenca del río **Los Yugos** dentro de Sierra Chincua tomando como evidencia las fotografías aéreas de ser un sitio con regiones con pocas perturbaciones y con recuperación de vegetación importantes, aunado a eso sus características fisiográficas como se mencionará están representadas por zonas homogéneas, además la cuenca cuenta con más de un 50% de su superficie dentro del área núcleo de la RBMM y con 925.68 ha de bosque de Oyamel, hábitat natural de hibernación por excelencia de la Mariposa Monarca (*Danaus plexippus*).

**Figura 6.** Localización de la Reserva de la Biosfera Mariposa Monarca



La cuenca del río Los Yugos se localiza al oriente del estado de Michoacán, dentro de la Sierra Chincua entre los paralelos 19°43'30" y 19°40'0" latitud norte y entre los meridianos 100°19'0" y 100°16'30" longitud oeste, con una superficie de **1617 ha**. Políticamente se localiza al sureste del municipio de Senguio, al Norte del Municipio Mineral de Angangueo y al Noreste del Municipio de Aporo. Los ejidos que comprende la cuenca son Senguio, El Calabozo, Tupataro, Chincua, San José Corrales, Propiedad Federal y Cerro Prieto.



**Figura 7.** Localización del área en estudio cuenca del río Los Yugos, RBMM

### **5.1.2. Aspectos fisiográficos**

La Reserva de la Biosfera Mariposa Monarca está enmarcada fisiográficamente en el Sistema Volcánico Transversal que marca el extremo sur de la Altiplanicie Mexicana y la separa de la depresión del Balsas, posee un sistema montañoso discontinuo, intensamente disectado por fuertes procesos tectónicos, compuestos de un conjunto de sierras y lomeríos, agrupados en la porción centro-sur y separadas por pequeños valles intermontanos y llanuras. Las topoformas dominantes están representadas por cuatro conjuntos montañoso (las montañas que predominan son las de origen volcánico). Se caracterizan por su pendiente pronunciada superior a 30°. Su morfología es cónica o en cúpula. Dominan los procesos de erosión areal y es cortada por valles profundos mayores a 100 metros de profundidad. Puede ser una forma aislada o constituir conjuntos mayores. Su origen es primordialmente endógeno que son Norte a Sur: el grupo montañosos Chincua, colorado-Cedral, Campanario-Rancho Grande-huacal, los cuales integran la denominada Sierra Anganguero destacan también por su extensión el Cerro Pelón y el Cerro Cacique, así como los lomeríos longitudinales y el pie de monte de estos dos últimos cerros.

#### **Grupo montañoso Chincua**

Esta unidad se localiza en la parte NO de la Sierra Campanario. Compuesto por andesitas del terciario muy modeladas. Configurada de forma radial en donde su centro está localizado a 3500 metros de altitud y su base a 2400 msnm. Las pendientes dominantes en las partes altas son entre 15° a 35 ° mientras que en el pie de monte son de 3° a 6°.

El norte de este grupo montañoso está compuesto por bloques con orientación NE y NO, aquí la Sierra aporta corrientes permanentes con poca agua en su cauce, la única que logra formar pequeños cuerpos de retención es la que se conoce como Zapatero, las restantes son permanentes pero su gasto es mínimo. La parte NE abastece la región hidráulica Lerma-Santiago cuenca Lerma-Toluca y subcuenca Cauchi. Mientras que la parte sur está compuesta por bloques de orientación NE y SE. En esta última parte encontramos una red torrencial más profunda y un terreno más abrupto que en la zona sur. Esta parte se incorpora a la región hidrológica Balsas, cuenca Cuetzamala y la subcuenca Tuxpan.

### 5.1.3. Geología

Esta reserva se localiza en la unidad orogénica elevada de la cordillera neovolcánica está compuesta por rocas ígneas extrusivas y en el estado de Michoacán las elevaciones de la reserva son de las más grandes de la entidad, incluyen algunas que superan los 3,500 m de altitud (Tamayo, 1962).

El área de la reserva se originó por las abundantes efusiones basálticas que surgieron por fisuras, fallas y chimeneas, con orientación noreste-suroeste. Estos productos volcánicos cubrieron todo el relieve anterior creando uno nuevo, representado por abundantes conos volcánicos, derrames lávicos, lahares, depósitos de brecha volcánica y cenizas. Debido a la alta permeabilidad de los depósitos volcánicos se han desarrollado pocas corrientes superficiales, lo que ha ocasionado la formación de ojos de agua. El relieve montañoso está representado por rocas volcánicas del Terciario superior que cubren secuencias metamórficas y sedimentarias del Mesozoico. La intensa actividad fluvial ha permitido fuertes pendientes y la escasez de depósitos aluviales nos indica que esta zona se encuentra en una etapa de juventud.

En la zona de lomeríos, laderas montañosas y pie de monte se presentan también compuestos de toba andesítica, brecha volcánica, rocas metamórficas, como esquisto y conglomerados de arenisca. La extensión de cada unidad litológica que integra el área. Se observa que tan solo el 75% de la reserva está compuesta por andesitas; e basalto, brecha y toba andesíticas y el piroclasto ocupan casi el 19%, lo que significa que las demás unidades encontradas representan en conjunto cerca del 7% de la superficie del área.

### 5.2. Clima

El clima de la RBMM es del tipo C(w2)(w)(b'(i'')), el más húmedo de los templados subhúmedos con lluvias en verano, temperatura del mes más caliente cercana a los 22 °C, con baja oscilación térmica, entre 5 y 7 °C (UNAM-Cetenal, 1970). Sin embargo, el ámbito altitudinal (más de 1,300 m) de esta área natural protegida ANP permite la existencia de tres zonas mesoclimáticas predominantes: fresca-subhúmeda, semifría-subhúmeda y fría-subhúmeda.

A nivel local se distinguen tres tipos en la reserva ([Plan de manejo RBMM, 2000](#))

a) Zona Fresca-Subhúmeda de 2000 a 2500 msnm: abarca casi todo el sector oeste; influenciando altitudes menores de 2500 msnm, con relieve ondulado y pendientes suaves inferiores a los 10° existiendo, también, elevaciones aisladas donde el declive adquiere vigor, rebasando 25° en algunos sitios, lo que determina un cambio mesoclimático a semifrío-subhúmedo. Esta zona fresca-subhúmeda está al margen del área protegida y se caracteriza por la lluvia menor a 800 mm anuales y temperatura promedio superior a 16°C.

b) Zona Semifría-Subhúmeda mayor de 2500 a 3000 msnm: es la más extensa, ocupa una franja altitudinal entre 2500 y 3000 msnm, cuyo desnivel de 500 metros incluye cimas de parteaguas y vertientes medias, imprimiendo al terreno amplio rango de pendientes (10° a 15°). La moderada altitud favorece temperaturas entre 14°C y 16°C y la lluvia oscila entre 2500 y 300 mm anuales. Esta zona influye la mayor parte del área “Cerro Chivatí-Huacal” y en menor grado de “Sierra Chincua”.

c) Zona Fría-Subhúmeda mayor a 3000 msnm: menos extensa que las anteriores, se restringe al piso a 3000 msnm, correspondiendo a vertientes elevadas que hacia el oriente dan origen al parte aguas principal del macizo montañoso. En este ámbito, vinculado con la mariposa monarca, con temperaturas inferiores a 14°C y la precipitación a veces supera 1000mm anuales. La zona ejerce influencia absoluta sobre el área “Cerro Campanario” casi es total para la “Sierra Chincua” y parcial en las cimas del área “cerros Chivati-Huacal”.



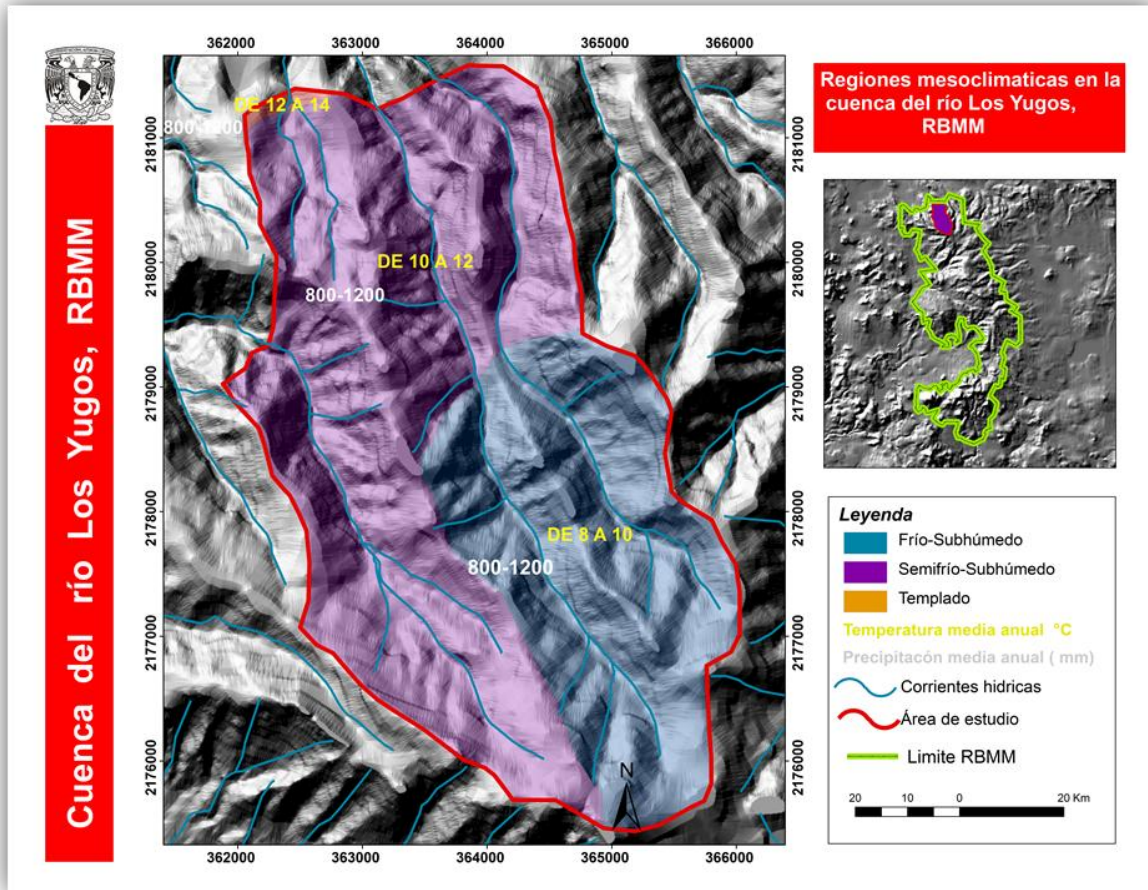


Figura 8. Regiones mesoclimáticas dentro la cuenca del río Los Yugos

### 5.3. Edafología

Los principales tipos de suelo en la Reserva de la Biosfera Mariposa Monarca son el resultado de material parental, constituido por rocas volcánicas (andesitas y tobas principalmente) y el resultado de procesos de intemperismo sobre estas rocas. (Cuadro 5)

**Cuadro 5.** Tipos de suelo dentro de la Reserva de la Biosfera Mariposa Monarca

SUELOS	CARACTERÍSTICAS	CONSIDERACIONES PARA LA PLANEACIÓN
<b>Andosol</b>	Son suelos originados a partir de cenizas volcánicas que se caracterizan por tener una capa superficial generalmente de color negro y textura media.	<p>Son suelos moderadamente susceptibles a la erosión.</p> <p>En la reserva se distinguen dos subunidades, andosol húmico y andosol ócrico. El primero se caracteriza por presentar una capa de color oscuro rica en materia orgánica, aunque con un pH ácido y pobre en nutrientes; y el segundo presenta una capa de color claro y pobre en materia orgánica.</p>
<b>Acrisol ortico</b>	Este suelo tiene una capa de arcilla en el subsuelo y por ser ácido o muy ácido.	Son muy susceptibles a procesos erosivos y poco fértiles.
<b>Litosol</b>	Suelo que se caracteriza por tener un espesor menor a 10 cm. En la reserva se desarrollan débilmente sobre andesitas debido a procesos gradatorios de erosión y acumulación.	
<b>Luvisol</b>	Son suelos que se caracterizan por presentar una capa de arcilla en el subsuelo, que a diferencia de los Acrisoles es más fértil y menos ácida.	<p>Suelos forestales muy susceptibles a la erosión</p> <p>Se distingue dos subunidades en la reserva, suelo Luvisol crómico, que presenta colores rojos o amarillentos en el subsuelo, y el Luvisol órtico, ambos de fertilidad moderada.</p> <p>Grano fino, suave y harinoso cuando está seco y se torna plástico cuando esta húmedo.</p> <p>Bueno como material para construcción de carreteras.</p> <p>Construcción de densidad baja.</p>
<b>Regosol eútrico</b>	Suelo que se caracteriza por no presentar una distinción de capas. En el área de estudio esta subunidad se origina a partir de los materiales residuales del basalto que ha sido expuesto a procesos de intemperismo.	<p>Suelos con rocas, impermeable con alta compresión.</p> <p>Cimentación fácil</p> <p>Drenaje por excavación difícil.</p> <p>Construcción de alta densidad.</p>

### 5.3.1. Asociaciones de suelo y características

Asociaciones de suelos. En la reserva domina la presencia de asociaciones de suelo más que unidades específicas (Cuadro 6). Estas asociaciones son el resultado del material parental que subyace al suelo, del relieve en donde se desarrollan, así como del intemperismo el clima y los factores biológicos, entre otros.

**Cuadro 6.** Asociaciones de suelo dentro de la RBMM

Clave	Unidad o asociación de suelo	Superficie (has)	%
<b>Lc+I+To</b>	Luviosol crómico, Litosol, Andosol ócrico	1824.9	3.33
<b>Th+Lo+To</b>	Andosol húmico, Luvisol órtico y Andosol ócrico.	9680.8	17.78
<b>To+Th+Re</b>	Andosol ócrico, Andosol húmico y Regosol leútrico.	5245.0	9.63
<b>Th+To</b>	Andosol húmico Andosol ócrico,	2569.7	4.72
<b>Ao+To</b>	Acrisol órtico, Andosol ócrico,	2265.0	4.16
<b>To+Th+Lo</b>	Andosol ócrico, Andosol húmico Livisol órtico	16926.2	31.00
<b>Th+Ah+To</b>	Andosol húmico, Acrisol húmico, Andosol ócrico,	12303.5	22.60
<b>Th+To+Ao</b>	Andosol húmico, Andosol ócrico, Acrisol órtico	1011.8	1.85
<b>Th+Ao+To</b>	Andosol húmico, Acrisol órtico, Andosol ócrico,	445.4	0.81
<b>Lc+Re+To</b>	Luvisol crómico, Regosol eutrico, Andosol ócrico	409.5	0.75
<b>To+Th+I</b>	Andosol ócrico, Andosol ócrico, Litosol	304.9	0.56
<b>To+Th</b>	Andosol ócrico, Andosol húmico	183.2	0.33
<b>Th+Ao</b>	Andosol húmico, Acrisol órtico	73.2	0.13
<b>Th</b>	Andosol ócrico,	7.1	0.01
<b>Lc+To</b>	Luvisol crómico, Andosol ócrico.	1184.8	2.17
	Total	54432	100

De éstas asociaciones encontramos en el área de estudio las formadas a partir de los tipos de suelo y horizontes de diagnóstico:

*Andosol*: “Suelos de Ando” fue introducida en 1947 por Soil Survey Staff en Japón por científicos americanos de suelo (Simonson, 1979). Son suelos que presentan propiedades ándicas resultantes de la presencia de cantidades significativas de materiales amorfos, los cuales consisten de minerales de rango corto como el alófano, complejos de aluminio-humus o cantidades específicas de vidrio volcánico (Parfitt y Clayden, 1991; Soil Survey Staff, 1999). Estos suelos se forman durante el intemperismo de tefras y materiales con vidrio volcánico (Soil Survey Staff, 1999), presentan un horizonte A oscuro de gran espesor, son friables con alto contenido de materia orgánica, tienen baja densidad aparente, alta capacidad de retención de agua (Ishizuka y Black, 1977), el rango de la relación C/N de la materia orgánica es de 13 a 25 y el suelo es moderadamente a fuertemente ácido con rangos de pH 4.5 a 5.1 en los horizontes A y 5.0 a 5.7.

*Luvisol*: se caracteriza por un contraste de texturas entre el horizonte A y el horizonte B, el horizonte Ae tiene menos arcillas que el horizonte Bt. Esta diferencia en el contenido de arcillas se presume se deriva de la transferencia física de las arcillas (iluvial) de la Ae (elivial) al Bt (ilivial), se desarrollan en zonas llanas, o con suave pendiente, de climas en los que existen una estación seca y otra humedad bien diferenciadas. Frecuentemente, se produce una acumulación de arcillas y un enrojecimiento que es consecuencia de la acumulación de óxidos de hierro favorecida por la fuerte sequía.

Los horizontes de diagnóstico *húmico (h)* se caracteriza por un alto contenido de materia orgánica que se explica por el bosque en el que se desarrolla.

Los horizontes de diagnóstico *ócrico (o)* se incluyen aquí todos los epipedones que no calzan en los otros grupos. Es decir son muy claros en color o muy delgados, con muy baja saturación de bases o bajos en contenido de materia orgánica.

Epipedón *crómico (c)* que tiene dentro de 150 cm de la superficie del suelo una capa subsuperficial, a 30 cm o más de espesor, que tiene un matiz Munsell más rojo que 7.5 YR o que tiene ambos, un matiz de 7.5 YR en y un croma en húmedo más de 4.

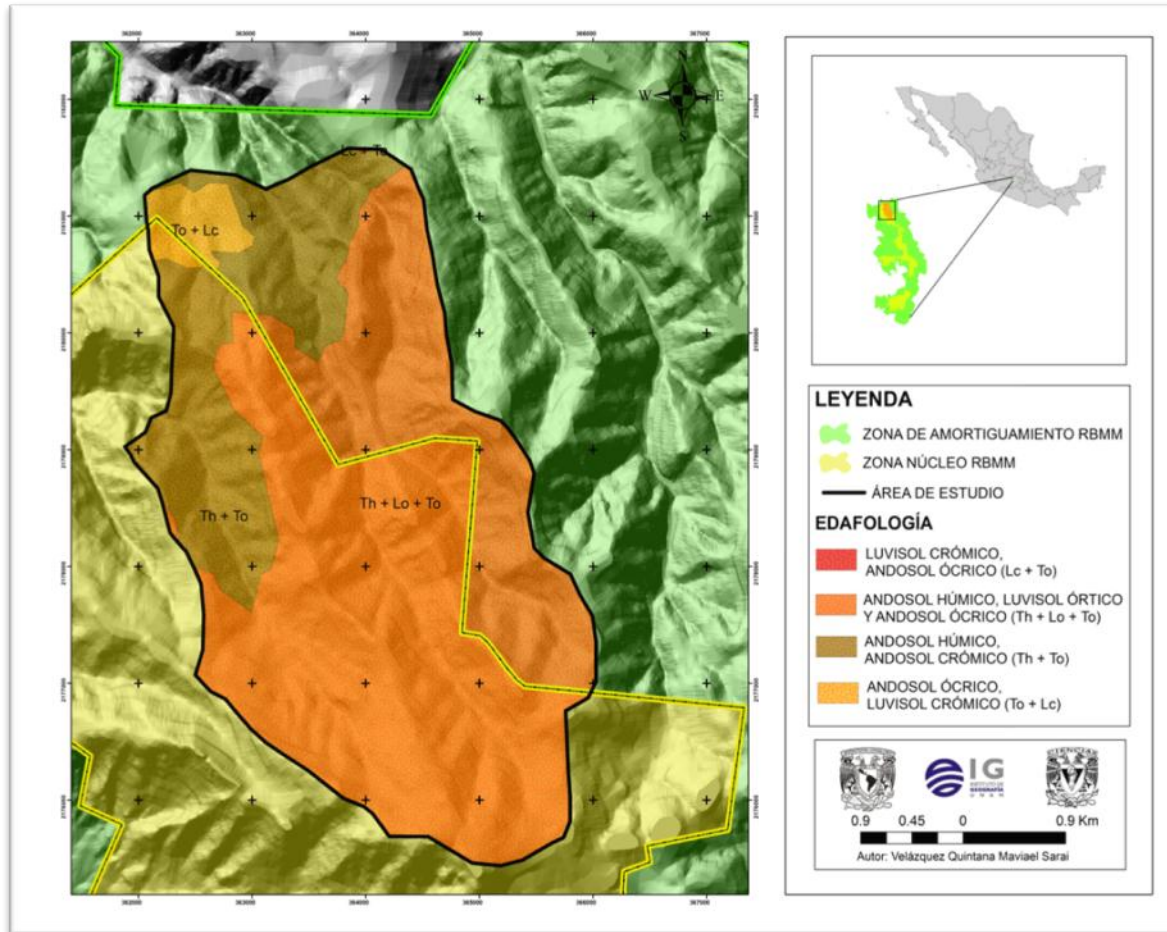


Figura 9. Distribución espacial de las asociaciones edáficas en la cuenca del río Los Yugos

#### 5.4. Vegetación

La vegetación el área de la RBMM forma parte de una zona de transición entre las regiones *Neártica* y *Neotropical* adscrita a la provincia de las *Serranías Meridionales*, pertenecientes a la *Región Mesoamericana de Montaña*, lo cual se expresa en la enorme biodiversidad de la zona. La complejidad del conjunto de elementos abióticos y los procesos biogeográficos ha dado lugar a cinco principales tipos de vegetación:

El bosque de Oyamel se distribuye desde los 3 600 hasta 2 400 msnm, es la comunidad más representativa, ocupa importantes extensiones del *subsistema montañoso* y las partes altas de los *aparatos volcánicos*, se caracteriza por la predominancia de *Abies religiosa* y constituye el hábitat característico de la mariposa Monarca.

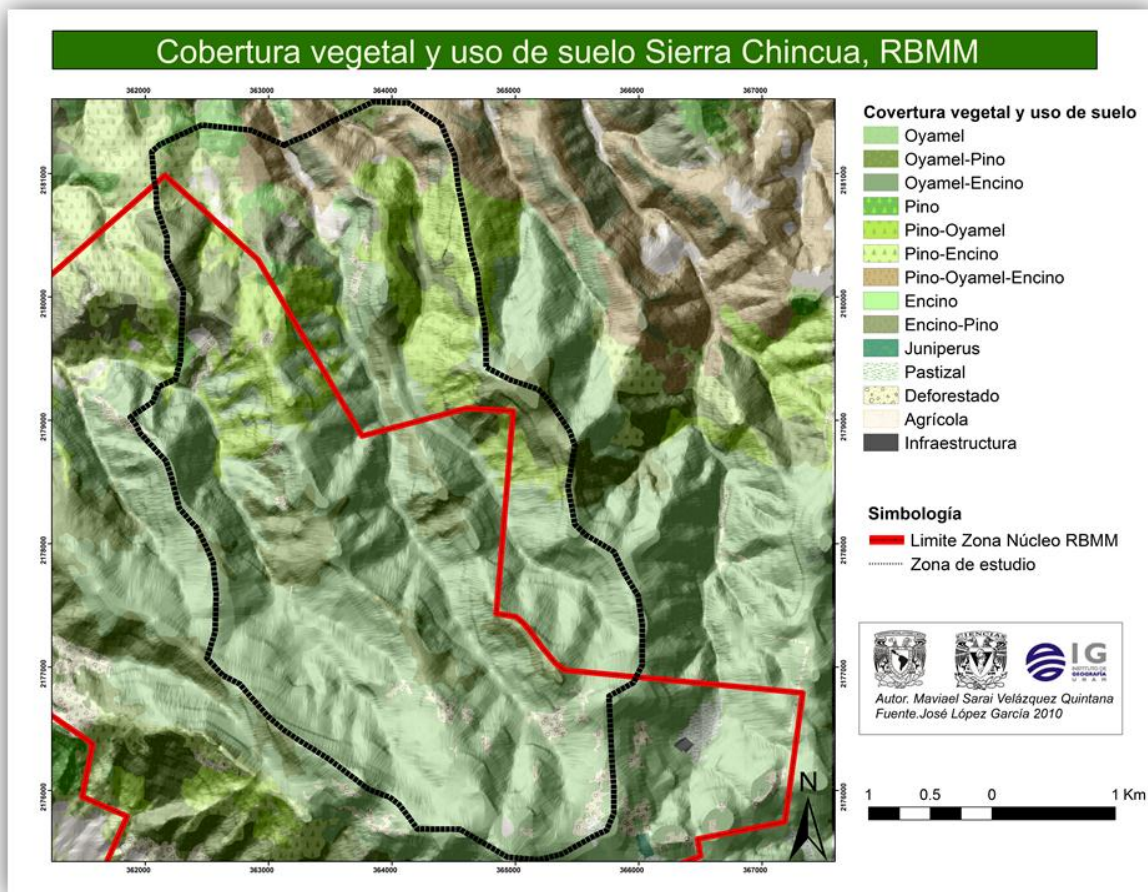
En las áreas perturbadas, principalmente en las laderas, se desarrolla un estrato arbóreo inferior con presencia de especies como *Quercus* sp, *Alnus* sp, *Arbutus* sp, *Salix* sp y *Prunus* sp, entre otros.

El bosque de Pino y Oyamel, se localiza en una franja altitudinal entre los 3 000 y 2 400 m pero su distribución horizontal se extiende por casi toda la región y su diversidad florística es muy amplia, a tal grado que está conformado por cuatro estratos bien diferenciados. El primero constituido por *Abies religiosa* y especies del género *Pinus*; el segundo por especies como *Arbutus grandulosa*, *Salix paradoxa*, *Alnus firmifolia* y *Quercus* sp., en el estrato herbáceo destacan especies como *Senecio prenanthoides*, *Senecio tolucanus*, *Senecio sanguisorbe*, *Acaena elongata*, *Oxalis* sp. *Geranium* sp. *Saturejamacrostema*, *Salvia elegans* y *Asplenium monanthes*, en el cuarto estrato se presentan diversas especies de musgo, así como *Viola* sp. *Sibthorpia pichinchensis*, *Oenothera* sp y *Oxalis* sp.

El bosque de Pino, se presenta en manchones aislados, la mayor parte de ellos se desarrollan a altitudes entre 3 000 y 1 500 m. Asociados a los sitios más húmedos o en declives fuertes, como es el caso de las cañadas, por debajo de los 2 000 msnm., en el primer caso predomina el *Pinus patula*, *Pinus pseudostrobus*, en suelos más someros o en condiciones secas se da lugar a asociaciones de *Pinus rudis* y *Pinus teocote*, así como *Pinus oocarpa* y *Pinus michoacana* en las partes medias y bajas más escarpadas.

El bosque de Encino está asociado a procesos de sucesión en áreas desprovistas de su vegetación originaria, por lo que se distribuye debajo de la cota de los 2 900 msnm. Aunque en algunos lugares se llega a encontrar hasta los 3 100 msnm y en general se encuentra compartiendo su espacio con pequeños manchones de cipreses. En el estrato arbóreo las especies que destacan son: *Quercus laurina*, *Clethra mexicana*, *Alnus firmifolia*, *Salix paradoxa*, *Buddleia cordata*, *Buddleia parvifolia*, *Ternstroemia pringlei*, y también es posible encontrar *Abies religiosa*, *Cupressus lindleyi* y *Pinus michoacana*.

El bosque de Cedro aunque de distribución restringida comparte espacio con el bosque de encino, principalmente al sur del Área Natural Protegida, en el Santuario de Cerro Pelón, entre los 2 400 y 2 600 msnm, asociado a condiciones especiales de humedad y temperatura propias de cañadas.



**Figura 10.** Clasificación de coberturas vegetales y usos de suelo dentro de la cuenca del río los Yugos, RBMM

En lo que comprende a la cuenca del río Los Yugos el bosque de Oyamel ocupa una superficie de 925.68 ha, el bosque Pino-Oyamel 228.33 ha, el bosque Oyamel-Pino 228.34 ha, el bosque de Pino - Oyamel-Encino 58.94 ha, bosque de Encino- Pino 43.42 ha, bosque de Pino - Encino 41.56 ha, bosque de Pino 23.65 ha, bosque de Encino 1.50 ha, Pastizal 1.56 ha, áreas Deforestadas 37.06 ha y con Agricultura 20.87 ha (Figura 10).

## 5.5. Fauna

La fauna de la región cuenta con elementos de afinidades neártica y neotropical, así como especies endémicas al eje neovolcánico las **Taxa notables:** La mariposa monarca (*Danaus plexippus*) (Pr), el venado cola blanca (*Odocoileus virginianus*), el coyote (*Canis latrans*), comadreja (*Mustela frenata*), la zorra gris (*Urocyon cinereo argenteus*), conejos (*Sylvilagus* spp.), cuervos (*Corvus corax*), el zopilote de cabeza roja (*Cathartes aura*), el tecolote (*Bubo virginianus*) (A), diversos colibríes, reptiles y anfibios.

## VI. Selección de los puntos de muestreo

### 6.1. Interpretación de fotografías aéreas

La selección del área de muestreo consistió en aplicar la técnica de interpretación de las fotografías aéreas de alta resolución que corresponden al período 1971-2010, con la finalidad de localizar aquellas áreas que han permanecido sin cambios, así mismo las que han sido perturbadas y reconocer el tiempo que han estado en estas condiciones. La previa caracterización del área de estudio optimiza el trabajo de campo, proporciona mayor agilidad, reduciendo los costos de mediciones y además otorga una mayor confianza en la presentación de los resultados 1) la interacción de procesos geomórficos y bióticos (Ellert et al., 2001); 2) la historia de manejo del suelo (Smith, 2003); 3) la época (Skjemstad et al., 2003; Steeffen, 2003) 4) la pendiente y grado de erosión ; 5) la orientación de ladera y 6) el tipo de vegetación que predomina, para tener áreas que compartan factores determinantes para la cuantificación COS y así poder compararlas.

Se emplearon los ortomosaicos corregidos 1971, 1994, 2003 y 2010 tomando como referencia espacial las ortofotos de INEGI de 1994, escala 1:75 000 utilizando la representación del territorio con proyección Universal Transversal de Mercator (UTM), con el datum de Norteamérica de 1927 y el elipsoide de Clack 1866 para la elaboración de la cartografía multitemporal y la clasificación de la densidad de cobertura vegetal se emplearon las siguientes clases categóricas.



**Cuadro 7.** Categorías de cobertura forestal y uso de suelo. Fuente: José López García, 2007

Clave	Categoría	Porcentaje cobertura forestal
1	Cerrada	>75%
2	Semicerrada	51-75 %
3	Semiabierta	26-50%
4	Abierta	11-25%
5	Deforestado	< 10 %
7	Matorral	-----
8	Pastizal	-----
9	Agricultura	-----
10	Infraestructura	-----

Para llevar a cabo la transferencia de la información fotointerpretada se empleó la técnica de restitución triangular en pantalla, para su posterior digitalización sobre los ortomosaicos usando el Sistema de Información Geográfica ArcGIS 9.3. A partir de esto fue necesario elaborar un mapa en donde se agruparan los cambios durante el periodo de 39 años representándolos a nivel espacial sobre la cuenca, esto se llevo a cabo usando una leyenda numérica basada en la comparación multitemporal que representa áreas de pérdida de vegetación como valores de -4 a -1 considerando al cero como áreas sin cambio y las unidades positivas de 4 a 1 como recuperación utilizando la herramienta Field calculator (Figura 13).

Los siete sitios (Cuadro 8) de muestreo se localizaron al oeste de la cuenca ya que es la zona que se encuentra dentro del área núcleo de la RBMM lo que significa que no hay un aprovechamiento forestal y la entrada a estas zonas es restringida para preservación del hábitat en su estado natural, también esta porción de la cuenca es donde se ubica la distribución natural del bosque de Oyamel según la cartografía consultada previamente al estudio. A continuación se describen los sitios de muestreo con apoyo de la cartografía e información en campo.

**Cuadro 8.** Caracterización de los sitios de muestreo cuenca del río los Yugos, RBMM

Muestreo	Descripción	Vegetación	Asociación de suelo	Geología	Precipitación media mm	Temperatura media °C	Altitud msnm	Pendiente °
1	Los madroños	Bosque Oyamel	Th+Lo+To	Andesitas	800 a 1200	10- 12 Semifrío	3166	12
6	Ojo de Agua	Bosque Oyamel	Th+Lo+To	Andesitas	800 a 1200	10- 12 Semifrío	3112	16
7	Koala	Bosque Oyamel	Th+Lo+To	Andesitas	800 a 1200	10- 12 Semifrío	3117	15
3	Senguio	Bosque Pino	Th+Lo+To	Andesitas	800 a 1200	10- 12 Semifrío	2876	15
2	Senguio	Bosque Pino	Th+ To	Andesitas	800 a 1200	10- 12 Semifrío	2834	13
4	Senguio	Bosque Pino	Th+ To	Andesitas	800 a 1200	10- 12 Semifrío	2777	10
5	Agua caliente	Bosque Aile	Th+ To	Andesitas	800 a 1200	10- 12 Semifrío	2731	14

## 6.2. Diseño para colecta de material edáfico en el campo

En base los ortomosaicos ingresados a un GPS (*Global Positioning System*) mediante el programa Arcpad, los puntos de muestreo fueron ubicados espacialmente en campo. La colecta de las muestras se llevó a cabo a partir del diseño anidado propuesto por Ordoñez (2002) dentro de las unidades de cobertura homogéneas anteriormente delimitadas se trazó un círculo de 1000 m<sup>2</sup>, en cuyo interior se ubicaron 3 cuadrados de 50 cm X 50 cm para la colecta de suelo (Figura 10). Se establecieron 3 parcelas para el bosque de Oyamel, 3 parcelas para el bosque de Pino y 1 parcela para bosque de Aile. La colecta del material edáfico se realizó hasta 30 cm de profundidad para el análisis de carbono además se colectó el material del perfil de suelo ubicado en el centro de la parcela para su posterior análisis en el laboratorio.

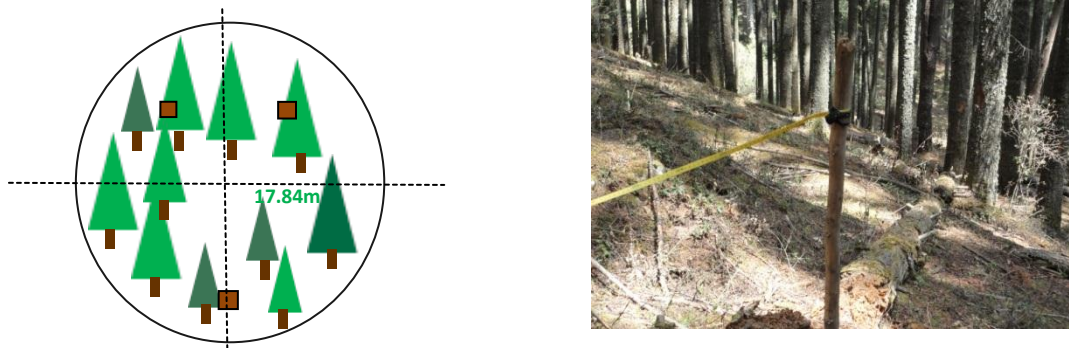


Figura 10. Esquema de muestreo parcela circular 1000 m<sup>2</sup> (Radio 17.84 m)

## VII. Determinación de la Biomasa aérea

En cada sitio de muestreo se identificó el centro de un círculo de 1000 m<sup>2</sup> a partir del cual se realizó el muestreo de la biomasa de los árboles considerando sólo el estrato arbóreo (DAP mayor a 2.5 cm), se tomo información referente a su diámetro a la altura del pecho DAP (1.3m), la altura, así como la especie de cada árbol.

Para la estimación de la biomasa se emplean las ecuaciones alométricas:

*Pinus patula* y otras especies de Pino s:  
 $B = 0.0948 * DAP^{2.4079}$  (Díaz., et al 2007)

*Abies religiosa*:

$B = 0.0754 * DAP^{2.513}$

*Alnus* sp:

$$B = 0.11765 * DAP^{2.23} \text{ (Acosta et al., 2002)}$$

*Quercus* sp:

$$B = 0.1033 * DAP^{2.39} \text{ (Acosta et al., 2002)}$$

*Cedrela* sp:

$$B = 0.525 + 0.015 (DAP^2 h) \text{ (Cole y Ewel, 2006)}$$

Donde:

B = biomasa (kg)

DAP = diámetro altura del pecho (cm)

h=Altura (cm)

En el caso de los Pino, la cantidad de C se obtuvo multiplicando la biomasa por el factor 0.5, el cual significa que el 50% la biomasa del árbol es C (Díaz et al., 2007). La concentración de C en la madera del fuste de *Quercus* sp es de 47% y del follaje 49%, para *Abies religiosa* el factor que se utiliza es de 0.4648 para el caso de *Cedrela* sp se multiplica por 0.5 (IPCC, 2007).

### **7.1. Determinación frecuencias diamétricas (árboles /ha)**

El concepto frecuencia diamétrica es importante para la evaluación de los bosques, ya que proporcionan información sobre la etapa de desarrollo del bosque. La clase diamétricas es concebida como un rango de valores de diámetro referenciados al valor central, llamándolo a valor de clase; usualmente en México se presentan en clases de 5 cm en 5 cm.

La distribución total del número de árboles por clases diamétricas de cualquier tipo de bosque no alterado presenta la forma de una "J" invertida", es decir, el número de árboles va disminuyendo conforme aumenta el DAP. Un resultado diferente debe hacer sospechar que el bosque ha sido alterado (por el hombre o por causas naturales). La distribución del número de árboles por clases diamétricas es fundamental para el estudio del bosque, la misma representan un indicador de la estructura de la masa arbórea, permitiendo diferenciar entre estructuras de diferentes bosques densos y al interior de estos mismos. Además, ofrecen información sobre el estado de equilibrio poblacional de una comunidad y de hecho, reflejan el equilibrio del bosque si este está en estado natural y no intervenido. En bosques alterados, permiten detectar actividades antropogénicas (Departamento de Fomento Forestal, 2006).

## **VIII. Métodos analíticos de suelos**

### **Preparación de muestras para su análisis**

Una vez tomada las muestras en campo se secaron a temperatura ambiente, posteriormente se realizó el molido y tamizado con malla 10 para homogeneizar la muestra. Para las pruebas de Carbono y Nitrógeno total se seleccionó una submuestra de 5 g que se pulverizó con un mortero de ágata y se tamizo en malla 60 de 0.25 mm.

#### **8.1. Color del suelo**

El color del suelo refleja algunas propiedades físicas, químicas y biológicas del mismo y ésta influido directamente por el contenido de materia orgánica, el material parental, el clima, el drenaje y la aireación. Para determinarlo se utilizó las tablas de color Munsell.

#### **8.2. Densidad aparente**

Los terrones de las muestras no tienen consistencia suficiente para determinar la densidad por el método de la parafina o el cilindro (horizontes AC poco desarrollo), por lo que se tuvo que hacer por el método de la probeta (Serrato y Landero, 2001) realizando 3 repeticiones en cada muestra para disminuir el error.

#### **8.3. Textura**

Se realizó la evaluación de la textura del suelo empleando el método de la pipeta de Robinson, el cual consiste en determinar el porcentaje de arenas, arcillas y limos en un suelo luego de haberlo procesado para eliminarle su materia orgánica y sus enlaces químicos de microagregados.

#### **8.4. Contenido gravimétrico de agua**

El agua es una sustancia con propiedades moleculares importantes como la formación de puentes de hidrógeno no sólo entre sino con otros compuestos, permitiendo al agua acción solvente, lo que beneficia a las plantas, ya que de esta manera los elementos esenciales para su crecimiento están disueltos y disponibles en el agua formando la solución del suelo, además de esto el agua en el suelo es absorbida y conducida por capilaridad a través de la planta e incorporándolas a su estructura, además el agua es esencial para los seres vivos, en su forma molecular entra en varias reacciones metabólicas dentro de los tejidos, es por ello que la evaluación de las diferentes humedades dentro del suelo resulta de suma importancia. Se llevó a cabo el método Gravimétrico que permite obtener:

- **Humedad a capacidad de campo:** se define como la cantidad de humedad que un suelo retiene contra la gravedad cuando se deja drenar libremente.
- **Humedad higroscópica o no aprovechable:** es el agua que se une a los coloides del suelo debido a las fuerzas de adhesión.
- **Humedad capilar o aprovechable:** forma películas dobles de agua gracias a las fuerzas de cohesión, dando movilidad a las moléculas que se desplazan por capilaridad a través de los microporos del suelo.
- **Humedad a punto de marchitez permanente.** Es el contenido de humedad de un suelo en el que las plantas se marchitan y son incapaces de recobrase debido a que las raíces no pueden ejercer la suficiente tensión para succionar el agua.

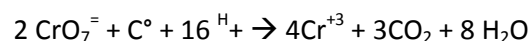
### 8.5. pH

El pH es una propiedad química del suelo que tiene una importancia para procesos como la morfogénesis, procesos químicos y biológicos del suelo. Se estimó a partir del método potenciométrico para determinar pH real desarrollado.

### 8.6. Estimación de carbono orgánico del suelo (COS)

Para el cálculo de la fracción de carbono en suelo COS, se utilizó el método de [Walkley-Black \(1934\)](#) modificado, que consiste en la oxidación del carbono orgánico que contiene el suelo con un exceso de dicromato de potasio en un medio fuertemente ácido, valorando el exceso de dicromato con sulfato ferroso, como se describe a continuación.

Tanto el C que se encuentra en distintos niveles de oxidación dentro de la MO del suelo, como el CO e Hidrógeno constitutivos de la misma, pueden reaccionar con el dicromato en diferentes proporciones. Pero experimentalmente se determinó una relación proporcional entre la cantidad de CO<sub>2</sub> desprendido en la oxidación por vía húmeda y la cantidad de ácido crómico reducido, sugiriéndose una compensación de las reacciones de H y O orgánicos. Por ello se supone que, cada átomo de C es oxidado desde un estado de oxidación 0 a un nivel +4 reflejando de esta manera todo el intercambio en la reacción:



El potencial redox del sistema está fuertemente asociado a la concentración de  $H_2SO_4$  y a la temperatura de reacción, por lo que un aumento en la concentración del ácido incrementa la fuerza oxidante del sistema.

Para estimar los almacenes de carbono en el suelo se obtuvo en base a la ecuación:

$$COS (Kg) = CC*DA*P$$

*COS*= carbono orgánico del suelo  
*CC*= concentración de carbono (%)  
*DA*= Densidad aparente ( $g\ cc^{-1}$ )  
*P*= profundidad de muestreo

Además del contenido de carbono se obtuvo el porcentaje de MO que sirvió para calcular la razón de estratificación de la MOS como un indicador de calidad de suelos propuesto por [Franzluebber \(2001\)](#) basado en el hecho que los suelos naturales forestales tienen sus propiedades estratificadas en profundidad. El cálculo de la razón de estratificación de la MOS es:

$$RE_{MOS} = \frac{MOS_{sup}}{MOS_{prof}}$$

Donde  $RE_{MOS}$  es la razón de estratificación de la materia orgánica, *MOS sup* es el contenido de MOS cercano a la superficie o primer estrato de muestreo y *MOS prof* es el contenido de materia orgánica del suelo en profundidad, en el límite de la capa arable.

### **8.7. Nitrógeno total**

El Nitrógeno es un elemento indispensable para la vida, ya que forma parte de las principales biomoléculas de todos los seres vivos. Es también uno de los elementos más abundantes en la Tierra, pues en su forma gaseosa ( $N_2$ ) constituye el 78% de la atmosfera. Se estimó aplicando el método [Micro-Kjeldahl](#).

El método de Kjeldahl la reacción ocurre en un medio ácido (sulfúrico concentrado) a temperaturas elevadas ( $360^\circ C$ ), donde el nitrógeno orgánico es transformado a ion amonio, éste es cuantificado a través de una destilación alcalina y su posterior titulación. La evaluación de este elemento fue en los primero 30 cm.

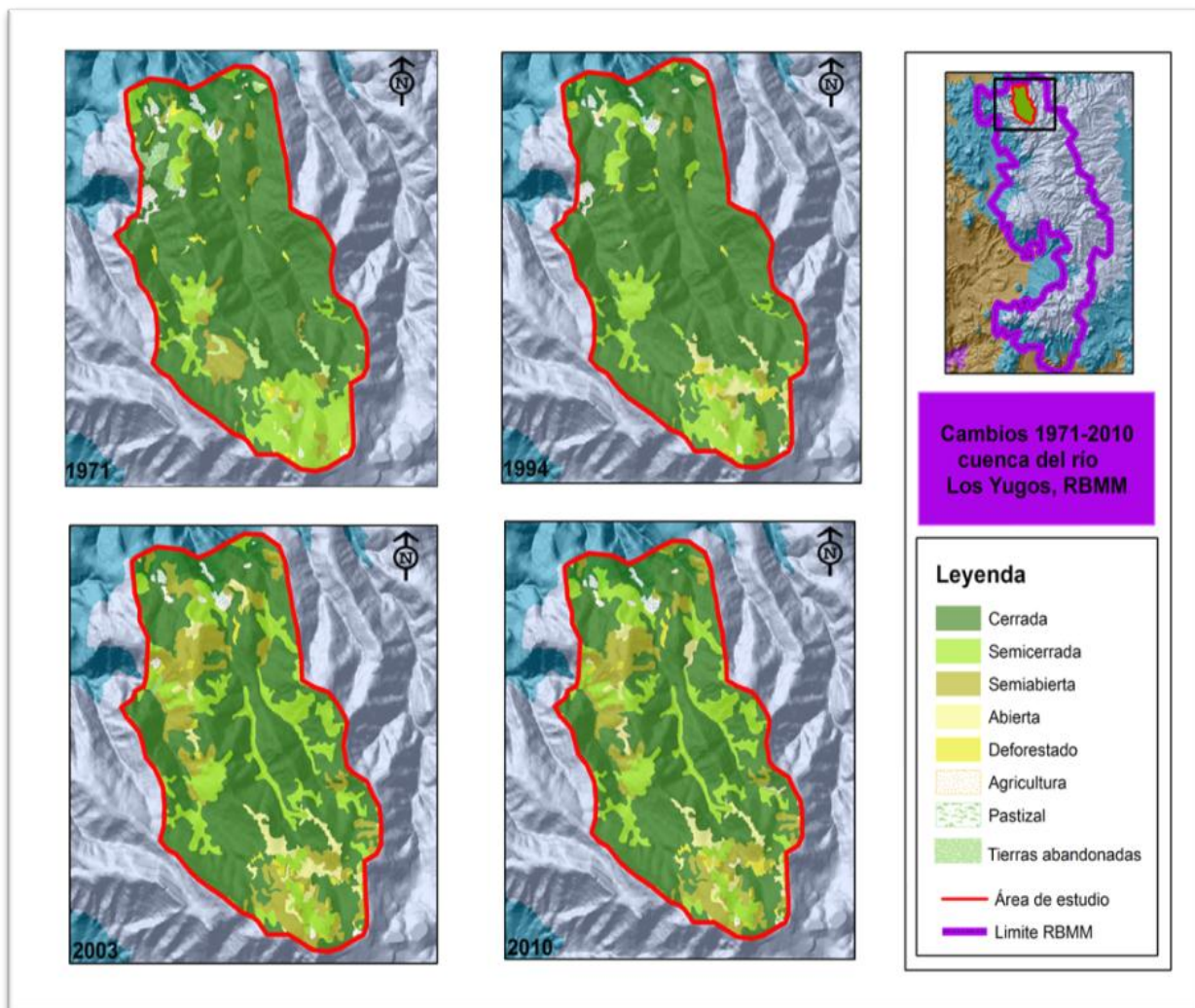
### **8.8. Capacidad de Intercambio Catiónico total**

La Capacidad de Intercambio Catiónico es una expresión del número de sitios de adsorción de cationes por unidad de peso de suelo. Se realizó el método acetato de amonio como extractante.

## IX. Resultados

### 9.1. Densidad de cobertura y uso de suelo 1971-2010

El análisis multitemporal de la densidad de cobertura vegetal y uso de suelo de 1971, 1994, 2003, 2010 en la cuenca del río Los Yugos en Sierra Chincua (Figura 11), permitió conocer que ha habido una pérdida y degradación en la cobertura forestal entre 1971-2010, con algunas recuperaciones entre 2003-2010, lo cual se puede deber a la implementación de Pago por Servicios Ambientales (PSA) y a la ampliación del Área Natural Protegida (ANP).



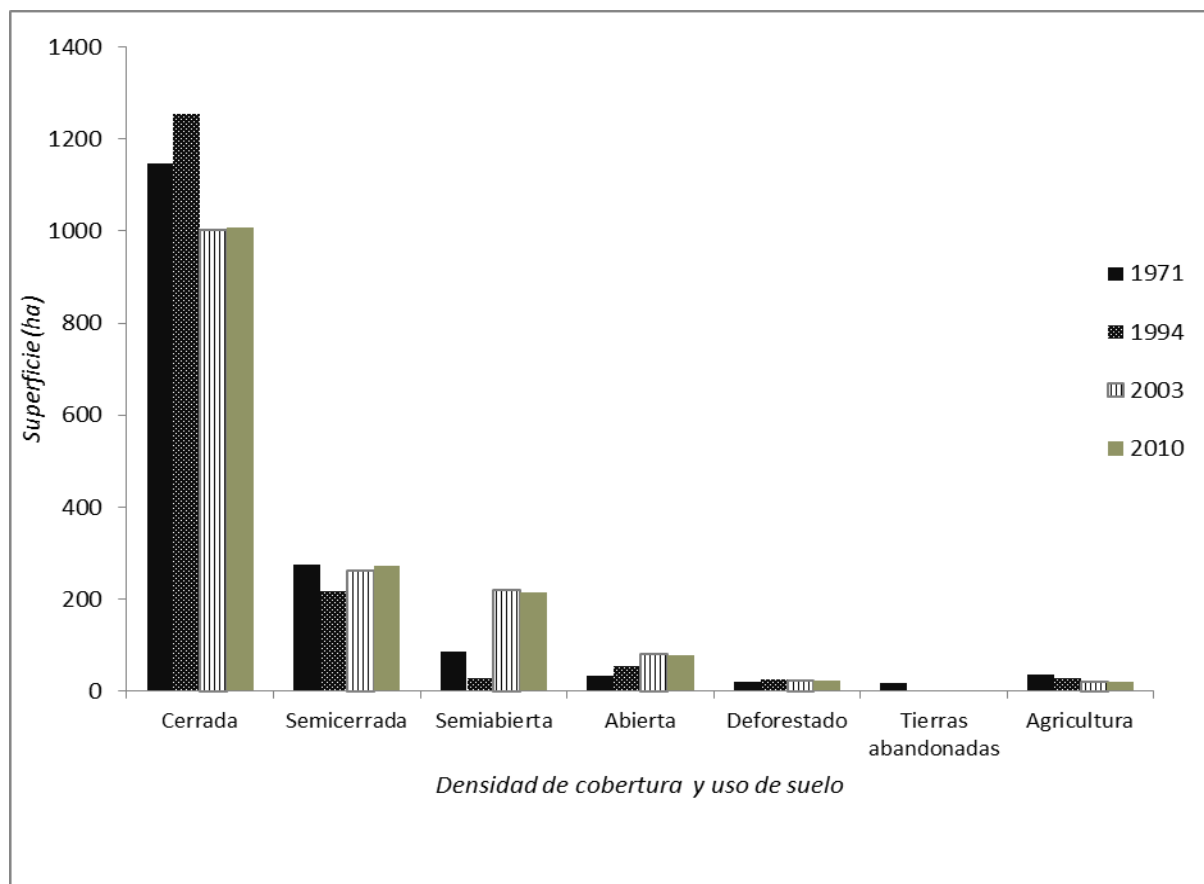
**Figura 11.** Cambios de la densidad de cobertura vegetal y uso de suelo 1971, 1994, 2003, 2010 en la cuenca del río Los Yugos, RBMM



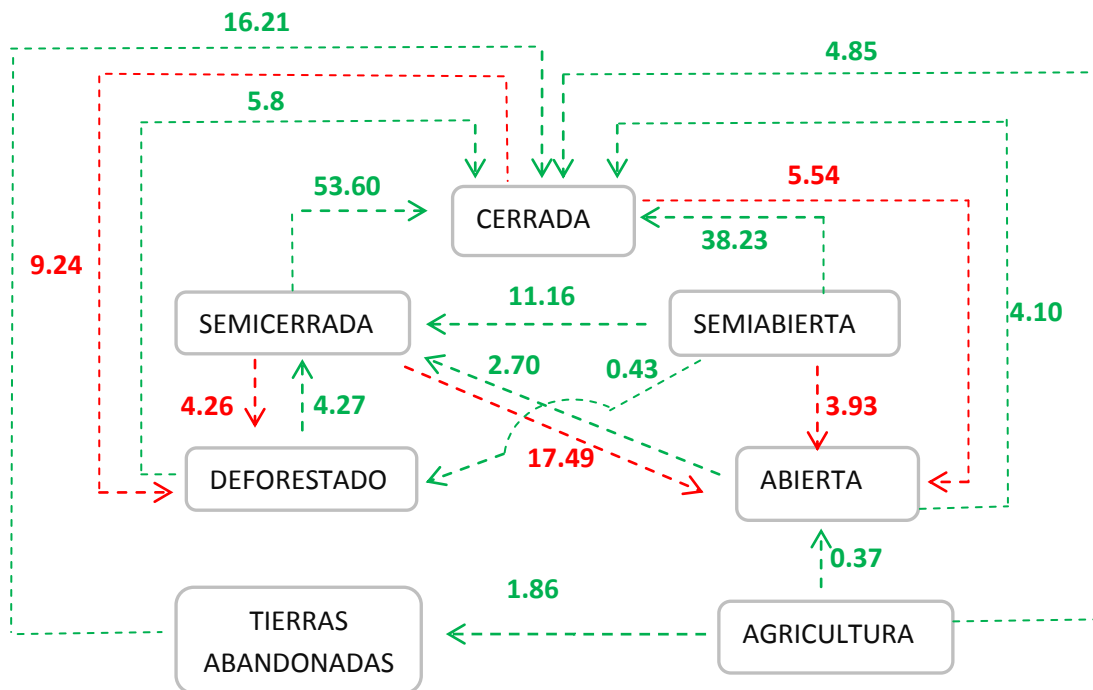
La categoría cerrada tuvo un importante recuperación entre los años 1971 a 1994 que fue de 108 ha, sin embargo el aumento no se mantuvo en el tiempo y descendió considerablemente en 251.4 ha para el año de 2003 y recuperándose solamente con 4.8 ha de superficie en el 2010. Gráfica 1

Con lo que respecta la categoría semicerrada disminuyó en 57.2 ha para el año de 1994 volviendo a aumentar su superficie en 2003 46.9 ha y en 2010 también aumentó con 7.1 ha. La categoría semiabierta tuvo el más importante crecimiento de su superficie en el período 1994 a 2003 donde aumentó en 192.0 ha, también la cobertura abierta tuvo un crecimiento de 1971 a 2003 de 47.1 ha.

En general de 1971 a 2010 los más importantes eventos fueron por una parte la pérdida de la cobertura cerrada en el 2003 considerándose como el más importante cambio para esta clase, sin embargo esta pérdida no resultó efectiva para todo el sistema ya que las demás coberturas; semicerrada, semiabierta y abierta aumentaron a partir de esta fecha, a su vez la agricultura disminuyó de 1971 con una superficie total de 35.5 a 19.44 ha para el 2010.

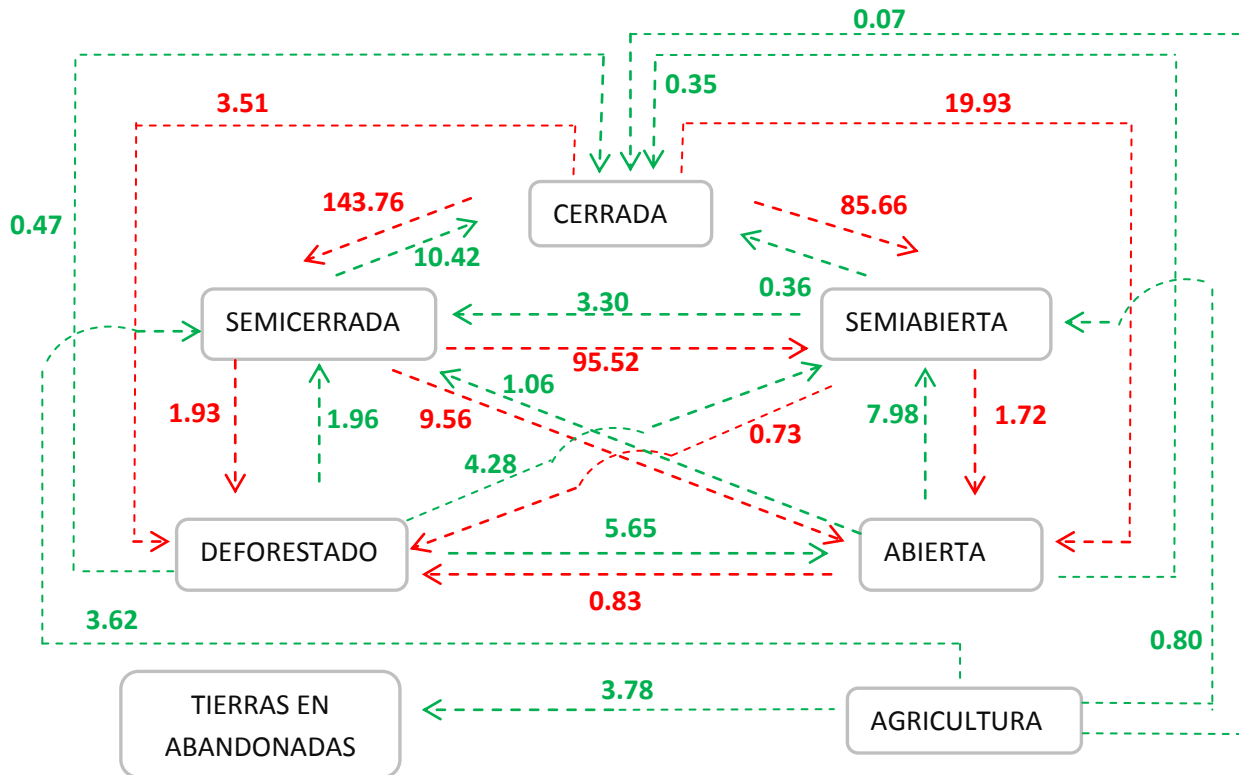


**Gráfica 1.** Cambio en la superficie de cobertura forestal y uso de suelo para el periodo 1971-2010



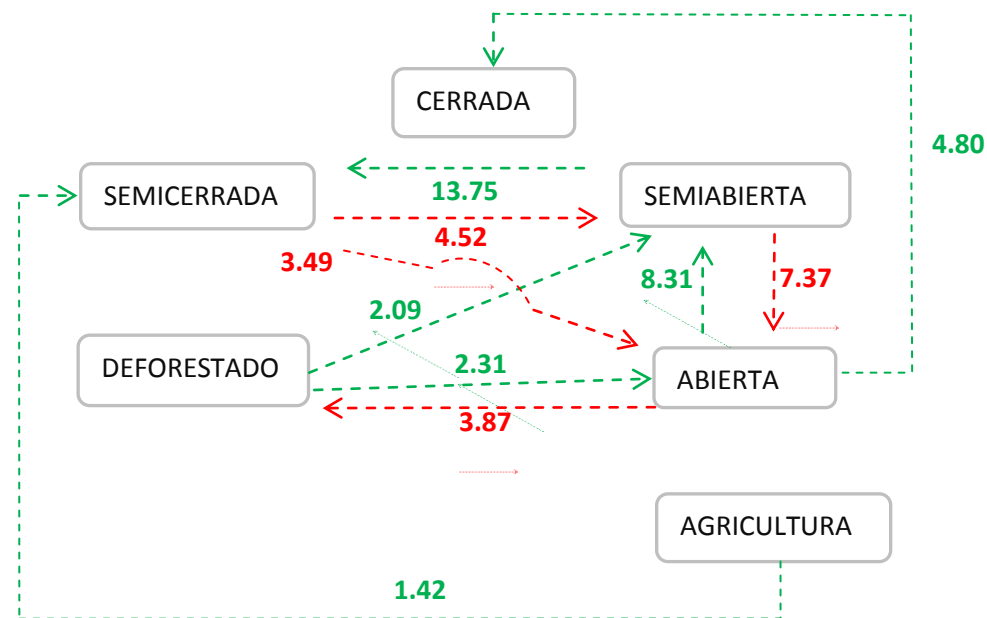
**Figura 12a.** Transiciones en hectáreas de las superficies de densidad de cobertura en el período 1971-1994. Las flechas verdes indican recuperación y las rojas pérdida en la cobertura forestal

La Figura 12a permite entender cómo fue que la vegetación cambió en el tiempo, de alguna forma se observa lo complejo de los sistemas forestales, ya que no sólo se trata de un cambio hacia otro, año con año, sino una compleja interacción de recuperaciones, pérdidas y áreas con permanencia en el sistema. Durante el período 1971-1994 las flechas verdes prevalecen ante las rojas lo que significa que este período se caracterizó en una recuperación de la cobertura vegetal principalmente de las categorías semicerradas y semiabierta pasaron a cobertura cerrada, aunado a esto un cambio igualmente importante fue que las tierras que fueron abandonadas después de haber sido utilizadas para agricultura tuvieron una importante recuperación en este período con 1.86 ha.



**Figura 12b.** Transiciones en hectáreas de las superficies de densidad de cobertura vegetal y uso de suelo durante el período 1994 -2003. Las flechas verdes indican recuperación y las rojas pérdida en la cobertura forestal

Para el período que va de 1994-2003 se puede ver en la Figura 12b, que las pérdidas son más numerosas que las ganancias en la superficies de cubierta forestal, por lo que se considerada este período como de pérdida y aunque se presentan recuperaciones, las superficies no son significativas. Las principales clases que tuvieron una pérdida fueron la cerrada con 252 ha y la semicerrada con 104 ha. Dentro de las recuperaciones se destacan la categoría semicerrada a cerrada con 10.42 ha y de agricultura a tierras abandonadas fue de 3.78 ha. Las pérdidas en las superficies para 1994-2003 se deben a disputas entre la comunidad y el ejido en cada propiedad anteriores al 2000 con el decreto de RBMM y la expansión de su superficie (López, 2011).



**Figura 12c.** Transiciones en hectáreas de las superficies de densidad de cobertura vegetal y uso de suelo durante el período 2003-2010. Las flechas verdes indican recuperación y las rojas pérdida en la cobertura forestal

Durante el período 2003-2010 se presentaron más ganancias que pérdidas en cuanto a superficie, además de esto se hay una mayor estabilidad en el sistema, posiblemente por la implementación del decreto de RBMM así como por los Pagos por servicios ecosistémicos. (López, 2011)

La cobertura cerrada resulta con una tendencia a disminuir pero quedándose estable a partir de 2003, si bien esto resulta en una pérdida de vegetación la estabilización de estos cambios podría contribuir para su nueva recuperación en años próximos. La categoría semicerrada muestra una recuperación que puede deberse a que gran parte de lo que era cerrada pasó a semicerrada o bien que las otras categorías inferiores presentaron una recuperación que las colocó ahí. La categoría semiabierta también resultó en ganancia de su cobertura para el 2003 manteniéndose de esta forma hasta el 2010, las demás clases de cobertura vegetal muestran una ligera disminución en cuanto a su superficie, con base a estas comparaciones se puede decir que el período 2003-2010 se caracterizó por importantes cambios en la cobertura cerrada y semiabierta, mientras que las otras categorías los cambios fueron menos intensos comportándose casi de manera lineal.

### 9.1.2. Cambios en la cobertura forestal durante el período 1971-2010

Con la finalidad de obtener de forma contundente cifras que permitieran llevar a cabo la evaluación de la cobertura forestal fue necesario comparar estos dos períodos (1971-2010) y aunque a lo largo de estos 39 años ocurrieron interacciones entre pérdidas y recuperaciones en términos de lo que había en 1971 y lo que hay a la fecha de 2010 se obtuvieron los siguientes resultados.

**Cuadro 9.** Evaluación de la densidad de cobertura forestal y uso de suelo en 1971 y 2010 en términos de hectáreas y porcentaje de la superficie ocupado dentro de la cuenca del río Los Yugos, RBMM

Categoría	1971 (ha)	% Cuenca	2010 (ha)	% Cuenca	Cambio (ha)	% Cuenca	Cambio anual (ha)
Cerrada	1147.35	70.96	1008.75	62.38	138.59	8.57	3.55
Semicerrada	274.00	16.94	271.43	16.79	2.57	0.16	0.06
Semiabierta	86.00	5.32	214.27	13.25	128.27	7.93	3.28
Abierta	34.12	2.11	77.46	4.79	43.35	2.68	0.06
Pastizal	1.60	0.10	1.60	0.10	0.00	0.00	0
Deforestado	20.44	1.26	24.08	1.49	3.65	0.23	0.005
Tierras en reposo	18.00	1.11	0.00	0.00	18.00	1.11	0.02
Agricultura	35.52	2.20	19.44	1.20	16.07	0.99	0.02

La cuenca del río Los Yugos Sierra Chincua se caracteriza por ser una área con una extensa superficie con un bosque denso (principalmente de Oyamel), dentro de la categoría cerrada ocupando en 1971 el 71% de la superficie de la cuenca y para 2010 con una disminución a 62 %, dentro de la región también se presentaron pérdidas en la categoría de agricultura ocupando sólo en 2010 una extensión de 19.44 ha, esto resultó en un cambio positivo ya que estas regiones ahora pueden recuperarse de forma natural para volver a formar parte de la cobertura forestal. Estas áreas son importantes para este trabajo ya que a partir de esta información los sitios de muestreo fueron ubicados y se llevó a cabo la evaluación de su contenido de carbono bajo diferentes escenarios de tiempo, otro dato importante de mencionar en esta evaluación es que el 87 % de la cobertura cerrada ha permanecido durante estos 39 años considerando a esta cuenca como de las más conservadas dentro de la RBMM y por tanto importante como sumidero de carbono.

Para el 2010 la cuenca del río Los Yugos Sierra Chincua contó con un total de 1154.02 ha de bosque de Oyamel del cual 989.12 ha se encuentran en estado conservado un 85.7% del total ocupado en esta área, con una enorme importancia ecológica para la hibernación de la mariposa monarca y el hábitat de otras especies. En cuanto al bosque de Pino representa 259 ha conservadas un 72.2 % del total ocupado por bosque de Pino, un porcentaje menor al bosque de Oyamel lo que se relaciona posiblemente a que el Oyamel se distribuye a una altitud mayor a los 2900 m y el Pino en altitudes menores lo hace más propenso a la degradación y conversión en el uso de suelo.

**Cuadro 9.1** Superficie (ha) de cobertura vegetal y densidad en la cuenca del río Los Yugos, 2010

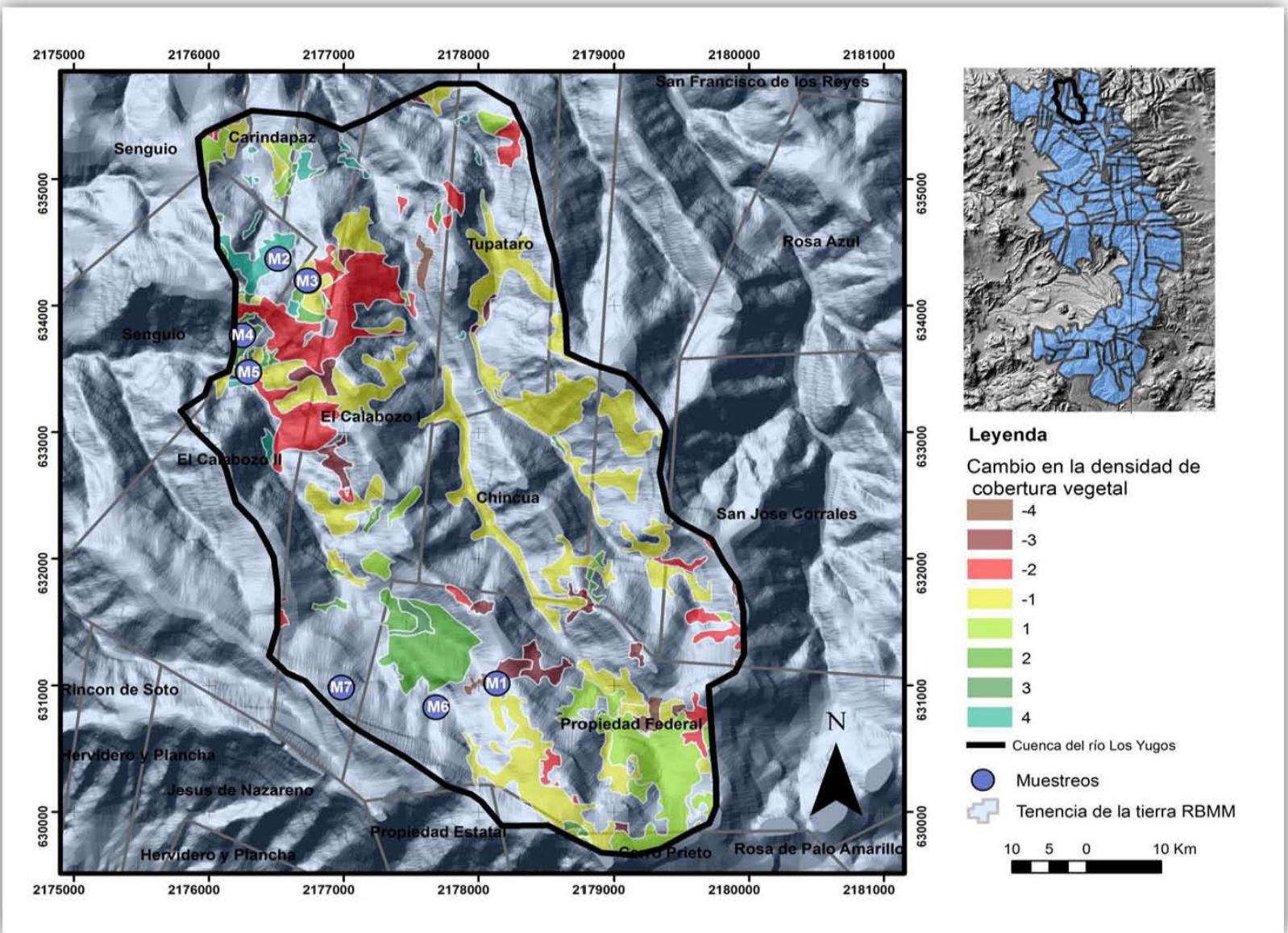
	Cerrada		Semicerrada		Semiabierta		Abierta		Total ha
	ha	%	ha	%	ha	%	ha	%	
<b>Oyamel</b>	779.06	67.50	210.06	18.20	108.70	9.41	56.20	4.86	<b>1154.02</b>
<b>Pino</b>	212.28	59.20	46.76	13.04	82.68	23.05	16.84	4.69	<b>358.56</b>
<b>Encino</b>	12.82	28.53	12.88	28.66	19.23	42.79	0.00	0	<b>44.93</b>
<b>Total ha</b>	<b>1004.16</b>		<b>269.70</b>		<b>210.61</b>		<b>73.04</b>		<b>1557.51</b>

Con base en esta información se realizó una caracterización a detalle de los acontecimientos en cuanto a la cobertura vegetal en las siete áreas de estudio a lo largo del período 1971-2010, para poder describir los procesos que pudieron estar involucrados en los almacenes de carbono y se obtuvo

**Cuadro 9.2.** Cobertura vegetal en las áreas de muestreo durante el período 1971-2010

Muestreo	CV-US	Acrónimo	Características	1971	1994	2003	2010
1	Oyamel	BA-C1	No perturbación	Cerrada	Cerrada	Cerrada	Cerrada
6	Oyamel	BA-C2	No perturbación	Cerrada	Cerrada	Cerrada	Cerrada
7	Oyamel	BA-C3	No perturbación	Cerrada	Cerrada	Cerrada	Cerrada
2	Pino Vegetación secundaria	BP-S1	Tierras abandonadas hace 55 años, anteriormente cultivo Sucesión secundaria	Tierras Abandonadas	Cerrada (Sucesión secundaria)	Cerrada	Cerrada
3	Pino	BP-C	No perturbación	Semiabierta	Semiabierta	Semiabierta	Semiabierta
4	Pino Vegetación secundaria	BP-Ref	Tierras abandonadas hace 14 años, reforestación.	Agricultura	Agricultura	Cerrada (Reforestado)	Cerrada
5	Aile Vegetación secundaria	BAil-S2	Tierras abandonadas hace 14 años sucesión secundaria	Agricultura	Agricultura	Semiabierta (Sucesión secundaria)	Semiabierta

Figura 13. Áreas de cambios multitemporales 1971- 2010 y ubicación de los sitios de muestreo, cuenca del río Los Yugos



## 9.2 Biomasa aérea

Los bosques de Oyamel además de contribuir en la regulación del microclima para el establecimiento de las colonias de mariposas monarcas durante el invierno, favorece la incorporación del carbono orgánico a su biomasa a través de la fotosíntesis, reduciendo de esta manera las concentraciones de CO<sub>2</sub> atmosférico. El carbono total almacenado en la biomasa aérea para las diferentes coberturas vegetales dentro de la cuenca del río Los Yugos es de 190,933 Mg de carbono para el bosque de Oyamel varia de 252.1 a 156.4 Mg/ha, con un promedio de 193.3 Mg/ha. Presentando diferentes densidades de arbolado 300 a 400 por hectárea, con diámetros mayores de 15 a 95 cm, encontrando una relación directa entre el número de árboles por hectárea y el carbono almacenado en su biomasa aérea.

El bosque de Pino conservado presento 115.2 Mg/ha, con una densidad de arbolado baja, pero con diámetros grandes mayores a los 75 cm hasta 120 cm. El bosque de Pino reforestado de 14 años se presentó una acumulación en de 177.9 Mg/ha, mientras que el bosque de Aile de la misma edad tiene 37.6 Mg/ha, pero bajo un proceso sucesión natural. Esta diferencia se debe a una alta concentración de individuos de 980 árboles/ha del bosque de Pino con reforestación y un manejo forestal, mientras que el bosque de Aile ostenta 620 árboles/ha mediante un proceso sucesional, diferenciándose por el tipo de crecimiento y la densidad del arbolado.

**Cuadro 14.** Información estructural y desarrollo del bosque en los diferentes muestreos dentro de la cuenca del río Los Yugos

Muestreo	Altura (m)	Densidad (árboles/ha)	Área Basal m <sup>2</sup>	Carbono en Biomasa (Mg/ha)
BA-C1	33.78±5	400	13.6±6	170.6
BA-C2	32.43±3	340	13.3±5	156.4
BA-C3	21.02±4	300	22.6±19	252.1
BP-S1	33.28±5	420	13.5±5	161.9
BP-C	39.06±6	50	53.7±35	115.2
BP-Ref	14.74±4	980	5.7±4	177.9
BAil-S2	14.72±8	620	3.6±4	37.6



### 9.3. Frecuencias diamétricas (árboles /ha) presentes en las coberturas vegetales

La distribución en los diámetros a la altura de pecho (DAP) manifiesta información acerca del desarrollo y estado actual del bosque bajo los distintos escenarios de cobertura vegetal como; la densidad de los árboles y la frecuencia con la que los diferentes diámetros se distribuyen por hectárea en cada cobertura. Para el bosque de Oyamel sus DAP se distribuyen hasta los 95 cm, es decir árboles gruesos pero también que comparten la superficie con arboles con DAP de 15 cm lo que nos indica que no hay árboles con diámetros pequeños en estas regiones.

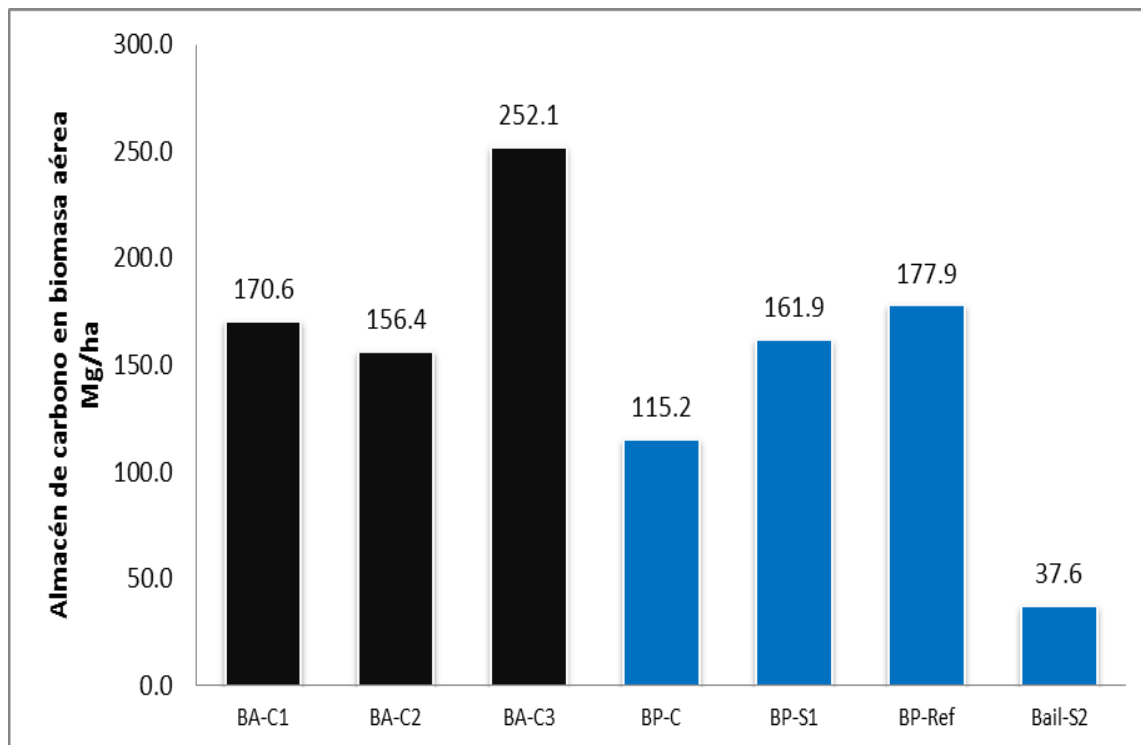
En el bosque de Pino conservado (BP-C ) son pocas las categorías de los DAP que se encuentran, que va de los 40 a los 120 cm que fue la cobertura vegetal en donde se encontró arboles con diámetro mayor, mientras que en el BP-Ref se halló la mayor densidad de árboles por hectárea sin embargo, sus diámetros fueron menores a 45 cm, con lo que respecta al BP-S1 los árboles encontrados superan en todos los casos 20 cm hasta los 65 cm y por último encontramos al BAil-S2 con árboles distribuidos con DA desde 5cm hasta 55 cm.

**Cuadro 15.** Frecuencia diamétrica ajustada (árboles/ha) para las diferentes CV. BA-C bosque de Oyamel conservado, BP-C bosque de Pino conservado, BP-S1 bosque de Pino (tierras abandonadas hace 55 años, sucesión secundaria), BAil-S2 bosque de Aile (tierras abandonadas hace 14 años, sucesión secundaria) y BP-Ref bosque de Pino (tierras abandonadas hace 14 años, reforestación)

DA ajustado	BA-C1	BA-C2	BA-C3	BP-C	BP-S1	BP-Ref	BAil-S2
5						40	20
10						70	170
15			10			100	130
20	20		40		10	240	80
25	20		10		50	100	100
30	20	40	20		40	210	70
35	110	90	20		50	110	20
40	60	140	30	10	90	70	10
45	80	40	10		100	40	10
50	50		30		20		
55	10	10	40		30		10
60	20		10		10		
65	10	20	10		20		
70			10				
75			10	10			
80			20	10			
85			10	10			
90			10				
95			10				
120				10			
$\Sigma$	400	340	300	50	420	980	620

#### 9.4 Almacén de carbono en la biomasa aérea

El almacén de carbono en la biomasa aérea para las diferentes clases de cobertura vegetal presentaron diferencias significativa entre los mismos tipos de cobertura lo que no ocurrió con el COS; el BA-C la diferencia fue significativa con ( $F=7.71$  y  $p\leq 0.05$ ), de igual forma al comparar BP-C con el BP-S1 la diferencia fue significativa ( $F=79.73$  y  $p\leq 0.05$ ), el BP-C también tiene diferencias significativas al compararlo con BP-Ref, BAil-S2 con un ( $p\leq 0.05$  y  $F=131.61$ ) y ( $p\leq 0.05$  y  $F=211.46$ ) respectivamente, al comparar BP-S1 y BP-Ref tienen significancia ( $p\leq 0.05$  y  $F=12.16$ ), para el bosque de Ail-S2 también las diferencias fueron significativas al compararlo con BP-S1 ( $p\leq 0.05$  y  $F=93.04$ ) y BP-Ref ( $F=12.84$  y  $p\leq 0.05$ ), lo que nos indica que en términos de almacenamiento de carbono en biomasa aérea las categorías de cobertura vegetal son más heterogéneas que en COS y aunque para el BA-C el valor de F crítico cercano al F calculado se presentó esta diferencia significativa.



**Gráfica 2.** Almacén de carbono en la biomasa aérea total en las coberturas vegetales de la cuenca del río Los Yugos, RBMM

**Cuadro 16.** Almacén de carbono biomasa aérea por árbol (Mg/ha) bajo diferentes coberturas vegetales en la cuenca del río Los Yugos, RBMM

Cobertura vegetal	Carbono Biomasa aérea (Ton/árbol)
<b>Bosque de Oyamel conservado (BA-C1)</b>	
<b>Promedio ± Desviación estándar</b>	4.26±2
<b>Coefficiente de variación</b>	61.7
<b>Bosque de Oyamel conservado (BA-C2)</b>	
<b>Promedio ± Desviación estándar</b>	4.11±2
<b>Coefficiente de variación</b>	48.63
<b>Bosque de Oyamel conservado (BA-C3)</b>	
<b>Promedio ± Desviación estándar</b>	8.40±9
<b>Coefficiente de variación</b>	103.56
<b>Bosque de Pino conservado (BP-C)</b>	
<b>Promedio ± Desviación estándar</b>	23.04±13
<b>Coefficiente de variación</b>	56.46
<b>Bosque de Pino reforestación natural (BP-S1)</b>	
<b>Promedio ± Desviación estándar</b>	2.47±2
<b>Coefficiente de variación</b>	64.1
<b>Bosque de Aile reforestación natural (BAil-S2)</b>	
<b>Promedio ± Desviación estándar</b>	0.60±0.07
<b>Coefficiente de variación</b>	131.37
<b>Bosque de Pino reforestación (BP-Ref)</b>	
<b>Promedio ± Desviación estándar</b>	2±3
<b>Coefficiente de variación</b>	149.43

### 9.5. Carbono orgánico del suelo (COS)

El carbono orgánico en el suelo en los bosques conservados de Oyamel (85.71 % de la superficie de Oyamel dentro de la cuenca) tiene un rango de variación de 199 a 330 Mg/ha, lo que representa una acumulación aproximada de 265744.63 Ton en la cuenca del río Los Yugos Sierra Chincua. Esto hace evidente la importancia de la conservación de estos bosques de oyamel como sumideros de carbono orgánico, su participación en los ciclos bioenergéticos, en la recarga de acuíferos y en el establecimiento de las colonias de mariposas monarca, lo que coadyuva a reducir los efectos de cambio climático.

Los bosques de Pino conservado tienen una retención de COS de 364.4 Mg/ha y comparado con bosque de Pino en recuperación, se tiene que bosques con 55 años de sucesión vegetal tienen 302 Mg/ha de COS y un bosque con 14 años de reforestación sólo ha almacenado 57.7 Mg/ha. Este último cotejado con un bosque de la misma edad en recuperación natural con Aile ostenta un COS de 259.2 Mg/ha.

### 9.6. Carbono edáfico almacenado en cada clase de cobertura vegetal

Al comparar los sitios de bosque de Oyamel no se encontró diferencia significativa en la estimación de carbono del suelo en ninguna profundidad con un  $p > 0.05$ . La mayor acumulación de COS a 0-10 cm de profundidad fue en el BA-C1, con un promedio de  $91 \pm 17$  Mg/ha BA-C. La profundidad con mayor acumulación de COS fue de 0-30cm, representando éste el almacén de carbono más importante para los muestreos en el bosque de Oyamel. Con lo que respecta a la tercer profundidad  $>30$  cm, fue el menor almacén con un promedio de 24.3 Mg/ha.

**Cuadro 10.** Almacén de carbono (Mg/ha) en el bosque de Oyamel en la cuenca del río Los Yugos, RBMM

Cobertura vegetal	COS <sub>0-10cc</sub>	COS <sub>0-30cm</sub>
<b>Bosque de Oyamel conservado (BA-C1)</b>		
<b>Promedio ± Desviación estándar</b>	91±17	254±37
<b>Coefficiente de variación</b>	18.3	14.5
<b>Bosque de Oyamel conservado (BA-C2)</b>		
<b>Promedio ± Desviación estándar</b>	78±15	203±53
<b>Coefficiente de variación</b>	19.8	25.9
<b>Bosque de Oyamel conservado (BA-C3)</b>		
<b>Promedio ± Desviación estándar</b>	65±7	181±45
<b>Coefficiente de variación</b>	10.4	24.6

En el bosque de Pino en donde se llevó a cabo una evaluación del COS de sitios con diferentes edades de recuperación; 55 años (BP-S1), 14 años (BAil-S2), 14 años de reforestación (BP-Ref) y se compararon con un bosque de Pino conservado (BP-C). A una profundidad de 0-10 cm se obtuvo una diferencia significativa en la acumulación de carbono entre BP-C y BP-S1 (con un  $F=18.01$  y  $p \leq 0.05$ ), por otro lado comparando el BP-C y de BAil-S2 no se encontró una diferencia en el almacén de carbono significativa ( $F=0.001$  y  $p \leq 0.05$ ). Mientras que al cotejar el carbono almacenado en el BAil-S2 y el BP-Ref se obtuvo que si existe una diferencia significativa ( $F= 23.33$  y  $p \leq 0.05$ ) a pesar de tener la misma edad. Para el BP-C y el BP-Ref, también se encontró que existe una diferencia significativa ( $F=14$  y  $p \leq 0.05$ ). En las clases de cobertura vegetal evaluados de Pino se puede observar que el almacén de 0-10 cm fue muy importante para el caso del BP-Ref represento el 60.72% del total almacenado.

En la profundidad de 0-30 cm las principales diferencias se encontraron entre las coberturas BP-S1 y el BP-C si se obtuvo una diferencia significativa ( $F=98.87$  y  $p \leq 0.05$ ) de igual manera existe una diferencia significativa en BP-Ref y BP-C ( $F=37.90$  y  $p \leq 0.05$ ) mientras que el BP-Ref y BP-S1 no presentó una diferencia significativa. Entre el BAil-S2 y BP-Ref si se presento diferencia significativa ( $F= 11.80$  y  $p \leq 0.05$ ) y para la categoría BAil-S2 y BP-C no se presento una diferencia significativa de COS a esta profundidad. Esta profundidad también resultó el almacén con mayor carbono orgánico del suelo para el bosque de Pino, en los diferentes escenarios de recuperación y en el bosque conservado.

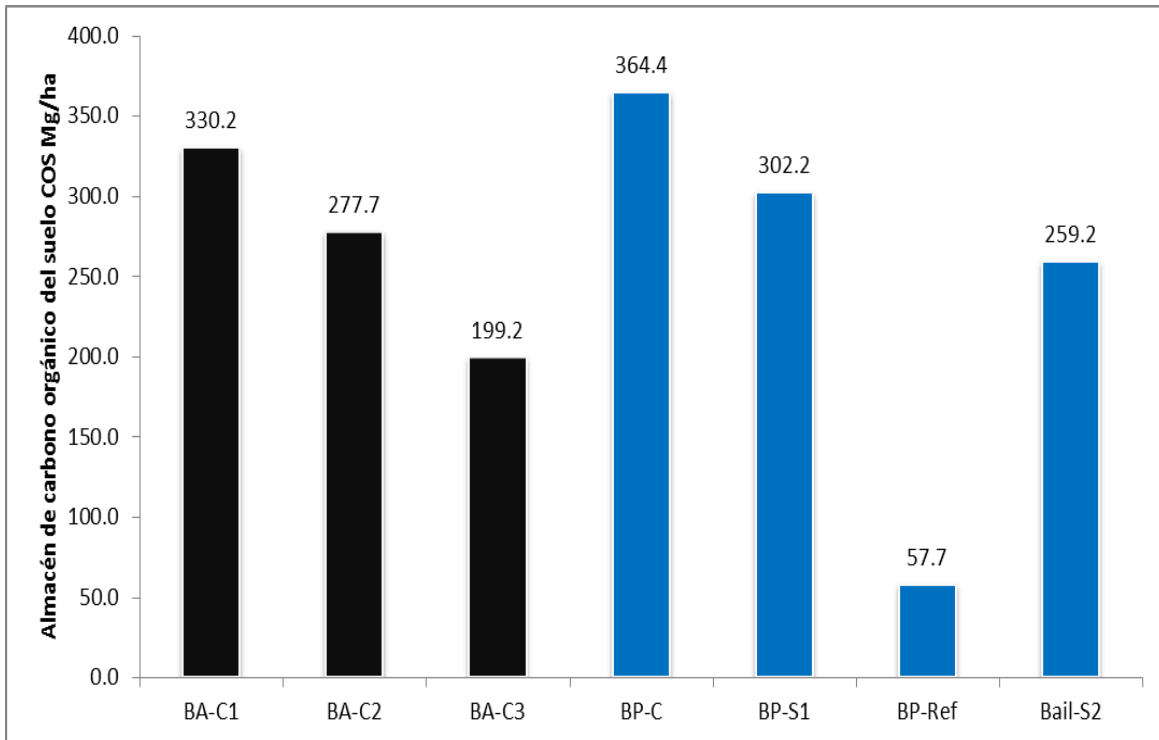
Los valores más altos de COS de 0- 30 cm fueron en BAil-S1 con 240.69 Mg/ha superando al BP-C con un almacén promedio de 230.66 Mg/ha, el último lugar fue ocupado por el BP-Ref con sólo una acumulación de 55 Mg/ha. **(Cuadro 10.1)**

**Cuadro 10.1.** Almacén de carbono (Mg/ha) bajo diferentes coberturas vegetales en la cuenca del río Los Yugos, RBMM. La relación entre las letras representa que hubo una diferencia significativa.

Cobertura vegetal	COS <sub>0-10cm</sub>	COS <sub>0-30cm</sub>
<b>Bosque de Pino conservado (BP-C)</b>		
<b>Promedio ± Desviación estándar</b>	83±17 A	231±14 A
<b>Coefficiente de variación</b>	20.4	6.2
<b>Bosque de Pino sucesión secundaria (BP-S1)</b>		
<b>Promedio ± Desviación estándar</b>	41±10 A	138±12
<b>Coefficiente de variación</b>	24.3	AB 8.7
<b>Bosque de Pino reforestación (BP-Ref)</b>		
<b>Promedio ± Desviación estándar</b>	35±13 AC	53±38 AC
<b>Coefficiente de variación</b>	38.4	36.5
<b>Bosque de Aile sucesión secundaria (BAil-S2)</b>		
<b>Promedio ± Desviación estándar</b>	83±22A C	240±69CB
<b>Coefficiente de variación</b>	26.6	28.5

En la tercer profundidad >30 cm se obtuvo una almacén de carbono edáfico que va de los 44±1 para BP-Ref y 59±11 en BAil-S2. Hay diferencias significativas al comparar al BP-C con BAil-S2 y BP-Ref a esta profundidad.

El carbono acumulado en todo el perfil se presentó de la siguiente manera en primer lugar se encontró al BP-C con un total de 364 Mg/ha mientras que por otro lado el BP-Ref con 57.7 Mg/ha hay una importante reducción del almacén de 306.7 Mg/ha. El BA-C también presentó valores altos que van de los 199.2 a los 330 Mg/ha.



**Gráfica 3.** Almacén de carbono edáfico (COS) total bajo las diferentes coberturas vegetales en la cuenca de Sierra Chincua, RBMM. BA-C bosque de Oyamel conservado, BP-C bosque de Pino conservado, BP-S1 bosque de Pino (tierras abandonadas hace 55 años, sucesión secundaria), BAil-S2 bosque de Aile (tierras abandonadas hace 14 años, sucesión secundaria) y BP-Ref bosque de Pino (tierras abandonadas hace 14 años, reforestación)

## 9.7. Propiedades físicas y químicas del suelo para los sitios de muestreo

### 9.7.1 Bosque de Oyamel

Los sitios de muestreo para el bosque de Oyamel se caracterizaron por ser suelos derivados de rocas volcánicas (Andosoles) con horizontes A/C, poco profundos (< 80 cm), con pH ácido de 6.3 a 5.5, asociado a los altos valores en la precipitación anual, materiales parentales de origen ácido (andesitas, material de bajo orden estructural) y las altas concentraciones de materia orgánica (MO) que ocasionan un aumento en concentración de ácidos orgánicos provenientes de actividad biológica (exudados de raíces). Las clases texturales predominantes son la Limosa y Franco Limosa con concentraciones altas de Arcillas + Limos del 91% al 64% en los diferentes horizontes. La humedad aprovechable evaluada a lo largo del perfil en el bosque de Oyamel obtuvo un valor máximo de 128 % ubicado en el horizonte A1. La Densidad aparente estuvo en los rangos para los Andosoles <1 gcc<sup>-1</sup>.

Dentro de las propiedades evaluadas para el bosque de Oyamel se encuentran una importante concentración de MO 27.8% considerándose en el rango muy alta según [Renger \(1987\)](#). También para esta propiedad se obtuvieron los datos de la razón de estratificación de la MOS, los valores obtenidos en los sitios con BA-C fueron de 2.9 a 2.7, como [Franzluebber \(2001\)](#) hace mención mientras mayor es el valor  $RE_{MOS}$  mayor es la calidad del suelo.

**Cuadro 11.** Razones de estratificación de la MOS para bosque de Oyamel

Muestreo	Razones de estratificación
BA-C1	2.7
BA-C2	2.9
BA-C3	2.6



El Nitrógeno evaluado para estos sitios esta varía de 0.5 a 1.6 %. La relación C/N es uno de los principales indicadores de la actividad biológica y es un indicador de la fertilidad de éstos, el valor más alto se encontró en BA-C2 con 30.6 mientras y el mínimo fue de 10.3 en BA-C1. La CIC tomo los valores más altos en BA-C3 con 175 cmol/kg en los niveles superficiales del perfil.

Con los resultados obtenidos correspondientes a las propiedades físicas y químicas edáficas se llevó a cabo una comparación a los primeros 30 cm de profundidad para los sitios de estudio con bosque de Oyamel, sin embargo no se obtuvieron diferencias importantes para ninguna propiedad en los diferentes sitios de muestreo.

**Cuadro 12.** Análisis de los parámetros edáficos a una profundidad de 30 cm.  
En el caso de los porcentajes arenas, arcillas, limos se utilizo en A1 para la comparación

Parámetros		BA-C1	BA-C2	BA-C3
químicos	pH	6.00	6.00	5.70
	Nitrógeno %	1.50	0.91	1.63
	C/N	28.71	44.35	30.14
	CIC cmol/kg	342.70	161.69	217.19
	MO%	45.14	38.38	43.14
físicos	Densidad	0.79	0.79	0.69
	Humedad a capacidad de campo %	297.66	299.92	247.19
	Humedad Higroscópica %	35.36	36.60	36.27
	Humedad capilar %	262.30	263.32	210.92
	Humedad a punto de marchitez %	51.99	53.83	53.34
	Arenas %	17.39	8.769	16.853
	Limos %	80.83	88.50	80.83
	Arcillas %	1.78	2.73	2.3212

### 9.7.2 Bosque de Pino

Los bosques de Pino evaluados presentan suelos tipo Andosol con poco desarrollo, asociados a materiales rocosos en las laderas moderadamente inclinadas, con horizontes AC, con colores de marrones oscuros a pardos amarillentos relacionados al contenido de MO. Los sitios de muestreo presentan valores de pH ácidos de 4.8 a 6.1. La humedad aprovechable tuvo resultados altos hasta de 161 %. Para la densidad aparente (DA) con los valores entre 0.3 a 0.9 g cc<sup>-1</sup>. El contenido de materia orgánica se concentró en los 24 y 2% a lo largo de los perfiles. Con lo que respecta al nitrógeno los valores estuvieron representados en el rango 0.7% y 0.3 %, de esta manera la relación C/N más alta fue de 19.8 y la menor de 5.4. Con una capacidad de intercambio catiónico que se obtuvo más alta fue de 90 cmol/kg.

La comparación entre las diferentes propiedades edáficas en los bosques de Pino se realizó a 30 cm con el sustento por el IPCC (2007) donde se estipula que es ésta la profundidad en donde se observan los cambios una vez que se realizó un uso agrícola o de cambio de uso de suelo.

**Cuadro 13.** Razones de estratificación de la MOS para bosque de Pino

Muestreo	Razones de estratificación
BP-C	2.0
BP-S1	1.3
BP-Ref	1.3
BAil-S2	1.6

Como se puede ver en la Cuadro 13 el BP- C obtuvo los valores más altos en cuanto a la MO %, Nitrógeno total %, CIC cmol/kg, Humedad a capacidad de campo (Hcc) y Humedad aprovechable, con respecto a los otros sitios de muestreo, así como la razón de estratificación. En segundo lugar se encontró BP-S1 para estas propiedades a excepción del Nitrógeno que fue más alto en BAil-S2. Los resultados con valores menores para dichas propiedades se obtuvieron en BP-Ref.

Los datos de las diferentes propiedades físicas y químicas del suelo como ya se mencionó fueron comparados a la profundidad de 30 cm, con la finalidad de evidenciar las características en cada sitio en recuperación y compararlas con el bosque de Pino conservado. Obteniendo entonces las principales diferencias el BP-C y BP-S1 para Nitrógeno y CIC. Por otro lado también se obtuvieron diferencias BP-C y BP-Ref para el Nitrógeno, CIC, C/N, MO, Hcc, Humedad higroscópica, Humedad a punto de marchitez considerando a este grupo de comparación con las mayores diferencias. Por último entre BP-C y BAil-S2 hubo diferencias al evaluar la MO, Humedad cc.

**Cuadro 14.** Análisis de los parámetros edáficos a una profundidad de 30 cm. En el caso de los porcentajes arenas, arcillas, limos se utilizó en A1 para la comparación. BP-S1 bosque de Pino (tierras abandonadas hace 55 años, reforestación natural), BP-C bosque de Pino conservado, BAil-S2 bosque de Aile (tierras abandonadas hace 14 años, reforestación natural) y BP-Ref bosque de Pino (tierras abandonadas hace 14 años). La relación indica una diferencia significativa

	<b>Parámetros</b>	<b>BP-S1</b>	<b>BP-C</b>	<b>BP-Ref</b>	<b>BAil-S2</b>
<b>químicos</b>	pH	5.37	6.13	6.00	5.95
	Nitrógeno %	1.05A	1.52AC	0.70C	1.50
	C/N	28.96	34.78C	11.45C	17.51
	CIC Cmol/kg	177.97A	267.08ACD	172.89C	136.03D
	MO%	33.95	53.84C	8.36CD	23.03D
<b>físicos</b>	Densidad	0.68	0.75BD	0.97BD	0.89D
	Humedad a capacidad de campo %	331.98D	302.86B	167.25BD	161.71D
	Humedad Higroscópica %	34.05	39.44B	24.36BD	23.38D
	Humedad capilar	297.92	263.42B	142.89BD	138.34D
	Humedad a punto de marchitez %	50.08	58.01B	35.83BD	34.38D
	Arenas %	10.27	11.394	17.053	18.42
	Limos %	87.97	86.72	80.63	80.23
	Arcillas %	1.76	1.89	2.32	1.35

### 9.8. Carbono orgánico del suelo (COS) y propiedades físicas y químicas del suelo

Las variables físicas y químicas edáficas se ven relacionadas con el contenido de COS y son un indicativo de la fertilidad de los suelos. Las características fisicoquímicas fueron evaluadas en relación con el COS a través del coeficiente de correlación de Person con un  $p < 0.05$ , los datos fueron agrupados por tipo de vegetación; bosque de Oyamel y bosque Pino para su análisis.

Para el caso del bosque de Oyamel (BA) se encontró una correlación muy buena y positiva entre el Carbono% y Humedad capilar %, Humedad a de punto de marchitez % y Humedad a capacidad de campo (Hcc) con un valor  $r = 0.87$ , la densidad aparente se relaciona también positivamente con este obteniendo una correlación muy buena  $r = -0.85$  así como para la Profundidad cm  $r = -0.80$ , también se encontró una correlación buena con la concentración de Nitrógeno %  $r = 0.72$ , el valor más bajo de correlación fue con % Arcillas.

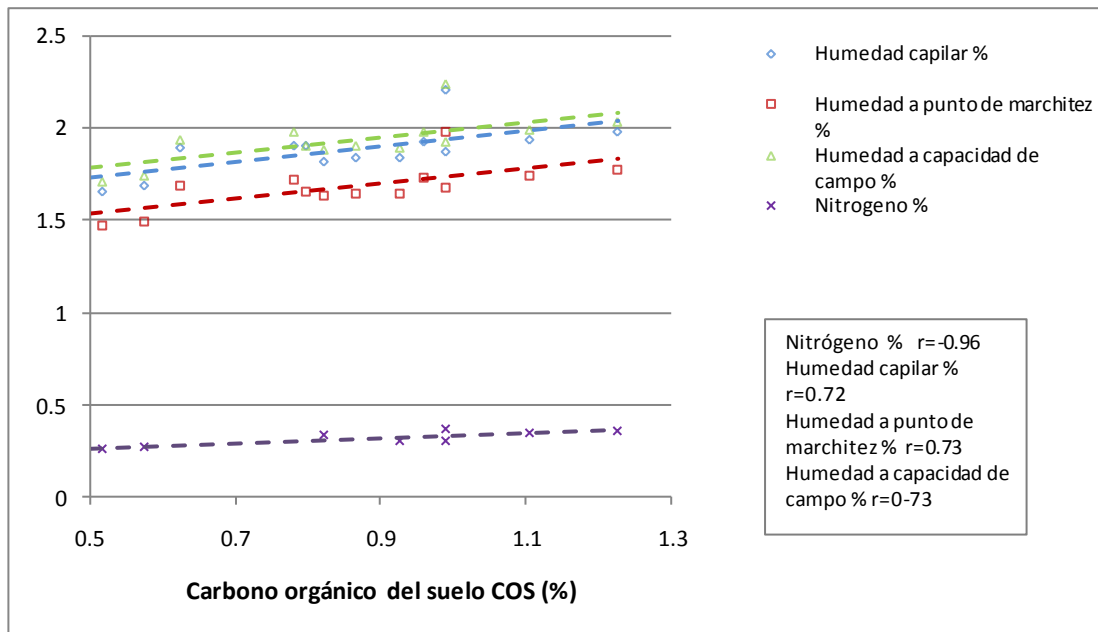
**Cuadro 15.** Coeficientes de correlación entre Carbono orgánico del suelo y propiedades fisicoquímicas edáficas en bosque de Oyamel. Datos previamente estandarizados (LOG 10)

	Carbono %
Humedad a capacidad de campo %	0.87
Humedad higroscópica %	0.58
Humedad capilar %	0.87
Humedad a punto de marchitez %	0.58
% Arenas	-0.60
% Limos	0.57
% Arcillas	0.43
Densidad g/cm <sup>3</sup>	-0.86
Profundidad cm	-0.80
pH	-0.55
Nitrógeno %	0.73
CIC cmol/kg	0.52

Las propiedades fisicoquímicas en el suelo bajo la cobertura de bosque de Pino (BP) que presentaron una correlación alta con el COS fueron menos que para el BA, con un coeficiente de correlación positiva para Nitrógeno %  $r = 0.96$  y la Humedad capilar, Humedad a capacidad de campo  $r = 0.73$ . No se presentaron correlaciones negativas altas.

**Cuadro 16.** Coeficientes de correlación entre Carbono orgánico del suelo y propiedades fisicoquímicas edáficas en bosque de Pino. Datos previamente estandarizados (LOG 10)

	<i>Carbono %</i>
Humedad a capacidad de campo %	0.91
Humedad higroscópica %	0.68
Humedad capilar %	0.93
Humedad a punto de marchitez %	0.68
% Arenas	0.28
% Limos	0.00
% Arcillas	-0.58
Densidad g/cm3	-0.97
Profundidad cm	-0.28
pH	0.70
Nitrógeno %	0.99
CIC cmol/kg	0.88

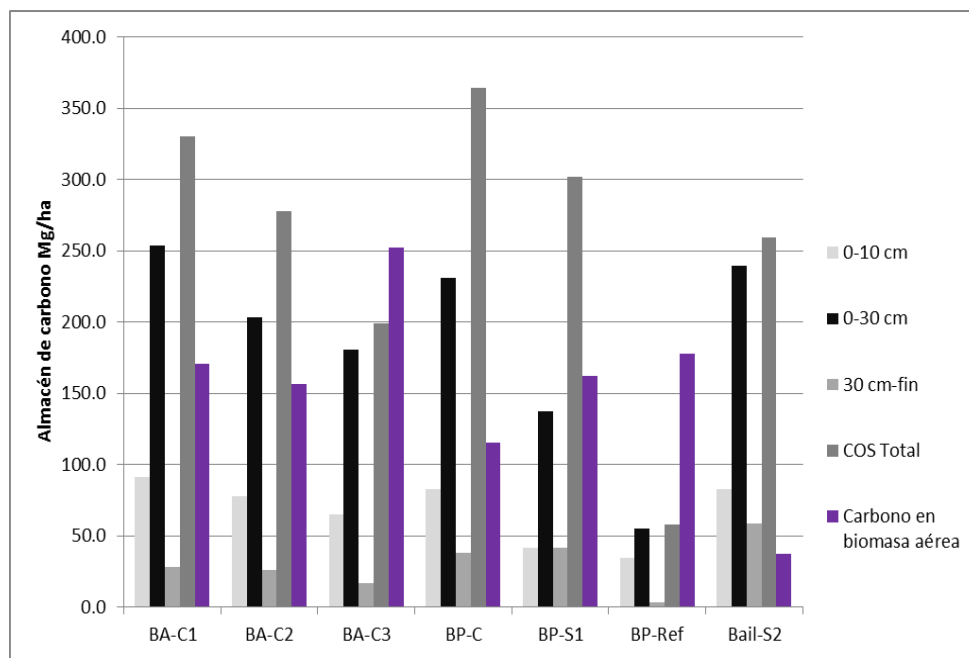


**Gráfica 4.** Correlación entre Carbono orgánico del suelo COS, Nitrógeno y Humedad

### 9.9. Relación entre el carbono orgánico del suelo COS y carbono en la biomasa aérea en las diferentes coberturas vegetales

Las diferentes coberturas vegetales presentaron heterogeneidad en la distribución del carbono almacenado, al comparar la parte aérea y la edáfica, se encontró para el BA-C como almacén principal el COS, en los primeros 30 cm de profundidad, sin embargo este suceso sólo se presentó en dos sitios y en el tercer muestreo con BA-C3 el contenido de carbono en la biomasa aérea fue mayor al almacén edáfico.

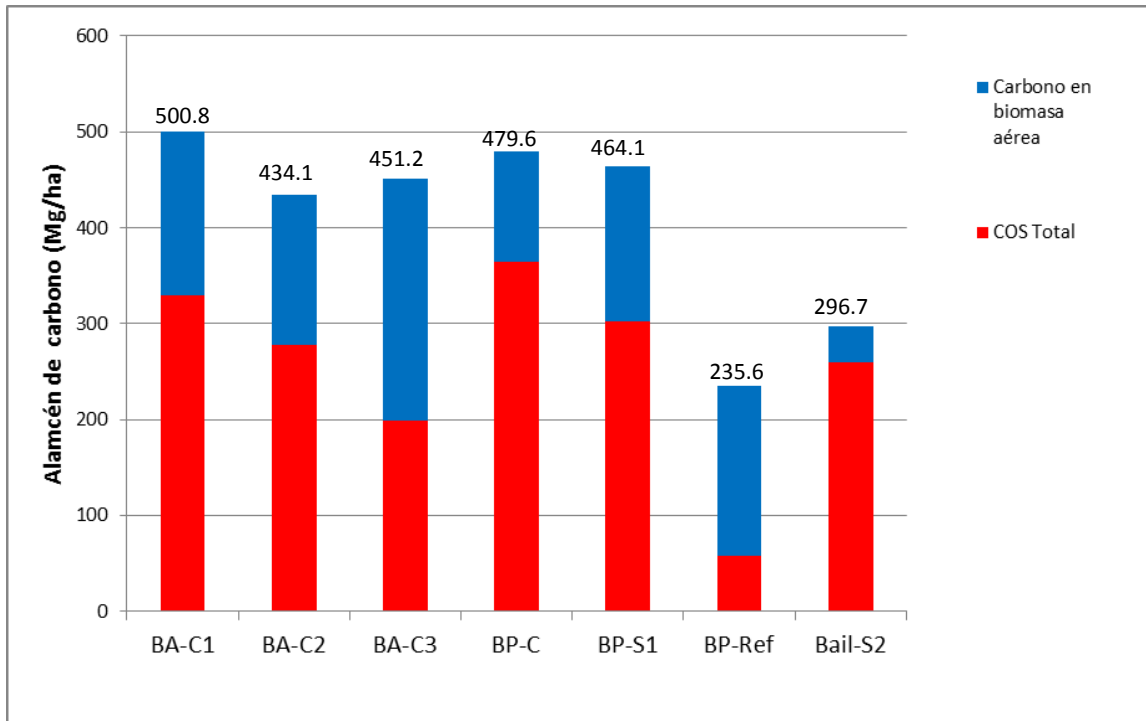
Para el bosque de Pino se obtuvo en los diferentes escenarios por un lado BP-C el carbono edáfico superó el almacén del carbono en la Biomasa aérea y de igual forma los primeros 30 cm representaron un almacén muy importante, con lo que respecta el BP-S1 también se presentó este comportamiento, sin embargo a los primeros 10 cm de profundidad se observa poca acumulación de COS comparándolo con BP-C, en el BP-Ref el almacén edáfico fue bajo comparándolo con BP-C por lo contrario a la biomasa aérea que fue la más alta para el caso de bosque de Pino , sin embargo el almacén edáfico >30cm es muy baja. Para el BAil-S2 el COS fue mayor el almacenado en la parte de la biomasa aérea por 216 Mg/ha. (Gráfica 6)



**Gráfica 6.** Relación entre el COS a diferentes profundidades y el carbono en la biomasa aérea para las coberturas vegetales en la cuenca del río Los Yugos, RBMM. BA-C bosque de Oyamel conservado, BP-C bosque de Pino conservado, BP-S1 bosque de Pino (tierras abandonadas hace 55 años, sucesión secundaria), BAil-S2 bosque de Aile (tierras abandonadas hace 14 años, sucesión secundaria) y BP-Ref bosque de Pino (tierras abandonadas hace 14 años, reforestación)

### 9.10. Capital total de carbono (COS y carbono en la biomasa aérea)

Los almacenes totales de carbono considerando el COS y el carbono en la biomasa aérea más alta fue en el BA-C hasta un total de 500 Ton/ ha, siguiéndole el BP-C con 464 Mg/ha, el almacén total menor fue en BP-Ref sin embargo también fue considerable con 235.6 Mg/ha.



**Cuadro 7.** Almacén total de COS y carbono en la biomasa aérea en la cuenca del río Los Yugos, RBMM

El bosque de Oyamel presento en promedio un capital de carbono de 269 Mg/ha con una desviación estándar menor a la del bosque de Pino el cual presento en promedio 241 Mg/ha (Cuadro 17) con una desviación alta relacionada con la perturbación de este ecosistema así como los múltiples escenarios de desarrollo que fueron considerados, resaltando la importancia de un estudio de uso de suelo para evidenciar las condiciones del lugar antes de realizar alguna estimación de almacenes de carbono.

**Cuadro 17.** Capital de carbono total por tipo de vegetación en la cuenca del río Los Yugos

	COS Mg/ha	Carbono en la Biomasa aérea Mg/ha
<b>Bosque Oyamel</b>	269.0 ±65	193 ±51
<b>Bosque de Pino</b>	241.4±162	151.6 ±32

## X. Discusión

### 10.1. Almacén de carbono en el Bosque de Oyamel

La conservación del bosque de Oyamel no sólo ha representado un hábitat natural para la Mariposa Monarca (*Danaus plexippus*), sino que además ha contribuido en la dinámica del propio ecosistema, a partir del hecho que los bosques de Oyamel se encuentra distribuidos en altitudes superiores de 2900 metros donde el establecimiento de la agricultura no es muy común, lo que ha contribuido a que el bosque permanezca conservado en la mayoría de las superficies ocupadas por este tipo de vegetación en la cuenca en estudio, favoreciendo de esta manera el almacenaje de carbono orgánico. Para los 3 sitios evaluados con bosque de Oyamel; se encontró una acumulación de carbono orgánico del suelo (COS) en promedio para la profundidad de 0-10 cm de  $78 \pm 13$  Mg/ha, (sin considerar el mantillo y el musgo presente en la zona) y de 0 a los 30 cm presentó  $212 \pm 37$  Mg/ha siendo ésta la profundidad con mayor almacén de carbono orgánico, ya que el desarrollo del perfil es incipiente con una secuencia de horizonte A/C, lo que determina que el grado de evolución del suelo se debe a la presencia del bosque de oyamel y su permanencia garantiza un almacén de carbono orgánico total promedio de  $264 \pm 65$  Mg/ha.

La comparación de los resultados obtenidos resulta difícil, ya que las metodologías empleadas son diversas para su evaluación, además de que son pocas las referencias de trabajos que reporten COS almacenado en bosque de *Abies religiosa* para México; por lo cual este trabajo hace un aporte al conocimiento de los sumideros de carbono y su relación con la biomasa de los bosques de coníferas, con respecto a la Reserva de la Biosfera Mariposa Monarca es la primer estimación de almacén bajo bosque de Oyamel. Entre los autores que evalúan bosque de coníferas se encuentra [Cruz \(2011\)](#) quien realizó una evaluación a 20 cm de profundidad en diferentes áreas naturales protegidas en México, obteniendo en promedio 105 Mg/ha en Sierra Mil Cumbres, otro trabajo sobre COS en bosque de Oyamel fue el de [Vela et al., \(2012\)](#) su estimación se realizo a 30 cm en el Distrito Federal, obtuvo 145 Mg/ha. En este sentido los datos reportados por estos autores fueron menores a los obtenidos en este trabajo, en el primer caso la diferencia pudo deberse a que el autor no menciona las condiciones fisiográficas particulares donde realizaron los muestreos aunado a que sus muestreos se localizan fuera de la reserva, para el segundo estudio ésta diferencia debió estar relacionada a que no se trata de una Área Natural Protegida, por lo tanto, las prácticas y manejo del bosque no están restringidas, además de esto se realizó una generalización de la diversidad del uso de suelo y cobertura vegetal, entonces los valores que se presentaron fueron estimativos.



La evaluación del carbono en la biomasa aérea en los tres muestreos de este bosque, fue en promedio  $193 \pm 51$  Mg/ha (considerando las ecuaciones alométricas). Sin embargo la distribución tanto del carbono almacenado en el suelo como en la parte aérea fue igual en los sitios evaluados, los datos muestran una relación directa entre el número de árboles por hectárea, carbono en la biomasa aérea y COS. Sin embargo no se muestra una relación entre el tamaño del DAP y el contenido de COS por lo que se esperaría obtener más COS en donde los diámetros de los arboles fueran más anchos, lo cual no ocurrió posiblemente como lo menciona [Hernández et al., \(2009\)](#) en los arboles de *Abies religiosa* la mayor parte de la biomasa se ubica en el fuste (84.5%), mientras que en las ramas se concentra 6.9 % y en el follaje 8.9%, y es precisamente éste ultimo el principal contribuyente en la acumulación del carbono orgánico del suelo. Por lo cual, en los lugares donde se concentraron mayor número de árboles se sumó este carbono acumulado en la biomasa en todos sus individuos al carbono edáfico, aunque no fueran muy anchos, lo que indica que el tamaño de los diámetros de los árboles es independiente en cuanto a la capacidad que tiene un suelo para almacenar carbono y el COS se relaciona con otras propiedades edáficas, como una baja densidad aparente y desarrollo del perfil, lo que afecta directamente la acumulación del COS (ver Anexo cuadro 1).

Los suelos del bosque de Oyamel son un importante reservorio de carbono además presentan un alta capacidad de almacenar agua con valores en la humedad aprovechable entre 51 y 128% a lo largo del perfil, teniendo la capacidad de retener agua en la superficie, con un coeficiente de correlación  $r = 0.87$  con COS. Es decir al aumentar COS también lo hace la humedad aprovechable; dado que los materiales orgánicos y minerales edáficos están íntimamente relacionados en complejos organominerales ([Liebig et al., 2004](#)), donde las moléculas de agua sirven de puentes entre estos dos componentes del suelo ([Yariv y Michaelian, 2002](#)). Por lo tanto, los aportes de materiales orgánicos incrementan el tamaño y la estabilidad de agregados, además de la capacidad de la MO de retener hasta 20 veces su peso en agua, fomentando una mayor actividad microbiana y favorecen la fertilidad física del suelo, en general ([Carter y Stewart 1996](#)).

La conservación de estos suelo forestales dentro de la RBMM no sólo ha brindado sustento para el establecimiento y desarrollo del bosque, sino que también contribuye en las condiciones microclimáticas para el establecimiento de las colonias de mariposa monarca, es por ello que la preservación de los mismos y sus características edáficas no deben alterarse, además como lo menciona [Maeda et al., \(1977\)](#) los suelos alofánicos suelen presentar fenómenos de retracción importantes de carácter irreversible si estos suelos llegan a secarse.

La evaluación de la capacidad de intercambio catiónico (CIC) presentó valores entre 37 cmol/kg a 95 cmol/kg; con los valores más altos a nivel superficial del perfil; donde los porcentajes de MO también lo fueron. Destacando de esta manera la relación entre CIC y MO, dado que las sustancias húmicas se caracterizan por su alta capacidad de intercambio entre ellos y la solución del suelo, por tanto además de facilitar la absorción favorece igualmente la retención (Alarcón, 2004).

Otra propiedad relacionada con el contenido de COS fue el Nitrógeno total a los 30 cm de profundidad con un promedio de  $1.3 \pm 0.2\%$ , el cual presentó un coeficiente de correlación alto en comparación del COS  $r=0.72$ , los valores más alto para esta propiedad fueron en el BA-C3, debido a que fue el lugar que presentó mayor porcentaje de carbono. La relación C/N fue en promedio de  $17.2 \pm 7$ . Los valores para la relación C/N están generalmente asociados con niveles altos de materia orgánica poco descompuesta debido a la constante adición de reservas por una vegetación nativa exuberante o por su fijación por alofano en suelos volcánicos.

En términos generales el almacenamiento de carbono total en el bosque de Oyamel en promedio es de 461.9 Mg/ha. Lo que indica de forma contundente la importancia de estos ecosistemas en cuanto al almacenamiento de carbono considerando la parte aérea y la edáfica.

## **10.2. Almacén de carbono orgánico Bosque de Pino conservado y en recuperación**

La conversión de los bosques de Pino a agricultura implicó una menor acumulación en su almacén de carbono edáfico total. La recuperación de la cubierta forestal ofrece un hábitat para los organismos, además de continuas adiciones de materiales orgánicos y soluciones ricas en nutrientes; permitiendo de esta manera una mayor acumulación en estos sitios. Dentro de los resultados obtenidos, el bosque de Pino en el cual no ha presentado cambios en su cobertura vegetal en los últimos 40 años (BP-C) almacenó un total de 364 Ton /ha en COS; mientras que el BP-S1 (55 años en recuperación) tuvo 302 Ton/ ha, lo que implica que el almacén se redujo en un 12%.

Por otro lado en un bosque de Pino reforestado (BP-Ref) de 14 años de recuperación, el almacén de COS fue de 55 Mg/ha, siendo menor en un 87% comparado con el bosque conservado. Los muestreos que se analizaron comparten características fisiográficas análogas como la pendiente, altitud, precipitación y temperatura media anual, lo que indica que estas diferencias en su almacén son precisamente debidas al cambio de su cobertura vegetal.

De esta forma los datos señalan que el tiempo de recuperación de la cobertura vegetal ésta relacionado con el COS; alcanzando niveles parecidos en el bosque de 55 años referente al bosque conservado, como se ha demostrado en otros trabajos, los bosques secundarios pueden llegar a acumular cantidades similares a los bosques primarios (Brown y Lugo 1990; Hughes et al., 1999; Silver et al., 2000; Heath y Smith, 2000).

El bosque de Pino en recuperación presentó un mayor almacén de COS en los primeros 10 cm de profundidad en relación con el almacenado en todo el perfil, para el bosque de Pino con 14 años de recuperación esta profundidad representó el 60% y en el bosque con 55 años de recuperación, los valores fueron menores que el bosque de Pino conservado 41 Mg/ha y 81 Mg/ha respectivamente; según lo señalado con Paul., et al (2002) en las plantaciones mayores de 30 años el contenido de C es similar a los sistemas anteriores agrícolas en la superficie 10 cm del suelo.

Para la profundidad 0-30 cm se encontró diferencia significativas al comparar el BP-C y BP-Ref, BP-S1 estas diferencias pueden ser explicadas por la pérdida de COS con el de bosque de Pino a agricultura y que la reciente acumulación de materia orgánica sólo se encuentra a un nivel superficial, como lo menciona Schlesinger (1985) esta reducción del COS se debe a varios factores; la menor biomasa que se incorpora al suelo y a la mayor capacidad de descomposición de los residuos de cultivo.

La acumulación de COS en la parte más profunda >30cm se encontró en mayor cantidad en BP-S1 que en el BP- C, debido a que los materiales que habían sido acumulados también fueron descompuestos, lo que se ve reflejado en menor medida en el bosque de Pino más joven de 55 años, ya que el aumento en acumulación es un tanto más rápido en las primeras etapas del desarrollo del campo forestal, pero a la larga se alcanza un estado casi de equilibrio, cuyo ritmo de descomposición es aproximadamente igual al aporte anual de materiales orgánicos (Bray y Gorham, 1964, Wells, 1971 citado por Pritchett, 1986).

Los estudios realizados en áreas cercanas a la RBMM son pocos y en algunos como el caso de Cruz (2011) no especifican en qué tipo de vegetación realizó su análisis. Otros trabajos son de Aviña-Cervantes (2007) y Ordoñez et al., (2008) quienes estudiaron la Región Purépecha en Michoacán y reportaron datos 0-30 cm de profundidad. Los resultados de Aviña-Cervantes para el bosque de Pino fueron 55% menos de almacenamiento y para Ordoñez fueron menores en un 60% respecto a este estudio. Estas diferencias pueden ser explicadas ya que dichos autores no mencionan un estudio de cambio de uso de suelo y cobertura vegetal multitemporal; para poder evidenciar en qué condiciones

se desarrollaron dichos bosques, tampoco indican características fisiográficas importantes como; pendiente, clima, altitud, precipitación y temperatura media anual, que están involucradas en la acumulación y descomposición del COS. Se ha demostrado que condiciones microclimáticas de mayor humedad y menor temperatura generan tasas de descomposición más bajas y por lo tanto mayores almacenes de COS en un mismo bosque (Post et al., 1982). En el caso de los resultados de carbono almacenado en bosque de Pino en recuperación tampoco se tiene ningún registro para la RBMM.

El carbono almacenado en la biomasa que se obtuvo en los diferentes sitios para el bosque de Pino, fue para en conservado (BP-C) un total de 115 Mg/ha, para el recuperado de 55 años (BP-S1) 161.9 Mg/ha y para el bosque reforestado de 14 años (BP-Ref) 177.9 Mg/ha, no se encontró una relación directa con el carbono orgánico del suelo (COS), se esperaría que a mayor carbono en la biomasa la acumulación de COS aumentara, estos resultados pudieron deberse en primera instancia a que BP-Ref se trata de una reforestación; con un establecimiento de arbolado muy denso para este caso se presentaron 980 arboles/ha y sus diámetros con tallas relativamente pequeñas que va de los 5-45 cm, lo que implica árboles jóvenes. Para el BP-S1 el estudio su densidad forestal (420 arboles/ha) se distribuye entre 20 y 65 cm la mayoría. Algunos autores piensan que los bosques secundarios pueden llegar a tener características estructurales y funcionales similares a los bosques primario (Dunn, 2004; Wright y Muller-Landau, 2006; Barlow et al., 2007), mientras otros indican que los bosques secundarios no alcanzan jamás la complejidad de los bosques originales (Aide et al., 1996; Finegan, 1996; Foster et al., 1998; Chazdon, 2003; Barlow et al., 2007; Laurance, 2007). Por lo tanto, la densidad del arbolado es un estado temporal, mientras que el COS es el resultado de cientos de años para su acumulación.

El cambio en el uso de suelo en un ecosistema no sólo afecta su capacidad de almacenar carbono, sino además las propiedades físicas y químicas del suelo se ven modificadas. La disminución del COS estuvo asociado a un aumento de la densidad aparente comparando el BP-C y BP-S1 dentro de los primeros 30 cm de profundidad  $0.7 \text{ g cm}^3$  y  $0.9 \text{ g cm}^3$ , relacionado precisamente a que los suelos que tienen alto contenido de materia orgánica tienen menores densidades aparentes que los suelos bajos en este componente. La relación inversa entre C y la densidad aparente, ha evaluado en otros suelos sometidos a períodos de cultivo (Bauer y Black, 1981), también ha sido confirmado por Nazyo et al., (1993), sin embargo para el caso de BP-C y BP-S1 este acontecimiento sólo se logró observar al comparar los horizontes A2; esto posiblemente a que en el horizonte superior la acumulación durante

los 55 años ha sido suficiente para incrementar su carbono orgánico y por ende disminuir su densidad aparente.

Con lo que respecta a la variable humedad aprovechable (HA) también se vio modificada de una manera significativa al realizar el cambio de uso de suelo a los 30 cm superficiales se obtuvo para BP-C 263 % y BP-Ref 142 % reduciendo en 46 % su HA. El cambio de uso de suelo, las prácticas de manejo agrícola y forestal modifican las propiedades inherentes a su fertilidad física, lo cual repercute sobre el contenido de materia orgánica (MO) y la capacidad de almacenamiento de agua ([Browman et al., 1999](#); [Lado et al., 2004](#)), como [Wooldridge \(1970\)](#) también menciona que los componentes orgánicos no sólo absorbe varias veces su peso en agua, sino amortigua el impacto de las gotas de lluvia, evitando la agitación de las partículas de suelo y la formación de costras superficiales, la tasa de infiltración a través de la materia orgánica asociada a suelo mineral son generalmente mayores. Comparando estos resultados con la evaluación de [Salcedo et al., \(2007\)](#) quien obtuvo sólo 27 % de HA para suelos agrícolas volcánicos, los resultados para este estudio en cuanto a la HA fueron mayores, entonces la recuperación del Bosque de Pino a contribuido a evitar la pérdida de la HA.

Las texturas limosas encontradas en estos sitios tienen un alto porcentaje de Arcillas+Limo. Así mismo en el caso de BP-Ref es importante recalcar un aumento de materiales finos tipo arcillas, lo que hace mención según [Geotechnical Society \(2005\)](#), los andosoles cuando son remodelados su apariencia cambia a la de suelos finos, asociado al no tener una cubierta forestal protectora el intemperismo puede actuar con mayor intensidad en dichas condiciones.

Con lo que se refiere a la capacidad de intercambio catiónico (CIC) se vio disminuida en los bosques en recuperación, a los primeros 30 cm de profundidad se encontró que el bosque de Pino conservado (BP-C) tiene una CIC 267 cmol/kg mientras que el bosque de Pino en recuperación y el reforestado (BP-Ref y BP-S1) 177 y 172 cmol/kg respectivamente. [Tan y Dowling \(1984\)](#) menciona que la propiedad de CIC está estrechamente relacionada a su fertilidad, depende de los coloides inorgánicos (arcillas cristalinas, geles amorfos, óxidos y sesquióxidos de hierro y aluminio) y del contenido de materia orgánica, en donde se considera que la CIC permanente provienen de la fracción arcilla, mientras que el CIC variable depende de las sustancias húmicas. Estos resultados pueden ser comparados con los de [Geissert, D \(2000\)](#) quien encontró una diferencia de 5.1 cmol/kg entre el Bosque y áreas con agricultura en suelos volcánicos en su horizonte A1.

Otra propiedad química que tuvo diferencias significativas al comparar dichos escenarios fue el Nitrógeno a los 30 cm de profundidad; según [Weetman y Webber \(1972\)](#) el Nitrógeno total en los suelos forestales se encuentra sobre todo en capas de humus de la cubierta forestal y en el horizonte A1, por otro lado la relación C/N también se ve disminuida en las zonas con bosque de Pino en recuperación, ya que las tasas de mineralización en los suelos ácidos son sumamente bajas en los bosques no perturbados. La alteración del suelo, tal como ocurre en prácticas agrícolas, por lo general aumentan el ritmo de descomposición de la materia orgánica y la liberación de nitrógeno, los aumentos en la temperatura del suelo después del desmonte también estimulan la nitrificación ([Likens et al., 1970](#)).

A pesar de presentarse diferencias significativas en los almacenes de carbono bajo los múltiples escenarios y que algunas propiedades físicas y químicas se vieron modificadas al cambiar el uso de suelo; los sistemas forestales de bosque de Pino dentro de la RBMM presentan importantes almacenes de carbono total, considerando la parte de biomasa aérea y el carbono orgánico del suelo (COS); BP-C 479.6 Mg/ha, BP-S1 464.1 Mg/ha y BP-Ref 236.6 Mg/ha, una razón más que se sumaría para la conservación y recuperación de estos ambientes.

De haberse realizado la certificación como se propuso en el [Plan de manejo RBMM \(2000\)](#) por el pago por captura de carbono, se habría obtenido bajo estas condiciones aproximadamente; BP-C 23,980 pesos M.N/ha, BP-S1 23,205 pesos M.N/ha y BP-Ref 11,830 pesos M.N/ha. Para el bosque de Oyamel representaría 25,040 pesos M.N/ha, 21,700 pesos M.N/ha y 22,550 pesos M.N. /ha. Contribuyendo así a la economía de los habitantes y a la conservación de dichos ambientes dentro de la RBMM.

### 10.3. Almacén de carbono orgánico bosques de Pino y Aile en recuperación

Las áreas con uso agrícola que fueron abandonadas y se recuperaron en forma natural con bosques de Aile hace 14 años significó un importante aporte de carbono orgánico al suelo y a la biomasa aérea. El bosque de Aile es considerado como una especie secundaria, substancial en las etapas sucesionales tempranas de los bosques de Pino, Pino -encino y bosque mesófilo de montaña (Huber., et al., 2003). La diferencia en cuanto los almacenes totales de carbono orgánico del suelo (COS) fue significativa entre el bosque de Aile (BAil-S2) y el bosque de Pino reforestado (BP-Ref) aun cuando la edad es la misma, se encontró un almacén menor para el BP-Ref en un 77%, esto puede deberse al papel tan importante del bosque de Aile en la recuperación de los ambientes perturbados, estos bosques son caracterizados por ser de rápido crecimiento permitiendo la formación temprana de un reservorio de carbono (Gómez y Vázquez, 1981), de esta manera la generación de hojas contribuye a que exista una amplia capa de hojarasca.

La acumulación de carbono en la materia orgánica puede ser afectada por la cobertura y por el tipo de vegetación (Gómez y Vázquez, 1981; Waring y Schlesinger, 1985) así mismo, la composición química de la capa de hojarasca afecta la tasa de descomposición, la liberación de nutrientes y CO<sub>2</sub>. Una capa de mantillo ácido (como el de las coníferas, pH ácido < 6) tardará más tiempo en ser degradada que una capa de mantillo con un pH relativamente más alto (pH > 6), como la proveniente de bosque de latifoliadas (Pritchett, 1986). En general, la materia orgánica proveniente de la hojarasca de los bosques de Pino tiende a ser más ácida que aquella proveniente de bosques de latifoliadas, en virtud de su alto contenido de ligninas (Pritchett, 1986), por lo que la degradación es más lenta, a pesar de encontrarse bajo las mismas condiciones de precipitación y temperatura media anual. Por lo que sería conveniente incentivar e inducir la reforestación con Aile, por sus efectos en el COS.

El carbono almacenado en la biomasa aérea fue mayor para el caso de BP-Ref 177 Ton/ ha relacionado directamente con el número de árboles por hectárea que fue de 980, lo cual implica una alta densidad de arbolado (por reforestación), esto estaría beneficiando la acumulación de carbono en la biomasa aérea a corto plazo, sin embargo podría ocasionar exigencias y competencia por la obtención de nutrientes para su crecimiento, aunado a que la tasa de descomposición de la materia orgánica proveniente de este es más lenta, así como el reclutamiento de la microbiota adecuada para

su degradación y la reincorporación al sistema, esto se ve reflejado en niveles muy bajos de carbono en el suelo así como otros elementos esenciales para la vida como el nitrógeno a 30 cm de profundidad con una concentración de tan sólo 0.7 %, comparado con el bosque de Aile (BAil-S2) de 1.5 %, además de la capacidad que tiene el bosque de Aile de establecer simbiosis con *Actinobacteria frankiella* para llevar a cabo la fijación de nitrógeno, convirtiendo el nitrógeno atmosférico en nitratos solubles en el suelo, que pueden ser utilizados para su crecimiento y mejorando la fertilidad del suelo (Trappe, 1968)

Como lo menciona Hernández et al., (2006) el suelo es un subsistema fundamental del ecosistema forestal con características físicas, químicas y biológicas decisivas en su fertilidad, que a su vez determinan sus propiedades y los cambios que ocurren a través del tiempo, así como la influencia por efecto del cambio de uso del suelo. De esta manera el cambio de uso forestal por el agrícola provoca cambios en el suelo llegando afectar propiedades intrínsecas de los mismos. Las principales propiedades físicas y químicas que se vieron modificadas al comparar el bosque de Pino conservado (BP-C) y el bosque de Aile (BAil-S2), son un aumento en la densidad aparente de 0.7 a 0.8 en los 30 cm superficiales, disminución de CIC en un 50%, reducción en la humedad aprovechable de 263 % a 138 %, disminución de la materia orgánica y aumento en el porcentaje de arenas. Estas diferencias comparadas con las presentes entre el BP-C y BP-Ref fueron menores cuantitativamente lo que puede estar hablando de un claro proceso recuperación del bosque de Aile, no sólo en su cobertura vegetal, sino también dentro de su sistema edáfico, para obtener condiciones similares a las del bosque conservado.



## **XI. Conclusión**

La evaluación del cambio de cobertura vegetal dentro de la Reserva de la Biosfera Mariposa Monarca 1971-2010, permitió determinar que la cuenca del río Los Yugos es una región altamente conservada, el 85.7% (1038 ha) del bosque de Oyamel y el 72.2 % (325 ha) del bosque de Pino se presentan con bosque cerrado y con tendencia a la recuperación. De los resultados obtenidos se puede concluir que el bosque de Oyamel conservado, no sólo es el hábitat natural para la Mariposa Monarca (*Danaus plexippus*), sino que además contribuye en la dinámica del propio ecosistema, favoreciendo de esta manera el almacenaje de carbono orgánico del suelo con un promedio de 269 Mg/ha y el carbono en la biomasa aérea fue 193 Mg/ha. Existiendo una relación directa entre el número de árboles por hectárea, carbono en la biomasa aérea y el carbono orgánico del suelo.

En el bosque de Pino el almacén de carbono edáfico es en promedio de 241 Mg/ha y en la biomasa aérea fue 151 Mg/ha, de forma particular la conversión de los bosques de Pino a agricultura implicó una disminución en la acumulación de carbono edáfico total, encontrando una reducción en el almacén para el bosque de 55 años de recuperación de 17 %, mientras que para el bosque con 14 años de reforestación fue de 84 %, y para un bosque de Aile con la misma edad de este último, el almacén fue menor en un 28 %, en relación con el bosque de Pino conservado. El cambio en la cobertura afectó otras propiedades físicas y químicas del suelo; una reducción de la CIC, Humedad aprovechable, Nitrógeno total y aumento en los horizontes superficiales de la densidad aparente. Dicho de esta manera la pérdida de la MO involucra más que una afectación superficial, sino que puede llevar a la pérdida de la estabilidad de los agregados, así como la susceptibilidad a la deshidratación del suelo convirtiendo a estos sitios menos propicios para el desarrollo de la vida.

Los resultados de este trabajo demostraron la capacidad de los bosques dentro de la RBMM de almacenar carbono en el suelo y en la biomasa aérea, además de evidenciar el impacto que tiene el cambio de uso suelo en los sistemas edáficos de bosques templados. Los sitios en recuperación no han alcanzado los mismos valores que los bosques sin alterar. Por lo que surge como una necesidad inmediata la implementación de medidas preventivas para frenar la tala y el aprovechamiento forestal no regularizado. La información generada a partir de este análisis puede servir como base para estudios posteriores en inventarios de carbono regional, así como en estudios subsecuentes sobre el cambio de cobertura vegetal, uso de suelo y pago por servicios ambientales.

## XII. Referencias

- **Acosta, M., J. Vargas, J. D. Etchevers, B y Velásquez, A.** (2002). Estimación de la biomasa aérea mediante el uso de relaciones alométricas en seis especies arbóreas en Oaxaca, México. *Agrociencia* 6: 725-736.
- **Aide T.M., Zimmeman J., Rosario m., Marcano H.**(1996). Forest recovery in abandoned cattle pasture along an elevation gradient in northeastern. *Biotropica*, 28: 537-548.
- **Ahuja, d. R. Lashof, d. A.** (1990). Relative contributions of greenhouse gas emissions to global warming. *Nature* 344(5): 529–531.
- **Alarcón, J.** Fundamentos teóricos de la conductividad eléctrica. (En línea). Consultado Julio 2012. Disponible en: [www.infoagro.com](http://www.infoagro.com)
- **Aviña, F.** (2007). Estimación del contenido de carbono en el suelo de diferentes clases de cobertura vegetal y uso de suelo en la región Purépecha, Michoacán, México. UNAM Facultad de Ciencias. pp 88.
- **Balesdent, J. ; C Chenu y M Balabane.** 2000. Relationship of soil organic matter dynamics to physical protection and tillage. *Soil Tillage Res*, 53: 215-230.
- **Barlow J, Gardner TA, Araujo IS, Avila-Pires TC, Bonaldo AB, Costa JE, Esposito MC, Ferreira LV, Hawes J, Hernandez MI, Hoogmoed MS, Leite RN, Lo-Man-Hung NF, Malcolm JR, Martins MB, Mestre LA, Miranda-Santos R, Nunes-Gutjahr AL, Overal WL, Parry L, Peters SL, Ribeiro-Junior MA, da Silva MN, da Silva Motta C, Peres CA.** (2007). Quantify the biodiversity value of tropical primary, secondary and plantation forest. *Proc Natl Acad Sci USA*. 104(47):1855-60.
- **Bauer A., y A. I. Black.** (1981). Soil carbon nitrogen and Cosgrove, B. 1994. La atmósfera y el tiempo. México: Biblioteca Visual Altea.
- **Berner R.** (1997). The rise of plants and their effect on weathering and atmospheric CO<sub>2</sub>, *Science*, 276:544:546.
- **Bocco, G., M. Mendoza y O. Masera.** (2001). La dinámica del cambio del uso del suelo en Michoacán. Una propuesta metodológica para el estudio de los procesos de deforestación. *Investigaciones Geográficas*, 44:18-38.
- **Bolin, B. y R. Sukumar.** (2000). Global Perspective. En Watson, R.T. (eds.). IPCC Special Report on Land Use, Land-Use Change and Forestry.
- **Bray, J., and E. Gorham.** (1964). Litter production of forests of the world. *Adv. Ecol. Res.* 2:101-157.
- **Browman, R. A., M. F. Vigil, D. C., Nielsen, and R. L. Anderson.** (1999). Soil organic matter changes in intensively cropping dry land systems. *Soil Science Am*, 63: 186-191.
- **Brown, S y Lugo, A.** (1990). Effects of forest clearing and succession on the carbon and nitrogen content of soils in Puerto Rico and US Virgin Islands. *Plant and Soil*, 124: 53-64.
- **Carter, M. R. y B.A. Stewart.** 1996. Structure and organic matter storage in agricultural soils. Lewis/CRC Press. USA: Boca Raton, FL.
- **Chapin, F. S., H. A. Mooney, M. C. Chapin y P. Matson.** 2002. Principles of Terrestrial. In Powlson D. S., P. Smith, and J. Smith (eds). Evaluation of soil organic matter models using long-term datasets. U. NATO ASI Series I: Global Environmental Change. Vol I 38. Springer- Verlag, Berlin, Heidelberg, Germany.

- **Chazdon, R.** (2003). Tropical forest recovery legacies of human impact and natural disturbances. *Perspectives in plant Ecology, Evolution and Systematics*, 6: 51-71.
- **Christensen, B.T.** 1996. Matching measurable soil organic matter fractions with conceptual pools in simulation models of carbon turnover: Revision of model structure. In Powlson D. S., P. Smith, and J. Smith (eds). *Evaluation of soil organic matter models using long-term datasets*. (pp 144-160). Berlin, Heidelberg, Germany: Springer-Verlag.
- **Cole, T y Ewel, J.** (2006). Allometric equations for four valuable tropical tree species. *Forest Ecology and Management*, 229: 351-360.
- **Cosgrove, B.** (1994). *La atmósfera y el tiempo*. México: Biblioteca Visual Altea.
- **Cruz, F.** (2011). Contenidos de carbono orgánico de suelos someros en pinares y abetales de áreas protegidas de México. *Agrociencias*, 849-863.
- **Daily, G.** (1995). Restoring value to the world degraded lands *Science*, 269: 350-354.
- **Dale, V. H., S. M. Pearson, H.L. Offerman y R. V. O'Neill.** (1994). Relating patterns of land-use change to faunal biodiversity in the Central Amazon. *Conservation Biology*, 8: 1024-1036.
- **Departamento de Fomento Forestal.** (2006). *Elaboración de planes de manejo y planes operativos de aprovechamiento en bosques húmedos latifoliados*. República de Nicaragua: Instituto Nacional Forestal.
- **Díaz F R, M Acosta M, F Carrillo A, E Buendía R, E Flores A, J D Etchevers B.** (2007). Determinación de ecuaciones alométricas para estimar biomasa y carbono en *Pinus patula*. *Madera y Bosques* 13:25-34.
- **Dunn, R.** (2004). Recovery of faunal communities during tropical forest regeneration. *Conservation Biology*, 18: 3002-309.
- **Ellert, B. H., Janzen, H.H., Mc Conkey, B. G., 2001.** Measuring and comparing soil carbon storage. In: Lal, R., Kimble, J.M., Follett, R.F., Stewart, B.A. (Eds.), *Assessment Methods for Soil Carbon*. CRC Press, Boca Raton, FL: FAO-UNEP. (1990). *Tropical Forest Resources Assessment Project*. Roma: Publications, Oxford, UK Food and Agriculture Organization of the United Nations.
- **FAO.** (1995). *State of the World's Forests*. Roma: Publications, Oxford, UK Food and Agriculture Organization of the United Nations
- **FAO.** (2010). *Evaluación de los recursos forestales mundiales. (Informe Principal)*. Roma: Oficina De Intercambio de Conocimientos, Investigación y Extensión, FAO.
- **Falkowski P., Katz, M.E., Milligan, A., Fennel, K., Cramer, B.S., Aubry, M.P., Berner, R.A., Novacek, M., y Zapole, W.M.** (2005). The rise of oxygen over the past 205 million years and the evolution of large placental mammals, *Science*, 309: 2202-2204.
- **Fischer A.** (1981), Climatic oscillations in the biosphere. En *Biotic Crises in Ecological and Evolutionary Time*. (pp 10-131). New York: Nitecki M. ed., Academic Press.
- **Footo, R. y Gragan, P.** (2010). Soil carbon accumulation during temperate forest succession on abandoned low productivity agricultural lands. *Ecosystems*, 13 (6): 795-812.
- **Foster, D., F. Swanson, J. Aber, I. Burke, N. Brokaw, D. Tilman, y A. Knapp.** (2003). The importance of land-use legacies to ecology and conservation, *Bio Science*, 53: 77-88,
- **Franzluebbers A.** (2002). Soil organic matter stratification ratio as an indicator of soil quality. *Soil & Tillage*, 66: 95-106.
- **Garduño, R.** (1998). *El veleidoso clima*. México: La Ciencia para Todos, 127. FCE SEP-CONACYT.

- **Garduño, R.** (2004). ¿Qué es el efecto invernadero? En Martínez, J y Fernández, A. (eds). Cambio climático: una visión desde México. (pp. 29-41). México, Distrito Federal. Secretaria de Medio ambiente y Recursos Naturales e Instituto Nacional de Ecología.
- **Gibbs, H.K., S. Brown, J.O. Niles y J.A. Foley.** (2007). Monitoring and estimating tropical forest carbon stocks: Making REDD a reality. *Environmental Research Letters* 2.
- **Global Forest Resources Assessment** (2010) Main Report 2010, Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome. pp 340.
- **Gómez, P. y Vázquez, Y.** (1981). Successional studies of a rain forest in Mexico. In: West, D.C., H.H. Shugart y D.B. Botkin (eds.). *Forest succession*. (pp 246-266). Concepts and application. Springer-Verlag. New York.
- **González, M., Etchevers, B., Hidalgo, M.** 2008. Carbono en suelos de ladera: Factores que deben de considerarse para determinar su cambio en el tiempo. *Agrociencia*. 42 (7):741-751.
- **Gou, L y Gifford, R.** (2002). Soil carbon stocks and land use change: a meta analysis. *Global Change Biology*, 8:345- 360.
- **Goudriaan, J.** (1992). ¿A dónde va el gas carbónico.: el papel de la vegetación. *Mundo Científico*, 126(12): 687-692
- **Hardy, R., p. Wright, J. Gribbin y J. Kington.** (1986). *El libro del clima*, Vol. III. Barcelona: Ediciones Orbis, S.A.
- **Health, L y Smith, J.** (2000). Soil carbon accounting and assumptions for forestry and forest-related land use change from a native pasture to a pine plantation. *Plant and Soil*, 299. Pp 251-262.
- **Hoer, H. y Solberg, B.** 1994. Potencial and economic efficiency of carbon sequestration in forest biomass through silvicultural management. *Forest Science*, 40(3): 429-451
- **Hernández, A., Acosta, D., Carrillo, M, Etchevers, F y Jorge, D.** (2009). Estimación de biomasa y carbono en un bosque de Abies Religiosa. *Revista fitotecnia mexicana*, 32:233-238.
- **Hernández, A., Ascanio, M., Morales, M., Bojórquez, JI., García, NE y García, D.**(2006). Fundamentos de la formación del suelo, cambios globales y su manejo. México: Editorial Universidad Autónoma de Nayarit, pp 15-25.
- **Holmén, K.** (2000). *The Global Carbon Cycle*. En Jacobson, M. y colaboradores. *Earth System Science from Biogeochemical Cycles to Global Changes*. Estados Unidos: Academic Press, pp 527.
- **Hughes, R., Kuuffman, J. y Jaramillo, V.** (1999). Biomass, carbon and nutrient dynamic of secondary forests in a humid tropical region of México. *Ecology*, 80; 1892-1907.
- **International Geosphere-Biosphere Programme** (1998). *Atmospheric chemistry in a changing world*. New York: Spinger.
- **IPCC.** Special Report on Land Use, Land-Use Change And Forestry, pp 23-51.
- **IPCC.** (2007). Summary for policymakers. In: S. Solomon, D. Quin, M. Manning, Z. Chen. M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor y H.L. Miller (eds.), *Climate change 2007: The physical science basis*. (Tercer Informe). Contribution of Working Group 1 to the fourth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, U.K.
- **Ishizuka Y. y Black C.** (1977). Soil derived from volcanic ash in Japan. Centro internacional de Maíz y Trigo, México.
- **ISRIC – FAO.** (2002). *Procedures for soil analysis*, 6ta Edition, Wageningen, Alemania.
- **Jenny, H.** (1941). *Factors of soil formation*. New York: McGraw-Hill.

- **Kohlmaier, G. H., Weber, M., & Houghton, R. A.** (1998). Carbon dioxide mitigation in forestry and wood industry. Berlin: Springer.
- **Lado, M., A. Paz, y M. Ben-Hur.** (2004). Organic matter and aggregate size interactions in infiltration, soil formation, and soil loss. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 68: 935-942.
- **Lal, R.** (2005). Forest soil and carbon sequestration. *Forest Ecology and Management*, 220:242-258.
- **Lambin, E. F.** (1994). Modeling deforestation processes a review Tropical Ecosystem Environment Observations by Satellites, TREE Series B. (Research report No 1).Luxenburg: Office of the European Commission, Directorate- General XIII.
- **Landa, R., J. Meave y J. Carabias.** 1997. Environmental deterioration in rural México: an examination of the concept. *Ecological Applications*, 7(1): 316-329.
- **Laurance W.F.** (2007). Have we overstarted the tropical biodiversity crisis. *Trends in Ecology and Evolution*, 22: 65-70.
- **Lee, H., J.L Carr y A. Lankerani.** (1995). Human disturbance and natural habitat: a biome level analysis of a global. *Biodiversity and Conservation*, 4: 128-155.
- **Liebig, M. A., D. L. Tanaka, and B. J. Wienhold.** (2004). Tillage and cropping effects on soil quality indicators in northern Great Plains. *Soil Tillage Res.* 78:131-141.
- **Likens, G. E., F. H. Bormann, N. M. Johnson, D. W. Fisher y R. S. Pierce.** 1970. Effects of forest cutting and herbicide treatment on nutrient budgets in the Hubbard Brook watershed ecosystem. *Ecol. Monogr*, 40(1):23-47.
- **Lopera, G y V. Gutiérrez.** (2000). Viabilidad técnica y económica de la utilización de plantaciones de Pinus patula Como Sumideros de Carbono. Tesis Ingeniero Forestal, Universidad Nacional de Colombia. Medellín-Colombia, pp 146.
- **López, J.** (2006). Análisis de cambio de la cobertura forestal en la Reserva de la Biosfera Mariposa Monarca (2006 – 2007). Fondo para la Conservación de la Mariposa Monarca, pp 36.
- **López, J.** (2011). Deforestation and forest degradation in the Monarch Butterfly Biosphere Reserve, Mexico, 2003–2009. *Journal of Maps*, 626-633.
- **Maeda, T., Takenada, H. y Warkentin, B.** (1977). Physical properties of allophane soils. *Advances in agronomy*, 29:229-261.
- **Magaña, V.** (2004). El cambio climático global: comprender el problema. En Martínez, J y Fernández, A (eds). Cambio climático: una visión desde México. (pp 17-28). México, Distrito Federal. Secretaria de Medio ambiente y Recursos Naturales e Instituto Nacional de Ecología.
- **Mann, I.** (1986). Changes in soil carbon storage after cultivation. *Soil Science*, 142: 279-288.
- **Mas, J.F., A. Velázquez, J.L Palacio, G. Bocco, A. Peralta y J. Prado.** (2002). Assessing forest resources in Mexico: wall-to-wall land use/cover mapping. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 5: 966-968.
- **Masera, O.** (1996). Deforestación y Degradación Forestal en México. Documento de trabajo. México: GIRA, A.C.
- **Masera, O., Cerón, A y Ordoñez, A.** (2001). Forestry mitigation options for Mexico: finding synergies between national sustainable development priorities and global concerns. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, 6: 291-312.
- **Merino, Leticia y Mariana Hernández** (2004), “Destrucción de Reserva de la Biosfera Mariposa Monarca, Michoacán, México”, *Revista Mexicana de Sociología*, 66 (2): 261-309.
- **Moonre B. Bonne R.D. Hobbie J.E et al.,** (1981). A sample model for the analysis of the role of terrestrial ecosystems in the global carbon budget. En Bolin, B. (eds) Carbon cycling modeling. Scope.

- **Murillo, B.** (2009). El manejo forestal y sus aplicaciones en la cubierta vegetal y en las estructuras demográficas de especies comerciales: Reserva de la Biosfera Mariposa Monarca. UNAM, Facultad de Filosofía y Letras, 108.
- **Myeres, N.** (1991). Tropical Forest: present status and future outlook. *Climatic Change*, 19:3-32.
- **Nanyzo N. R. Dahlgren y S. Shoji.** (1993). Chemical characteristics of volcanic ash soil In: Shoji, Nazyo y Dahlgren. Volcanic ash soil. Genesis, properties and utilization. *Developments in Soil Science* (21: 145-187). Elsevier.
- **Nicoloso, R., Rice, C., Amado, T. y Fiorin, J.** (2009). Deep soil carbon sequestration under no-tillage cropping systems in tropical and temperate climates. *Earth and Environmental Science*, 6: 22-24.
- **Oliva, M. y F. García-Oliva.** (1998). Un nuevo campo de acción en la química biológica: Parte I. Generalidades sobre el cambio global. *Educación Química* 9(3):136-142.
- **Ordóñez, J. A. B.** 2002. Emisiones y captura de carbono derivadas de la dinámica de cambio en el uso del suelo en los bosques de la Región Purépecha, Michoacán, México. Documento que para obtener la Candidatura a doctor en Ciencias Biomédicas presenta; Programa Doctoral en Ciencias Biomédicas, Instituto de Ecología, UNAM. México.
- **Ordoñez, J.** (2008). Emisiones y captura de carbono derivadas de la dinámica de cambio en el uso del suelo en los bosques de la región Purépecha. UNAM Instituto de Ecología, pp 164.
- **Ortiz, R.** (1997). Costa Rican secondary forest: an economic option for joint implementation initiatives to reduce atmospheric CO<sub>2</sub>. Draft paper presented for inclusion in the Beijer Seminar in Punta Leona. Costa Rica.
- **Paul, K.I., P.J. Polglase, J.G. Nyakuengama, P.K. Khanna.** (2002). Change in soil carbon following afforestation. *Forest ecology and management*, 168: 241-257.
- **Parfitt, R.L. y B. Clayden.** 1991. Andisols: The development of a new order in Soil Taxonomy. *Geoderma* 49: 181-198.
- **Post, W y Mann,** (1990). Changes in Soil Organic Carbon and Nitrogen as a result of cultivation, A.F. Bouwman, editor, *Soil and the Greenhouse effect*. New York: John Wiley & sons.5
- **Post, W. y Kwon, K.** (2000). Soil Carbon sequestration and Land-Use Change: Processes and Potential. *Global Change Biology*, 6: 317-328.
- **Post W.H., Emanuel, W.H., Zinke, P.S. y Stangenberger A.C.** (1982). Soil carbon pools and world life zone. *Nature*, 298: 156-159.
- **Pritchett, W.L.** (1986). Suelos forestales. Propiedades, conservación y mejoramiento. México, D.F: Limusa.
- **Puget, P., C. Chenu y J. Balesdent.** 1995. Total and young organic matter distributions in aggregates of silty cultivated soils. *European Journal of Soil Science*, 46: 449–459.
- **Ramírez, Gómez y Shultz, S.** 1997. Valuing the contribution of plantation forestry to the national accounts of Costa Rica from the ecological economics perspective. Beijer Research Seminar. Costa Rica. pp 28.
- **Rivera, M.** (1994). El cambio climático. México: Colección Tercer Milenio, CNCA.
- **Rogers, S. y M. McCormick.** (2007). Hot spots – the carbon atlas. *The Guardian*. [disponible por ejemplo en <http://eco.microservos.com/concienciacion/atlas-emisiones-carbono.html>]
- **Salcedo, E. Galvis, S., Hernández., Rodríguez, M., Zamora, N., Bugarin, M y Carrillo, M.** (2007). La humedad aprovechable y su relación con la materia Orgánica y superficie específica del suelo. *Tierra Latinoamericana*, 25(4): 418-425.

- **Santilli, M., P. Moutinho, S. Schwartzman, D. Nepstad, L. Curran & C. Nobre.** (2005). Tropical deforestation and the Kyoto protocol. *Climate Change*, 71: 267-276.
- **Satto, T; Madgwick, H,** (1982). *Forest biomass*. La Haya: Martinus Nijhoff. Junk Publishers.
- **Schlesinger, W. H** (1985). Changes in soil carbon storage and associated properties with disturbance and recovery. In: Trabalka JR, Reichle DE (eds). *The Changing Carbon Cycle: A Global Analysis* New York: Springer-Verlag.
- **Schlesinger, W. H.** (1991). *Biogeochemistry: An Analysis of Global Change*. Estados Unidos: Academic Press.
- **Schlesinger W.H.** (1990). Evidence from chronosequence studies for a low carbon storage potential of soils. *Nature*, 348, 232-234.
- **Shoji s, R. Dahlgren y N, Nazyo** (1993). Genesis of volcanic ash soils In Shoji, Nazyo y Dahigfen. *Volcanic ash soils and Genesis properties and utilization*. *Developments in Soil Science* 21: 37-71.
- **Silver,W., Ostertag, R. y Lugo, A.** (2000). The potential for carbon sequestration through reforestation of abandoned tropical agriculture and pasture lands. *Restoration Ecology*, 8: 394-407.
- **Simonson R.W.** (1979). Origin of the name "Ando soils". *Geoderma*, 22:333-335.
- **Skjemstad, J. O., N. J. Mckenzie, G.P. Richards, and A. A. Webb.** (2003). Principles for monitoring soil-carbon change in Australian agricultural lands. In: Smith, S. *Soil Organic Carbon and Agriculture: Developing Indicators for Policy Analyses*.(pp65–72).Canada, Ottawa: Agriculture and Agri-Food and Organization for Economic Cooperation and Development, Paris, France.
- **Smith, S.** (2003). *Soil Organic Carbon and Agriculture: Developing Indicators for Policy Analyses*. Agriculture and AgriFood Canada, Ottawa and Organization for Economic Cooperation and Development, Paris. pp 329.
- **Soil Survey.** (1975). *Soil Taxonomy. A basic system of soil classification for making and interpreting soil survey*. USDA-SCS Agric. Handb. 436. US. Gov Office.
- **Soil Survey Staff.** (1990). *Keys to Soil Taxonomy*. 4<sup>th</sup> edition. Ald, USDA-SMSS technical Monograph NO. 19, Virginia.
- **Suplee, C.** (1998). Desentrañando el enigma del clima. *National Geographic* 2 (5): 38-70.
- **Tamayo, J. L.** 1962. *Geografía general de México*. México: Instituto Mexicano de Investigaciones Económicas.
- **Tan, K. H., Dowling, G. P. S.**(1984). Effect of organic matter on CEC due to permanent and variable charges in selected temperate region soils. *Geoderma*, 32: 89-101
- **Toharia, M.** (1984). *Tiempo y clima*. Colección Temas clave, Madrid: Salvat Editores.
- **Trappe, J.M., J.F. franlin, R.F. Tarrant and G.M.Hasen,** (1968). *Biology of alder* *Proceedings of a symbiosium held at Northwest*, pp. 292-292.
- **United Nations Conference on Environment and Development.** (1993).London.
- **Vaccaro, S., Arturi,M., Goya, J., Frangi, J. y Piccolo,G.**(2003).Almacenes de carbono en estadios de la sucesión secundaria en la provincia de misiones, Argentina. *Interciencia*, 28 (9):521-527.
- **Vela, G., López, J., y Rodríguez, Ma.** (2012). Niveles de carbono orgánico total en el suelo del Distrito federal, centro de México.77: 18-30.

- **Voituriez, B.** (1994). La atmosfera y el clima. Barcelona: Colección Conocer la ciencias RBA Editores.
- **Walkley, A y Black, A.** (1934). An examination of the Degtjareff method for determining soil organic matter, and proposed modification of the chromic acid titration method. En Carreira, D y Ostenelli, M (2010). Carbono orgánico del suelo por Walkley y Black evaluación de dos escalas de trabajo. XXII Congreso Argentino de la Ciencia del suelo.
- **Watson, R.T., Noble, I.R., Bolin, B., Ravindranath, N.H., Verardo, D.J. and Dokken, D.J.** (2000). Special Report on Land Use, Land-Use Change and Forestry. Special Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom.
- **Waring, H.R. y Schlesinger, W.H.** 1985. Forest Ecosystems. Concepts and management. Academic Press. Orlando, FL. And Forestry. Cambridge University Press, pp 377.
- **Weetman, G y Webber, B.** (1972). The influence of wood harvesting the nutrients status of two spruce stands. Can. J. For. Res, 2: 315-369.
- **Wright S.J. y Muller-Landau H.C.**(2006).The future of tropical forest species. Biotropica, 38: 287-301.
- **West, T. y Post, W.** (2002). Soil organic carbon sequestration rates by tillage and crop rotation: a global data analysis. Soils Science Society American Journal, 66: 1930-1946
- **Yariv, S. y K. H. Michaelian.** (2002). Structure and surface acidity of clay minerals. In: S. Yariv and H. Cross (eds). Organo-clay complexes and interactions. (pp. 1-38). New York, NY. USA: Marcel Dekker.



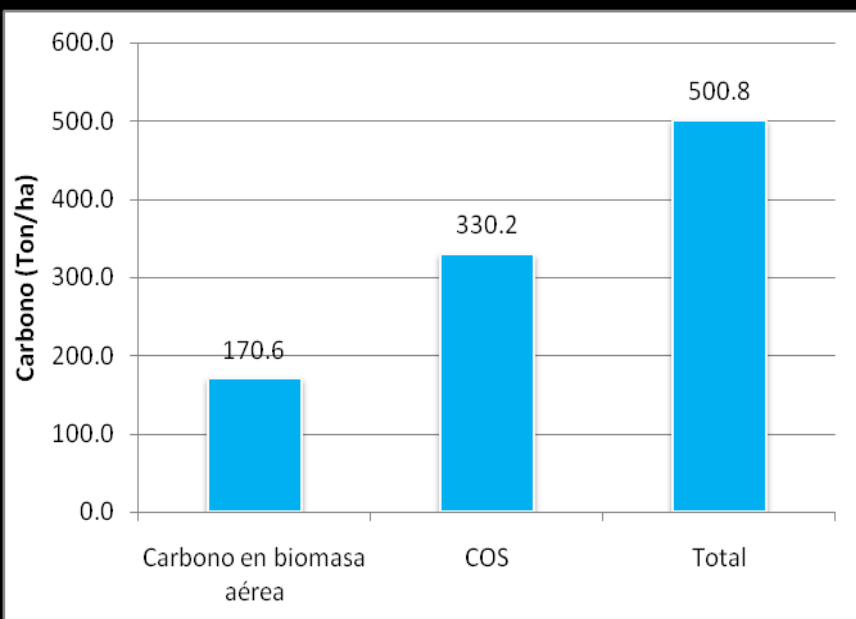
## **XII. ANEXOS**

## MUESTREO BA-C1. LOS MADROÑOS.

Se localiza al suroeste de la cuenca del río Los Yugos a una altitud 3166 metros, con materiales de origen volcánico adesítico, temperatura media anual de 10-12 °C, precipitación media anual entre 800-1200 mm, una pendiente de 12°, suelos tipo Andosol y desarrollo de bosque de Oyamel (conservado).



### Almacén de carbono



## Propiedades físicas y químicas del suelo

Profundidad (cm)	0-15	15-19	29-40	40-51
<b>Color seco</b>	10YR4/3	10YR4/3	10YR4/3	10YR4/4
	marrón oscuro	marrón oscuro	marrón oscuro	café oscuro amarillento
<b>Color húmedo</b>	10YR2/2	10YR2/2	10YR2/2	10YR2/2
	muy negro	muy negro	muy negro	muy negro
<b>Densidad aparente g cc-1</b>	0.68	0.85	0.84	0.87
<b>Humedad a capacidad de campo %</b>	116.42	90.32	90.93	81.77
<b>Humedad Higroscópica %</b>	11.50	12.01	11.84	12.69
<b>Humedad capilar %</b>	104.91	78.30	79.09	69.09
<b>Humedad a punto de marchitez %</b>	16.92	17.66	17.41	18.66
<b>Humedad a punto de marchitez %</b>	63.27	49.08	49.42	44.44
<b>% Arenas</b>	17.39	10.38	13.14	14.90
<b>% Limos</b>	80.83	87.94	85.44	80.12
<b>% Arcillas</b>	1.78	1.69	1.42	4.98
<b>Limos+Arcillas</b>	82.61	89.62	86.86	85.10
<b>Textura</b>	Limo	Limo	Limo	Limo

Profundidad (cm)	0-15	15-19	29-40	40-51
<b>pH (agua destilada)</b>	5.70	6.10	6.20	6.30
<b>M.O. %</b>	25.40	10.40	9.34	6.33
<b>Nitrógeno %</b>	0.86	0.64	1.50	
<b>%C</b>	15.95	6.49	5.72	3.89
<b>CIC cmol/kg</b>	93.75	73.44	175.52	40.81
<b>C/N</b>	18.58	10.13	28.71	

### Características del bosque de Oyamel

Densidad de arboles/hectárea: 400

Diámetro (cm): 40.30 ±10

Altura (m): 33.78±5

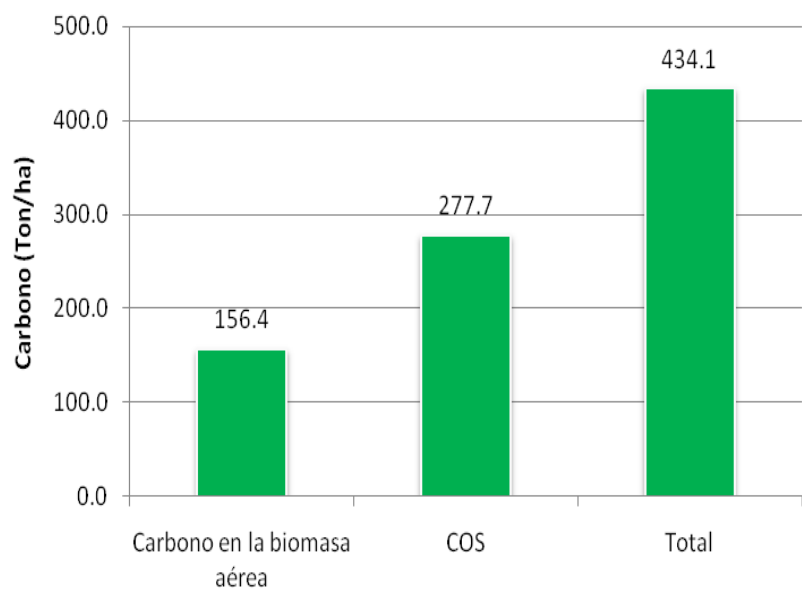


## MUESTREO BA-C2. OJO DE AGUA

Se localiza al suroeste de la cuenca del río Los Yugos a una altitud 3112 metros, con materiales de origen volcánico adsésitico, temperatura media anual de 10-12 °C, precipitación media anual entre 800-1200 mm, una pendiente de 16°, suelos tipo Andosol y desarrollo de bosque de Oyamel (conservado).



### Almacén de carbono



## Propiedades físicas y químicas del suelo

Profundidad (cm)	0-7	7 - 15	15-28	28-40	40-77
<b>Color seco</b>	10YR 3/3	10YR 5/3	10YR 5/4	10YR 5/4	10YR 6/4
	marrón oscuro	marrón	pardo amarillento	pardo amarillento	
<b>Color húmedo</b>	10YR 2/1	10YR 3/3	10YR 3/4	10YR 3/4	10YR 3/4
	negro	marrón oscuro	marrón amarillento oscuro	marrón amarillento oscuro	marrón amarillento oscuro
<b>Densidad aparente (g cc-1)</b>	0.69	0.81	0.86	0.89	0.95
<b>Humedad a capacidad de campo %</b>	141.92	84.58	73.42	75.96	71.40
<b>Humedad Higroscópica %</b>	13.08	10.59	12.94	10.25	11.60
<b>Humedad capilar %</b>	128.83	73.99	60.49	65.71	59.80
<b>Humedad a punto de marchitez %</b>	19.24	15.57	19.02	15.07	17.06
<b>Humedad a punto de marchitez %</b>	77.13	45.97	39.90	41.28	38.80
<b>% Arenas</b>	8.77	13.43	20.10	19.81	21.22
<b>% Limos</b>	88.50	84.54	79.07	78.83	78.36
<b>% Arcillas</b>	2.73	2.03	0.83	1.36	0.41
<b>Limos+Aercillas</b>	91.23	86.57	79.90	80.19	78.78
<b>Textura</b>	Limo	Limo	Franco-Limoso	Limo	Franco-Limoso

Profundidad (cm)	0-7	7 - 15	15-28	28-40	40-77
<b>pH (agua destilada)</b>	6.00	6.00	6.00	6.00	5.90
<b>M.O. %</b>	25.21	8.57	4.61	4.71	5.10
<b>Nitrógeno %</b>	0.52	0.39	0.91		
<b>%C</b>	15.93	5.31	2.93	2.92	3.17
<b>CIC cmol/kg</b>	61.76	53.20	46.73	66.21	55.57
<b>C/N</b>	30.62	13.73	44.35		

### Características del bosque de Oyamel

Densidad de arbolado: 340

Diámetro (cm): 41.53±7

Altura (m): 32.43±3



### MUESTREO BA-C3. KOALA

Se localiza al suroeste de la cuenca del río Los Yugos a una altitud 3117 metros, con materiales de origen volcánico adesítico, temperatura media anual de 10-12 °C, precipitación media anual entre 800-1200 mm, una pendiente de 15°, suelos tipo Andosol y desarrollo de bosque de Oyamel (conservado).



### Características del Bosque de Oyamel

Densidad de arbolado: 300

Diámetro (cm): 48.92 ±22

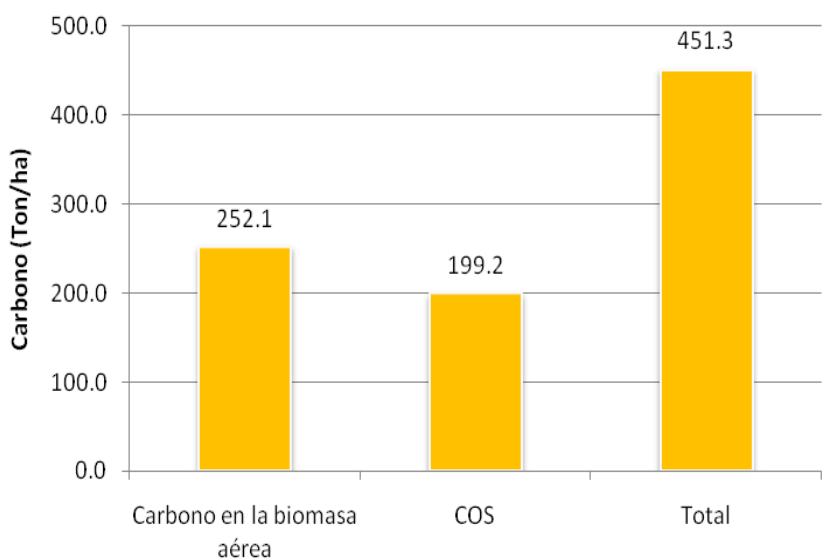
Altura (m): 21.02±4



### Propiedades físicas y químicas del suelo

Profundidad (cm)	0-6	6-11	11-30	30-58	58-77
pH (agua destilada)	5.50	5.80	5.80	6.00	6.10
M.O. %	27.84	10.54	4.77	2.85	3.13
Nitrógeno %	1.06	0.57	1.63		
%C	19.47	6.69	2.97	2.77	1.85
CIC cmol/kg	95.88	67.94	53.37	37.23	55.33
C/N	18.39	11.75	30.14		

### Almacén de carbono



Profundidad (cm)	0-6	6-11	11-30	30-58	58-77
<b>Color seco</b>	10YR 3/3	10YR 5/3	10YR 5/3	10YR 6/4	10YR 6/4
	marrón oscuro	marrón	amarillento marrón	Marrón ligeramente amarillento	Marrón Ligeramente amarillento
<b>Color húmedo</b>	10YR 2/1	10YR 2/2	10YR 3/4	10YR 3/6	10YR 3/6
	negro	marrón muy oscuro	marrón amarillento oscuro	marrón amarillento oscuro	marrón amarillento oscuro
<b>Densidad aparente (g cc-1)</b>	0.30	0.82	0.96	0.98	1.02
<b>Humedad a capacidad de campo %</b>	93.35	84.42	69.42	58.62	59.84
<b>Humedad Higroscópica %</b>	13.08	13.04	10.16	7.19	7.26
<b>Humedad capilar %</b>	80.28	71.38	59.27	51.43	52.58
<b>Humedad a punto de marchitez %</b>	19.23	19.18	14.94	10.57	10.68
<b>Humedad a punto de marchitez %</b>	50.74	45.88	37.73	31.86	32.52
<b>% Arenas</b>	16.85	19.36	25.39	35.68	28.85
<b>% Limos</b>	80.83	79.43	74.23	63.07	69.76
<b>% Arcillas</b>	2.32	1.21	0.38	1.25	1.40
<b>Limos+Arcillas</b>	83.15	80.64	74.61	64.33	71.15
<b>Textura</b>	Limo	Limo	Franco-Limoso	Franco-Limoso	Franco-Limoso

## MUESTREO BP-C SENGUIO

Se localiza al noroeste de la cuenca del río Los Yugos a una altitud 2876 metros, con materiales de origen volcánico adesítico, temperatura media anual de 10-12 °C, precipitación media anual entre 800-1200 mm, una pendiente de 15°, suelos tipo Andosol y desarrollo de bosque de Pino (conservado).



## Propiedades físicas y químicas del suelo

Profundidad (cm)	0-11	11-18	18-31	31-60
Color seco	10YR 3/3	10YR 3/3	10YR 3/6	10YR 4/6
	marrón oscuro	marrón oscuro	café oscuro amarillento	café oscuro amarillento
Color húmedo	10YR 2/2	10YR 2/2	10YR 3/2	10YR 3/4
	muy negro	muy negro	marrón grisáceo muy oscuro	
Densidad aparente	0.71	0.77	0.79	0.82
Humedad a capacidad de campo %	107.66	98.38	96.82	95.50
Humedad Higroscópica %	12.32	12.99	14.13	17.04
Humedad capilar %	95.34	85.39	82.69	78.46
Humedad a punto de marchitez %	18.12	19.11	20.78	25.06
Humedad a punto de marchitez %	58.51	53.47	52.62	51.90
% Arenas	11.39	13.73	18.38	19.67
% Limos	86.72	85.36	81.20	79.86
% Arcillas	1.89	0.91	0.42	0.47
Limos+Arcillas	88.61	86.27	81.62	80.33
Textura	Limo	Limo	Limo	Limo

Profundidad (cm)	0-11	11-18	18-31	31-60
pH (agua destilada)	6.20	6.10	6.10	6.00
M.O. %	24.37	17.69	11.78	6.89
Nitrógeno %	0.77	0.75	1.52	
%C	15.33	11.21	7.58	4.52
CIC cmol/kg	90.05	88.82	88.22	64.02
C/N	19.84	14.94	34.78	

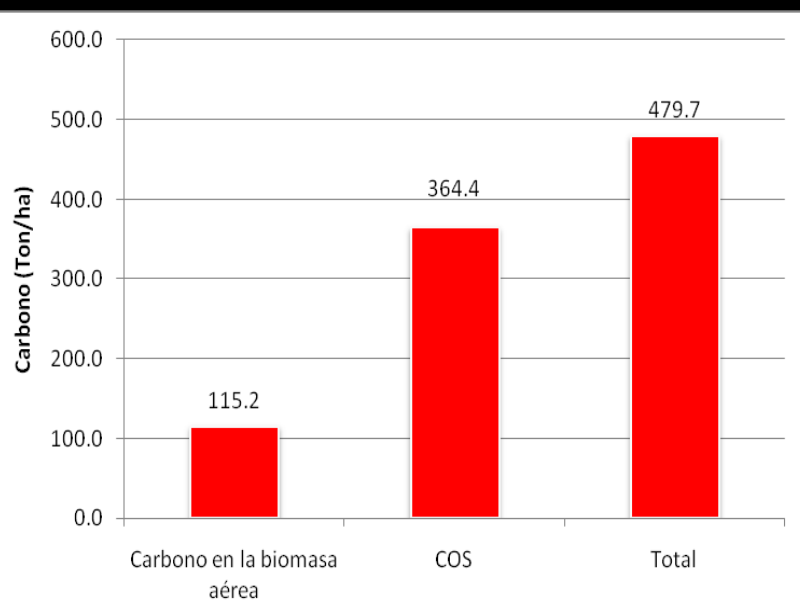
## Características del bosque de Pino

Densidad de arbolado: 50

Diámetro (cm): 78.8 ±27

Altura (m): 39.06±6

## Almacén de carbono

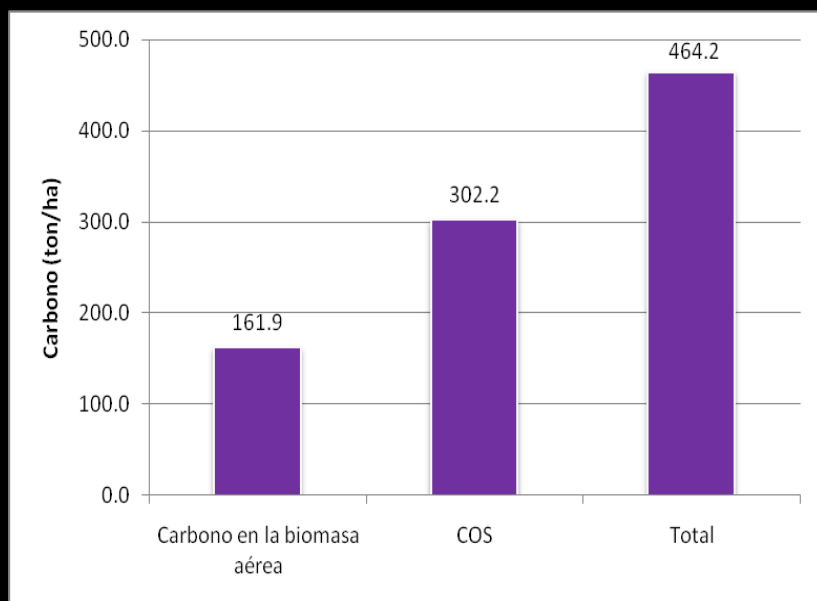


## MUESTREO BP-S1. SENGUO LABORES

Se localiza al noroeste de la cuenca del río Los Yugos a una altitud 2834 metros, con materiales de origen volcánico adésitico, temperatura media anual de 10-12 °C, precipitación media anual entre 800-1200 mm, una pendiente de 13°, suelos tipo Andosol y desarrollo de bosque de Pino (sucesión secundaria hace 55 años).



### Almacén de carbono



### Propiedades físicas y químicas del suelo

Profundidad (cm)	0-11	11- 24	24-38	38-52	52-65
<b>Color seco</b>	10YR 3/2	10YR 4/4	10YR 4/4	10YR 4/4	10YR 4/6
	marrón grisáceo muy oscuro	café oscuro amarillento	café oscuro amarillento	café oscuro amarillento	café oscuro amarillento
<b>Color húmedo</b>	10YR 2/1	10YR 2/2	10YR 2/2	10YR 3/4	10YR 3/6
	negro	marrón muy oscuro	marrón muy oscuro	marrón amarillento oscuro	marrón amarillento oscuro
<b>Densidad aparente</b>	0.33	0.85	0.87	0.83	0.84
<b>Humedad a capacidad de campo %</b>	174.32	77.90	79.76	81.13	87.13
<b>Humedad Higroscópica %</b>	12.92	9.44	11.70	1.23	10.62
<b>Humedad capilar %</b>	161.41	68.46	68.06	79.90	76.51
<b>Humedad a punto de marchitez %</b>	18.99	13.88	17.21	1.81	15.62
<b>Humedad a punto de marchitez %</b>	94.74	42.34	43.35	44.09	47.35
<b>% Arenas</b>	10.27	22.86	18.70	17.22	19.11
<b>% Limos</b>	87.97	76.78	80.24	82.72	80.71
<b>% Arcillas</b>	1.76	0.36	1.07	0.07	0.18
<b>Limos Arcillas</b>	89.73	77.14	81.30	82.79	80.89
<b>Textura</b>	Limo	Franco-Limoso	Limo	Limo	Limo

Profundidad (cm)	0-11	11- 24	24-38	38-52	52-65
<b>pH (agua destilada)</b>	4.40	5.80	5.90	6.00	6.00
<b>M.O. %</b>	13.19	11.30	9.46	6.71	4.73
<b>Nitrógeno %</b>	0.54	0.51	1.05		
<b>%C</b>	8.23	6.95	5.82	4.77	2.69
<b>CIC cmol/kg</b>	61.93	54.52	61.52	48.51	64.62
<b>C/N</b>	15.32	13.64	28.96		

### Características del bosque de Pino

Densidad de arbolado: 420

Diámetro (cm): 40.16 ±10

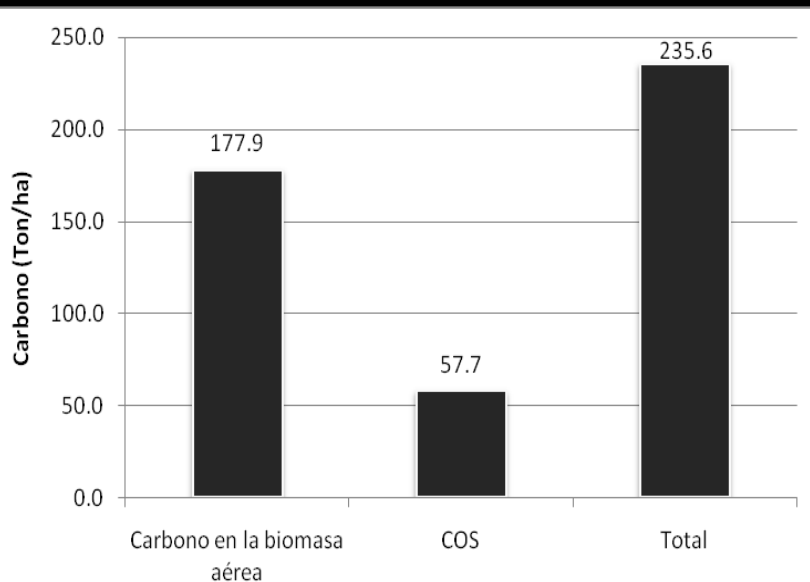
Altura (m): 33.28±5

## MUESTREO BP-Ref. SENGUO REFORESTACIÓN

Se localiza al noroeste de la cuenca del río Los Yugos a una altitud 3777 metros, con materiales de origen volcánico adésítico, temperatura media anual de 10-12 °C, precipitación media anual entre 800-1200 mm, una pendiente de 10°, suelos tipo Andosol y desarrollo de bosque de Pino (por reforestación hace 14 años).



### Almacén de carbono



### Propiedades físicas y químicas del suelo

Profundidad (cm)	0-13	13-22	22-32
Color seco	10YR 5/4	10YR 4/6	10YR 5/6
	pardo amarillento	café oscuro amarillento	pardo amarillento
Color húmedo	10YR 3/6	10YR 3/4	10YR 4/4
	marrón amarillento oscuro	marrón amarillento oscuro	marrón amarillento oscuro
Densidad aparente	0.96	0.98	0.97
Humedad a capacidad de campo %	51.96	55.43	59.86
Humedad Higroscópica %	7.53	8.31	8.53
Humedad capilar %	44.43	47.13	51.33
Humedad a punto de marchitez %	11.07	12.22	12.54
Humedad a punto de marchitez %	28.24	30.13	32.53
% Arenas	17.05	12.85	5.24
% Limos	80.63	84.94	89.92
% Arcillas	2.32	2.22	4.84
Limos+Arcillas	82.95	87.15	94.76
Textura	Limo	Limo	Limo

Profundidad (cm)	0-13	13-22	22-32
pH (agua destilada)	6.10	5.90	6.00
M.O. %	2.88	3.28	2.20
Nitrógeno %	0.34	0.37	0.70
%C	1.79	2.25	1.38
CIC cmol/kg	46.74	65.97	60.18
C/N	5.33	6.13	11.45

### Características del bosque de Pino

Densidad de arbolado: 980

Diámetro (cm): 24.86 ±10

Altura (m): 14.74±4

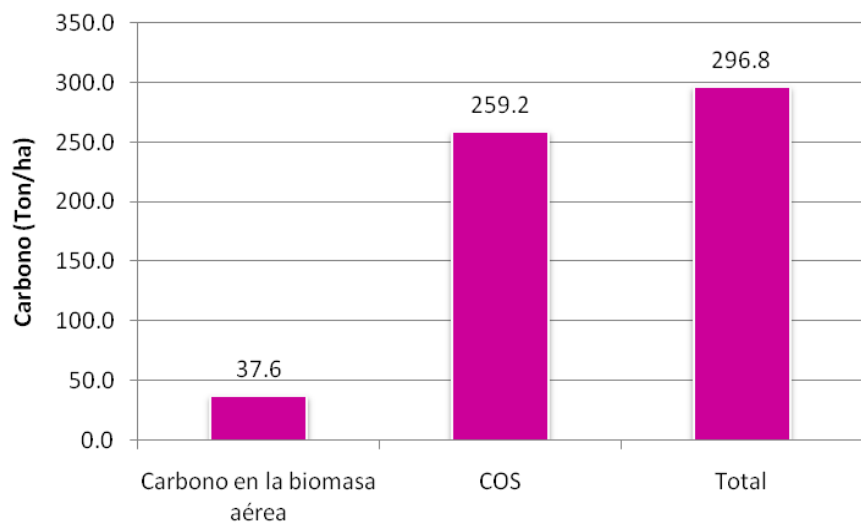


## MUESTREO Baii-S2. AGUA CALIENTE

Se localiza al noroeste de la cuenca del río Los Yugos a una altitud 3731 metros, con materiales de origen volcánico adésítico, temperatura media anual de 10-12 °C, precipitación media anual entre 800-1200 mm, una pendiente de 14°, suelos tipo Andosol y desarrollo de bosque de Aile (sucesión secundaria hace 14 años).



## Almacén de carbono



## Propiedades físicas y químicas del suelo

Profundidad (cm)	0-20	20-40
Color seco	10YR 3/4	10YR 3/3
	café oscuro amarillento	marrón oscuro
Color húmedo	10YR 2/2	10YR 2/1
	marrón muy oscuro	negro
Densidad aparente	0.90	0.88
Humedad a capacidad de campo %	85.09	76.62
Humedad Higroscópica %	11.72	11.65
Humedad capilar %	73.37	64.97
Humedad a punto de marchitez %	17.24	17.14
Humedad a punto de marchitez %	46.25	41.64
% Arenas	18.42	20.17
% Limos	80.23	78.53
% Arcillas	1.35	1.30
Limos+Arcillas	81.58	79.83
Textura	Limo	Franco-Limoso

Profundidad (cm)	0-20	20-40
pH (agua destilada)	5.80	6.10
M.O. %	14.23	8.80
Nitrógeno %	0.85	0.66
%C	8.25	5.10
CIC cmol/kg	71.20	64.84
C/N	9.75	7.76

## Características del bosque de Aile

Densidad de arbolado: 620

Diámetro (cm): 19.13 ±10

Altura (m): 14.72±8



**Cuadro 1. Descripción de las propiedades fisicoquímicas en los diferentes perfiles tipo en los sitios de muestreo.**

Muestreo	Color seco		Color húmedo		pH	M.O. %	Nitrógeno %	DA g*cm <sup>3</sup>	Humedad a capacidad de campo %	Humedad Higroscópica %	Humedad capilar %	Humedad a punto de marchitez %	Humedad a punto de marchitez %	%C	CIC cmol/kg	C/N	% Arenas	% Limos	% Arcillas	Textura
	10YR4/3	marrón oscuro	10YR2/2	muy negro																
0-15	10YR4/3	marrón oscuro	10YR2/2	muy negro	5.7	25.40	0.86	0.68	116.42	11.50	104.91	16.92	63.27	15.95	93.75	18.58	17.39	80.83	1.78	Limo
15-19	10YR4/3	marrón oscuro	10YR2/2	muy negro	6.1	10.40	0.64	0.85	90.32	12.01	78.30	17.66	49.08	6.49	73.44	10.13	10.38	87.94	1.69	Limo
29-40	10YR4/3	marrón oscuro	10YR2/2	muy negro	6.2	9.34	1.50	0.84	90.93	11.84	79.09	17.41	49.42	5.72	175.52	28.71	13.14	85.44	1.42	Limo
40-51	10YR4/4	café oscuro amarillento	10YR2/2	muy negro	6.3	6.33		0.87	81.77	12.69	69.09	18.66	44.44	3.89	40.81		14.90	80.12	4.98	Limo
Muestreo 2																				
0-11	10YR 3/2	marrón grisáceo muy oscuro	10YR 2/1	negro	4.4	13.19	0.54	0.33	174.32	12.92	161.41	18.99	94.74	8.23	61.93	15.32	10.27	87.9738	1.76	Limo
11 - 24	10YR 4/4	café oscuro amarillento	10YR 2/2	marrón muy oscuro	5.8	11.30	0.51	0.85	77.90	9.44	68.46	13.88	42.34	6.95	54.52	13.64	22.86	76.7788	0.36	Franco-Limoso
24-38	10YR 4/4	café oscuro amarillento	10YR 2/2	marrón muy oscuro	5.9	9.46	1.05	0.87	79.76	11.70	68.06	17.21	43.35	5.82	61.52	28.96	18.70	80.2368	1.07	Limo
38-52	10YR 4/4	café oscuro amarillento	10YR 3/4	marrón amarillento oscuro	6	6.71		0.83	81.13	1.23	79.90	1.81	44.09	4.77	48.51		17.22	82.7188	0.07	Limo
52-65	10YR 4/6	café oscuro amarillento	10YR 3/6	marrón amarillento oscuro	6	4.73		0.84	87.13	10.62	76.51	15.62	47.35	2.69	64.62		19.11	80.7128	0.18	Limo
Muestreo 3																				
0-11	10YR 3/3	marrón oscuro	10YR 2/2	muy negro	6.2	24.37	0.77	0.71	107.66	12.32	95.34	18.12	58.51	15.33	90.05	19.84	11.39	86.720	1.89	Limo
11 18	10YR 3/3	marrón oscuro	10YR 2/2	muy negro	6.1	17.69	0.75	0.77	98.38	12.99	85.39	19.11	53.47	11.21	88.82	14.94	13.73	85.362	0.91	Limo
18-31	10YR 3/6	café oscuro amarillento	10YR 3/2	marrón grisáceo muy oscuro	6.1	11.78	1.52	0.79	96.82	14.13	82.69	20.78	52.62	7.58	88.22	34.78	18.38	81.201	0.42	Limo
31-60	10YR 4/6	café oscuro amarillento	10YR 3/4	café oscuro amarillento	6	6.89		0.82	95.50	17.04	78.46	25.06	51.90	4.52	64.02		19.67	79.863	0.47	Limo

Muestreo	Color seco		Color húmedo		pH	M.O. %	Nitrógeno %	DA g/cm <sup>3</sup>	Humedad a capacidad de campo %	Humedad Higroscópica %	Humedad capilar %	Humedad a punto de marchitez %	Humedad a punto de marchitez %	%C	CIC Cmol/kg	C/N	% Arenas	% Limos	% Arcillas	Textura
0-13	10YR 5/4	pardo amarillento	10YR 3/6	marrón amarillento oscuro	6.1	2.88	0.34	0.96	51.96	7.53	44.43	11.07	28.24	1.79	46.74	5.33	17.05	80.63	2.32	Limo
13-22	10YR 4/6	café oscuro amarillento	10YR 3/4	marrón amarillento oscuro	5.9	3.28	0.37	0.98	55.43	8.31	47.13	12.22	30.13	2.25	65.97	6.13	12.85	84.94	2.22	Limo
22-32	10YR 5/6	pardo amarillento	10YR 4/4	marrón amarillento oscuro	6	2.20	0.70	0.97	59.86	8.53	51.33	12.54	32.53	1.38	60.18	11.45	5.24	89.92	4.84	Limo
Muestreo 5																				
0-20	10YR 3/4	café oscuro amarillento	10YR 2/2	marrón muy oscuro	5.8	14.23	0.85	0.90	85.09	11.72	73.37	17.24	46.25	8.25	71.20	9.75	18.42	80.23	1.35	Limo
20-40	10YR 3/3	marrón oscuro	10YR 2/1	negro	6.1	8.80	0.66	0.88	76.62	11.65	64.97	17.14	41.64	5.10	64.84	7.76	20.17	78.53	1.30	Franco-Limoso
Muestreo 6																				
0-7	10YR 3/3	marrón oscuro	10YR 2/1	negro	6	25.21	0.52	0.69	141.92	13.08	128.83	19.24	77.13	15.93	61.76	30.62	8.77	88.50	2.73	Limo
7-15	10YR 5/3	marrón	10YR 3/3	marrón oscuro	6	8.57	0.39	0.81	84.58	10.59	73.99	15.57	45.97	5.31	53.20	13.73	13.43	84.54	2.03	Limo
15-28	10YR 5/4	pardo amarillento	10YR 3/4	marrón amarillento oscuro	6	4.61	0.91	0.86	73.42	12.94	60.49	19.02	39.90	2.93	46.73	44.35	20.10	79.07	0.83	Franco-Limoso
28-40	10YR 5/4	pardo amarillento	10YR 3/4	marrón amarillento oscuro	6	4.71		0.89	75.96	10.25	65.71	15.07	41.28	2.92	66.21		19.81	78.83	1.36	Limo
40-77	10YR 6/4	marrón ligeramente amarillento	10YR 3/4	marrón amarillento oscuro	5.9	5.10		0.95	71.40	11.60	59.80	17.06	38.80	3.17	55.57		21.22	78.36	0.41	Franco-Limoso

Muestreo 7	Color seco		Color húmedo		pH	M.O. %	Nitrógeno %	DA g*cm <sup>3</sup>	Humedad a capacidad de campo %	Humedad Higroscópica %	Humedad capilar %	Humedad a punto de marchitez %	Humedad a punto de marchitez %	%C	CIC cmol/kg	C/N	% Arenas	% Limos	% Arcillas	Textura
0-6	10Y R 3/3	marrón oscuro	10YR 2/1	negro	5.5	27.84	1.06	0.30	93.35	13.08	80.28	19.23	50.74	19.47	95.88	18.39	16.85	80.83	2.32	Limo
6-11	10Y R 5/3	marrón	10YR 2/2	marrón muy oscuro	5.8	10.54	0.57	0.82	84.42	13.04	71.38	19.18	45.88	6.69	67.94	11.75	19.36	79.43	1.21	Limo
11-30	10Y R 5/3	amarillento marrón	10YR 3/4	marrón amarillento oscuro	5.8	4.77	1.63	0.96	69.42	10.16	59.27	14.94	37.73	2.97	53.37	30.14	25.39	74.23	0.38	Franco-Limoso
30-58	10Y R 6/4	marrón ligeramente amarillento	10YR 3/6	marrón amarillento oscuro	6	2.85		0.98	58.62	7.19	51.43	10.57	31.86	2.77	37.23		35.68	63.07	1.25	Franco-Limoso
58-77	10Y R 6/4	marrón ligeramente amarillento	10YR 3/6	marrón amarillento oscuro	6.1	3.13		1.02	59.84	7.26	52.58	10.68	32.52	1.85	55.33		28.85	69.76	1.40	Franco-Limoso

**Cuadro 2. Coeficientes de correlación entre las variables edáficas fisicoquímicas evaluadas. Datos estandarizados (LOG 10)**

	Carbono %	Humedad a capacidad de campo %	Humedad higroscópica	Humedad capilar %	Humedad a punto de marchitez %	Humedad a punto de marchitez %	CIC cmol/kg	% Arenas	% Limos	% Arcillas	Densidad	Nitrógeno	pH	MO %	Profundidad (cm)
Carbono %	1.00	<b>0.78</b>	0.34	0.77	0.33	<b>0.78</b>	0.54	-0.23	0.36	0.05	<b>-0.72</b>	<b>0.78</b>	-0.25	<b>0.99</b>	<b>-0.80</b>
Humedad a capacidad de campo %	<b>0.78</b>	1.00	0.39	<b>0.99</b>	0.38	1.00	0.42	-0.37	0.49	-0.01	<b>-0.75</b>	0.37	-0.51	<b>0.80</b>	-0.46
Humedad higroscópica	0.34	0.39	1.00	0.29	<b>1.00</b>	0.39	0.36	-0.13	0.18	0.19	-0.28	0.65	-0.11	0.38	-0.27
Humedad capilar %	<b>0.77</b>	0.99	0.29	1.00	0.28	0.99	0.39	-0.38	0.49	-0.02	<b>-0.75</b>	0.35	-0.52	<b>0.78</b>	-0.46
Humedad a punto de marchitez %	0.33	0.38	<b>1.00</b>	0.28	1.00	0.38	0.35	-0.13	0.17	0.20	-0.27	0.65	-0.11	0.37	-0.27
Humedad a punto de marchitez %	<b>0.78</b>	<b>1.00</b>	0.39	<b>0.99</b>	0.38	<b>1.00</b>	0.41	-0.37	0.49	-0.01	<b>-0.75</b>	0.37	-0.51	<b>0.80</b>	-0.46
CIC cmol/kg	0.54	0.42	0.36	0.39	0.35	0.41	1.00	-0.31	0.45	-0.01	-0.36	<b>0.87</b>	-0.01	0.56	-0.28
% Arenas	-0.23	-0.37	-0.13	-0.38	-0.13	-0.37	-0.31	1.00	<b>-0.91</b>	-0.60	0.29	0.17	0.12	-0.25	0.44
% Limos	0.36	0.49	0.18	0.49	0.17	0.49	0.45	<b>-0.91</b>	1.00	0.33	-0.36	-0.13	-0.14	0.40	-0.47
% Arcillas	0.05	-0.01	0.19	-0.02	0.20	-0.01	-0.01	-0.60	0.33	1.00	-0.14	-0.10	0.01	0.04	-0.38
Densidad	<b>-0.72</b>	<b>-0.75</b>	-0.28	<b>-0.75</b>	-0.27	<b>-0.75</b>	-0.36	0.29	-0.36	-0.14	1.00	-0.48	0.69	-0.70	0.63
Nitrógeno	<b>0.78</b>	0.37	0.65	0.35	0.65	0.37	<b>0.87</b>	0.17	-0.13	-0.10	-0.48	1.00	-0.07	<b>0.78</b>	-0.18
pH	-0.25	-0.51	-0.11	-0.52	-0.11	-0.51	-0.01	0.12	-0.14	0.01	0.69	-0.07	1.00	-0.25	0.38
MO %	<b>0.99</b>	<b>0.80</b>	0.38	<b>0.78</b>	0.37	0.80	0.56	-0.25	0.40	0.04	<b>-0.70</b>	<b>0.78</b>	-0.25	1.00	-0.66
Profundidad (cm)	<b>-0.80</b>	-0.46	-0.27	-0.46	-0.27	-0.46	-0.28	0.44	-0.47	-0.38	0.63	-0.18	0.38	-0.66	1.00