



COLEGIO DE POSTGRADUADOS

INSTITUCION DE ENSEÑANZA E INVESTIGACIÓN EN CIENCIAS AGRÍCOLAS

CAMPUS MONTECILLO

POSTGRADO DE EDAFOLOGIA

**CARBONO EN BIOMASA AÉREA, EN SUELO
Y SU RELACIÓN CON LA FRACCIÓN FINA
DE ESTE RESERVORIO**

ESTRADA HERRERA ISABEL DEL RAYO

TESIS

PRESENTADA COMO REQUISITO PARCIAL
PARA OBTENER EL GRADO DE:

MAESTRA EN CIENCIAS

MONTECILLO, TEXCOCO, EDO. DE MÉXICO

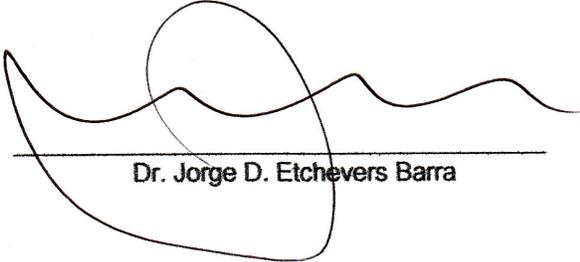
2007

La presente tesis titulada: Carbono en biomasa aérea, en suelo y su relación con la fracción de este reservorio realizada por la alumna: Isabel del Rayo Estrada Herrera bajo la dirección del Consejo Particular indicado, ha sido aprobada por el mismo y aceptada como requisito parcial para obtener el grado de:

MAESTRA EN CIENCIAS
EN EDAFOLOGIA

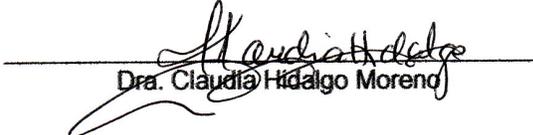
CONSEJO PARTICULAR

CONSEJERO



Dr. Jorge D. Etchevers Barra

ASESOR



Dra. Claudia Hidalgo Morend

ASESOR



Dr. Fernando de León González

Montecillo, Texcoco, México, Octubre de 2007.

CARBONO EN BIOMASA AÉREA, EN SUELO Y SU RELACIÓN CON LA FRACCIÓN FINA DE ESTE RESERVORIO

Isabel del Rayo Estrada Herrera, M. C.

Colegio de Postgraduados, 2007

Con el propósito de analizar el potencial de captura en la parte aérea del sistema MIAF (Milpa Intercalada con Árboles Frutales) y PAP (Parcelas de Alta Productividad), los suelos más representativos fueron investigados y clasificados de acuerdo con los sistemas Taxonomía de Suelos (Soil Survey Staff, 2003) y WRB (FAO-ISRIC-SICS, 1999); de acuerdo con el primer sistema, los suelos de las tres microcuencas se clasificaron como Inceptisoles; los de las microcuencas Mazateca y Mixe, fueron *Humic Dystrudepts* y el de la Cuicateca *Typic Hapludepts*. De acuerdo al segundo, los dos primeros resultaron ser Umbrisoles con propiedades ferráticas y el de la Cuicateca un Cambisol hiperferrático. Otro objetivo de esta investigación fue estimar el contenido de carbono en la biomasa aérea de los árboles frutales de ambos sistemas por un lapso de 3 años. Los resultados mostraron que el potencial para capturar carbono es de al menos 1 tonelada (Mg) por hectárea por año con café y de hasta 1.7 para durazno. Por otro lado, se estudió la dinámica de la distribución del carbono en las distintas fracciones del suelo en dos sistemas de uso de suelo contrastantes (agrícola (labranza tradicional) y natural (bosques)) en estas mismas regiones; para lo cual se fraccionó el suelo mediante tamizado en húmedo para fracciones mayores a 250 micras y por dispersión con sonda ultrasónica en diferentes tiempos y sedimentación para todas las fracciones. Las recuperaciones fueron entre 95 y 100 %, la mayor dispersión del suelo se obtuvo después de los 40 minutos de aplicación de energía (910 J/mL); la distribución de carbono en las fracciones de los suelos, mostró que ambos se asocian mayormente con las fracciones limo y arcilla del suelo. La difracción de rayos X de los suelos, sin fraccionar, indicó que el cuarzo es el mineral predominante en el suelo y la fracción fina (< 2 μm) está constituida por arcillas silicatadas cristalinas.

Palabras Clave: carbono, suelos, clasificación, biomasa aérea, fraccionamiento.

CARBON IN AERIAL BIOMASS, IN THE SOIL, AND ITS RELATION WITH THE FINE FRACTION OF THIS RESERVOIR

Isabel del Rayo Estrada Herrera, M.C.

Colegio de Postgraduados, 2007

With the purpose of analyzing the capture potential of the aerial part of the MIAF (Corn and fruit trees) and PAP (High productivity parcels) systems, the most representative soils were researched and classified according to the Soil Taxonomy (Soil Survey Staff, 2003) and WRB (FAO-ISRIC-SICS, 1999) systems. According to the first system, the soils of the three micro-basins were classified as Inceptisoles: those from the Mazateca and Mixe basins were *Humic Dystrudepts*, and the one from the Cuicateca basin was *Typic Hapludepts*. According to the second system, the first two soils were Umbrisoles with ferralic properties, and the one from the Cuicateca basin was a hyperferralic Cambisol. Another objective of this research was to estimate the carbon content in the aerial biomass of fruit trees in both systems for a three-year period. The results showed that the potential of carbon capture is at least one metric ton (Mg) per hectare per year in coffee, and 1.7 in peach. On the other hand, the dynamics of carbon distribution with the different soil fractions was studied in two contrasting soil use systems, agricultural (traditional farming) and natural (forests), in these same regions. To do this, the soil was fractioned through humid sifting for fractions greater than 250 micras, and through dispersion with an ultrasonic probe at different times and sedimentation for all fractions. Recuperations were between 95 and 100%. The greatest soil dispersion was obtained after 40 minutes of energy application (910 J/mL). Carbon distribution in the soil fractions showed that both are mainly related with the fractions silt and clay of the soil. X-ray diffraction of the unfractioned soils showed that quartz is the most predominant mineral in the soil and the fine fraction (< 2 μm) is made up of crystalline silicate clays.

Key words: carbon, soils, classification, aerial biomass, fractioning.

AGRADECIMIENTOS

A Dios, por brindarme la oportunidad de seguir viviendo y superarme... por todas sus bendiciones...

A mis padres y hermanos...

A DRJ por tu incondicional apoyo e inmenso amor...

Al Colegio de Postgraduados, por otorgarme un espacio para realizar mis estudios de posgrado.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) por el financiamiento para la realización de mis estudios de posgrado.

Al Dr. Jorge Etchevers, a la Dra. Claudia Hidalgo y al Dr. Fernando de León, por su apoyo, asesoría y dirección en el desarrollo de esta investigación y de mis estudios.

A Lulú, Jesús Valencia, Mayra Venegas, Andrea Chocobar, Prudencio Claro y Patricio Sánchez, por todo su apoyo en el laboratorio y en la realización del trabajo de campo de esta investigación.

A la M.C. Juliana Padilla por las facilidades prestadas en el laboratorio de fertilidad de suelos para la realización de la parte experimental de esta investigación.

DEDICATORIAS

A mis Padres; Paulina y Sabino con amor, para ellos mis logros...

A mis hermanos, Armando, Lourdes, Cristina, Javier y Laura... cuando se quiere... se puede... aunque eso no significa que será sencillo...

Con especial amor a mis niñas y niños, Jonathan, Wendy, Nancy, Viri, Diana (siempre mi princesa), Azucena, Dana, Irving, Mariana, Ami, Dany... por contagiarme de su alegría de vivir y recordarme el valor de una sonrisa y el de un llanto...

Con infinito amor a Donato, por ser pilar central en mi vida... por acompañarme siempre, primero como un sueño y después como una realidad... por compartir conmigo la etapa más hermosa de mi vida... y por muchísimo más...

A mi bebe... Abril Donají... que me recuerda el milagro de la vida... a ti que eres mi principal motivo de inspiración y de superación...

A mis amigos, los que están y a los que se fueron...por su amistad incondicional... por que nada es eterno y siempre ocuparan una parte muy especial en mi corazón...

A los compañeros, que compartieron esta etapa de mi formación... mis mejores deseos para ellos siempre...

A todos aquellos que siempre confiaron en mi y me brindaron una palabra de aliento en los momentos difíciles...

INDICE GENERAL

	Página
I. INTRODUCCIÓN	1
II. REVISIÓN DE LITERATURA	3
2.1. Clasificación y colección de suelos.....	3
2.2. El carbono en la atmósfera	4
2.2.1. El CO ₂ y el Efecto Invernadero.....	6
2.3. El Ciclo del Carbono.....	9
2.4. Captura de carbono.....	11
2.5. El carbono en las plantas	12
2.5.1. Uso de ecuaciones alométricas en la estimación de carbono en biomasa aérea.....	15
2.6. El carbono en el Suelo	16
2.7. Formas de Carbono en el suelo	20
2.8. Agregación como mecanismo físico de protección de la materia orgánica del suelo...	22
2.9. El Carbono y los complejos organo-minerales del suelo.....	23
III. OBJETIVOS	26
IV. HIPÓTESIS	27
V. MATERIALES Y MÉTODOS	28
5.1. Descripción, caracterización, clasificación y preservación de los suelos de sitios experimentales seleccionados.....	30
5.2. Carbono acumulado en la biomasa aérea de árboles frutales.....	32
5.3. Carbono en distintas fracciones de tamaño del suelo.....	37
5.4. Determinación de la mineralogía del suelo.....	41
5.5. Diseño Experimental y análisis estadístico.....	43
VI. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	44
6.1. Descripción, caracterización, clasificación y preservación de los suelos de las de las experimentales seleccionadas.....	44
6.2. Carbono acumulado en la biomasa aérea de árboles frutales.....	51
6.3. Carbono en diferentes fracciones de tamaño del suelo.....	56
6.4. Caracterización mineralógica del suelo y su relación con el carbono del suelo.....	78
VII. CONCLUSIONES	91
VIII. LITERATURA CONSULTADA	92
IX. ANEXO	106

ÍNDICE DE CUADROS

		Página
Cuadro 1	Gases de efecto invernadero (Fuente. INE, 2004).....	7
Cuadro 2	Sistemas de uso de suelo seleccionados en cada microcuenca de Oaxaca.....	37
Cuadro 3	Tiempo de sonicación y energía aplicada para la dispersión de las muestras.....	39
Cuadro 4	Ejemplo de secuencia de la sonda.....	40
Cuadro 5	Características morfológicas de tres suelos de la Sierra Norte de Oaxaca donde se realizan estudios agronómicos y de captura de carbono.....	45
Cuadro 6	Características físicas de tres suelos de la Sierra Norte de Oaxaca donde se realizan estudios agronómicos y de captura de carbono.....	46
Cuadro 7	Propiedades químicas de tres suelos de la Sierra Norte de Oaxaca donde se realizan estudios agronómicos y de captura de carbono.....	47
Cuadro 8	Horizontes de diagnóstico y regímenes de humedad y temperatura identificados en tres suelos de la Sierra Norte de Oaxaca donde se realizan estudios agronómicos y de captura de carbono.....	49
Cuadro 9	Clasificación según los criterios de la Taxonomía de Suelos en tres suelos de la Sierra Norte de Oaxaca donde se realizan estudios agronómicos y de captura de carbono.....	50
Cuadro 10	Clasificación según los criterios de la Base de Referencia Mundial del Recurso Suelo (WRB) de tres suelos de la Sierra Norte de Oaxaca donde se realizan estudios agronómicos y de captura de carbono.....	50
Cuadro 11	Carbono acumulado en la biomasa aérea de los árboles frutales en los sistemas MIAF e incremento medio anual en la región Mazateca.....	52
Cuadro 12	Carbono acumulado en la biomasa aérea de los árboles frutales en los sistemas PAP e incremento medio anual en la región Mazateca.....	52
Cuadro 13	Carbono acumulado en la biomasa aérea de los árboles frutales en los sistemas MIAF e incremento medio anual en la región Cuicateca.....	53
Cuadro 14	Carbono acumulado en la biomasa aérea de los árboles frutales en los sistemas PAP e incremento medio anual en la región Cuicateca.....	54
Cuadro 15	Carbono acumulado en la biomasa aérea de los árboles frutales en los sistemas MIAF e incremento medio anual en la región Mixe.....	54
Cuadro 16	Carbono acumulado en la biomasa aérea de los árboles frutales en los sistemas MIAF e incremento medio anual en la región Mixe.....	55
Cuadro 17	Fraccionamiento del suelo total en los sistemas agrícola y natural de la región Mazateca.....	57
Cuadro 18	Ecuaciones asociadas a los porcentajes de recuperación de las fracciones separadas en los sistemas agrícola y natural de la región Mazateca.....	60

Cuadro 19	Fraccionamiento del suelo total en los sistemas agrícola y natural de la región Cuicateca.....	61
Cuadro 20	Ecuaciones asociadas a los porcentajes de recuperación de las fracciones separadas en los sistemas agrícola y natural de la región Cuicateca.....	63
Cuadro 21	Dinámica del fraccionamiento del suelo total en los sistemas agrícola y natural de la región Mixe.....	64
Cuadro 22	Ecuaciones asociadas a los porcentajes de recuperación de las fracciones separadas en los sistemas agrícola y natural de la región Mixe.....	66
Cuadro 23	Dinámica del carbono en el suelo y fracciones del suelo en los sistemas labranza tradicional y bosque de liquidámbar en la región Mazateca.....	67
Cuadro 24	Dinámica del carbono en el suelo y fracciones del suelo en los sistemas labranza tradicional y bosque de encino en la región Cuicateca.....	70
Cuadro 25	Dinámica del carbono en el suelo y fracciones del suelo en los sistemas labranza tradicional y bosque de pino en la región Mixe.....	72
Cuadro 26	Carbono en fracciones del suelo en los sistemas y regiones estudiados.....	75
Cuadro 27	Arcillas de los suelos de Oaxaca y carbono asociado en la fracción < 2 μm	88

ÍNDICE DE FIGURAS

	Página
Figura 1	Efecto invernadero. (Fuente: ONI, 2003)..... 6
Figura 2	Estimación del ciclo mundial del carbono. 11
Figura 3	Modelo de la dinámica del carbono en el suelo (Balesdent <i>et al</i> , 2000)... 18
Figura 4	Procesos de la pedosfera que afectan la dinámica del COS (Lal <i>et al.</i> , 1998)..... 19
Figura 5	Ubicación de la materia orgánica en la matriz del suelo. (Chone <i>et al.</i> , 1991)..... 23
Figura 6	Ubicación de la zona de estudio..... 28
Figura 7	Filtro de rastrojo en el sistema MIAF..... 33
Figura 8	Sistema de poda en árboles frutales de Durazno (A) y Café (B)..... 34
Figura 9	Sistema de poda en árboles frutales de Durazno (A) y Café (B)..... 35
Figura 10	Perfiles estudiados en las tres microcuencas..... 44
Figura 11	Difractogramas de los minerales primarios de los suelos de las regiones Mazateca y Cuicateca (A) y Mixe (B), de la Sierra Norte de Oaxaca. Muestras de suelo total en polvo desorientado, radiación $CuK\alpha$ 48
Figura 12	Monolitos preservados de los tres sitios experimentales estudiados en las tres microcuencas..... 51
Figura 13	Carbono acumulado en la biomasa aérea de los árboles frutales en los sistemas MIAF (a) y PAP (b) e incremento medio anual en la región Mazateca..... 53
Figura 14	Carbono acumulado en la biomasa aérea de los árboles frutales en los sistemas MIAF(a) y PAP (b) e incremento medio anual en la región Cuicateca..... 54
Figura 15	Carbono acumulado en la biomasa aérea de los árboles frutales en los sistemas MIAF (a) y PAP (b) e incremento medio anual en la región Mixe..... 56
Figura 16	Efecto de la aplicación de energía en la fracción menor a 250 μm en los sistemas (A) labranza tradicional y (B) bosque de liquidámbar en la región Mazateca..... 58
Figura 17	Efecto de la aplicación de energía en la fracción menor a 250 μm en los sistemas (A) labranza Tradicional y (B) bosque de encino en la región Cuicateca..... 62
Figura 18	Efecto de la aplicación de energía en la fracción menor a 250 μm en los sistemas (A) labranza tradicional y (B) bosque de pino en la región Mixe..... 65

Figura 19	Dinámica del carbono en fracciones < 250 μm en los sistemas (A) labranza tradicional y (B) bosque de liquidámbar en la región Mazateca.....	69
Figura 20	Dinámica del carbono en fracciones < 250 μm en los sistemas (A) labranza tradicional y (B) bosque de encino en la región Cuicateca.....	71
Figura 21	Dinámica del carbono en fracciones < 250 μm en los sistemas (A) labranza tradicional y (B) bosque de pino en la región Mixe.....	74
Figura 22	Distribución de carbono en fracciones de suelo, (a) sistemas agrícolas (LT) y (b) bosques, de las regiones Cuicateca, Mazateca y Mixe.....	77
Figura 23	LT, Mazateca, Natural.....	79
Figura 24	LT, Mazateca, Saturación con EG.....	79
Figura 25	LT, Mazateca, Saturación con K y calentamiento a 300°.....	80
Figura 26	LT, Mazateca Calentamiento a 490°.....	80
Figura 27	BL, Mazateca, Natural.....	80
Figura 28	BL, Mazateca, Saturación con EG.....	80
Figura 29	BL, Mazateca, Saturación con K y calentamiento a 300°.....	81
Figura 30	Mazateca, Calentamiento a 490°.....	81
Figura 31	LT, Cuicateca, Natural.....	82
Figura 32	LT, Cuicateca, Saturación con EG.....	82
Figura 33	LT, Cuicateca, Calentamiento a 550°.....	82
Figura 34	LT, Cuicateca, Calentamiento 490°.....	82
Figura 35	BE, Cuicateca, Natural.....	83
Figura 36	BE, Cuicateca, Saturación con EG.....	83
Figura 37	BE, Cuicateca, saturación con K calentamiento a 300°.....	84
Figura 38	BE, Cuicateca, calentamiento a 550°.....	84
Figura 39	BE, Cuicateca, Calentamiento a 490°.....	84
Figura 40	LT, Mixe, Natural.....	85
Figura 41	LT, Mixe, Saturación con EG.....	85
Figura 42	LT, Mixe, Calentamiento a 490°.....	85
Figura 43	LT, Mixe, Calentamiento a 550°.....	85
Figura 44	LT, Mixe, Saturación con K y calentamiento a 300°.....	86
Figura 45	BP, Mixe, Natural.....	86
Figura 46	BP, Mixe, Saturación con EG.....	86
Figura 47	BP, Mixe, Calentamiento a 490°.....	87
Figura 48	BP, Mixe, Saturación con K y calentamiento a 300°.....	87
Figura 49	BP, Mixe, Calentamiento a 550°.....	87

I. INTRODUCCIÓN

El suelo es un elemento natural de importancia máxima para la vida de los seres vivos. Además de brindar un medio adecuado para el desarrollo de las plantas, tiene capacidad de purificar, almacenar y regular el abasto de agua, y de acumular carbono y retenerlo por largos periodos de tiempo, detoxificar los residuos urbanos y transformar los residuos orgánicos que la agricultura genera, además de constituir un elemento fundamental del paisaje (Swift, 2001).

Un problema que ha venido preocupando a la sociedad actual, es el aumento en la atmósfera de la concentración de ciertos gases, llamados gases de efecto invernadero (GEI), en especial de la porción de éstos generados por las actividades humanas. La concentración de los GEI, entre ellos el CO₂, ha incrementado a nivel global, lo cual ha provocado alteraciones en los ciclos climáticos de la tierra y el efecto invernadero. Dichos cambios han hecho necesario adoptar medidas tendientes a reducir las emisiones de los GEI (IPCC, 2007) en los distintos sectores de la actividad económica responsables de su generación. Existen estudios que muestran el carbono atmosférico emitido por las actividades antrópicas es capturado por el suelo (Lal *et al.*, 1997, Ingram, 2000, FAO, 2002; Antonie, 2001; DOE, 2003) y que éste puede actuar como un almacén semipermanente del carbono capturado por las plantas. El estudio de los compuestos orgánicos del suelo requiere su división en compartimentos o fracciones que proporcionen información acerca de su ubicación y tiempo de residencia (Buyanovsky *et al.*, 1994, Gaudinski *et al.*, 2000). Estos compartimentos constituyen un factor importante para el desarrollo de la agricultura sustentable, y son fundamentales para el crecimiento y desarrollo de la vegetación natural, la producción sostenida de cultivos y la investigación en la acumulación de reservas orgánicas del suelo para restaurar el capital natural del suelo (De León y Etchevers, 1999).

Entre los mecanismos de captura de carbono, los bosques han recibido especial atención, porque generalmente cubren extensas superficies, son eficientes en esta función y su propiedad está concentrada, todo lo cual facilita las transacciones comerciales derivadas de la posible comercialización de los bonos de carbono (SEMARNAT, 2006. www.geimexico.org/downs/documentos/MDL_Acdos_ene06.pdf). En este contexto las plantaciones de especies frutales han sido escasamente consideradas como una opción para disminuir la concentración de CO₂ en la atmósfera, a pesar que pudiesen traer beneficios adicionales a la captura de carbono,

como son el aumento de los ingresos a los productores por concepto de comercialización de la fruta, incremento en los recursos alimenticios para el núcleo familiar y, en general, mayor bienestar en el campo. Con el propósito de explorar esta posibilidad, el Colegio de Postgraduados inició en 1998, con el apoyo de la SAGARPA, la Global Environmental Facility (GEF)/ Banco Mundial y el Gobierno del Estado de Oaxaca, el Proyecto Manejo Sustentable de Laderas (PMSL) en algunas comunidades indígenas de la Sierra Norte de dicho Estado. Los objetivos que se planteó el PMSL, entre otros de carácter socioeconómico, fueron estudiar el potencial de producción de biomasa y captura carbono de sistemas tradicionales y de nuevas propuestas tecnológicas que incorporaban a los árboles frutales junto a la producción de granos básicos (maíz asociado con árboles frutales, MIAF) e investigar la cantidad de carbono que podía ser almacenado en el suelo como consecuencia de estas prácticas, con respecto a las tradicionales. Durante el desarrollo del proyecto se han evaluado: los almacenes de carbono en el suelo en los sistemas mencionados y en otros sistemas forestales típicos de la zona de acción el PMSL, así como en la biomasa que generan los sistemas MIAF y tradicional, resultados que se han reportado en tesis de licenciatura, maestría y doctorado (Acosta, 2003; Estrada 2003; Figueroa, 2001). Resultados preliminares de este proyecto indican que las parcelas experimentales con durazno, pueden secuestrar entre 1 y 2 ton C ha⁻¹ año⁻¹ en la biomasa aérea de los árboles frutales, gracias a la alta densidad de plantación (1000 árboles por ha⁻¹) (PMSL, 2004).

La presente investigación tiene por objetivo caracterizar y clasificar los suelos de los principales sitios experimentales del PMSL en las regiones de estudio de dichos sitios, así como determinar la cantidad de carbono presente en la biomasa aérea de árboles frutales en parcelas experimentales de Maíz Intercalado con Árboles Frutales (MIAF) y en parcelas MIAF establecidas en terrenos de productores o Parcelas de Alta Productividad (PAP) y medir la cantidad de carbono en el suelo y en la fracción fina de este reservorio en dos sistemas de uso de suelo contrastantes (natural y agrícola).

II. REVISIÓN DE LITERATURA

En esta revisión se abordará el estado del conocimiento actual acerca de los suelos de algunas regiones de la Sierra Norte de Oaxaca, particularmente de las regiones étnicas denominadas, Mazateca, Cuicateca y Mixe, donde se encuentran ubicados los sitios experimentales en las que se establecieron las parcelas de investigación (MIAF experimental) y parcelas en terrenos de los productores (Parcelas de Alta Productividad o PAP) del Proyecto Manejo Sustentable de Laderas; el asunto de la captura de carbono en la parte aérea de cultivos permanentes y en el suelo y finalmente la ubicación del carbono que se acumula en el suelo en las estructuras de éste.

2.1. Clasificación, caracterización y colección de suelos

Conocer las propiedades, características y la clasificación apropiada de los suelos cultivados es imprescindible para su mejor manejo y aprovechamiento y para extrapolar la información generada en un sitio a otros con características similares. Además, permite entender y explicar los procesos que en él tienen lugar. La clasificación de los suelos y la preservación permanente de los perfiles de suelos empleados para este propósito, en particular de sitios experimentales, constituyen una ayuda valiosa como referente para estudios posteriores en el sitio, como antecedente para comunicar con precisión los resultados y como útil ayuda visual en la enseñanza de la ciencia del suelo. Los suelos estudiados y clasificados, corresponden a tres sitios experimentales instalados en microcuencas experimentales de las regiones Mazateca, Cuicateca y Mixe de la Sierra Norte de Oaxaca. Los suelos de la Sierra Norte del Estado de Oaxaca han sido clasificados por el Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática (INEGI) como Luvisoles, Rendzinas, Feozem, Cambisoles y Acrisoles (INEGI, 1999). Observaciones preliminares no detalladas en las zonas de interés experimental, indican que los suelos no corresponden con las unidades arriba mencionadas, probablemente por problemas de escala y de mapeo. Bautista *et al.* (2004) reportaron que en una zona intermedia entre la región Cuicateca y la Mixe de la Sierra Norte de Oaxaca, la existencia de Inceptisoles y Entisoles. En suelos con pendiente irregular es frecuente que se favorezcan procesos de erosión y sedimentación similares a los que ocurren en depresiones cerradas (Birkeland, 1984). Esto hace que la definición de algunas de sus características, como son la edad del suelo y ciertas propiedades físicas y químicas, constituya un problema.

La preservación de un suelo se hace mediante la confección de monolitos permanentes con los perfiles de los sitios. Por definición, monolito de suelo es una sección vertical de un perfil de suelo, que es removida y montada con fines demostrativos y de estudio que se emplea como ayuda visual en la enseñanza de la ciencia del suelo, ya que éste incrementa el nivel de percepción de sus características (van Baren y Bommer, 1982) y como referencia histórica. La información que proporciona un monolito y la correspondiente a su entorno, permite tener una idea de las limitaciones y potencialidades del suelo, y de la problemática edáfica de la región de estudio.

Los primeros monolitos de suelos fueron colectados en Rusia durante las últimas décadas del siglo XIX y fueron expuestos en Chicago en 1893-1894 en una exposición internacional (Hodgson, 1978). De este modo se introdujo el método de colección y preservación de perfiles de suelo en los Estados Unidos de Norteamérica. Posteriormente, en el Primer Congreso Internacional de la Ciencia del Suelo, celebrado en Washington en 1927, fueron exhibidos 18 grandes monolitos provenientes de Latvia (Truog, 1928). Para la impregnación del suelo se hace aun, uso generalizado de lacas a base de nitro-celulosa. La gran ventaja de esta técnica es que un programa de recolección de perfiles de suelos requiere que se incluya junto con el perfil colectado una detallada descripción del mismo y su ubicación geográfica precisa, además de fotografías del suelo y del paisaje. También se deben realizar muestreos para análisis físicos, químicos, mineralógicos y micro morfológicos; y reunir información relevante (reportes técnicos, mapas) sobre el suelo, geología, vegetación, uso de la tierra y clima (van Baren y Bommer, 1982). Por todo lo anterior se consideró importante que además de clasificar correctamente los suelos, guardar un testimonio permanente como referencia para futuros trabajos y a su vez permitirá generar información fidedigna para cada sitio experimental, que complementará las investigaciones sobre captura de carbono por el suelo y los nuevos sistemas tecnológicos de producción propuestos para las condiciones de ladera (Cortés *et al.*, 2005; Etchevers *et al.* 2005).

2.2. El carbono en la atmósfera

El Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático (IPCC por sus siglas en inglés) estima que la temperatura media de la superficie de la Tierra ha aumentado entre 0.3 a 0.6°C durante los últimos 100 años y los modelos de predicción del clima señalan un aumento de temperatura a final de siglo de entre 2 y 4.5 grados, con el valor más probable de tres grados. Es muy improbable que el aumento sea menor

de 1,5 grados. Valores por encima de los 4,5 grados no pueden ser excluidos (IPCC 2007). Las predicciones indican que el incremento en la atmósfera de los llamados gases de efecto invernadero (GEI) y el consecuente cambio climático al que contribuyen éstos, tendrán efectos importantes en el siglo XXI como variaciones en el comportamiento del clima que pueden tener efectos negativos sobre los biomas regionales y mundiales (IPCC, 2007). En el anterior informe del IPCC (IPCC, 2007), el aumento de temperatura previsto para final de siglo era de entre 1.4 y 5.8 grados, aunque depende tanto de las emisiones, del aumento de población y de la política que se adopte respecto a la energía y el aumento de población. Las proyecciones de temperatura para el 2100 sin políticas para frenar el cambio climático indican un calentamiento de hasta 6.3 grados, entre las consecuencias de incremento de la temperatura, se considera que habrá un incremento del calentamiento en algunas áreas de la tierra, lo cual provocará se altere el ciclo hidrológico, los patrones de producción agrícola, aumento de enfermedades, etc., y que el nivel medio del nivel mar podría elevarse entre 0.09 y 0.88 m (IPCC, 2007).

El aumento de las concentraciones de CO₂ en la atmósfera desde los inicios de la revolución industrial ha sido fruto de la actividad humana, en particular la quema de combustibles fósiles, la fabricación de cemento y la deforestación. Se ha detectado que las concentraciones de CO₂ se incrementan año con año, se emiten del orden de 6000 millones de toneladas de carbono por año (una tonelada de carbono equivale a 3,666 toneladas de CO₂), de las cuales alrededor de 3000 millones permanecen y se acumulan en la atmósfera (INE, 2004). Este aumento se debe principalmente a las emisiones producidas por la quema de combustibles fósiles emisiones que no logran equilibrarse con los sumideros de CO₂ (principalmente: océano, fotosíntesis en la vegetación). Se sabe que los ecosistemas terrestres inciden de forma notable en el ciclo mundial del carbono (INE, 2004). El cambio en la distribución espacial y temporal de las precipitaciones en el mundo, afectará la vulnerabilidad de los ecosistemas, la hidrología, la producción de alimentos y fibras, los sistemas costeros y la salud humana al cambio climático, el resultado señala impactos adversos en muchas regiones del globo (IPCC, 1997). El informe del IPCC de 2007 señala que el incremento de situaciones extremas como sequías y olas de calor pueden ser atribuidas al cambio climático antropogénico, el producido por la acción del hombre. Un grupo de evidencias cada vez mayor sugiere una influencia humana discernible en aspectos del clima como el hielo marino, olas de calor y otros eventos extremos, tormentas y lluvias (IPCC, 2007).

2.2.1. El CO₂ y el efecto invernadero

El aumento de las concentraciones de CO₂ en la atmósfera desde los inicios de la revolución industrial ha sido producto, entre otros, de la actividad humana, en particular la quema de combustibles fósiles, la fabricación de cemento y la deforestación, estas actividades han reducido las reservas de carbono en la biomasa y en el suelo y han incorporado grandes cantidades de CO₂ a la atmósfera. Estos gases al combinarse con el vapor de agua de la atmósfera generan ácidos que al precipitarse junto con el agua de lluvia, nieve o niebla, forman lluvia ácida (pH entre 3 y 4), las cuales causan grandes daños a los bosques y agro ecosistemas naturales, alteraciones naturales, en el agua, etc. (FAO , 2002). De entre los gases de efecto invernadero se encuentran el dióxido de carbono (CO₂), el metano (CH₄) y el óxido nitroso (N₂O). Se considera que el CO₂ es responsable de alrededor el 65 por ciento del efecto invernadero (FAO, 2002). La fuente actual de CO₂ en la atmósfera se estima en 762 giga toneladas (FAO, 2002). El efecto invernadero se presenta por que la atmósfera absorbe una cantidad de radiación infrarroja mayor que la que históricamente ha absorbido (Figura 1).

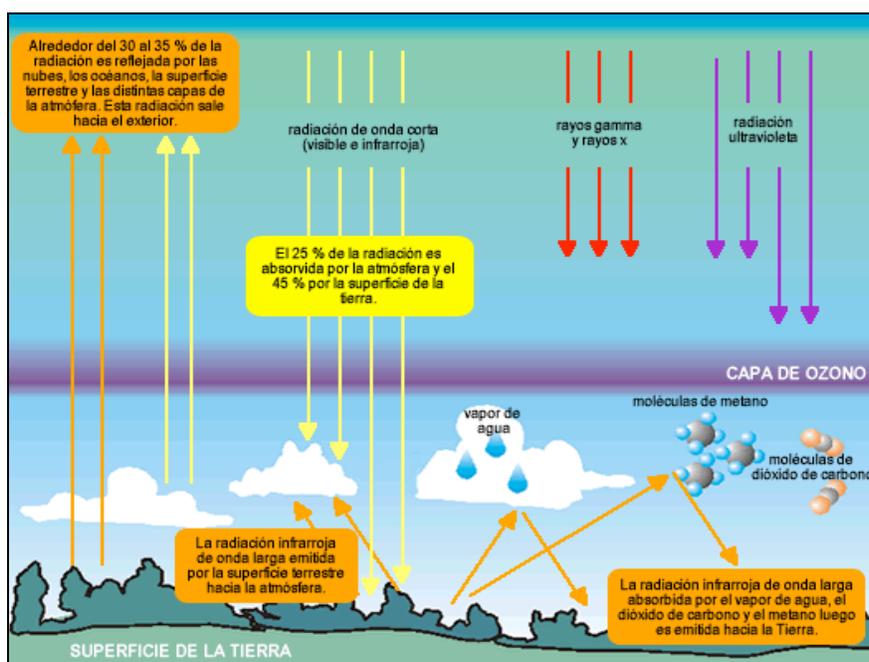


Figura 1. Efecto invernadero. (Fuente: ONI, 2003).

Ello se debe a un incremento de ciertos gases, llamados gases de efecto invernadero (GEI) que la actividad antrópica ha generado en los últimos siglos, a partir de la revolución industrial y en particular en las últimas décadas. Entre los GEI de origen antrópico, se encuentran: el dióxido de carbono (CO₂),

el ozono (O₃), el óxido nitroso (N₂O), el metano (CH₄) y los clorofluocarbonos (CFCs); (Cuadro 1, INE, 2004).

Cuadro 1. Gases de efecto invernadero (Fuente: INE, 2004).

Gas	Principales Fuentes	Concentración preindustrial	Concentración Hasta 1999	Potencial de calentamiento atmosférico Años			Tasas recientes de variación de la concentración	Vida atmosférica (años)
				20	50	100		
Bióxido de carbono CO ₂	Quema de combustibles fósiles, producción de cemento, cambios en uso de suelo tropical.	280 ppmv ⁽¹⁾	367 ppmv	1	1	1	3.3 ± 0.1PgC/año ⁽³⁾	50 a 200
Metano CH ₄	Cultivo de arroz bajo agua, rellenos sanitarios, ganadería, combustión de biomasa, producción y consumo de combustibles fósiles.	700 ppbv ⁽²⁾	1745 ppbv	62	23	7	600 Tg/año ⁽⁴⁾	12
Óxido nitroso N ₂ O	Agricultura (pastoreo en regiones tropicales), quema de biomasa, procesos industriales (producción de ácido adípico y ácido nítrico).	275 ppbv	314 ppbv	275	296	156	16.4 TgN/año	114

(1) partes por millón de volumen.

(2) partes por mil millones de volumen.

(3) petagramos de carbono por año.

(4) teragramos por año.

La tierra naturalmente recibe radiaciones electromagnéticas (REM), provenientes del sol, parte de éstas son interceptables en la atmósfera y parte penetran hasta la superficie calentándola. Una fracción de las REM que impactan la superficie son reemitidas a la atmósfera como radiación de onda larga que es absorbida por los gases de invernadero de la atmósfera, produciendo el calentamiento de ésta (ONI, 2003). Este proceso es el responsable de que la temperatura de la superficie de la tierra sea aproximadamente 14°C más alta de lo que sería si no se produjera este fenómeno (INE, 2004)

El CO₂ proveniente la quema de combustibles fósiles sigue incrementándose año con año, y no logra equilibrarse con los sumideros naturales de CO₂ de la tierra, principalmente la vegetación, su función fotosintética y el océano. Otra fuente de emisión de CO₂ es la deforestación; información disponible indica que de 1980 a 1990, la deforestación pudo haber sido la causa de la cuarta parte de las emisiones antropogénicas de CO₂ a la atmósfera (Houghton, 1999). Sólo las emisiones de carbono estimadas en áreas tropicales por efecto de la deforestación son de 1.5 Pg/año (INE, 2004). Se estima que las emisiones correspondientes al cambio de uso de la tierra debido a la deforestación e incremento del pastoreo y de las tierras cultivadas fueron cerca de 140 Pg entre 1850 y 1990 (de 0.4 Pg/año en 1850 a 1.7 Pg/año en 1990), con una liberación neta hacia la atmósfera de 25 Pg de carbono (INE, 2004).

De acuerdo con IPCC (2000), la pérdida histórica de carbono de los suelos agrícolas en el último medio siglo sería de 50 Pg de este elemento, lo cual representa un tercio de la pérdida total del suelo y la vegetación. En el pasado, la agricultura fue la causa principal del incremento de la concentración de CO₂ en la atmósfera, hoy en día, la mayor contribución se debe al uso de combustibles fósiles por parte de la industria y el transporte (6.5 Pg/año) (FAO, 2002).

Es esencial que se tomen medidas para reducir las emisiones de estos gases y para capturarlos tanto en las aguas como en los suelos y en la biomasa. Los ecosistemas que retiran bióxido de carbono de la atmósfera son conocidos como sumideros; los cinco grandes almacenes o reservorios de carbono que existen en el globo terráqueo son: (a) la atmósfera, (b) la vegetación terrestre, (c) el suelo, (d) los océanos y (e) los combustibles fósiles. De los almacenes, el carbono inorgánico en los océanos (principalmente carbonatos y bicarbonatos) es en proporción el mayor de todos, seguido de el de los combustibles fósiles (Perry, 1994).

Los ecosistemas terrestres pueden acumular cantidades importantes de carbono. Algunas estimaciones indican que éstos pueden capturar de 1.8 a 2 Pg/año (FAO, 2002). Se ha afirmado que sería factible que en los próximos 50 años la biosfera terrestre conservara o absorbiera de 60 a 87 Gt de carbono en los bosques y de 23 a 44 Gt de carbono en los suelos agrícolas (Brown *et al.*, 1996). La FAO (2002) menciona tres estrategias que pueden adoptarse para disminuir la concentración de CO₂: (a) aumentar la tasa de acumulación de carbono mediante la creación o ampliación de sumideros de carbono

(absorción del carbono), (b) impedir o reducir la emisión del carbono existente en los sumideros actuales (conservación del carbono) y (reducir la emisión de combustibles fósiles). También pueden emplearse estrategias complementarias, como la captura de carbono en los suelos y en la biomasa terrestre de tierras usadas para la agricultura (FAO, 2002). En el Protocolo de Kyoto las medidas para disminuir la concentración de CO₂ son referidas al uso de la tierra, Cambio en el Uso de la Tierra y Forestación (LULUCF, por sus siglas en inglés) y corresponde a los artículos 1.3 y 1.4 de dicho protocolo, (IPPC, 2000; FAO, 2002).

En nuestro país, los principales emisores de gases de efecto invernadero son el sector energía, el cambio en el uso del suelo y la dasonomía, así como los procesos de la industria del cemento (FAO, 2002). El IPCC (1997) estimó que las emisiones de México contribuían con el 1.45% de las emisiones totales de carbono que se dan anualmente en nuestro planeta.

En la evaluación del estado de los suelos en México, publicada en 2003, se reporta que 45.2% del territorio nacional sufre algún proceso de degradación del suelo causada por el hombre. El desconocimiento del potencial de los bosques y selvas conduce a su conversión para usos diversos. Entre 1976 y 2002, las superficies dedicadas a la agricultura y los agostaderos inducidos han aumentado en cerca de 5 millones de hectáreas cada una. Con respecto a 1976, esto representa un incremento del 20% en el caso de la agricultura, y del 35% en el de los agostaderos. La tasa de transformación neta del total de los ecosistemas terrestres a otros usos de suelo está disminuyendo, pasando de cerca de 469 mil hectáreas al año entre 1976 y 1993, a poco más de 337 mil hectáreas anuales entre 1993 y 2002 (INE, 2004).

2.3. El ciclo del carbono

El ciclo del carbono comienza con la fijación del anhídrido carbónico atmosférico a través de los procesos de la fotosíntesis, realizada por las plantas y ciertos microorganismos. En este proceso, el anhídrido carbónico y el agua reaccionan para formar carbohidratos y liberar oxígeno en forma simultánea, que pasa a la atmósfera. Parte de los carbohidratos se consume directamente para suministrar energía a la planta, y el anhídrido carbónico así formado se libera a través de sus hojas o de sus raíces. Otra parte es consumida por los animales, que también respiran y liberan anhídrido carbónico.

Las plantas y los animales mueren y son finalmente descompuestos por microorganismos del suelo, lo que da como resultado que el carbono de sus tejidos se oxide en anhídrido carbónico y regrese a la atmósfera (Schimel, 1995; Smith et al., 1993). La fijación de carbono por bacterias y animales es otra manera de disminuir la cantidad de bióxido de carbono, aunque cuantitativamente menos importante que la fijación de carbono por las plantas. Cuando los organismos vegetales son comprimidos por depositación, no son atacados por las bacterias, sino que sufren una serie de cambios químicos para formar turba, luego carbón pardo o lignita, y finalmente carbón. Los cuerpos de algunos organismos marinos pueden sufrir cambios semejantes y formar, en un largo periodo, petróleo (La ciencia ecológica autor, 2004).

La acción fotosintética de las plantas es parte del ciclo del carbono. Al absorber el dióxido de carbono existente en el aire o el agua, las plantas lo acumulan en los tejidos vegetales en forma de grasas, proteínas e hidratos de carbono (La ciencia ecológica, 2004). También los animales herbívoros que se alimentan de estos vegetales, de los que obtienen energía, para después, siguiendo las cadenas tróficas, transferir esa energía a los demás niveles (carnívoros que se alimentan de los herbívoros). Dentro de este ciclo el carbono es devuelto a la atmósfera como dióxido de carbono mediante la respiración y otra parte se deriva hacia el medio acuático (La ciencia ecológica, 2004).

Otra forma en que la vegetación interviene en el ciclo del carbono es como resultado de su acumulación en zonas húmedas. Esto resulta en una descomposición incompleta, lo que genera turba, y que finalmente dará lugar a la formación de depósitos de combustibles fósiles como carbón, gas natural y petróleo. La participación de los océanos en el ciclo del carbono es, tal vez, la más notoria. Éstos contienen el 71% de los recursos de carbono de la tierra en forma de carbonatos y bicarbonatos. Otras contribuciones pequeñas dentro del ciclo del carbono corresponden a las adjudicadas al fitoplancton y materia orgánica muerta (3%); los bosques (3%) y el CO₂ utilizado en la fotosíntesis (1%) circulando en la atmósfera. El 22% restante permanece fuera del ciclo en forma de combustibles fósiles (La ciencia ecológica, 2004).

Se estima en 125 000 millones de toneladas la cantidad de carbono que se intercambia anualmente entre la vegetación, los suelos y la atmósfera, cantidad que equivale a los dos quintos del intercambio total de carbono entre la tierra y la atmósfera (Figura 2) (FAO, 2001), en los bosques se lleva a cabo el 80 % de dicho intercambio.

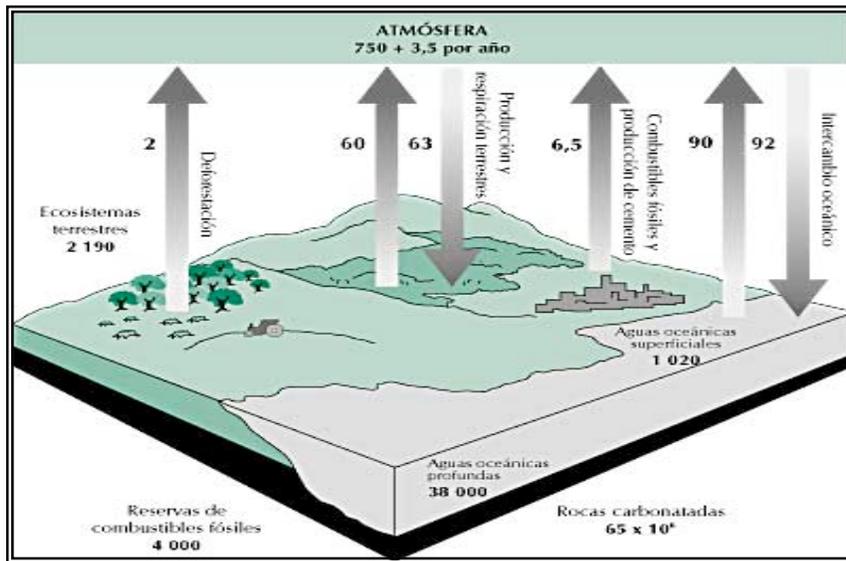


Figura 2. Estimación del ciclo mundial del carbono. (Valores expresados en gigatoneladas (Gt) de carbono (1 Gt = 1 000 millones de toneladas). (FAO, 2001).

La circulación del CO₂ en los ecosistemas vegetales ocurre en cadena, entre la planta que va a fijar el carbono, el aire en donde se deposita el gas y la tierra que lo libera como CO₂; Los flujos entre el carbono orgánico del suelo o terrestre y la atmósfera son importantes y pueden ser positivos bajo la forma de captura o negativos como emisión de CO₂ (La Ciencia Ecológica, 2004).

2.4. Captura de carbono

El término captura de carbono, tal como se usa en el Protocolo de Kyoto, se usa para significar almacenamiento de cualquier forma de carbono (FAO, 2002). Angers y Chenu (1998) lo refieren como el carbono que es capturado por organismos autótrofos y utilizado en su metabolismo para la construcción de esqueletos hidrocarbonatados.

Secuestro de carbono es un término utilizado para indicar la cantidad de CO₂ que puede ser capturado de la atmósfera por las plantas y permanecer como carbono orgánico después de la biodegradación de la materia orgánica o aquella parte de este carbono que queda temporalmente fuera del ciclo, en productos maderables (Angers y Chenu, 1998) o la parte del carbono que tiene largos periodos de

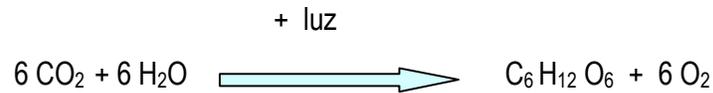
residencia en compuestos orgánicos o inorgánicos. Se conocen tres procesos principales en el secuestro de carbono en el suelo; la humificación, la agregación y la sedimentación (Lal *et al.*, 1997).

2.5. El carbono en las plantas

Los árboles actúan como sumideros al absorber el CO₂ atmosférico mediante el proceso fotosintético, durante el cual se libera oxígeno y parte del carbono es retenido pasando a formar parte de la biomasa. La madera contiene un 48% de carbono en forma de lignina y celulosa (Acosta, 2003). Esto significa que para secuestrar una tonelada de carbono, es necesario producir 2.2 toneladas de madera. Si esta se quema, el proceso se revierte, usa oxígeno del aire y el carbono almacenado en la madera, para al final liberar CO₂. No solo una gran cantidad de carbono se almacena en la vegetación terrestre, sino que además se intercambia activamente con la atmósfera. Se estima que lo equivalente al contenido total de CO₂ pasa a través de la vegetación cada 7 años, siendo los bosques los responsables del 70% de ese intercambio (Acosta, 2003). La relación entre los ciclos biogeoquímicos, es altamente dependiente de la distribución de la vegetación. La saturación de nitrógeno que ocurre en el suelo y los cambios en el uso del suelo, están alterando de manera significativa el potencial de los ecosistemas para almacenar carbono a nivel global (Acosta, 2003).

La capacidad de absorción del carbono por los árboles es función de la especie, la tasa de crecimiento, la longevidad, el sitio, el clima, el periodo de rotación, etc. En general, fijan más carbono los bosques secundarios y las plantaciones jóvenes. Los bosques primarios y las plantaciones maduras alcanzan un estado de equilibrio respecto a la absorción de carbono, ya que liberan la misma cantidad mediante la descomposición de la madera muerta y de los árboles enfermos. Los trópicos poseen un potencial para secuestrar y conservar la mayor cantidad de carbono (80%), seguido por la zona templada (17%) y la zona boreal (3%). Las plantaciones forestales y la agroforestería, contribuirían con menos de la mitad del total tropical, pero sin ellos, tanto la regeneración como el freno a la deforestación podrían lograrse (La ciencia ecológica, 2004). El carbono interviene en el proceso de la fotosíntesis, proceso complejo mediante el cual los seres vivos poseedores de clorofila y otros pigmentos, captan energía luminosa procedente del sol y la transforman en energía química (ATP), almacenada en forma de compuestos de carbono orgánico y en compuestos reductores (NADPH) que transforman el agua y el CO₂ en compuestos orgánicos reducidos (glucosa y otros), liberando oxígeno. Además de la luz del sol y el

dióxido de carbono, la planta requiere de un sustrato oxidable (agua), de este proceso resulta la formación de oxígeno molecular, el que se obtiene del agua al eliminar protones y electrones (Mooney, 1972). La vía principal por la cual la planta adquiere carbono desde la atmósfera es la difusión de gases a través de los estomas foliares ubicados en los espacios intercelulares de las hojas y posteriormente por las paredes de las células del mesófilo en los sitios de carboxilación. La reacción global es la siguiente:



La energía captada en la fotosíntesis y el poder reductor adquirido en el proceso, hacen posible la reducción y la asimilación de los bioelementos necesarios para el desarrollo de la planta, como nitrógeno, azufre y carbono, para formar materia viva. La fotosíntesis se lleva a cabo en dos etapas, cada una con una reacción específica:

1.- La fase 1 denominada fase luminosa; que sucede en el tilacoide (unidad estructural de la fotosíntesis), en donde se capta la energía de la luz y ésta es almacenada en dos moléculas orgánicas sencillas (ATP y NADPH).

2.- La fase 2, denominada fase oscura, ocurre en los estromas (sitio de las reacciones oscuras de la fotosíntesis), y en las que ocurre realmente la fijación de carbono. En esta fase, la energía química obtenida en la fase luminosa, se emplea para reducir CO_2 , Nitratos y Sulfatos, y para asimilar los bioelementos C, H, y S, con el fin de sintetizar glúcidos, aminoácidos y otras sustancias es decir las dos moléculas producidas en la fase anterior son utilizadas en la asimilación del CO_2 atmosférico para producir hidratos de carbono e indirectamente el resto de las moléculas orgánicas que componen los seres vivos (aminoácidos, lípidos, nucleótidos, etc).

La denominación como "fase oscura" de la segunda etapa es incorrecta, porque actualmente se conoce que los procesos que la llevan a cabo solo ocurren en condiciones de iluminación. Es más preciso referirse a ella como fase de fijación del dióxido de carbono (ciclo de Calvin) y a la primera como "fase fotoquímica" o reacción de Hill.

El CO₂ que las plantas obtienen del aire a través de las estomas de sus hojas es reducido a través de un proceso cíclico (Ciclo de Calvin). La fijación del CO₂ se produce en tres fases:

1. Carboxilativa: El CO₂ se fija a una molécula de 5 C, la ribulosa 1,5 di fosfato, formándose un compuesto inestable de 6C, que se divide en dos moléculas de ácido 3 fosfoglicérico conocido también con las siglas de PGA.
2. Reductiva: El ácido 3 fosfoglicérico se reduce a gliceraldehido 3 fosfato, también conocido como PGAL, utilizando ATP y NADPH.
3. Regenerativa / Sintética: Las moléculas de gliceraldehido 3 fosfato formadas siguen diversas rutas; de cada seis moléculas, cinco se utilizan para regenerar la ribulosa 1.5 difosfato, lo que permite que el ciclo de Calvin pueda seguir, y una será empleada para poder sintetizar moléculas de glucosa (vía de las hexosas), ácidos grasos, aminoácidos, etc., y en general todas las moléculas que necesita la célula.

Las plantas captan la luz solar y llevan a cabo la fotosíntesis de tres formas (C₃, C₄ y CAM) y se diferencian entre si, debido a el tipo de metabolismo; durante el desarrollo de la planta el carbono es utilizado primeramente para la síntesis de proteínas y polisacáridos. Cuando las hojas alcanzan su longitud máxima exportan carbono a hojas más jóvenes y a otras partes de la planta. El carbono se trasloca en forma de sacarosa y/o almidón a través del floema por toda la planta hasta la raíz (Mooney, 1972).

A diferencia de las plantas anuales, los árboles almacenan los fotoasimilados de carbono en sus estructuras leñosas por periodos prolongados, por lo que se les considera una importante reserva natural de carbono. La capacidad de los ecosistemas forestales y agrícolas para almacenar carbono en forma de biomasa aérea varía en función de la composición florística, la edad y la densidad de población de cada estrato por comunidad vegetal, ya que el ciclo de carbono terrestre es muy dinámico (Schulze *et al.*, 2000).

El contenido de carbono en la biomasa seca es de aproximadamente 50%. Sin embargo, la densidad básica (peso seco del volumen de material establecido) varía entre las especies y las condiciones de los lugares. El carbono es acumulado a medida que la biomasa viviente crece. También se acumula carbono en la hojarasca, desechos de madera y material orgánico de suelo. El carbono se pierde por

descomposición de material orgánico muerto y también se puede perder por la remoción de árboles por raleo y recolección, sin embargo el carbono en estos productos permanecerá capturado hasta ser degradado o quemado (Acosta 2003).

Algunas de las alternativas de manejo para capturar carbono en las plantas, en los sistemas agrícolas es reducir el uso del arado, labranza de conservación, labranza cero y el establecimiento de sistemas agroforestales que combinen especies arbóreas con especies productoras de grano para aumentar y hacer más eficiente el uso del espacio.

El sistema MIAF (Milpa Intercalada con Árboles Frutales) permite incrementar la captura de carbono tanto en suelo como en plantas, cultivando barreras vivas de frutales entre los cultivos anuales, manejar de manera sustentable los sistemas de producción e incrementar los ingresos de los productores agrícolas. Sin embargo no hay estudios, en los cuales se haya analizado el potencial de árboles frutales como reservorio de este elemento, sin embargo hay referencias de los resultados de el PMSL que indican que las parcelas experimentales con durazno, pueden secuestrar entre 1 y 2 toneladas de carbono por ha por año (PMSL, 2007).

2.5.1. Uso de ecuaciones alométricas en la estimación de carbono en biomasa aérea

Cierto tipo de manejo de la vegetación agrícola o forestal puede contribuir a incrementar la captura y eventualmente a secuestrar el carbono atmosférico (Lal, 1998). Para evaluar la cantidad de carbono asociado a la biomasa de la vegetación es necesario medir la cantidad de biomasa aérea y el carbono contenido en sus componentes. Para ello existen varias posibilidades. Una de éstas requiere de un análisis destructivo directo para medir directamente la biomasa (Brown *et al.*, 1989), esta forma es aplicable a pequeñas extensiones de terreno; otra forma, es realizar estimaciones indirectas a partir de mediciones que se hacen en ejemplares representativos del material vegetal, a partir de los cuales se hacen inferencias de la biomasa en la población total. Si se emplea esta última forma se requiere contar con funciones matemáticas en las que la estimación de la biomasa total se realiza con base en el tamaño y dimensiones de un árbol; estas funciones matemáticas se basan en relaciones alométricas.

Otro método que se puede emplear es el uso de la percepción remota mediante modelos previamente calibrados (Wiegen y Richardson, 1984; Tucker *et al.*, 1985; Escandon *et al.*, 1999). Se denomina relación alométrica a la razón matemática entre la dimensión del fuste y la biomasa aérea de un árbol y se define para cada órgano del individuo seleccionado (Huxley, 1932). Las relaciones alométricas han sido ampliamente utilizadas para estimar el carbono capturado por especies forestales de clima templado frío y se han usado para estimar la biomasa total y el área foliar. Se parte de la medición del diámetro a la altura del pecho de los árboles (DAP, parámetro constante equivalente a 1.3 m), o del área de la albura (Grier y Waring, 1974; Geron y Ruark, 1998, Chapman y Gower, 1991; Cano-Morales, 1993, Castellanos *et al.*, 1996 y Acosta *et al.*, 2002). Estas ecuaciones han sido empleadas para estimar la biomasa de los componentes de árboles (Bartelink, 1996), el carbono presente en diferentes tipos de vegetación (Brown *et al.*, 1989; De Jong *et al.*, 1995; Deans *et al.*, 1996; Brown, 2001) y la distribución de biomasa en los árboles (Landsberg y Gower, 1997).

Estas ecuaciones son una herramienta importante y necesaria en la creación de modelos mecanicistas de crecimiento forestal y agrícola (Causton, 1985; Acosta *et al.*, 2002) los cuales pueden resultar útiles para predecir la captura de carbono por los árboles. Estudios realizados por diversos autores (Grier y Waring, 1974; Geron y Ruark, 1998, Chapman y Gower, 1991; Cano-Morales, 1993, Castellanos *et al.*, 1996 y Acosta *et al.*, 2002) en los cuales se ha evaluado el potencial de los ecosistemas forestales para la captura de carbono muestran que estos sistemas forestales pueden capturar hasta 99.50 Mg ha⁻¹ (PMSL, 2007). Los grandes almacenes de carbono que el hombre puede controlar con mayor efectividad son aquellos asociados a los componentes vegetales y al suelo de los ecosistemas, un adecuado manejo en las prácticas de cultivo puede ser la diferencia entre continuar siendo sumideros de carbono (Acosta, 2003).

2.6. El carbono en el suelo

En el suelo existe el carbono inorgánico, el carbón orgánico y el carbono total. La reserva del carbono total del suelo es 3.3 veces más grande que el pool de carbono en la atmósfera (750 Gt) y 4.5 veces más grande (560 Gt) que el pool de carbono en materiales bióticos. La reserva global de este elemento en el suelo asciende a 2500 Gt (FAO, 2002) y se divide en las formas de carbono inorgánico (CIS) y orgánico (COS) (Eswaran *et al.*, 1995).

La parte subterránea de los sistemas está constituida por dos grandes componentes: el suelo mineral al que se ha asociado material orgánico totalmente descompuesto (humus) no visible a simple vista y que conforman los llamados compuestos organo-minerales; y otra de origen biótico, conformada por la raíces (gruesas, medias y finas) y los residuos orgánicos sin descomponer de origen animal o vegetal (Etchevers *et al.*, 2005). El carbono del aire (CO₂) es tomado por las plantas a través del proceso de fotosíntesis, y luego es incorporado a las plantas vivas. Cuando mueren las plantas, el carbono de las hojas, tallos y raíces se descompone y pasa a formar parte de la materia orgánica del suelo.

Existen diversos procesos de transformación y degradación de materia orgánica en los cuales parte del carbono es reciclado a la atmósfera en forma de CO₂, otra parte permanece en el suelo formando sustancias húmicas, ácidos fúlvicos y húmicos y huminas, las cuales intervienen en la producción de coloides orgánicos del suelo, en su capacidad amortiguadora y en la producción de macro y micro agregados, lo cual mejora las propiedades químicas, físicas y biológicas del suelo (Lal *et al.*, 1999, Stott *et al.*, 1999). Esta agregación de los complejos organo-minerales representa un importante mecanismo de secuestro de carbono en el suelo, la estabilidad del carbono en los micros y macroagregados del suelo depende de la protección física del carbono. La adición de residuos de cultivos al suelo tiene la ventaja de mejorar la cantidad y calidad de humus y la formación de complejos organo-minerales que posteriormente son estabilizados por los microorganismos (Lal *et al.*, 1998).

Por otro lado el secuestro de carbono, aumenta la calidad del suelo y mejora su capacidad como regulador ambiental. Estos efectos positivos constituyen la base de una estrategia para el manejo sostenible de los recursos suelo y agua (Lal *et al.*, 1998). En condiciones aeróbicas del suelo, gran parte del carbono es lábil y sólo una pequeña fracción, (1%) del que ingresa (55 Pg/año), se acumula en la fracción húmica estable (0.4 Pg/año) (FAO, 2002). La Figura 3 muestra uno de los modelos que se conocen sobre la dinámica de carbono en el suelo. También muestra los procesos que se llevan a cabo en la pedosfera. Algunos de estos procesos favorecen la producción, humificación, descomposición y agregación de residuos orgánicos y otros, la degradación de los mismos por la acción de la erosión, lixiviación y descomposición de la materia orgánica.

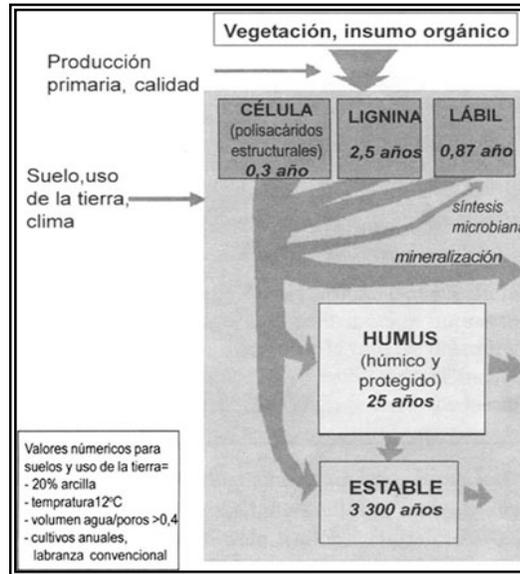


Figura 3. Modelo de la dinámica del carbono en el suelo (Balesdent *et al*, 2000).

El efecto del carbono sobre la calidad del suelo se refleja en la modificación de algunas propiedades y características de éste, como la estructura del suelo, la profundidad de las raíces, la capacidad de agua disponible (Thomasson, 1978; Letey, 1985; Da Silva *et al.*, 1995), la biodiversidad, y los ciclos y reservas de los nutrientes. La acumulación de residuos agrícolas en el suelo permite aumentar la cantidad y calidad de sustancia húmicas y la formación de agregados estables (Konyushkov, 1997). Las reservas de carbono en el suelo forman un parte importante del capital natural del suelo; Las reservas orgánicas e inorgánicas y el mantenimiento de éstas reservas es un factor relevante para la agricultura sustentable (Acosta, 2003). Son pocos los estudios dirigidos a entender mejor la dinámica del COS, de igual forma que las transformaciones químicas del CIS y de los factores que la afectan (Lal *et al.*, 1997).

El secuestro de carbono en el suelo tiene dos posibles efectos; el aumento de la calidad del suelo, y el mejoramiento de su capacidad reguladora ambiental. Estos efectos positivos constituyen la base de una estrategia para el manejo sostenible de los recursos suelo y agua (Lal *et al.*, 1997). En el suelo existen 950 Gt de carbono inorgánico (FAO, 2002), alrededor de 12 % más que de carbono orgánico (COS) (Schlesinger 1991; Grossman *et al.*, 1995). La mayoría del CIS corresponde a los carbonatos, por lo general más abundantes en las regiones semiáridas, aunque es muy escasa la información al respecto y se conoce poco acerca de la dinámica del reservorio de CIS con relación al uso del suelo. FAO (2002) estima que el carbono orgánico (COS) acumulado en el suelo de toda la tierra es

aproximadamente 1550 Gt, una cifra muy similar a la estimada por Eswaran *et al.* (1995) que asciende a 1500 PG. Esto equivale a alrededor 2.1 veces el carbono reportado en la atmósfera y 2.7 veces el medido en las plantas. EL COS se divide en COS activo y pasivo (Figura 4).

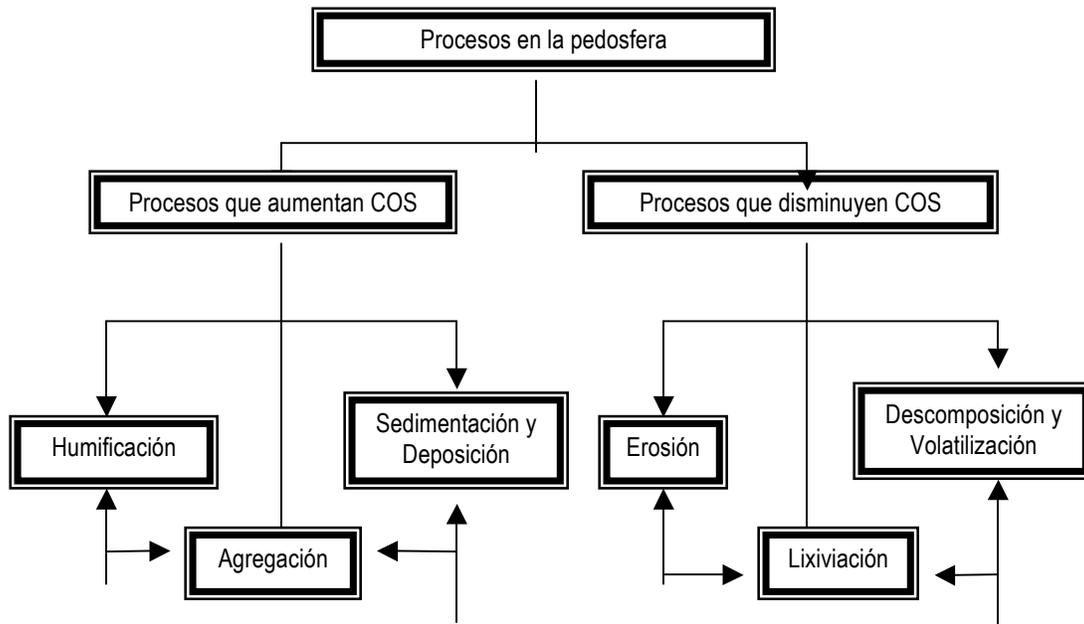


Figura 4. Procesos de la pedosfera que afectan la dinámica del COS (Lal *et al.*, 1998).

El COS activo se subdivide, a su vez, en COS lábil (aminoácidos, ácidos simples, proteínas, celulosas y hemicelulosas) y COS estabilizado (ligninas y pectinas) y es de rápida descomposición (1 a 5 años) y su proporción en relación al total es aproximadamente 5%. Las formas pasivas de COS están constituidas principalmente por ceras, quitinas y sustancias húmicas muy resistentes a la descomposición (5 a 50 años) y su proporción con relación al total del COS del suelo es de 5 a 30% (Schlesinger 1991; Grossman *et al.*, 1995). Los procesos que aumentan la dinámica del COS, son la producción de biomasa, la humificación, la agregación y la deposición de sedimentos, los que disminuyen el COS son la erosión, la lixiviación y la descomposición de la materia orgánica (Schlesinger, 1991; Grossman *et al.*, 1995). Durante estos procesos, una parte del carbono es reciclado a la atmósfera como CO₂, y otra se integra a los materiales descompuestos y forma ácidos húmicos, fúlvicos y huminas sustancias que participan en la agregación del suelo. Existen diversos factores que incrementan el carbono orgánico en el suelo, la acumulación de residuos de plantas y animales en diferentes estados de descomposición.

2.7. Formas de estudio del carbono en el suelo

Existen diferentes enfoques para estudiar la forma como se lleva a cabo la captura de carbono en el suelo, varios estudios se dirigen a la estabilización de la MOS en suelos incubados con substratos orgánicos, pero debido a la complejidad de las asociaciones órgano minerales y la falta de métodos adecuados, los componentes orgánicos y los minerales del suelo han sido estudiados de manera separada. La parte mineral se ha estudiado por mineralogistas después de retirar cuidadosamente la MOS, mientras que las sustancias orgánicas han sido estudiadas extractándolas con sustancias químicas (Christensen, 1992). En el caso del método granulométrico, se aplica dispersión directa en agua mediante ultrasónico, para destruir agregados y así liberar la POM que pudiera estar aprisionada mecánicamente entre ellos, pero este resulta en una eficiencia variable según el tipo de cemento organo-mineral de los agregados por el quebrado de minerales frágiles y la alteración de ciertas materias orgánicas (Watson, 1971) y sobre todo por que provoca el estallido de células microbianas cuyo contenido protoplásmico se adsorbe sobre las arcillas (Mc Gill, *et al.*, 1975), por lo que es preferible utilizar un tratamiento mecánico de baja intensidad por agitación controlada en presencia de bolitas de ágata o de vidrio (Andriulo *et al.*, 1990).

Las técnicas de fraccionamiento físico son consideradas menos destructivas que las químicas. El fraccionamiento físico incluye la separación de las partículas organo minerales primarias en función a la densidad y tamaño de partículas. El fraccionamiento en función a la densidad, es aplicado para aislar la MOS que no está firmemente asociada con la parte mineral del suelo, en esta técnica el suelo es dispersado por líquidos orgánicos pesados o en soluciones de sal orgánicas con densidades específicas (1.6 a 2.2 g/ml). Una de las técnicas de fraccionamiento físico del suelo es la aplicación de vibraciones ultrasónicas para dispersar el suelo (Christensen, 1992). El fraccionamiento físico incluye la separación de densidad y tamaño de partículas organo minerales primarias de un suelo entero, esta técnica ha sido utilizada anteriormente por Tiessen (1983), Christensen (1985, 1987), Oades (1989), Stevenson (1989), y Elliott y Cambardella (1991). La técnica de manera general se basa en la dispersión del suelo mediante la aplicación de ultrasonido en medio acuoso y las fracciones que se generan son separadas mediante tamizado y recuperando cada fracción en contenedores.

Edwards y Bremner (1967) reportaron en un estudio que la mayor parte de los minerales examinados sufrió menor perturbación cuando se expuso a la dispersión ultrasónica que cuando se aplicó agitación en agua por 10 horas o agregando agentes dispersantes químicos como H_2O_2 y Calgon. Autores como Edwards y Bremner, (1967); Adams y Stewart, (1969), compararon varios tratamientos de dispersión (dispersantes, agitación, las vibraciones ultrasónicas) y mostraron que la aplicación de vibraciones ultrasónicas causó menor fragmentación de partículas que la agitación y la aplicación de dispersantes, y que materiales frágiles tales como biotita, mica, pizarra, etc., son muy susceptibles a la dispersión ultrasónica. Christensen (1992) mencionó la posibilidad de separar la materia orgánica del suelo (MOS) de los complejos organo-minerales del suelo mediante dispersión ultrasónica debido a que la microscopía electrónica, sugiere que la MOS está íntimamente asociada con la parte mineral del suelo (Turchenek y Oades. 1978; Tiessen y Stewart, 1983; Spycher, *et al.* 1983; Christensen, 1985). Watson (1971) menciona que la dispersión ultrasónica del suelo causa alteración en las partículas primarias de éste, pero el impacto en complejos órgano-minerales primarios no se conoce.

De acuerdo a Christensen (1992), una vez dispersado el suelo, el aislamiento de las partículas en distintos tamaños, se basa en la ley de Stokes, el tamaño de las partículas se hace con base en el sistema de la propuesta del Departamento de Agricultura de los Estados Unidos de América (USDA) y el tamaño de las partículas puede limitar la comparación de los resultados. Los estudios de fraccionamiento físico de la materia orgánica del suelo muestran que la mayor parte del carbono está asociado a las partículas de arcilla y limo, y que suelos arenosos poseen una concentración de carbono hasta siete veces superior en sus partículas de arcilla y limo que suelos arcillosos (Christensen, 1992; Matus, 1994). Una hipótesis simple para explicar estos resultados la propuso Hassink *et al.* (1997): las fracciones de arcilla y limo en suelos arenosos se encuentran más libres, mientras que en suelos arcillosos forman densos paquetes de agregados. Por lo tanto, la superficie específica disponible para retener MOS es muy superior en suelos arenosos que en suelos arcillosos (Matus *et al.*, 2000). Christensen (1992), menciona que las fracciones finas como limo y arcilla se pueden separar por centrifugación aislándose juntos o de manera independiente. La dispersión del suelo es importante por que determina bien la distribución de las partículas del suelo. Gregorich (1988) examinó la distribución de las MOS en los diferentes tamaños de partículas del suelo, y reportó que la mayor dispersión del suelo la obtuvo al aplicar 1500 J/mL, energía que variará en función del tipo de sonda y de suelo.

Según Christensen (1992), la materia orgánica de suelo (MOS) abarca residuos de plantas, animales y microbios en todas las etapas de descomposición y una diversidad de sustancias orgánicas heterogéneas asociadas con los componentes inorgánicos del suelo. La microbiota del suelo y las raíces finas también se consideran como parte de la MOS. La composición de la MOS difiere debido a la interacción de los procesos biológicos, químicos, y físicos en el suelo. A lo largo de la historia en la investigación de la MOS, se ha reportado que la interacción de MOS con los minerales de arcilla es crucial en el comportamiento de ésta (Christensen, 1992). El carbono orgánico del suelo representa la mayor reserva de este elemento que se encuentra interactuando con la atmósfera (FAO, 2002). El contenido total de materia orgánica del suelo se considera como un indicador del contenido de carbono en el suelo (OECD, 1993). Los principales componentes de la materia orgánica del suelo son los polisacáridos (Parfitt *et al.*, 1997). A los distintos componentes de la MO se le denomina reservas orgánicas del suelo, cuando la materia orgánica se mineraliza y se humifica, se une a las partículas finas del suelo (fracción coloidal mineral < 2 μm) formando complejos arcillo-húmicos (Parfitt *et al.*, 1997). Las interacciones de materiales orgánicos con partículas minerales del tipo de las arcillas silicatadas cristalinas y los compuestos “paracristalinos” es un proceso que se lleva a cabo en la mayoría de los horizontes superficiales del suelo en donde abunda la materia orgánica, este tipo de interacciones ya han sido descritas y revisadas (Theng, 1979).

2.8. Agregación como mecanismo físico de protección de la materia orgánica del suelo

La formación de agregados favorece la acumulación de residuos agrícolas en el suelo, lo cual también permite aumentar la cantidad y calidad de las sustancia húmicas (Konyushkov, 1997). Es precisamente la formación de agregados una vía para el secuestro de carbono en el suelo; por esta vía el carbono es protegido físicamente de la acción de la biomasa microbiana, con la consecuente formación de complejos órgano-minerales (Harris *et al.*, 1966) en donde el carbono queda secuestrado (Chaney and Swith, 1984; Oades, 1988). La protección física significa el encapsulado de los fragmentos de la materia orgánica por las partículas de arcilla o por macro o micro agregados del suelo, de acuerdo como lo muestra la Figura 5 (Puget *et al.*, 1995; Balesdent *et al.*, 2000). La protección química involucra la unión de la materia orgánica con otros constituyentes del suelo -coloides o arcillas-, frecuentemente este mecanismo concierne a la formación de compuestos orgánicos del suelo muy estables. La MOS queda protegida dentro de los macro agregados lo que prolonga su permanencia en el suelo y su estabilidad

depende del COS, el cual es dividido en tres componentes dependiendo su estabilidad; sustancias húmicas que están asociadas con cationes metal polivalentes que son los agentes más persistentes y están asociados con los micro agregados; las raíces e hifas que son agentes estabilizantes temporales y se asocian a los macro agregados y los polisacáridos y microorganismos (Tisdall y Oades, 1982).

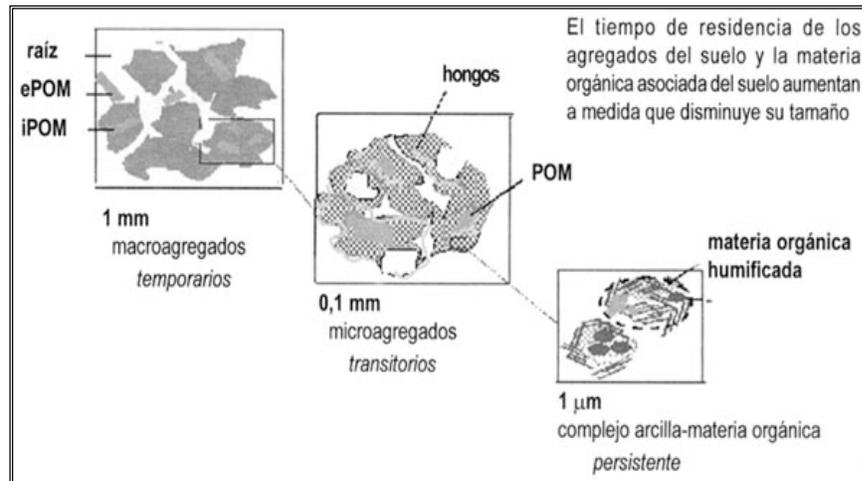


Figura 5. Ubicación de la materia orgánica en la matriz del suelo. (Chone *et al.*, 1991).

Cuando los agregados del suelo son roturados se incrementa la mineralización del carbono (Elliot, 1986) por lo que podríamos pensar que en los sistemas naturales el carbono está más estabilizado que en suelos agrícolas. 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. También hay una cierta conexión con la composición, pero principalmente con el tipo de protección o el tipo de uniones químicas, los productos de descomposición de la materia orgánica y sus cambios químicos se asocian estrechamente con las partículas minerales del suelo, con lo cual la materia orgánica tiende a estabilizarse química y físicamente, lo que la hace más resistente a la biodegradación (Angers Chenu, 1998).

2.9. El carbono en los complejos organo-minerales del suelo

En varios estudios se ha mencionado que existe fuerte correlación entre el contenido de carbono en el suelo y el contenido de arcillas, principalmente en suelos forestales (Nichols, 1984). Monreal y Kodama (1997) y Monreal *et al.*, (1997) han mencionado que existe una fuerte asociación entre el carbono de los agregados del suelo y las arcillas del tipo expandibles (2:1) y la formación de complejos organo-

minerales en el suelo es un mecanismo importante en el secuestro de carbono (Lal *et al.*, 1998) así como mejoramiento de la estructura del suelo a través de la formación de estos complejos (Harris *et al.*, 1966).

Otros estudios han demostrado que en muchas ocasiones el contenido de arcillas no influye en la acumulación de carbono (Percival *et al.*, 1999). Sollins *et al.*, (1996) y Torn *et al.*, (1997) y Burke, *et al.*, (1989) han sugerido que el clima es el que controla la acumulación de carbono en el suelo, especialmente en condiciones de alta humedad y por otro lado las prácticas de labranza en el suelo ocasionan la dispersión de las arcillas y por lo tanto la inestabilidad de los agregados, lo que conlleva a la pérdida de carbono en el suelo y a una mayor predisposición de éste a la erosión hídrica (Fuller *et al.*, 1995). Los minerales de arcilla intervienen de manera importante en la formación y estabilidad de agregados del suelo, la cantidad y naturaleza de la fracción mineral está estrechamente relacionada con la cantidad, calidad y el grado de estabilización de la materia orgánica en el suelo (Parfitt *et al.*, 1997). Monreal y Kodama (1997) y Monreal *et al.*, (1997) han concluido que el tipo de material arcilloso es importante en la retención y el secuestro de carbono y en las tasas de recambio del carbono orgánico del suelo. Lo anterior se dedujo de la alta correlación que presentó el carbono orgánico del suelo con el Al extractable con oxalato de amonio. Estos trabajos mostraron también que el carbono orgánico del suelo se relacionó inversamente con arcillas no expandibles del tipo de las micas y las arcillas 1:1 (Monreal y Kodama, 1997).

Otros estudios muestran que el contenido de carbono no se relaciona con el contenido de arcilla (Percival *et al.*, 1999) si no mas bien con los óxidos de Fe y Al (alofánicas) que participan activamente en la estabilización de la materia orgánica (Martín y Haider, 1986), las cuales han sido señaladas como un factor importante en la acumulación de carbono en el suelo (Sollins *et al.*, 1996; Torn *et al.*, 1997), proceso que se reporta particularmente en Andisoles y Oxisoles, en donde están presentes estos materiales; los alofanos y óxidos de hierro favorecen la estabilización de la materia orgánica por su pequeño tamaño y elevada superficie específica (Oades, 1989). Sin embargo, se desconoce el papel de otros amorfos, como podrían ser los de sílice, en la captura de carbono, los cuales han sido identificados frecuentemente y en cantidades importantes en suelos del centro del país; estos, debido a su naturaleza química presentan un comportamiento distinto al de los alofanos, por lo que sería

necesario clarificar el papel de los mismos en la captura de carbono, aspecto que no ha sido desarrollado en ningún país debido a que los ambientes que permiten el desarrollo de estos compuestos no son frecuentes. Estudios de fraccionamiento físico de la materia orgánica del suelo, han mostrado que la mayor parte del carbono está asociado a las partículas de arcilla y limo y que suelos arenosos presentan una concentración hasta siete veces mayor en sus partículas de arcilla y limo que suelos arcillosos (Christensen 1992).

A los modelos para estudiar los procesos claves que controlan la estabilización del carbono a escala espacial y temporal, y que permiten predecir cambios de carbono en el suelo, se ha incorporado variables como la textura del suelo y de manera específica el contenido de arcilla, debido a que esta controla la estabilización del carbono en el suelo (Percival *et al.*, 2000). Modelos como Century, usan el contenido de arcilla o la capacidad de intercambio catiónico para modificar las tasas de reciclaje de carbono (Parffit *et al.*, 1997). Otros estudios han encontrado que la textura del suelo no afecta las tasas de mineralización (Matus *et al.*, 2000).

II. OBJETIVOS

3.1. Objetivo General

Medir la captura de carbono en la biomasa aérea de árboles frutales asociados al sistema MIAF establecido en terrenos de ladera en tres regiones de la Sierra Norte de Oaxaca, estudiar los suelos de los sitios donde está establecido este sistema agrícola y determinar como se distribuye el carbono en fracciones del suelo de distinto tamaño, en dos sistemas contrastantes de uso de suelo (agrícola y forestal).

3.2. Objetivos Específicos

- ⇒ Caracterizar y clasificar los suelos de tres regiones de laderas donde se introdujo el sistema MIAF.

- ⇒ Medir los cambios anuales en el contenido de carbono acumulado en árboles frutales de los sistemas MIAF y PAP y establecer el potencial de esos árboles frutales para capturar carbono.

- ⇒ Determinar la distribución del carbono en fracciones de suelo de distinto tamaño, en dos sistemas contrastantes de uso de suelo.

- ⇒ Analizar la influencia de la naturaleza química y mineralógica del suelo, en la capacidad de éste para retener carbono.

IV. HIPÓTESIS

- ↗ Los suelos de las tres regiones de estudio corresponden al mismo orden de suelos.

- ↗ Los árboles frutales de los sistemas MIAF Y PAP presentan un potencial similar para capturar carbono.

- ↗ El carbono se distribuye de manera homogénea en las distintas fracciones del suelo.

- ↗ El carbono en la fracción mineral del suelo se encuentra asociado principalmente a la fracción fina (< de 2 micras).

V. MATERIALES Y MÉTODOS

El presente trabajo se desarrolló en tres microcuencas ubicadas en las regiones Mazateca, Cuicateca y Mixe, de la Sierra Norte de Oaxaca, México (Figura 6).

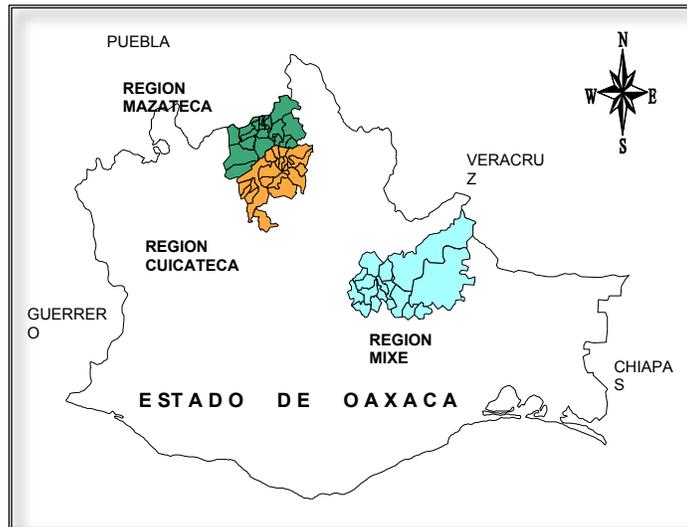


Figura 6. Ubicación de la zona de estudio.

Los suelos estudiados y clasificados, corresponden a tres sitios experimentales instalados en microcuencas de las regiones Mazateca, Cuicateca y Mixe de la Sierra Norte de Oaxaca. Las características de las regiones, microcuencas y sitios experimentales se describen a continuación.

La topografía de la zona se caracteriza por pronunciadas pendientes, en general, mayores al 30%, lo que influye de manera determinante en la distribución de los suelos, así como en la variabilidad de su morfología y de sus propiedades (Birkeland, 1984).

Región Mazateca, Microcuenca Santa Catarina (P1). La región Mazateca, se localiza entre las coordenadas 18 08' 57" y 18 10' 13" de latitud norte y 96° 53' 30" y 96° 54' 43" de longitud oeste, comprende un área de 2, 301.33 km². De acuerdo a INEGI (1999) los suelos predominantes son Luvisol, Rendzina, Feozem y Acrisol, y su uso es agrícola, ganadero y forestal. La vegetación de la zona está distribuida en bosque de pino-encino, selva alta y pastizal, ecológicamente esta región se divide en tres subregiones, tierra caliente (0 a 800 m), tierra templada (800 a 1800 m) y tierra fría (1800-

3200 m), con pendientes > 15% (25-45%) y una precipitación >2000 mm, siendo la más húmeda de las tres regiones (INEGI, 1999) y una temperatura que oscila entre los 16 – 27 °C (PMSL, 1998). La microcuenca seleccionada, denominada Microcuenca Santa Catarina, se localiza en el municipio de San Jerónimo Tecoaatl; comprende un área de 319 has, con una elevación desde 1380 – 1910 msnm, con pendientes desde 30 a 60 %; la forma del terreno es de ladera inclinada con pendiente abrupta y los principales sistemas de manejo del terreno son la milpa (PMSL, 1998, Acosta, 2003, Vergara 2003), pastizal y bosques. La vegetación de la microcuenca está distribuida en 41.04 ha de milpa, 16.49 ha de pastizal, 20.29 ha de bosque, 169.14 ha de café y 72.29 has de acahual (vegetación secundaria), (Vergara, 2003). El sitio experimental muestreado se localizó en las cercanías del poblado San Jerónimo Tecoaatl, municipio de igual nombre, a 18°08'57" LN y 96°53'30" LO; la elevación del sitio de muestreo es de 1689 m con exposición Este y un clima Cwa(i')(g)n; templado subhúmedo con verano caliente, la temperatura media del mes más caliente es mayor de 22°C, con poca oscilación de la temperatura, marcha de la temperatura tipo Ganges en donde el mes más caliente se presenta antes del solsticio de verano, con nieblas frecuentes y con una precipitación de aproximadamente 2000 mm anuales.

Región Cuicateca, Microcuenca Concepción Pápalo (P2). La Región Cuicateca, se localiza entre las coordenadas 17° 50' 20" y 17° 51' 25" de latitud norte y 96° 51' 55" y 96° 52' 35" de longitud oeste, comprende un área de 1329.67 km². Los suelos mapeados por INEGI (1999) son predominantemente Luvisol, Rendzina, Feozem y Acrisol. El uso de suelo es agrícola, con vegetación forestal (pino – encino) y pastizal. Ecológicamente se divide en tres subregiones de acuerdo a su elevación; baja (menos de 800 m), media (800 a 1500 m) y alta (más de 1500 m), con pendiente > 15 %, una precipitación de entre 500 – 700 mm y una temperatura entre 18 y 20°C (PMSL, 1998). La microcuenca Concepción Pápalo, comprende un área de 149 ha, con una elevación que va de los 1 700 hasta los 2 200 msnm y pendientes de 30 – 65 %; el uso del suelo es parcialmente agrícola (milpa tradicional y algunos frutales), pastizal y áreas remanentes con vegetación forestal (pino-encino), mayormente secundaria (Vergara, 2003; PMSL, 1998). El sitio experimental muestreado se ubicó en la vecindad del poblado de Concepción Pápalo, municipio del mismo nombre, en el predio denominado *La Colorada*, a una altitud de 2180 msnm y coordenadas 17° 50'20" LN y 96° 51'55" LO. El clima del lugar es cálido subhúmedo con régimen de lluvias en verano (Cw(i)g) y con una precipitación de 700 mm anuales (Colegio de Postgraduados, 1998).

Región Mixe, Microcuenca Zompantle (P3). Esta Región se localiza entre las coordenadas 17° 00' 45" y 17° 01' 16" de latitud norte y 95° 53' 53" y 95° 54' 10" de longitud oeste y comprende un área de 6 470 km². Los suelos más abundantes, según INEGI (1999), son Acrisoles y Cambisoles, y el uso más frecuente es agrícola, bosques y acahuales. La vegetación natural ha sido clasificada como selva baja, pastizal cultivado y bosque. Ecológicamente la región se divide en Mixe baja, media y alta con elevaciones entre los 200 y 3 200 m. Las pendientes son mayores de 25%. La precipitación varía de 1500 a 2 000 mm anuales y la temperatura entre los 17 – 27 °C (PMSL 1998). La microcuenca Zompantle pertenece al municipio de Asunción Cacalotepec y comprende un área de 32 ha, con elevación de 1 280 a 1 525 msnm y pendientes de 30 - 65%, los principales sistemas de manejo en esta microcuenca son milpa, café bajo sombra y acahuales en diferentes estados de desarrollo y que es la vegetación más abundante de la microcuenca (20.77 ha, 8.39 ha de café, 0.52 de bosque y 3.00 de milpa) (PMSL, 1998). El sitio experimental muestreado se ubicó en el paraje *Minatitlan*, a un costado del rancharío *El Zompantle*, a 17°00'45" LN y 95°54'10" LO y una elevación de 1422 msnm, el clima es templado subhúmedo con verano caliente (Cwai(g)n) y la precipitación es de 1500 mm anuales (INEGI, 1999).

5.1. Descripción, caracterización, clasificación y preservación de los suelos de los sitios experimentales seleccionados

Los puntos donde se describieron los perfiles en cada microcuenca, se ubicaron en parcelas donde el PMSL había implantado el sistema milpa intercalada con árboles frutales (MIAF), alternativa tecnológica de producción para condiciones de ladera (Cortés *et al.*, 2005). En las tres microcuencas, los sitios experimentales donde se describieron los suelos para su clasificación y se colectaron los monolitos, se ubicaron en laderas con pendientes abruptas y exposición al oriente. El microrrelieve de los sitios es escarpado, compuesto por pequeños montículos y terrazas. La pendiente es variable, mayor de 30 % en la Mazateca, de 41 % en la Mixe y más abrupta (65 %) en la Cuicateca.

Descripción morfológica: En cada sitio experimental (P1-Mazateca, P2-Cuicateca y P3-Mixe), se excavó un pozo pedológico hasta 1 m de profundidad: y se realizó la descripción morfológica de acuerdo con Cuanalo (1990).

Análisis físico y químico: Para los análisis químicos y físicos de laboratorio se tomaron muestras de cada horizonte identificado en campo hasta 1m de profundidad. Las muestras colectadas se secaron al aire, a la sombra y se tamizaron a través de una malla de 2 mm (malla 10). Los análisis químicos se realizaron de acuerdo a los procedimientos definidos en el Manual para el Análisis de Suelos para Clasificación y Correlación de van Reeuwijk (1999) en el Laboratorio de Fertilidad de Suelos del Colegio de Postgraduados. Las determinaciones físicas realizadas fueron: humedad en condiciones de campo, color y textura. Los análisis químicos realizados fueron: pH, conductividad eléctrica (CE), materia orgánica (MO), nitrógeno total (Nt), bases intercambiables (Na^+ , K^+ , Ca^{2+} Mg^{2+}), capacidad de intercambio catiónico (CIC), saturación de bases (PSB), fósforo soluble en ácido cítrico (Ps), acidez y Al intercambiables. Tanto las determinaciones físicas como químicas se realizaron con base en el manual para el análisis de suelos para clasificación y correlación de van Reeuwijk (1999).

Análisis mineralógico: Con objeto de tener una idea general de la naturaleza del material de origen de los suelos estudiados, se tomaron muestras (2 a 3) representativas de cada uno de los sitios. Se realizaron preparaciones en polvo del suelo que se pasaron por un difractómetro de rayos X Shimadzu 3A (DRX), equipado con un tubo de rayos X con ánodo de Cu y radiación $\text{CuK}\alpha$. Las muestras fueron analizadas en el espectro de 60° a $5^\circ 2\theta$ (Whittig and Allardice, 1986).

Clasificación: Una vez obtenidos los resultados de todos análisis requeridos en los sistemas de clasificación de la Taxonomía de Suelos (2003) y la Base Referencial Mundial (WRB, 1999), se procedió a clasificar los suelos de acuerdo al procedimiento indicado en cada sistema de clasificación.

Confección del monolito: Para elaborar el monolito se realizó un corte de 20 x 90 x 12 cm en una de las caras del pozo pedológico, en el cual se introdujo un contenedor de madera de las mismas dimensiones, como lo señalan VanBaren y Bomer (1982). El contenedor con la muestra inalterada se retiró y se inmovilizó con un vendaje para evitar cambios estructurales o fraccionamientos. De la cara expuesta del monolito, se eliminó alrededor de 3 cm para aplicar la mezcla de endurecimiento (mezcla de laca y solvente adelgazador o *thinner*). Para facilitar la penetración de ésta, se realizaron perforaciones entrelazadas (con un picahielo) dejando un espacio de 3 a 5 cm entre cada una de ellas. Se hicieron cuatro aplicaciones de la mezcla (cada 48 a 72 horas) con las siguientes proporciones laca:*thinner*: 30-70%, 50-50%, 80-20% y 0-10. Se dejó secar y endurecer la mezcla por

aproximadamente 10 días. Este proceso permite que la impregnación se realice por completo y evita la pérdida de las partículas del suelo. El monolito seco (aún en su caja) se pegó sobre un tablero de madera (90 x 18 cm) con Resistol blanco 850. Una semana después, se retiró el cajón de madera y con una navaja se realizó el moldeo del monolito extrayendo los agregados de la superficie dura de éste y los excesos de material y artefactos. El monolito se recubrió con una capa delgada de laca diluida en aerosol (10:90) para resaltar sus colores y evitar el desprendimiento de agregados del suelo. Finalmente el monolito se fijó con tornillos en una base sólida de madera. En ésta se incluye la información relevante del sitio de muestreo y del perfil (clima, cultivos, uso del suelo, manejo, aspectos relevantes, análisis físicos y químicos) y su clasificación.

5.2. Carbono acumulado en la biomasa aérea de árboles frutales

En cada una de las microcuencas se evaluó la tecnología alternativa introducida en la zona denominadas MIAF, que consiste en la intercalación de milpa entre barreras de árboles frutales. La tecnología MIAF se evaluó en dos condiciones diferentes; en parcelas experimentales del PMSL establecidas para estudiar técnicamente los detalles de la propuesta y en parcelas establecidas en terrenos de los productores o Parcelas de Alta Productividad (PAP). La especie frutal introducida con el MIAF dependió de las condiciones ambientales reinantes en cada sitio experimental de la microcuenca. En los sitios más fríos se introdujo durazno y en los más cálidos café. Sin embargo éstas no son las únicas alternativas; hoy se tienen parcelas establecidas con aguacate, manzana y mandarina.

El sistema MIAF fue diseñado para ser establecido en laderas con pendientes moderadas (< a 20%) y fue adaptado para condiciones de laderas pronunciadas (20 a 40%), por ello las dimensiones de las parcelas son variables, dependiendo la dimensión del terreno y de la pendiente.

En general, las parcelas experimentales siguen el siguiente esquema; tienen tres franjas contiguas con una anchura total de 9 m, los ajustes sugeridos por la investigación indicaron la necesidad de modificar esta anchura a 11 m (Cortés *et al.*, 2005). Las establecidas en los terrenos de los productores tienen anchos y largos variables, pero la distancia entre las hileras de los árboles se mantiene. La franja de en medio es de 4.6 m de ancho y las dos laterales de 3.2 m de ancho cada una. En el centro de la primera

franja se ubica una hilera de árboles frutales en curva de nivel, plantados a 1 m de separación. En cada franja lateral a los árboles de 3.2 m se siembran 4 surcos de maíz y frijol con una distancia de 0.8 m entre surcos, paralelos a la hilera de los árboles frutales. La siembra de maíz y frijol se realiza de acuerdo a los patrones de cultivo convencionales, que son principalmente, maíz y frijol en relevo y maíz y frijol asociados. El primer surco de maíz y/o frijol está una distancia de 2.7 m del tronco del árbol frutal en ambos lados de la hilera.

Al pie de la hilera de los árboles frutales en la parte de arriba de la pendiente se coloca el filtro de escurrimientos formado con rastrojo de maíz, el cual es sostenido por los troncos de los árboles, lo que sirve, para el control de la erosión hídrica del suelo, y es reforzado cada año con nuevas adiciones de rastrojo del maíz, que se coloca horizontalmente entrelazado. El filtro concluye formando una especie de triángulo con un cateto horizontal junto a la hilera de tronco de los árboles, un cateto horizontal hacia la pendiente y la hipotenusa descansando sobre la ladera (Figura 7).

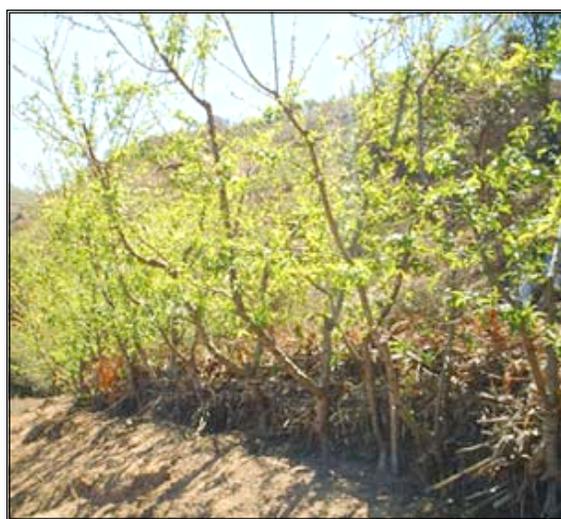


Figura 7. Filtro de rastrojo en el sistema MIAF.

Los residuos actúan como presa filtrante. Retienen el suelo de la parte aguas arriba de la parcela (entre dos surcos de árboles), que es transportado por el agua de lluvia. La repetición de este módulo a lo ancho del terreno da lugar al diseño de ocho surcos de maíz y/o frijol intercalados en hileras de árboles frutales separadas a 11 m por lo que el maíz y frijol ocupan el 58% del terreno y los árboles frutales el 42 % restante, con una densidad de plantación de 909 árboles por hectárea (Cortés, *et al.*, 2005).

El diseño del sistema MIAF además de introducir una forma diferente de cultivar la tierra, aspira a suavizar ligeramente las pendientes, de modo que se faciliten las labores que realiza el productor.

Los árboles frutales de durazno se podan de acuerdo a un sistema denominado “tatura” (Figura 8), la cual mantiene el vigor y superficie productora de los árboles maduros y ayuda a renovar y ajustar la cantidad de madera de fructificación para obtener alta producción de fruto de calidad y permite disminuir los costos por raleo de frutos. Las demás podas de invierno y verano son con fines de floración y fructificación.

En el caso de la especie de café, sólo se dan las podas de floración y fructificación y se maneja un solo tallo (Cortés, *et al.*, 2005). Ambos sistemas, MIAF experimentales con durazno en las tres microcuencas y con café en la Mazateca y Mixe están establecidas desde al año 1999 y fueron monitoreados del año 2000 al 2004.



Figura 8. Sistema de poda en árboles frutales de Durazno (A) y Café (B).

Estimación de la biomasa aérea: Para estimar la biomasa aérea, y con este dato el carbono aéreo, se utilizaron ecuaciones alométricas generadas para los árboles de durazno y café en un trabajo previo por Acosta *et al.* (2001). Para aplicarlas, se midieron periódicamente (cada 6 a 12 meses) los diámetros de las dos ramas principales en la base del tallo (D1 y D2), el diámetro del tronco principal en la base

(Bi), en la bifurcación de las ramas (Bs) y la altura del tronco principal de la base a la bifurcación de las ramas (H) (Figura 9). En el caso del café sólo se mide el tallo en la base (Bi) y la altura (H) de la rama).



Figura 9. Esquema de mediciones en árboles de durazno.

Con esos datos se calcularon los siguientes parámetros para estimar la biomasa total del árbol y posteriormente el contenido de carbono.

Ecuación para especie de durazno: en esta especie la biomasa total del árbol, se calcula por partes, primero la biomasa aérea de las ramas, luego se le suma la biomasa del tallo, la cual se estima con base en el volumen de éste y la densidad de la madera, como se indica a continuación:

Biomasa aérea (BA) de las ramas: se sustituye el valor del diámetro de cada rama en ecuaciones independientes y se suman para obtener la biomasa aérea de ramas.

$$BA = EXP (-2.76398 + 2.367 \ln(D1))$$

D = diámetro a la base de cada rama

Volumen del tallo (VT): primero se calcula el volumen del tallo del árbol (VT) utilizando los diámetros de las bases superior e inferior y la altura, considerando que este es un tronco de cono.

$$VT = ((Bs+Bi)/2)*H$$

Bs = base superior

Bi = base inferior

H = altura

Biomasa del tallo (BT): una vez obtenido el volumen del tallo, se procede a calcular la biomasa del tallo (BT) con la fórmula siguiente que considera la densidad de la madera, la cual fue determinada experimentalmente por Acosta (2003).

$$BT = (VT*0.6)/100$$

VT = volumen del tallo.

0.6 = densidad de la madera durazno.

Biomasa Total (BTt): para obtener la biomasa total, se suman los resultados obtenidos de la biomasa aérea de las ramas (BA) y de la biomasa del tallo (BT) para obtener la biomasa total del árbol.

$$BTt = BA + BT$$

Ecuación para especie de café: Biomasa aérea (BA) de árbol: En esta especie la biomasa aérea se calcula directamente sustituyendo el valor del diámetro en la ecuación, ya que por la forma del árbol se considera en una sola rama y un solo tallo principal.

$$BA = EXP (-2.19308 + 2.368 \ln(D))$$

D = diámetro a la base de el tallo principal

Estimación del carbono en la biomasa aérea de los árboles frutales: Para estimar la cantidad de carbono asociada a la biomasa, se multiplica esta última, que se expresa en peso seco a 72°C, por el factor 0.5, valor correspondiente a las estimaciones experimentales realizadas en la madera de estos árboles por Acosta (2001).

5.3. Carbono en distintas fracciones de tamaño del suelo

Con objeto de poder comparar la distribución de contenido de carbono en las distintas fracciones granulométricas del suelo, se procedió al fraccionamiento de éste. Para esta comparación se seleccionaron dos sistemas contrastantes, por su uso o manejo del suelo, un sistema agrícola (Labranza tradicional, LT) y un sistema natural (bosque) en cada microcuenca (Cuadro 2).

Cuadro 2. Sistemas de uso de suelo seleccionados en cada microcuenca de Oaxaca.

Sistema	Región		
	Mazateca	Cuicateca	Mixe
Natural	Bosque de Liquidámbar (BL)	Bosque de Encino (BE)	Bosque de Pino (BP)
Agrícola	Labranza Tradicional (LT)	Labranza Tradicional (LT)	Labranza Tradicional (LT)

Características de los sistemas naturales: En el Estado de Oaxaca, el uso del suelo de la Sierra Norte era originalmente forestal; pero con el transcurso del tiempo ha ido modificándose para hacerlo agrícola. Las áreas explotadas se caracterizan por ubicarse en laderas con elevada pendiente (del 20 al 60 %). Los bosques de las microcuencas son de una edad de aproximadamente 40 años, generalmente son vegetaciones secundarias que no corresponden a áreas bajo aprovechamiento forestal; más bien se refiere a zonas donde predomina una especie determinada como resultado del proceso de alteración de la vegetación original. Cada sistema de uso de suelo presenta las siguientes características:

Bosque de Liquidámbar (*Liquidambar macrophylla* sp.) (BL): Representa un tipo del bosque mesófilo de montaña, en donde predomina principalmente la especie *Liquidambar macrophylla* Oerst, aunque también se encuentran muchas otras especies arbóreas, arbustivas y herbáceas, como los helechos arborescentes y otras hojarasca (Acosta 2001).

Bosque de Encino (*Quercus* sp.) (BE): En este sistema, la vegetación nativa ha sido alterada, la cual correspondía a pino-encino, debido al inadecuado aprovechamiento del bosque, el pino ha sido eliminado del área. Esta vegetación de caracteriza por formar parte de una etapa terminal de sucesión ecológica (Acosta 2001).

Bosque de Pino (*Pinus sp*)(BP): Constituye importantes áreas de vegetación dentro de las regiones estudiadas, y son de gran importancia económica; se caracteriza por tener como componente principal al género *Pinus* (Acosta 2001).

Características del sistema agrícola:

Labranza tradicional (LT): se refiere a parcelas experimentales de iguales dimensiones que las MIAF y PAP, descritas anteriormente, instaladas en sitios seleccionados dentro de las microcuencas que se cultivan de acuerdo a las costumbres de los productores cooperantes, por lo que hay ligeras diferencias al MIAF en cuanto a, preparación del terreno, métodos de siembra (tracción animal en las pendientes menores y manual en las mayores) y en la cosecha. En estas parcelas los residuos son retirados por los productores para ser usados como forraje para los animales (PMSL, 1998). Este sistema carece de un arreglo topológico, se combina al azar maíz, frijol, calabaza, árboles frutales y otras especies (hierbas de olor, plantas medicinales, flores, etc) (PMSL 1998).

Procesamiento de las muestras de suelo para el fraccionamiento: En ambos sistemas, natural y agrícola, se procedió a realizar un muestreo de suelo; la muestra se tomó de manera aleatoria y en un lugar representativo de cada sistema, a una profundidad de 20 cm, se etiquetaron y se trasladaron al laboratorio para su procesamiento. A cada muestra se le asignó un número de laboratorio, con el cual se identificó durante el resto del procesamiento, se homogenizó la muestra dentro de la bolsa, destruyendo manualmente todos los terrones antes de colocarla a secar (al aire libre aproximadamente 48 hr) en platos de plástico marcados por el borde (parte superior) con el número de muestra registrado en el laboratorio, posteriormente se tamizó a través de una malla de 2 mm.

Fraccionamiento del suelo: Para el fraccionamiento del suelo se consideraron las siguientes clases de acuerdo al sistema USDA (Soil Survey Staff, 1975).

- (1) $> 250 \mu\text{m}$ (2000-250 μm) ó (equivalente a arena muy gruesa a media (Ag))
- (2) $< 250 \mu\text{m}$ (equivalente a los tamaños de arena fina (Af), limo (L) y arcilla (Ar))
- (3) $<50\text{-}>2 \mu\text{m}$ (equivalente a limo (L))
- (4) $< 2 \mu\text{m}$ (equivalente a arcilla (Ar))

También se separó la materia orgánica ligera (MOL), la cual de acuerdo a Gregorich *et al.* (2006) está compuesta por mezclas de plantas, animales y microorganismos en varios estados de descomposición, de tamaño menor a 53 μm . Esta fue separada por flotación después de la agitación de la muestra con bolitas de vidrio durante 26 horas a 75 opm, fue extraída manualmente con cuchara de plástico.

Las fracciones (1) ó Ag y (2) ó Af+L+Ar se separaron por tamizado en húmedo y las fracciones (3) y (4) por sedimentación y sifoneo, aplicando la Ley de Stocks.

Para la separación de las fracciones (1) y (2) se procedió de la siguiente manera:

Se pesaron 50 g de suelo (tamizado a malla 2 mm), se saturó por 24 horas con 100 mL de agua y se sometió a agitación, en acción recíproca a 75 opm durante 16 horas.

1) Este suelo se tamizó a través de malla No. 60 (250 μm) con agua, obteniendo las fracciones (1) o Ag que quedó sobre el tamiz y (2) ó Af+L+Ar que pasó a través del tamiz y fue colectada en vasos de precipitado.

Estas fracciones, así como la MOL, se recuperaron en vasos de precipitado de vidrio y se secaron en estufa a 60°C, se pesaron y por diferencia se obtuvo la cantidad de fracción recuperada de cada muestra.

2) Se tomaron 10 gramos de la fracción (2) (< 250 μm) y se saturó con 100 mL de agua por 12 horas, posteriormente se dispersó usando ultrasonido, en diferentes tiempos y energía aplicada (Cuadro 3).

Cuadro 3. Tiempo de sonicación y energía aplicada para la dispersión de las muestras.

Tiempo de sonicación	Energía aplicada (J/mL)
0 min	0.00
10 min	228
20 min	455
40 min	910
60 min	1365

La sonda se dejó descansar 10 minutos por cada 10 minutos de energía aplicada y 30 minutos por cada 30 minutos acumulados de energía aplicada, como se muestra en el Cuadro 4.

Cuadro 4. Ejemplo de secuencia de la sonda.

Muestra	S	D	S	D	S	D	S	D	S	D	S	D	Tiempo acumulado
	0	0											0
	10	10											10
10 gr	10	10	10	10									20
	10	10	10	10	10	30	10	10					40
	10	10	10	10	10	30	10	10	10	10	10	30	60

S= Tiempo de sonicación D= Descanso de la sonda

3) La muestra se trasvasó a columnas de vidrio y se obtuvo la fracción (3) < 2 μm (Ar), se agregó agua a la columna hasta 900 mL y se agitó manualmente 40 veces; se dejó reposar 16 horas y se sifoneó, este proceso se repitió hasta que el agua estuvo clara o el sobrenadante estuvo por debajo de los 10 cm en la columna. La suspensión colectada de esta fracción se centrifugó por 20 minutos a 3000 rpm para sedimentar la Ar y obtener mejor recuperación; el sobrenadante se colectó en un recipiente y se floculó en un solución 0.1 M de CaCl₂ para obtener la mayor recuperación posible.

4) Para obtener la fracción (4) 50-2 μm (L), se llenó la probeta hasta 900 ml y se agitó 40 veces manualmente, se dejó reposar 60 segundos (este tiempo varió en función a la temperatura, a mayor temperatura menor tiempo de reposo) y se sifoneó, se repitió el proceso hasta que no se observó a simple vista partículas libres en el agua en los 10 cm superiores de la columna, se dejó reposar por 24 horas y se eliminó el exceso de agua y se secó a 60°C.

5) La fracción restante en la probeta es la Af, de igual manera que las fracciones anteriores se eliminó el exceso de agua y se seco a 60°C.

Se calcularon los porcentajes de recuperación para cada fracción y la recuperación del suelo total, con base en el peso del suelo seco, utilizando las siguientes fórmulas:

$$\% \text{ de recuperación de cada fracción: } \frac{\text{gr de suelo de fracción } \phi \text{ seco}}{\text{gr de fracción recuperada}} \times 100$$

$$\% \text{ de recuperación del suelo total fraccionado: } \sum \text{recuperación parcial de cada fracción}$$

Se calcularon los porcentajes de recuperación para cada fracción.

Determinación de carbono total en suelo y en las fracciones del suelo: Los suelos sin fraccionar y las fracciones se tamizaron a malla 100 mm, en el caso de la materia orgánica particulada (vegetal) a malla 60 mm, todas las muestras se secaron en la estufa a 60°C por 2 horas, se trasladaron a un desecador con tapa hermética para su enfriamiento. De cada muestra se tomó una cantidad aproximada de 200 a 300 mg de suelo (en el caso de la fracción vegetal es menor de 100 mg) y se registró el peso exacto, se colocó en un crisol de porcelana (previamente lavado con ácido fosfórico y calcinado a 800 °C) y se introdujo dentro de la cámara del analizador de carbono TOC 5050 AC (Total Organic Carbon Analyzer).

Este instrumento mide la concentración de CO₂ de la muestra como respuesta a la absorción de energía en el rango del infrarrojo que hace esta molécula, que se genera por la oxidación del carbono a una temperatura de 900 °C. El valor obtenido es guardado en una base de datos del mismo analizador, el resto de la muestra se almacena en envases de plástico con tapa, se etiqueta y guarda. Los resultados del análisis en el TOC 5050 AC son proporcionados en porcentaje, por lo que fueron transformados para su análisis a gramos por kilogramo de suelo.

5.4. Determinación de la mineralogía del suelo

Para definir las arcillas presentes en el suelo, éstas se determinaron mediante difracción de rayos X, para lo cual primero se eliminó la materia orgánica a las muestras; se pesaron 50 g de suelo en un vaso de precipitados de 600 ml y se les agregó 30 ml de H₂O₂ hasta cubrir totalmente la muestra de suelo y se adicionó 40 ml de agua destilada lavando a la vez los residuos del suelo de las paredes del vaso, se agitó cada una de las muestras mezclando la suspensión y se dejaron reposar durante 12 horas, posteriormente se colocaron en una plancha de arena caliente (entre 60 y 80 °C), se fue agregando peróxido y agua destilada agitando a la vez hasta que la muestra fría no presentó efervescencia al agregar más H₂O₂. El exceso de peróxido se eliminó agregando agua destilada a las muestras y calentando hasta que no se observó efervescencia y el sobrenadante de la suspensión se tornó traslucida .

Las muestras obtenidas del tratamiento anterior se trasvasaron a vasos de precipitado de vidrio de 50 ml, se les agregaron 5 ml de agua y se les aplicó energía mediante ultrasonido (Fisher modelo 300)

durante 1 minuto para dispersar cada muestra, de esta suspensión se tomaron alícuotas de 5 gotas y se distribuyeron sobre un portaobjetos de vidrio y se dejaron secar al aire libre hasta que se evaporó el agua (se realizó por triplicado).

Saturación con etiléntrico (EG): Los portaobjetos con la capa de arcilla se colocaron en un desecador con EG y se aplicó vacío. La arcilla estuvo en contacto con los vapores del EG durante 8 horas (o hasta que la arcilla estuvo saturada). Se determinaron los rayos X.

Calentamiento a 490° C: Se colocaron los portaobjetos con las películas de arcilla en una mufla a 490°C durante 2 horas. Una vez fría la mufla, se sacaron los portaobjetos y se colocaron en un desecador hasta el momento de la determinación de rayos X.

Calentamiento a 550°C: Se colocaron los portaobjetos con las películas de arcilla en una mufla a 550°C durante 1 hora. Una vez fría la mufla, se sacaron los portaobjetos y se colocaron en un desecador hasta el momento de la determinación de rayos X.

Saturación con HCl 1 N: Se tomó 1 gr de arcilla y se agregó HCl 1 N, se hirvió durante 2 horas. Se tomaron alícuotas y se prepararon las laminillas, se dejaron secar hasta el momento de la determinación de rayos X.

Saturación con potasio: Se pesó 1 gr de arcilla de cada muestra por separado y se les adicionaron 30 ml de KCl 1 N (75.4 g/L), se agitaron durante 5 minutos y se centrifugaron 2 minutos, el sobrenadante se les eliminó y se repitió el tratamiento 3 veces, se lavaron las muestras 7 veces hasta que la prueba de cloruros con AgNO_3 0.1M dio negativa. Se calentaron las laminas durante 1 hora a 300°C, se dejaron enfriar y se determinó la difracción de rayos X.

Para la difracción de rayos X, se utilizó un difractómetro de rayos X (Shimadzu modelo XD-3A), su fuente de rayos X se obtiene de un tubo con ánodo de cobre y radiación $\text{CuK}\alpha$. Los portaobjetos se colocaron en el goniómetro del aparato, los difractogramas se graficaron simultáneamente en una computadora para lo cual se utilizó en software Sadw1p. Las especificaciones del aparato correspondientes al análisis de las muestras fueron: ángulo de inicio de la difracción 35 grados, velocidad el goniómetro 4 grados por segundo, velocidad de carta del graficador 10mm/min, Kv=30, CPS=5K, tiempo de θ =1 y constante de tiempo=1. Para identificar el tipo de arcilla se ubicaron las

reflexiones en los difractogramas usando las tablas correspondientes para convertir los ángulos 2θ a los valores " d " correspondientes a las distancias interlaminares de las láminas de arcilla expresadas en nm . Las muestras fueron analizadas en el espectro de 60° a 5° 2θ (Whittig and Allardice, 1986).

5.5. Diseño experimental y análisis estadístico

Para el análisis estadístico de los resultados de carbono y nitrógeno se empleó un diseño experimental completamente al azar, las variables a analizar fueron el contenido de carbono y nitrógeno en cinco niveles de energía aplicada en dos distintos sistemas de uso de suelo y cinco fracciones de suelo en tres regiones de estudio. Se realizó un análisis de varianza y se aplicó la prueba de comparación de medias de Tukey, $\alpha \leq 0.05$ mediante el modelo logístico, en el programa SAS (SAS V8e).

VI. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

6.1. Descripción, caracterización, clasificación y preservación de los suelos de las parcelas experimentales seleccionadas.

Los resultados obtenidos en la descripción de campo, los análisis de laboratorio y la preservación de los suelos se muestran a continuación:

Morfología: Los suelos de esta zona se caracterizaron por presentar perfiles poco desarrollados, de reciente formación, complejos, debido a la mezcla de materiales edáficos (Figura 10), que se generan como consecuencia de las pronunciadas pendientes de la región (Colegio de Postgraduados, 1998).



a) Perfil Mazateca (P1)

b) Perfil Cuicateca (P2)

c) Perfil Mixe (P3)

Figura 10. Perfiles estudiados en las tres microcuencas.

Aunque en general los tres perfiles estudiados presentaron características morfológicas similares, se observaron algunas ligeras diferencias. El color del suelo varió de pardo en P1 y P2 a pardo oscuro en P3. El color más oscuro en P3 se asoció a la acumulación y descomposición de materia orgánica en ese sitio, favorecida por el clima y la vegetación nativa y actual. El desarrollo de la estructura en los tres perfiles varió de moderada P1 y P2 a bien desarrollada en P3, favorecida por la actividad microbiana y la presencia de carbono orgánico (Cuadro 5).

Cuadro 5. Características morfológicas de tres suelos de la Sierra Norte de Oaxaca donde se realizan estudios agronómicos y de captura de carbono.

Horizonte	Profundidad	Color	Estructura	Consistencia	Transición
Mazateca					
Ap	0 - 19	10 YR 3/3	Bloques subangulares	Friable (húmedo)	Marcada y horizontal
A	19 – 37	7.5 YR 4/6	Bloques subangulares	Friable (húmedo)	Media y ondulada
AB	37 – 67	10 YR 4/4	Bloques subangulares	Friable (húmedo)	Tenue e irregular
BC	67 – 88	10 YR 6/6	Bloques angulares y subangulares	Friable (húmedo)	Tenue e irregular
C	88 +	2.5 Y 6/6	Bloques angulares	Friable (húmedo)	-----
Cuicateca					
Ap	0 – 17	10 YR 4/4	Bloques subangulares	Muy Friable (húmedo)	Tenue y ondulada
A	17 – 40	10 YR 6/6	Bloques subangulares	Friable (húmedo)	Tenue y ondulada
AB	40 – 58	10 YR 6/6	Bloques subangulares y angulares	Friable (húmedo)	Media e irregular
Bw	58 – 85	5 YR 6/8	Bloques subangulares	Firme (seco)	Media e irregular
Bw2	86 +	10 Y 6/8	Bloques subangulares y angulares	Firme (seco)	-----
Mixe					
Ap	0 – 7	10 YR 2/1	Bloques subangulares	Friable (húmedo)	Media y ondulada
Ah	7 – 32	10 YR 2/2	Bloques subangulares	Friable (húmedo)	Media y ondulada
ABh	32 - 49	10 YR 3/4	Bloques subangulares	Friable (húmedo)	Marcada e irregular
B	49 – 60	10 YR 4/6	Bloques subangulares	Friable (húmedo)	Marcada e irregular
B2	60 +	10 YR 5/6	Bloques subangulares y angulares	Firme (húmedo)	-----

La consistencia en húmedo fue friable en todos los casos, excepto en el primer horizonte de P2 (muy friable) y el último horizonte de P3 donde se presentó firme. La transición entre los horizontes, muestra un movimiento de materiales orgánicos hacia la parte baja del perfil; las transiciones de tipo ondulado en los primeros horizontes de P2 y P3, indican deposición de material coluvial en distintas profundidades, lo que se explica por las fuertes pendientes. En P3 se observó una considerable lixiviación de material orgánico fino, por la elevada precipitación de la zona y el contenido de materia orgánica del suelo en esta región. En los tres sitios se observaron abundantes raíces finas y delgadas, que disminuyen con la profundidad. Abundan los poros muy finos y finos, dentro y entre agregados, lo cual confiere al suelo una permeabilidad de rápida a moderada. Tanto en P1 como en P2 se presentó abundancia de piedras, en superficie y en el perfil. Lo anterior indica movimiento y deposición de diversos materiales coluviales al interior del perfil en P1, favorecido por las fuertes pendientes de la región. En P2 este proceso fue menor por las escasas lluvias del lugar.

Propiedades físicas: Los perfiles P2 y P3 presentaron porcentajes similares de limo en todo el perfil (ca. 57 % y 51 % para P2 y P3), no así P1 que tuvo mayores porcentajes de limo en los horizontes profundos (57-71 %). Los porcentajes de arena fueron bajos (alrededor del 10 %) en P1 y P3 y altos para P2 (hasta 40 % en varios de los horizontes de los dos perfiles) (Cuadro 2). El P2, por el contrario, tenía más arena (30-40 %) y menos arcilla (20 %). Los porcentajes de arena, limo y arcilla definieron clases texturales muy similares, franco para P2, franco limosa para P1 y franco arcillo-limosa para P3 (Cuadro 6).

Cuadro 6. Características físicas de tres suelos de la Sierra Norte de Oaxaca donde se realizan estudios agronómicos y de captura de carbono.

Horizonte	Humedad	Arena	Limo	Arcilla	Textura
	%				
Mazateca					
Ap	49	13	57	30	Franco arcillo limoso
A	49	9	52	39	Franco arcillo limoso
AB	48	9	49	42	Arcillo limoso
BC	44	7	72	21	Franco limoso
C	40	6	71	23	Franco limoso
Cuicateca					
Ap	25	26	57	17	Franco limoso
A	25	33	50	17	Franco
AB	23	29	51	20	Franco limoso
B	19	23	57	20	Franco limoso
B2	18	46	57	17	Franco
Mixe					
Ap	54	9	51	36	Franco arcillo limoso
Ah	55	12	64	37	Franco arcillo limoso
ABh	37	13	50	23	Franco limoso
B	49	11	51	39	Franco arcillo limoso
B2	41	10	48	39	Franco arcillo limoso

Propiedades químicas: El pH ácido (4.2 a 5.1) en P1 y P3 se explica por los elevados valores de acidez intercambiable (3 cmolkg^{-1}) en P1 y hasta 6.9 cmolkg^{-1} en P3, y de Al intercambiable (1 y 2 cmolkg^{-1}) en ambos perfiles. En P2 los valores de pH fueron mayores (aproximadamente pH 6) y aquí la acidez y Al intercambiables fueron sólo trazas (Castellanos *et al.*, 2000). Los suelos presentan altos contenidos de materia orgánica. Los valores más bajos, de 2.5 a 4.6 % MO, correspondieron a P1. En el horizonte superficial de P2 la MO fue 6 % MO y de 12 a 20 % MO en P3. Los elevados porcentajes

de MO en P3 sugieren presencia de protones provenientes de la disociación de grupos funcionales de dicha MO (Brady y Weil, 2000) (Cuadro 7).

Cuadro 7. Propiedades químicas de tres suelos de la Sierra Norte de Oaxaca donde se realizan estudios agronómicos y de captura de carbono.

Horizonte	pH	Materia orgánica	Carbono orgánico	CIC	K	Ca	Mg	Na	Al	Acidez	PSB				
												Intercambiables			
												%	cmol/kg ⁻¹ suelo		
Mazateca															
Ap	5	2.5	1.27	7.1	0.14	0.1	0.1	0.1	1.8	3.1	4				
A	4.4	4.6	2.29	6.5	0.15	0.3	0.1	0.1	1.1	3.6	8				
AB	4.5	3.6	1.78	14.1	0.06	0.3	0.0	0.1	0.8	3.3	2				
BC	5.1	1.1	0.56	5.6	0.12	0.1	0.1	0.1	0.7	2.5	5				
C	5.1	1.1	0.56	6.1	0.10	0.1	0.1	0.1	0.7	2.3	5				
Cuicateca															
Ap	5.2	6.0	3.00	11.8	0.25	6.2	2.3	0.1	Trazas	0.1	73				
A	5.7	4.8	2.39	11.0	0.20	6.8	2.4	0.0	Trazas	0.1	83				
AB	5.8	1.7	0.86	10.8	0.13	5.4	1.7	0.2	0.1	0.1	66				
Bw	5.7	1.1	0.56	10.7	0.14	5.5	3.1	0.1	0.1	0.3	80				
Bw2	5.7	0.5	0.25	9.21	0.16	6.2	2.7	0.1	0.1	0.2	98				
Mixe															
Ap	4.5	20.8	10.4	24.5	0.40	1.9	0.5	0.1	1.7	6.2	11				
Ah	4.2	12.1	6.04	16.8	0.17	0.5	0.2	0.1	2.6	6.9	4				
ABh	4.2	7.6	3.81	14.2	0.28	0.2	0.1	0.1	1.3	5.4	3				
B	4.5	3.6	1.78	11.0	0.10	0.0	0.1	0.1	1.0	4.9	0				
B2	4.7	3.4	1.68	9.58	0.10	0.0	0.1	0.1	1.3	4.4	0				

PSB=Porcentaje de Saturación de Bases

CIC= Capacidad de Intercambio Catiónico

En los tres perfiles, los contenidos de materia orgánica (MO) y carbono orgánico (CO) tendieron a disminuir con la profundidad del suelo. Los elevados contenidos de carbono orgánico en los tres perfiles, sobre todo en P3, se explican por la práctica de roza-tumba-quema, que era común en la región hasta antes del establecimiento del sistema MIAF. Parte del carbono orgánico puede ser atribuido a la presencia de carbón negro que se observó visualmente en las muestras. El contenido de MO es producto de la historia de manejo y acumulación de residuos de esos sitios. Los altos valores de CIC en los perfiles P1 y P3 solamente podrían asociarse a arcillas del tipo de la montmorillonita y vermiculita (Bain and Smith, 1987) y, en P3, también al alto contenido de MO (Brady y Weil, 2000). En

el caso de P2 los valores de la CIC son concordantes con la cantidad de cationes intercambiables presentes, indicando que en este caso, son las arcillas del suelo las que actúan como complejo de intercambio, en este perfil, también se obtuvieron los menores porcentajes de materia orgánica.

Mineralogía: En la Figura 11, se presentan los difractogramas característicos de los minerales presentes en los suelos de los tres sitios estudiados. En los suelos de las regiones Cuicateca y Mazateca (Figura 11A) los diagramas de difracción indican la presencia de cuarzo como mineral predominante, lo que se denota por la reflexión característica de éste a 3.36 Å. En menor proporción, se denotó la presencia de micas, cuya reflexión principal se presenta a 10.15 Å.

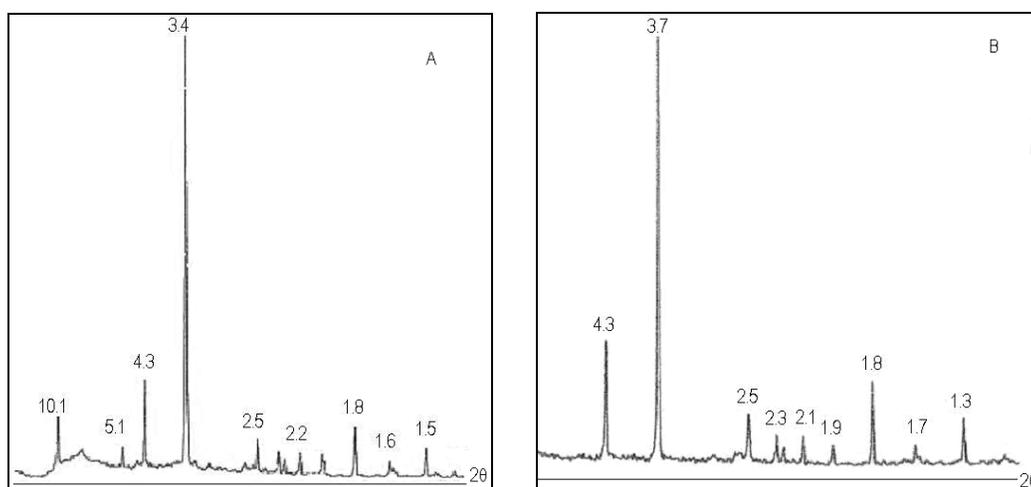


Figura 11. Difractogramas de los minerales primarios de los suelos de las regiones Mazateca y Cuicateca (A) y Mixe (B), de la Sierra Norte de Oaxaca. Muestras de suelo total en polvo desorientado, radiación $CuK\alpha$.

El resto de los picos presentes en los difractogramas corresponden a otras reflexiones asociadas a las distintas orientaciones de los dos minerales encontrados. En el caso de los suelos de la región Mixe (Figura 11B) sólo se observa la reflexión característica y los picos relacionados a las orientaciones del cuarzo, único mineral primario detectado por la DRX. Las micas inicialmente presentes, ya han sido intemperizadas, y la presencia de solo cuarzo indica un proceso de intemperismo más avanzado en esta región. Los minerales anteriores son característicos de las micasquistos (Foucault y Raoult, 1985) o esquistos de micas (Blyth y de Freitas, 1995) lo que corrobora la naturaleza del material de origen de los suelos, observada en campo y señalada por las cartas geológicas de INEGI (INEGI, 1999).

Clasificación de suelos: Los regímenes de temperatura (mésico) y de humedad (údico) fueron similares para los tres perfiles estudiados, pero se presentaron variaciones en cuanto a la definición de los horizontes de diagnóstico superficial y subsuperficial (Cuadro 8).

Cuadro 8. Horizontes de diagnóstico y regímenes de humedad y temperatura identificados en tres suelos de la Sierra Norte de Oaxaca donde se realizan estudios agronómicos y de captura de carbono.

Región	Horizontes de Diagnóstico		Regímenes	
	superficial	Sub superficial	T°	Humedad
Mazateca	Úmbrico	Sómbrico	Mésico	Údico
Cuicateca	Ócrico	Cámbico	Mésico	Ústico
Mixe	Úmbrico	Sómbrico	Mésico	Údico

Los horizontes de diagnóstico superficial y sub-superficial resultaron ser semejantes (úmbrico y sómbrico, respectivamente) en P1 (Mazateca) y P3 (Mixe), pero ócrico y cámbico en P2 (Cuicateca). Esta variación fue determinada por el clima, que es más seco en la última microcuenca.

Los horizontes úmbrico y ócrico son horizontes formados de material mineral por intemperismo del material parental, principalmente por efecto del clima. Aunque los horizontes ócricos pudieran confundirse con los horizontes mólicos o úmbricos, se diferencian de éstos principalmente por su contenido de carbono, los valores de brillo (value) e intensidad (croma), y por el porcentaje de saturación de bases (PSB) (WRB, 1999). Los horizontes subsuperficiales sómbrico y cámbico presentan colores que indican la acumulación de materia orgánica proveniente de la descomposición de los residuos vegetales. El horizonte sómbrico se distingue del cámbico por presentar un color más oscuro, así como mayor contenido de materia orgánica, y mayor desarrollo de su estructura (WRB, 1999).

Los resultados antes presentados permitieron clasificar, de acuerdo con la Taxonomía de Suelos, a los tres perfiles estudiados como Inceptisoles (Cuadro 9). (Soil Survey Staff, 2003). Hudnall *et al.*, (2000) y Bautista *et al.* (2005) reportaron Inceptisoles en regiones cercanas a la de este estudio.

En todos los casos, se trata de suelos jóvenes, de reciente formación, muy poco meteorizados y desarrollados, que presentan un horizonte B alterado por procesos químicos favorecidos por el clima. Su profundidad es muy variable, pudiendo llegar a ser muy profundos o someros. Presentan

propiedades de diagnóstico que indican los procesos formadores del suelo en las condiciones presente o pasada. Los Inceptisoles no siempre presentan las características del perfil bien definidas (Brady y Weil, 2000).

Cuadro 9. Clasificación según los criterios de la Taxonomía de Suelos en tres suelos de la Sierra Norte de Oaxaca donde se realizan estudios agronómicos y de captura de carbono.

Región	Clasificación			
	Orden	Suborden	Gran grupo	Sub grupo
Mazateca	Inceptisol	Udepts	Dystrudepts	Humic Dystrudepts
Cuicateca	Inceptisol	Usteps	Haplustepts	Typic Haplustepts
Mixe	Inceptisol	Udepts	Dystrudepts	Humic Dystrudepts

En el Cuadro 10 se muestra la clasificación correspondiente para cada uno de los perfiles estudiados de acuerdo a la propuesta de la Base de Referencia Mundial del Recurso Suelo (WRB). Los perfiles P1 y P3 (Mazateca y Mixe) se clasificaron como Umbrisoles húmicos con propiedades ferrálicas. Mientras que el perfil P2 (Cuicateca) se clasificó como Cambisol Ortiéutrico-hiperferrálico (FAO-ISRIC-SICS, 1999).

Cuadro 10. Clasificación según los criterios de la Base de Referencia Mundial del Recurso Suelo (WRB) de tres suelos de la Sierra Norte de Oaxaca donde se realizan estudios agronómicos y de captura de carbono.

Región	Clasificación
Mazateca	Umbrisol Humico-ferrálico
Cuicateca	Cambisol Ortiéutrico-hiperferrálico
Mixe	Umbrisol Umbrihúmico-ferrálico

Preservación de suelos: Los monolitos permitieron preservar los perfiles de suelo tal como se encontraban en el sitio experimental como una referencia para las investigaciones actuales e investigaciones futuras. Es común que mucha información valiosa que se ha generado en estudios de campo en México carezca de adecuadas referencias edafológicas, clima y manejo, lo cuál impide la extrapolación de los resultados a condiciones similares.

Los monolitos ayudan a identificar, además de la clasificación del perfil de suelo, su localización geográfica exacta y las características más importantes de la región donde se localiza el sitio documentada con fotografías del sitio y del perfil, así como resultados de los análisis químicos y físicos.

Los monolitos aparte de constituir una ayuda para la investigación son una manera de mostrar claramente al público en general, las diferencias y las similitudes entre los suelos estudiados (Figura 12).



a) Monolito Mazateca (M1) b) Monolito Cuicatca (M2) c) Monolito Mixe (M3)
 Figura 12. Monolitos preservados de los tres sitios experimentales estudiados en las tres microcuencas.

6.2. Carbono acumulado en la biomasa aérea de árboles frutales.

El potencial de captura de carbono en la parte aérea de los frutales se estableció con base en la cantidad de biomasa y a partir de esta, el carbono que los árboles pueden acumular por hectárea por año. Para este cálculo se consideró una densidad de 1000 árboles por hectárea.

Región Mazateca

En el Cuadro 11 se presenta el carbono acumulado por por los árboles de durazno establecidos en las parcelas MIAF experimentales (Centro de Salud y Santa Catarina) en la microcuenca San Jerónimo Tecoaatl en la región Mazateca.

Cuadro	2001 2002 2003 2004				11.
	2001	2002	2003	2004	
MIAF 1 (Centro de Salud)	0.96	2.49	6.41	7.66	1.70
MIAF 2 (Santa Catarina)	0.00	0.69	3.69	5.18	1.48

Incremento de carbono en la biomasa aérea de los árboles frutales en los sistemas MIAF en la región Mazateca.

La parcela MIAF 1 (Centro de Salud) fue establecida en el año 1999, un año antes que la parcela MIAF 2 (Santa Catarina). Ello ocasionó que la acumulación de biomasa y consecuentemente de carbono fuese un poco más bajo en la segunda. En efecto, la diferencia entre los dos sistemas MIAF establecidos es sólo de 0.22 Mg ha⁻¹ al quinto y cuarto año, respectivamente la acumulación promedio de carbono de los árboles había sido 7.66 y 5.18 Mg ha⁻¹ de carbono, lo cual corresponde a una tasa de acumulación promedio de 1.70 y 1.48 Mg ha⁻¹. En el Cuadro 12 se muestran los resultados de la acumulación de carbono la biomasa aérea de los árboles de plantaciones de duraznos realizadas en parcelas de productores (PAP), cuyos resultados en promedio fueron ligeramente inferiores a los de los MIAF experimentales, más aún hubo PAP que acumulación más carbono que los experimentales.

Cuadro 12. Incremento de carbono en la biomasa aérea de los árboles frutales en los sistemas PAP en la región Mazateca.

Sistema	AÑO			Incremento promedio anual (Mg ha ⁻¹)
	2001	2003	2004	
PAP 1	0.64	2.49	4.57	1.14
PAP 2	1.08	3.38	3.86	0.97
PAP 3	0.94	5.12	6.18	1.55
PAP 4	0.44	5.01	6.07	1.52
PAP 5	0.71	3.38	4.44	1.11
PAP 6	1.26	3.53	4.59	1.15
PAP 7	0.48	3.42	4.04	1.01

En la Figura 13, se observan gráficamente los resultados discutidos anteriormente.

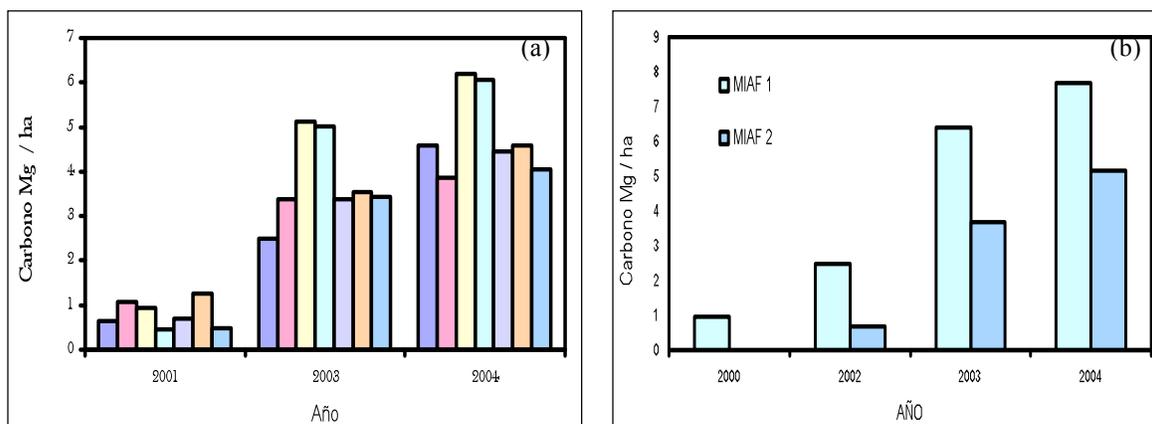


Figura 13. Incremento de carbono aéreo en los sistemas MIAF (a) y PAP (b) en la región Mazateca.

Región Cuicateca

En la región Cuicateca, las condiciones para el desarrollo de los frutales son menos propicias que en la región Mazateca, los suelos son mucho más pedregosos y las pendientes más abruptas, el incremento anual de los frutales fue menor en el MIAF 2 (La Colorada) (el cual se estableció meses después) que en el MIAF 1 (Camino Yacuay), la tasa de acumulación anual promedio de carbono fue de 1.31 y de 0.49 Mg ha⁻¹ para cada parcela experimental. (Cuadro 13) .

Cuadro 13. Incremento de carbono en la biomasa aérea de los árboles frutales de los sistemas MIAF en la región Cuicateca.

Sistema	AÑO				Incremento promedio anual (Mg ha ⁻¹)
	2000	2001	2003	2004	
MIAF 1 (camino Yacuay)	0.53	3.54	5.05	5.91	1.31
MIAF 2 (La colorada)	0.02	1.24	1.93	2.19	0.49

En esta microcuenca al momento de hacer las mediciones solo había una parcela PAP, establecida al mismo tiempo que el MIAF 2 (La Colorada), presentó mayor tasa de acumulación de biomasa y por lo tanto de carbono que dicho sistema, mostrando que este sistema adoptado por los productores funciona igual o mejor para la captura de carbono, que los experimentales (Cuadro 14 y Figura 14).

Cuadro 14. Incremento de carbono en la biomasa aérea de los árboles frutales en de el sistema PAP en la región Cuicateca.

Sistema	AÑO			Incremento promedio anual (Mg ha ⁻¹)
	2001	2003	2004	
PAP 1	1.09	1.12	2.34	0.59

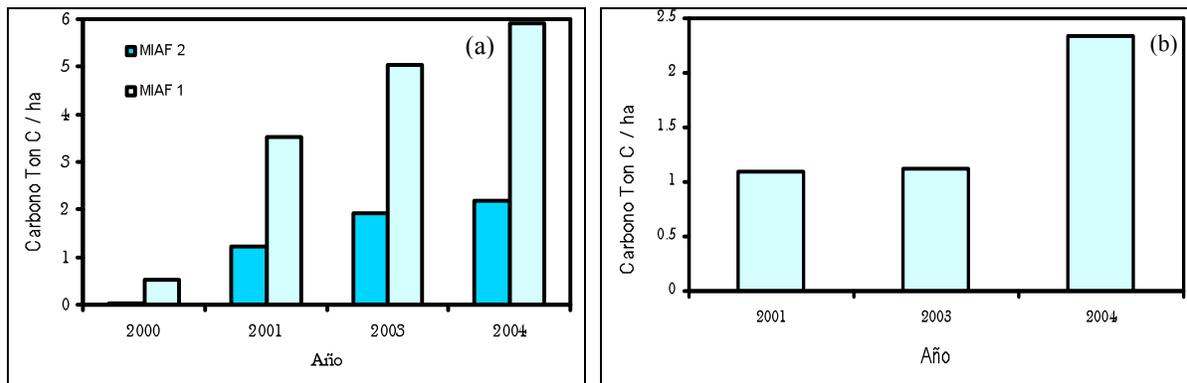


Figura 14. Incremento de carbono aéreo en los sistemas MIAF (a) y PAP (b) en la región Cuicateca.

Región Mixe

En la región Mixe, el MIAF fue establecido inicialmente con cafetales, debido a que las condiciones son más óptimas para este frutal que para el durazno por la elevada humedad de la región; y 3 años después se estableció el sistema con durazno, por lo que la acumulación tanto anual como total fue menor que en las regiones Mazateca y Cuicateca aunque no por esto menos importante. El sistema con café presentó un potencial de captura de carbono de 0.91 ton por año (Cuadro 15).

Cuadro 15. Incremento de carbono en la biomasa aérea en los sistemas MIAF en la región Mixe.

SISTEMA	Año de medición					Incremento promedio (Mg ha ⁻¹)
	2000	2001	2002	2003	2004	
MIAF 1 (paraje Minatitlán) durazno	0	0	0	0.41	3.59	1.80
MIAF 2 (paraje Minatitlán) café	0.18	0.37	1.62	2.35	3.65	0.91

El Cuadro 16 muestra el incremento anual de los sistemas PAP establecidos con durazno.

Cuadro 16. Incremento de carbono en la biomasa aérea en los sistemas PAP en la región Mixe.

SISTEMA	Año de medición		Incremento promedio (Mg ha ⁻¹)
	2003	2004	
PAP 1	0.487	2.893	1.45
PAP 2	0.537	1.208	0.60
PAP 3	0.842	2.504	1.25
PAP 4	0.81	1.998	1.00
PAP 5	0.845	2.341	1.17
PAP 6	0.625	1.97	0.99
PAP 7	0.84	1.789	0.89
PAP 8	0.984	podada	--
PAP 9	0.438	3.594	1.80
PAP 10	1.007	1.662	0.83
PAP 11	1.045	2.773	1.39
PAP 12	0.533	3.599	1.80
PAP 13	0.417	1.586	0.79
PAP 14	0.367	1.938	0.97
PAP 15	0.463	1.028	0.51
PAP 16	0.436	0.704	0.35
PAP 17	0.378	1.437	0.72
PAP 18	0.634	1.231	0.62
PAP 19	0.801	podada	--
PAP 20	0.984	2.131	1.07

Los resultados de carbono en la biomasa aérea de los árboles frutales de la región Mixe son menores a los de la Mazateca y Cuicateca, debido a que el café por la forma y naturaleza de la especie, acumula menos biomasa, sin embargo no deja de ser una alternativa importante para lugares con condiciones climáticas similares.

Los sistemas PAP establecidos en esta región con durazno presentaron en general un importante potencial de captura de carbono que osciló entre 0.35 a 1.8 Mg ha⁻¹ anuales, las variaciones se deben a diversos factores como la ubicación de las parcelas y el manejo del productor (Cuadro 16). Varias de estas parcelas están ubicadas fuera de la microcuenca pero dentro de la misma región. Estos incrementos se pueden observar claramente en la Figura 15.

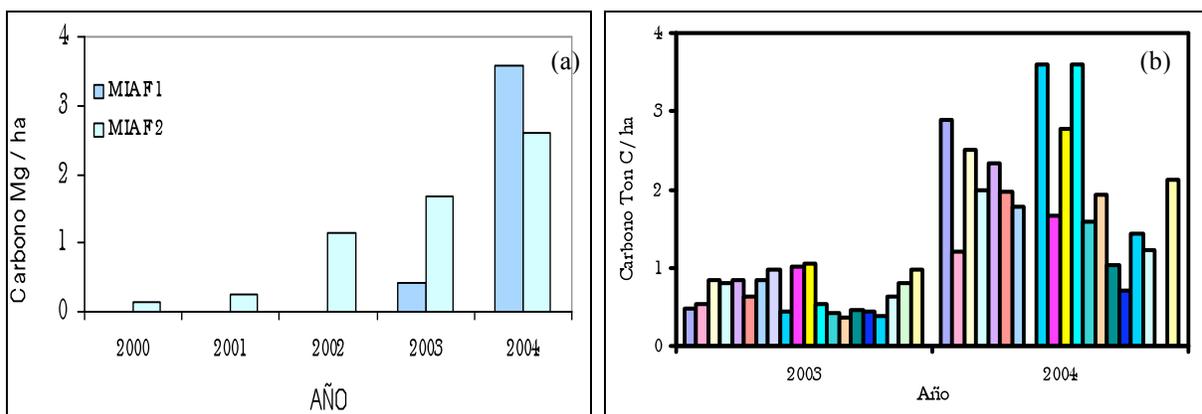


Figura 15. Incremento de carbono aéreo en los sistemas MIAF (a) y PAP (b) en la región Mixe.

6.3. Carbono en diferentes fracciones de tamaño del suelo.

Fraccionamiento del suelo: La aplicación de distintos niveles de energía (224, 455, 910 y 1365 Jml⁻¹) con una sonda de ultrasonido tuvo por objetivo obtener una dispersión completa de los suelos. Los resultados de este experimento permitieron definir la energía máxima requerida (Jml⁻¹) para lograr la máxima dispersión. En los cuadros y figuras se presentan los promedios de los porcentajes de la recuperación de masa para cada una de las fracciones en que se separó el suelo, así como los porcentajes totales de recuperación. Los resultados de las tres repeticiones correspondientes a cada fracción y nivel de energía, se presentan en el Apéndice de la tesis. Las curvas que se muestran permiten entender también la dinámica del rompimiento de los agregados como resultado de la aplicación de energía aplicada con ultrasonido.

Recuperación de fracciones en los sistemas labranza tradicional y bosque de liquidámbar en la región Mazateca: En el Cuadro 17 y Figura 16 se presentan los resultados del fraccionamiento del suelo cuando se aplicó distintos niveles de energía a los suelos de los sistemas LT y BL de la región Mazateca. La recuperación del suelo tratado con los diferentes niveles de energía en ambos sistemas de manejo fué de 98 a 104 % (Cuadro 17). El porcentaje de recuperación de la materia orgánica ligera

(MOL) (sin aplicar ultrasonido) fue en promedio de 1.80 % en el bosque (BL) y de 1.3 % en el sistema agrícola (LT).

Cuadro 17. Fraccionamiento del suelo total en los sistemas agrícola y natural de la región Mazateca.

LABRANZA TRADICIONAL (LT)						
Recuperación (%)						
Energía (J/mL ⁻¹)	Arena gruesa (Ag) (250-2000 µ)	Arena Fina (Af) (50-250 µ)	Limo (L) (2-50 µ)	Arcilla (Ar) (< 2 µ)	limo + arcilla (< 2-50 µ)	TOTAL
0	17.49 a	15.86 a	52.91 a	16.00 c	68.91 b	103.56 a
224	13.14 ba	6.98 b	48.36 b	33.47 b	81.83 a	103.33 a
455	10.63 b	6.30 b	47.76 cb	37.77 ba	85.52 a	103.89 a
910	8.07 b	5.49 b	44.54 c	40.55 a	85.09 a	99.91 a
1365	10.03 b	5.08 b	45.67 cb	37.68 b	83.35 a	99.47 a
DMS	6.18	2.14	3.57	4.78	7.71	5.83

BOSQUE DE LIQUIDÁMBAR (BL)						
Recuperación (%)						
Energía (J/mL ⁻¹)	Arena gruesa (Ag) (250-2000 µ)	Arena Fina (Af) (50-250 µ)	Limo (L) (2-50 µ)	Arcilla (Ar) (< 2 µ)	limo + arcilla (< 2-50 µ)	TOTAL
0	34.51 a	13.24 a	44.23 a	5.25 d	49.48 c	98.71 a
224	26.21 b	6.67 b	44.86 a	18.47 c	63.32 b	98.04 a
455	21.65 cb	6.28 b	48.27 a	23.13 b	71.41 ba	101.26 a
910	20.86 cb	5.94 b	47.33 a	25.43 ba	72.76 a	101.04 a
1365	16.70 c	6.55 b	47.20 a	27.87 a	75.08 a	100.60 a
DMS	5.54	2.38	6.34	3.99	8.37	6.08

TOTAL= (MOL+Ag+Af+L+Ar), MOL=materia orgánica ligera, Ag= arena gruesa Af=arena, Fina, L=limo, Ar=arcilla.

Los resultados del Cuadro 17 indican que la aplicación de energía a la suspensión de suelo condujo a la disminución del porcentaje de las fracciones gruesas, en el sistema agrícola (LT) de 17 a 8 % para Arena gruesa (Ag) y de 16 a 5 % para Arena fina (Af), y en el bosque BL de 34 a 17 % para Ag y de 13 a 6 % para Af. También disminuyó L de 53 a 45 % en LT. Los agregados contenidos en las fracciones de tamaño Ag y Af en el sistema agrícola (LT) y los de la fracción Af en el bosque BL resultaron ser los menos estables al romperse a bajos niveles de energía (224 Jml⁻¹). Por el contrario, la aplicación de energía condujo a incrementos en el porcentaje de recuperación, en la fracción Ar (arcilla), de 16 a 38 % en el sistema agrícola (LT) y de 5 a 25 % en el bosque BL. En ambos sistemas la aplicación de una energía mayor provocó aumento del porcentaje de recuperación de Ar. El análisis estadístico indica que para lograr una máxima dispersión, se requiere de mayor energía en el bosque BL (910 Jml⁻¹) que en el suelo del sistema agrícola LT (455 Jml⁻¹). El nivel de energía aplicado para obtener la mayor recuperación de las fracciones se consideró como el óptimo para alcanzar la máxima dispersión en los

suelos (Christensen, 1992). De acuerdo con esto, los porcentajes obtenidos con ultrasonido correspondieron a: 11 % (Ag), 6 % (Af), 45 % (L), y 38 % (Ar) para LT y 21 % (Ag), 7 % (Af), 47 % (L) y 25 % (Ar) para BL. La distribución por tamaño de partícula realizada con el método de la pipeta de Robinson en el suelo del sistema agrícola LT, dio como resultado que a Ag, Af, L (limo) y Ar le correspondieran 3, 6, 59 y 32 % de la masa, respectivamente y en el bosque BL estos porcentajes fueron 7, 12, 59 y 22, respectivamente. Si se comparan los porcentajes de las fracciones que se obtuvieron con ambas técnicas, al aplicar ultrasonido el porcentaje de Ag y Ar fue mayor pero el de L fue menor, en ambos sistemas lo cual indica que aún cuando la aplicación de ultrasonido permitió sobrepasar los porcentajes de Ag y Ar obtenidos por la Pipeta de Robinson, esta técnica no fue tan eficiente en la ruptura de los agregados del tamaño Af (50-250 μm), y L (2-50 μm). En la Figura 16 se presenta la variación de los porcentajes de recuperación de cada fracción separada (% recuperación de masa) en función de la cantidad de energía aplicada con ultrasonido (J mL^{-1}).

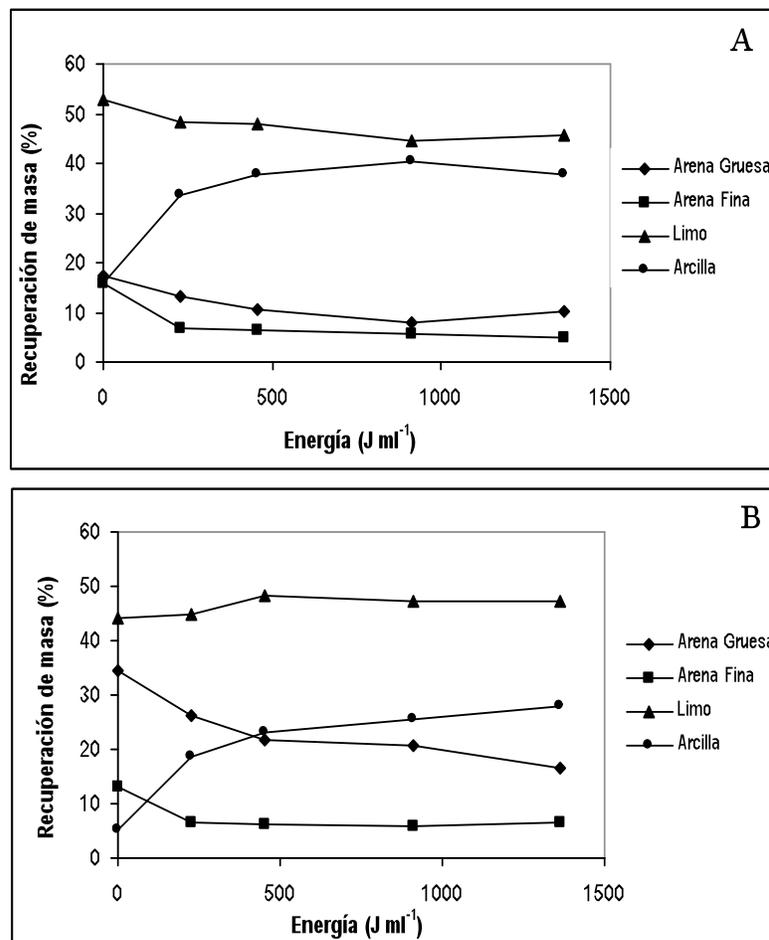


Figura 16. Efecto de la aplicación de energía en la fracción menor a 250 μm en los sistemas (A) labranza tradicional y (B) bosque de liquidámbar en la región Mazateca.

Las curvas indican de manera general que la aplicación de ultrasonido fue eficiente para romper los agregados del suelo. Esto se observó claramente por la disminución del porcentaje de la fracción Ag, situación que fue más pronunciada para el bosque BL que para LT, lo cual indica que los microagregados de ese tamaño en LT son más estables que en BL. Por el contrario, el porcentaje de recuperación de la fracción Ar aumentó con la energía aplicada hasta los 455 JmL^{-1} en LT y 910 JmL^{-1} en BL. Niveles de energía mayores resultaron en un comportamiento de las curvas casi asintótico. Al aumentar la energía aplicada, se dio una transferencia de masa, de Ag y Af hacia la fracción fina Ar en el BL, y de Ag, Af y L a la fracción Ar en el sistema agrícola LT; lo cual se explica porque se establece un balance entre la pérdida de masa de la fracción Ag y la ganancia de masa de la fracción Ar (Gregorich *et al.*, 1988).

Tendencias semejantes a las encontradas para las fracciones Ag y Ar han sido reportadas por Morra *et al.* (1991) y Gregorich *et al.* (1988). De la Figura 16, también se deduce que después de aplicar 224 JmL^{-1} , el porcentaje de recuperación de Af en ambos sistemas (LT y BL), no varía al aplicar mayores niveles de energía, y que la fracción L de BL no se ve afectada por el ultrasonido.

Las curvas correspondientes a la fracción Ag comprueban que en el bosque BL se requirió de mayor energía para desintegrar esta fracción en unidades de menor tamaño, y obtener los mayores porcentajes de recuperación, respecto a la misma fracción en el sistema agrícola (LT), lo que corrobora una mayor estabilidad de la fracción Ag en el bosque. Los resultados anteriores permitieron establecer que, las fracciones Af (50-250 μm) y en menor grado Ag (50-250 μm) del sistema LT son inestables al aplicar ultrasonido, se rompen con bajos niveles de energía (224 JmL^{-1}); mientras que la fracción L (2-50 μm) requiere de mayor energía para romperse.

En el caso de los suelos del bosque BL, la fracción L (50-250 μm) resultó ser la más estable al ultrasonido, no se vio afectada por la energía aplicada. La fracción Af (2-50 μm) fue la más inestable (se rompió con 224 JmL^{-1}) en tanto que la Ag (250-2000 μm) requirió de 455 JmL^{-1} para romperse, más

energía que la requerida por esta misma fracción en el sistema LT. La baja estabilidad al ultrasonido de las fracciones L y Af también han sido reportadas por Roscoe *et al.*, (2000). Las curvas asociadas al comportamiento que presentan estas fracciones son de tipo polinomial, por lo general de segundo grado, con excepción de las fracciones Af y L del bosque que fue de tercer grado, (Cuadro 18).

Cuadro 18. Ecuaciones asociadas a los porcentajes de recuperación de las fracciones separadas en los sistemas agrícola y natural de la región Mazateca.

Sistema/fracción	Ecuación curva de recuperación	R ²
LT		
arena gruesa	$y = 1E-05x^2 - 0.02x + 17.387$	0.998
arena fina	$y = 1E-05x^2 - 0.0223x + 14.126$	0.824
limo	$y = 8E-06x^2 - 0.0158x + 52.542$	0.958
arcilla	$y = -3E-05x^2 + 0.0554x + 18.571$	0.920
BL		
arena gruesa	$y = 1E-05x^2 - 0.0262x + 33.039$	0.919
arena fina	$y = -2E-08x^3 + 4E-05x^2 - 0.0322x + 12.953$	0.951
limo	$y = 3E-09x^3 - 1E-05x^2 + 0.0118x + 43.869$	0.770
arcilla	$y = -2E-05x^2 + 0.0408x + 7.402$	0.926

Las curvas de las fracciones Af del sistema agrícola LT y L del bosque, presentaron los menores valores de R², lo que indicó una baja asociación entre las variables comparadas. Lo anterior corroboró la débil participación de las fracciones Af (en LT) y L (en BL) en el proceso de fraccionamiento del suelo. El comportamiento polinomial de tercer (para Af y L del bosque) y de segundo orden (para el resto de las fracciones de BL y LT) mostraron valores para R² mayores a 0.90.

Recuperación de fracciones en labranza tradicional y bosque de encino en la región Cuicateca:

Los resultados para el fraccionamiento del suelo en los sistemas agrícola LT y bosque BE de la región Cuicateca se presentan en el Cuadro 19 y la Figura 17. En los dos sistemas (LT y BE) la recuperación del suelo inicialmente sometido a fraccionamiento fue un poco mayor al 100 % (103-105 %) en todos los niveles de energía aplicada. Esta situación que pudiese parecer anormal se explica por la contribución del CaCl₂ a la masa de la fracción arcilla. Dicha sal, utilizada en la floculación, es muy higroscópica y se hidrata rápidamente después del secado a 60 °C (temperatura de secado de las fracciones separadas).

Cuadro 19. Fraccionamiento del suelo total en los sistemas agrícola y natural de la región Cuicateca.

LABRANZA TRADICIONAL (LT)						
Recuperación (%)						
Energía (J/mL ⁻¹)	Arena gruesa (Ag) (250-2000 μ)	Arena Fina (Af) (50-250 μ)	Limo (L) (2-50 μ)	Arcilla (Ar) (< 2 μ)	limo + arcilla (< 2-50 μ)	TOTAL
0	28.52 a	15.51 a	44.71 a	12.30 c	57.01 c	103.65 a
224	24.42 ba	12.83 cb	43.39 a	19.21 b	62.60 b	103.07 a
455	21.71 b	12.79 cb	43.71 a	21.55 ba	65.26 ba	103.02 a
910	21.66 b	13.44 b	43.86 a	21.16 ba	65.02 ba	103.93 a
1365	21.20 b	12.48 c	44.01 a	23.45 a	67.46 a	105.01 a
DMS	6.26	0.95	2.30	2.37	3.20	6.04
BOSQUE DE ENCINO (BE)						
Recuperación (%)						
Energía (J/mL ⁻¹)	Arena gruesa (Ag) (250-2000 μ)	Arena Fina (Af) (50-250 μ)	Limo (L) (2-50 μ)	Arcilla (Ar) (< 2 μ)	limo + arcilla (< 2-50 μ)	TOTAL
0	36.42 a	24.22 a	33.81 a	7.08 b	40.89 b	103.03 a
224	34.09 a	19.50 b	32.22 a	14.51 a	46.73 a	102.02 a
455	34.64 a	19.39 b	31.08 a	14.85 a	45.93 a	102.02 a
910	34.78 a	18.61 b	31.08 a	16.03 a	47.12 a	102.42 a
1365	33.39 a	18.82 b	33.78 a	14.17 a	47.95 a	101.81 a
DMS	7.06	3.13	2.90	3.19	4.98	4.67

TOTAL= (MOL+Ag+Af+L+Ar), MOL=materia orgánica ligera, Ag= arena gruesa, Af=arena Fina, L=limo, Ar=arcilla.

El porcentaje de recuperación de la masa de materia orgánica ligera (MOL) (sin aplicar ultrasonido) fue en promedio 3.35 % en LT y 1.76 % en el bosque BE (Cuadro 19). El mayor porcentaje de MOL en LT que en el bosque BE lo explica: (1) el suelo del bosque muestreado esta degradado en su mayoría y no presenta mantillo en su superficie, (2) el déficit hídrico de esta región retarda la transformación de la MOL, y (3) en LT como resultado del manejo, parte de los residuos del rastrojo del cultivo queda en la parcela y otra parte es incorporado en los primeros centímetros, ya que en esta región se usan implementos de tiro animal. Por otra parte, la historia de manejo del sitio muestra que el sistema agrícola se estableció sobre un sitio anteriormente forestal (después de aplicar el sistema roza-tumba-quema), por lo que estos suelos contienen también residuos de materia orgánica del bosque anterior. En el sistema agrícola LT la aplicación de energía con ultrasonido (224 JmL⁻¹) dio como resultado la disminución de la cantidad de masa de la fracción Af (de 15 a 13 %,.) y de la fracción Ag (de 28 a 24 %). Sin embargo, la aplicación de una mayor cantidad de energía, no condujo variaciones significativas en

la recuperación de estas fracciones. Se obtuvo también un consecuente aumento en el porcentaje de recuperación de la fracción Ar (de 12 a 23 %) (Cuadro 19). En el bosque BE, la aplicación de niveles bajos de energía (224 J mL^{-1}) fue suficiente para producir una disminución del porcentaje de Af, conjuntamente con un aumento en el porcentaje de recuperación de la fracción Ar (Cuadro 19). Sin embargo, la aplicación de energía no tuvo ningún efecto significativo sobre los porcentajes de recuperación de L y Ag, antes y después de aplicar ultrasonido. En la Figura 17 es evidente la contribución de las fracciones Ag y Af al aumento del porcentaje de recuperación de Ar en el suelo del sistema agrícola LT como resultado de la aplicación de ultrasonido.

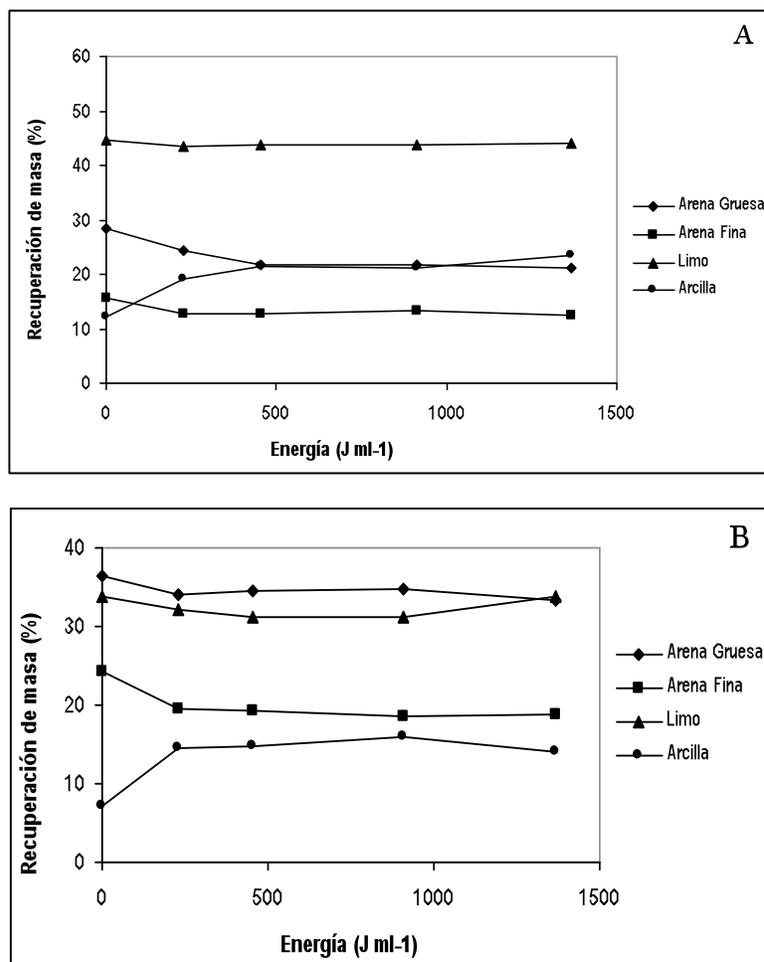


Figura 17. Efecto de la aplicación de energía en la fracción menor a $250 \mu\text{m}$ en los sistemas (A) labranza Tradicional y (B) bosque de encino en la región Cuicatteca.

De los resultados presentados (Figura 17 y Cuadro 19) se deduce que las fracciones estudiadas presentan diferente estabilidad a la aplicación de energía con ultrasonido: (1) las fracciones Ag y Af del

suelo de LT son menos estables al ultrasonido que la fracción L, por que en esta última su porcentaje de recuperación no cambia con la energía aplicada, (2) las fracciones Ag y L separadas del suelo del bosque BE, son mas estables que Af a la energía aplicada con ultrasonido, los porcentajes de recuperación de las primeras no variaron significativamente al aplicar esta energía como lo señala Roscoe *et al.* (2000). Para lograr la máxima dispersión del suelo del sistema agrícola LT se requiere aplicar 1365 JmL⁻¹, y 224 JmL⁻¹ en el bosque BE, donde mayor energía aplicada no conduce a efectos significativos en los porcentajes de recuperación de las fracciones separadas como lo señala Christensen (1992). La energía aplicada para estos suelos de la región Cuicateca fue menor a la empleada para dispersar los suelos de la región Mazateca (455 JmL⁻¹, y LT y 919 JmL⁻¹, BL). Como resultado de la aplicación de ultrasonido, se obtuvo alrededor de: 21 % (Ag), 13 % (Af), 44 % (L) y 23 % (Ar) para LT y 33 % (Ag), 19 % (Af), 33 % (L) y 14 % (Ar) para BE.

La distribución de tamaño de partícula de lo suelos de los sistemas (LT y BE) de la región Cuicateca, determinada con el método de la Pipeta de Robinson mostró la existencia de 15 % (Ag), 19 % (Af), 49 % (L) y 17 % (Ar) para (LT) y 25 % (Ag), 24 % (Af), 40 % (L) y 11 % (Ar) respectivamente. La comparación de estos valores con los obtenidos al aplicar energía ultrasónica muestra que el procedimiento usando ultrasonido fue eficiente para romper agregados de la fracción (Ag) (250-2000µm) y obtener una alta dispersión, pero no fue eficiente para romper los de las fracciones (Af) (50-250 µm) y (L) (2-50 µm) en ambos sistemas. En general, la proporción relativa de las fracciones separadas al aplicar distintos niveles de energía con ultrasonido presentaron un comportamiento polinomial de segundo (fracción limo del bosque) y tercer orden (el resto de las fracciones) (Cuadro 20).

Cuadro 20. Ecuaciones asociadas a los porcentajes de recuperación de las fracciones separadas en los sistemas agrícola y natural de la región Cuicateca.

Sistema/fracción	Ecuación curva de recuperación	R ²
LT		
Arena gruesa	$y = 2E-08x^3 - 5E-05x^2 + 0.0408x + 12.347$	0.999
Arena fina	$y = -1E-08x^3 + 2E-05x^2 - 0.015x + 15.424$	0.972
Limo	$y = -4E-09x^3 + 9E-06x^2 - 0.006x + 44.618$	0.818
arcilla	$y = 2E-08x^3 - 5E-05x^2 + 0.0408x + 12.347$	0.999
BE		
Arena gruesa	$y = -9E-09x^3 + 2E-05x^2 - 0.0114x + 36.271$	0.909
Arena fina	$y = -1E-08x^3 + 3E-05x^2 - 0.0219x + 23.981$	0.943

Limo	$y = 7E-06x^2 - 0.009x + 33.844$	0.999
arcilla	$y = 1E-08x^3 - 4E-05x^2 + 0.0341x + 7.457$	0.941

Los valores de R^2 mayores a 0.90 de estos modelos, con excepción de L en el sistema agrícola LT (0.81) indicaron una alta asociación entre la energía aplicada y la proporción de las fracciones obtenidas. Nuevamente la fracción limo, con mayor estabilidad que las otras, contribuye poco al fraccionamiento.

Recuperación de fracciones en labranza tradicional y bosque de pino en la región Mixe: En la región Mixe, la recuperación total de las fracciones de suelo separadas en suelos de los sistemas (LT) y (BP), fue cercana al 100 % (100-104 %) y prácticamente igual con todos los niveles de energía aplicados (Cuadro 21). El porcentaje de recuperación de la materia orgánica ligera (MOL) (sin sonicar) fue mayor en el bosque (BP) (4.99 %) que en el sistema agrícola (LT) (3.13 %).

Cuadro 21. Dinámica del fraccionamiento del suelo total en los sistemas agrícola y natural de la región Mixe.

LABRANZA TRADICIONAL (LT)						
Recuperación (%)						
Energía (J/mL ⁻¹)	Arena gruesa (Ag) (250-2000 μ)	Arena Fina (Af) (50-250 μ)	Limo (L) (2-50 μ)	Arcilla (Ar) (< 2 μ)	limo + arcilla (< 2-50 μ)	TOTAL
0	30.65 a	8.99 a	56.64 c	3.82 c	60.46 b	103.56 a
224	17.86 b	2.23 b	68.82 a	11.82 b	80.65 a	103.7 a
455	14.89 c	2.08 b	69.21a	13.18 b	82.39 a	102.27 a
910	14.27 c	1.83 b	67.34 a	16.11 a	83.45 a	102.86 a
1365	14.62 c	1.77 b	62.92 b	17.80 a	80.73 a	100.06 a
DMS	1.7964	0.9465	4.1625	2.3163	5.7681	6.9345
BOSQUE DE PINO (BP)						
Recuperación (%)						
Energía (J/mL ⁻¹)	Arena gruesa (Ag) (250-2000 μ)	Arena Fina (Af) (50-250 μ)	Limo (L) (2-50 μ)	Arcilla (Ar) (< 2 μ)	limo + arcilla (< 2-50 μ)	TOTAL
0	25.63 a	21.69 a	45.53 a	4.81 d	50.34 c	102.34 a
224	19.22 b	16.58 b	45.05 ba	17.35 c	62.40 b	103.13 a
455	17.92 b	14.78 b	45.66 a	21.04 b	66.70 a	104.59 a
910	14.93 c	15.74 b	45.03 ba	22.52 ba	67.56 a	103.17 a
1365	13.85 c	15.46 b	42.88 b	24.32 b	67.20 a	101.67 a
DMS	2.8512	3.417	2.189	2.6455	3.4537	2.7317

TOTAL= (MOL+Ag+Af+L+Ar), MOL=materia orgánica ligera, Ag= arena gruesa, Af=arena Fina, L=limo, Ar=arcilla.

Los resultados del Cuadro 21 muestran que la aplicación de energía con ultrasonido a suspensiones de suelo correspondientes a los sistemas LT y BP de la región Mixe, produjo porcentajes de recuperación de masa de las fracciones separadas que resultaron ser significativamente diferentes, con excepción de la fracción (Af) (50-250 μm) cuyos porcentajes de recuperación no variaron significativamente después del primer nivel de energía aplicado (224 J mL^{-1}). Las curvas que se presentan en la Figura 18, permiten observar mejor la dinámica de la estabilidad de las distintas fracciones con respecto a la energía aplicada con ultrasonido.

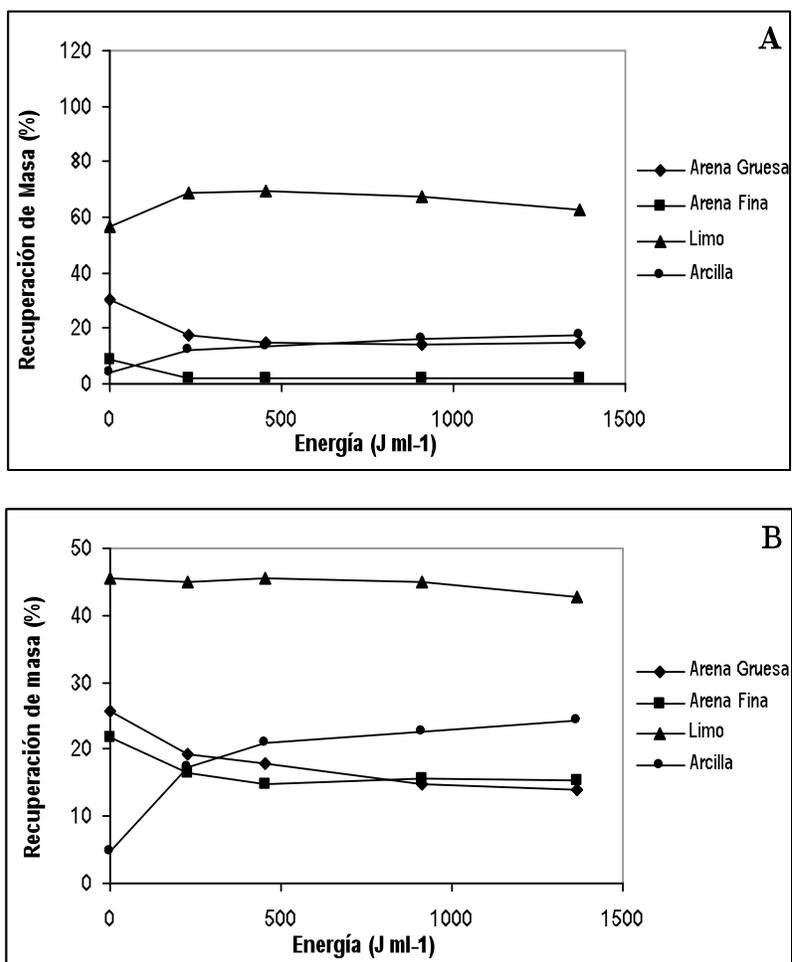


Figura 18. Efecto de la aplicación de energía en la fracción menor a 250 μm en los sistemas (A) labranza tradicional y (B) bosque de pino en la región Mixe.

En ambos sistemas (LT y BP) ocurrió una disminución del porcentaje de recuperación de las fracciones gruesas (Ag) y (Af) y, un aumento en (LT) en el porcentaje de recuperación de (Ar) y (L), circunstancia

que sólo se observó con la fracción (Ar) del bosque (BP). El análisis estadístico de los datos presentados en el Cuadro 21, indicó que para alcanzar la máxima dispersión se requiere aplicar 910 Jml⁻¹ los valores de recuperación de la fracción Ar y L no resultaron ser significativamente diferentes en ambos sistemas, al aplicar mayor energía. Los resultados de la distribución de tamaño de partícula que se realizó por el método de la pipeta de Robinson indicaron: 11 % (Ag), 3 % (Af), 71 % (L) y 15 % (Ar) para (LT) y 11 % (Ag), 24 % (Af), 44 % (L) y 21 % (Ar). La comparación de los porcentajes obtenidos, mediante esta técnica con los generados después de aplicar energía con ultrasonido: 15 % (Ag), 2 % (Af), 67 % (L) y 16 % (Ar) para LT y 11 % (Ag), 24 % (Af), 44 % (L) y 21 % (Ar) para BP, indicó que la dispersión del suelo fue semejante con ambas técnicas. Con bajo nivel de energía 224 Jml⁻¹, se rompieron los agregados del tamaño Af (250 y 50 µm), lo cual ha sido indicado por Edwards and Bremner (1967). Lo anterior indica que esta fracción no sería tan estable al ultrasonido como se le ha considerado en la literatura (Edwards and Bremner, 1967, North, 1976). En conclusión para dispersar totalmente los suelos de la región Mixe se requirió alta energía (910 -1365 Jml⁻¹), semejantes a la energía requerida para dispersar los suelos de la región Mazateca (LT y BL) y de (LT) de la Cuicateca. Menor energía (224 Jml⁻¹) fue requerido para el bosque de la región Cuicateca. Las ecuaciones asociadas al comportamiento presentado por las fracciones separadas con ultrasonido, correspondieron a curvas polinomiales de segundo grado para todas las fracciones separadas en el suelo del sistema agrícola (LT) y a la fracción (Af) del bosque; y de tercer grado, para el resto de las fracciones separadas en el suelo del bosque (BP). En todos los casos el valor de R² fue mayor a 0.90 lo que indicó una alta asociación (Cuadro 22).

Cuadro 22. Ecuaciones asociadas a los porcentajes de recuperación de las fracciones separadas en los sistemas agrícola y natural de la región Mixe.

Sistema/fracción	Ecuación curva de recuperación	R ²
LT		
Arena gruesa	$y = -3E-08x^3 + 8E-05x^2 - 0.0678x + 30.333$	0.989
Arena fina	$y = -2E-08x^3 + 4E-05x^2 - 0.0332x + 8.6811$	0.948
Limo	$y = 3E-08x^3 - 8E-05x^2 + 0.0618x + 57.145$	0.952
Arcilla	$y = -1E-05x^2 + 0.0224x + 5.1137$	0.933
BP		
Arena gruesa	$y = -2E-05x^2 + 0.0369x + 6.9813$	0.903
Arena fina	$y = -2E-08x^3 + 4E-05x^2 - 0.0308x + 21.673$	0.999
Limo	$y = -3E-06x^2 + 0.0019x + 45.251$	0.923
arcilla	$y = -2E-05x^2 + 0.0369x + 6.9813$	0.903

Carbono en distintas fracciones de tamaño del suelo: Una vez separadas las fracciones del suelo, se procedió a evaluar la cantidad de carbono asociada a cada una de éstas. Los resultados se presentan a continuación.

Efecto de los niveles de energía ultrasónica sobre la cantidad de carbono asociado a las fracciones de suelo.

El carbono de cada fracción y nivel de energía aplicado se determinó por triplicado, pero en los Cuadros se presentará el valor promedio de las tres repeticiones realizadas. Los resultados y análisis estadístico completos se presentan en los cuadros (28, 29, 30, 31, 32, 33, 34, 35, 36, 37, 38 y 39) del apéndice de esta tesis. Las unidades usadas para reportar el contenido de carbono fueron gramos de carbono por kg de suelo.

Carbono en suelo y fracciones del suelo en los sistemas labranza tradicional (LT) y bosque de liquidámbar (BL) en la región Mazateca.

En el Cuadro 23 se presentan los valores promedio de las mediciones para el contenido de carbono en las fracciones separadas con ultrasonido Ag, Af, L y Ar con distintos niveles de energía aplicados (224, 455, 910 y 1365 JmL⁻¹).

Cuadro 23. Dinámica del carbono en el suelo y fracciones del suelo en los sistemas labranza tradicional y bosque de liquidámbar en la región Mazateca.

LABRANZA TRADICIONAL (LT)						
Energía (J/mL ⁻¹)	Arena gruesa (Ag) (250-2000 µ)	Arena Fina (Af) (50-250 µ)	Limo (L) (2-50 µ)	Arcilla (Ar) (< 2 µ)	Recuperación total	suelo total
g/Kg suelo						
0	3.40 a	4.35 a	18.37 a	4.68 d	34.26 a	36.49
224	1.89 b	0.62 b	16.97 a	11.08 c	34.46 a	36.49
455	1.24 b	0.45 b	16.64 ab	12.30 b	34.71 a	36.49
910	1.43 b	0.28 b	14.98 bc	12.64 a	32.72 a	36.49
1365	1.31 b	0.27 b	14.86 c	13.39 a	32.57 a	36.49
DMS	1.616	0.598	1.748	3.562	3.45	----
BOSQUE DE LIQUIDÁMBAR (BL)						
Energía (J/mL ⁻¹)	Arena gruesa (Ag) (250-2000 µ)	Arena Fina (Af) (50-250 µ)	Limo (L) (2-50 µ)	Arcilla (Ar) (< 2 µ)	Recuperación Total	suelo total
g/Kg suelo						
0	11.07 a	3.59 a	18.21 a	2.04 d	39.94 a	43.94
224	7.65 ab	0.35 b	19.02 a	6.98 c	39.99 a	43.94
455	6.30 bc	0.31 b	20.24 a	9.92 b	42.77 a	43.94
910	5.27 bc	0.23 b	18.62 a	11.25 ab	40.65 a	43.94

1365	3.32 c	0.23 b	18.22 a	12.58 a	42.37 a	43.94
DMS	3.592	2.717	2.717	2.162	6.23	---

Recuperación total= carbono (MOL+Ag+Af+L+Ar), MOL=materia orgánica ligera, Ag= arena gruesa, Af=arena fina, L=limo, Ar=arcilla.

La aplicación de niveles crecientes de energía con ultrasonido (0 a 1365 Jml⁻¹) resultó en una disminución progresiva de la cantidad de carbono en las fracciones Ag (250-2000 µm) y Af (50-250 µm) (3.4 a 1.89 g Kg⁻¹ suelo y 4.35 a 0.62 g Kg⁻¹ suelo, respectivamente) en el sistema agrícola LT; siendo máximo el cambio cuando se aplicaron bajos niveles (224 JmL⁻¹). Lo mismo se observó para la fracción Af (50-250 µm) del bosque BL (3.59 a 0.23 JmL⁻¹) (Cuadro 23). Mayores niveles de energía no modificaron significativamente la cantidad de carbono medido en esas fracciones. Hunter y Busacca (1989) también encontraron este comportamiento al aplicar bajos niveles de energía con ultrasonido. Por el contrario, en las fracciones L del sistema agrícola LT, y Ag del bosque BL la aplicación de ultrasonido provocó variaciones significativas en la cantidad de carbono medido y se requirió de mayor energía (910 JmL⁻¹) para romper los agregados (Cuadro 23). En ambos sistemas tampoco no hubo cambios significativos en el carbono medido con niveles superiores de energía. Lo anterior se explica por el rompimiento de los agregados contenidos en las fracciones Ag, Af y L de (LT) y Ag y Af de (BL), lo que condujo a una transferencia de masa, de éstas a la fracción Ar, y por tanto también del carbono asociado a las partículas más finas que resultaron del fraccionamiento; como lo mostraron los resultados reportados en el fraccionamiento del suelo.

La cantidad de carbono en la fracción L del bosque BL no varió con la aplicación de ultrasonido, el comportamiento invariable de esta fracción, sugiere una alta estabilidad de la misma, corroborando lo antes observado en el fraccionamiento del suelo. La persistencia de cantidades altas de carbono en la fracción L en ambos sistemas (LT y BL), antes y después de la aplicación de energía, se atribuye a que esta fracción está compuesta probablemente de microagregados fuertemente estabilizados por la materia orgánica (Roscoe *et al.*, 2000). Lo anterior pudo contribuir también a una deficiente dispersión de la fracción Ag (250-2000 µm), tal como se señaló en el fraccionamiento. En la Figura 19, se observa el comportamiento general del carbono en las fracciones que fueron separadas, en los dos sistemas (LT y BL), cuando se aplicó energía con ultrasonido. Las curvas que se presentan son similares a las de la Figura 17, las cuales mostraron el comportamiento de las fracciones al aplicar energía con ultrasonido. En todos los casos, la recuperación total de carbono (que corresponde a la suma de las recuperaciones de carbono determinado en las fracciones Ag, Af, L y Ar separadamente y la MOL) fue menor a la

cantidad de carbono medida en el suelo sin fraccionar. Lo anterior no concuerda con resultados obtenidos por otros autores que indican que el fraccionamiento debe conducir a mayor cantidad de carbono medido, debido a que la ruptura de los agregados favorece una mejor y mayor oxidación de la MO al momento de evaluarla (Tan y Troth, 1981).

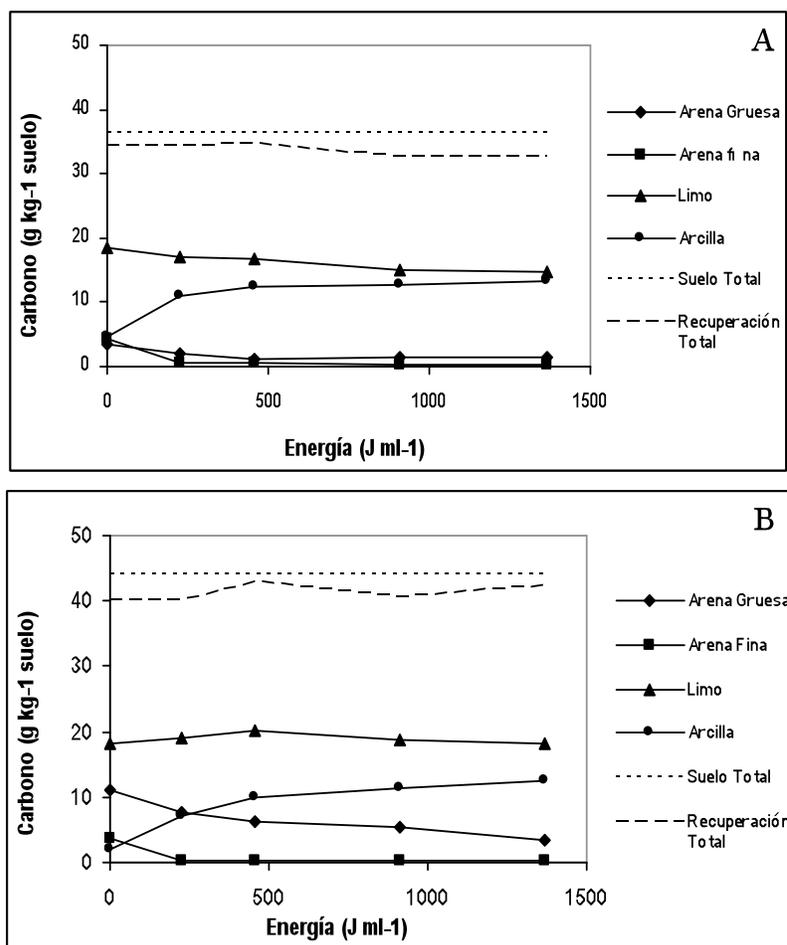


Figura 19. Dinámica del carbono en fracciones < 250 μm en los sistemas (A) labranza tradicional y (B) bosque de liquidámbar en la región Mazateca.

En nuestro caso, debido a que las muestras analizadas, tanto para el suelo sin fraccionar como para las fracciones separadas, se tamizaron a malla 100 (150 μm) y les fue separada la materia orgánica ligera, se favoreció la homogeneidad de la muestra de análisis y de los resultados. La recuperación total (Cuadro 23), indicó que no hubo diferencia significativa en el carbono evaluado después de la aplicación de distintos niveles de energía con respecto al carbono del suelo medido sin fraccionar el suelo.

Carbono en suelo y fracciones del suelo en los sistemas labranza tradicional (LT) y bosque de encino (BE) en la región Cuicateca: El Cuadro 24, muestra que la aplicación de energía con ultrasonido hasta 455 JmL⁻¹ en muestras de suelo de los sistemas (LT y BE) de la región Cuicateca, tuvo un efecto significativo en la cantidad de carbono medido, pero mayores niveles de energía no se tradujeron en aumento del carbono. En las fracciones (Ag) (250-2000 μm) y (Af) (50-250 μm) del sistema tradicional (LT) y Af del bosque (BE) el carbono disminuyó, de 2.27 a 0.34 gKg⁻¹, de 1.76 a 0.09 gKg⁻¹ y de 2.06 a 0.11 gKg⁻¹ respectivamente, pero en la fracción (Ar) (< 2 μm) de ambos sistemas aumentó de 2.80 a 6.92 gKg⁻¹ en LT y de 1.85 a 4.91 gKg⁻¹ en BE. En la fracción (L) no se observó ningún efecto significativo con la aplicación de ultrasonido en ambos sistemas. Lo anterior concuerda, en lo general, con los resultados obtenidos para el fraccionamiento de estos suelos y refleja las transferencias de masa y de carbono de las fracciones gruesas (Ag) y (Af) a la fina (Ar). De lo anterior se dedujo que la transferencia de carbono se dio a baja energía (224 JmL⁻¹) desde Ag (en LT) y desde Af (en BE) a Ar pero requirió de mayor energía en Af del sistema tradicional (LT) (910 JmL⁻¹). En el Cuadro 24 y Figura 20 también se observa que no hay diferencias significativas en la cantidad de carbono total medido en suelo sin fraccionar y el carbono obtenido por la suma del carbono medido en cada fracción (incluyendo MOL), confirmado que solamente existe una redistribución de carbono en las distintas fracciones evaluadas.

Cuadro 24. Dinámica del carbono en el suelo y fracciones del suelo en los sistemas labranza tradicional y bosque de encino en la región Cuicateca.

LABRANZA TRADICIONAL (LT)						
Energía (J/mL ⁻¹)	Arena gruesa (Ag) (250-2000 μ)	Arena Fina (Af) (50-250 μ)	Limo (L) (2-50 μ)	Arcilla (Ar) (< 2 μ)	Recuperación total	Suelo total
g/Kg suelo						
0	2.27 a	1.76 a	10.69 a	2.80 c	22.52 a	25.78
224	0.78 b	0.40 b	10.54 a	5.00 b	23.07 a	25.78
455	0.34 b	0.30 bc	10.60 a	6.06 a	23.27 a	25.78
910	0.69 b	0.17 c	10.29 a	6.17 a	24.66 a	25.78
1365	0.34 b	0.09 c	10.14 a	6.92 a	24.60 a	25.78
DMS	0.64	0.22	0.76	0.98	2.80	----
BOSQUE DE ENCINO (BE)						
Energía (J/mL ⁻¹)	Arena gruesa (Ag) (250-2000 μ)	Arena Fina (Af) (50-250 μ)	Limo (L) (2-50 μ)	Arcilla (Ar) (< 2 μ)	Recuperación total	Suelo total
g/Kg suelo						
0	0.53 ab	2.06 a	8.82 a	1.85 c	18.88 a	20.14
224	0.72 a	0.40 b	9.18 a	3.89 b	20.06 a	20.14
455	0.45 b	0.30 b	8.74 a	4.20 ab	19.39 a	20.14
910	0.72 a	0.24 b	8.52 a	4.91 a	20.15 a	20.14

1365	0.55 ab	0.11 b	9.34 a	4.91 a	20.79 a	20.14
DMS	0.57	0.39	0.84	0.92	3.63	----

Recuperación total= carbono (MOL+Ag+Af+L+Ar), MOL=materia orgánica ligera, Ag= arena gruesa, Af=arena fina, L=limo, Ar=arcilla.

En la Figura 20, se observa que el comportamiento mostrado por las curvas correspondientes a la distribución de carbono en las fracciones (L) y (Ar), fue semejante al reportado para las fracciones separadas con ultrasonido (Figura 18). Este no fue el caso de las fracciones gruesas (Ag) y (Af) del sistema tradicional (LT), en las cuales las curvas de carbono determinado no mostraron un comportamiento semejante al de la distribución de las fracciones Ag y Af al aplicar ultrasonido. Es decir, aunque el porcentaje de recuperación de la masa de la fracción (Ag) fue mayor que el de la fracción (Af), sin embargo la cantidad de carbono medido en (Af) fue muy semejante al de (Ag), lo cual indica que en el sistema agrícola (LT), la (Af) (50-250 μm) tiene mayor cantidad de carbono que la (Ag) (250-2000 μm).

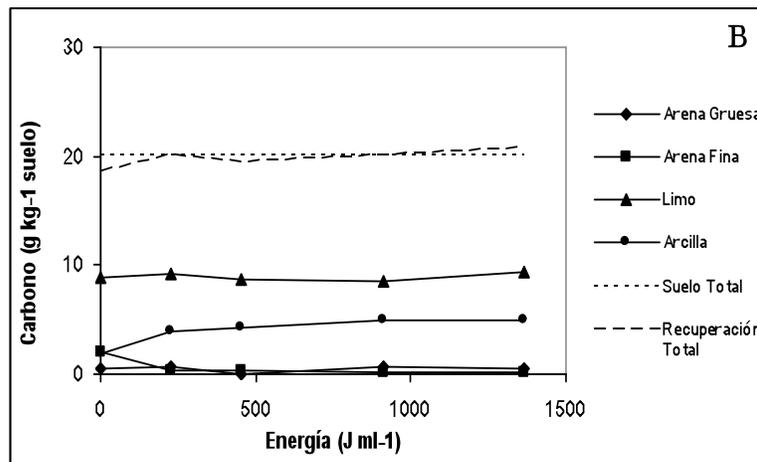
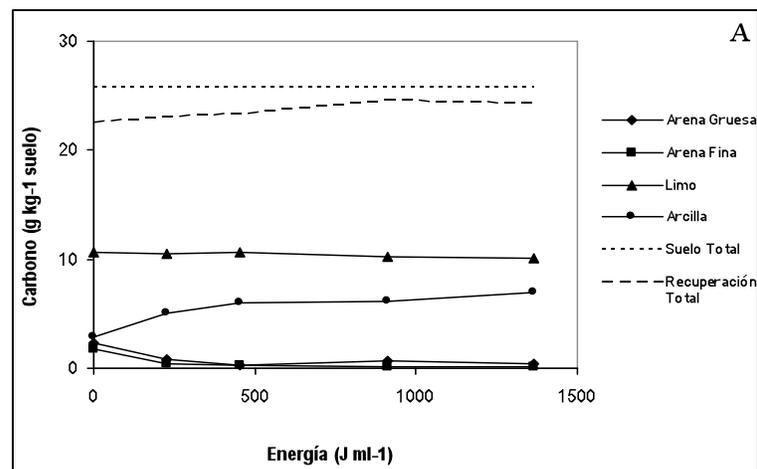


Figura 20. Dinámica del carbono en fracciones < 250 μm en los sistemas (A) labranza tradicional y (B) bosque de encino en la región Cuicateca.

El mismo comportamiento anterior se observó para el bosque (BE). En este caso el porcentaje de recuperación de la masa de la fracción (Ag) fue el mayor de todas las fracciones (Cuadro 19), sin embargo la cantidad de carbono fue la menor (Cuadro 24). De esto se deduce que en BE, la agregación de la fracción (Ag) (250-2000 μm) no fue debida a compuestos orgánicos, sino a otros productos presentes en el suelo. De acuerdo con la Figura 24, la cantidad de carbono determinado en suelo sin fraccionar fue mayor al porcentaje de recuperación total, lo que confirma lo señalado en el caso de los suelos de la región Mazateca, que la molienda a 150 μm (malla 100) favorece una oxidación eficiente del suelo, semejante a la obtenida al separar éste en sus fracciones granulométricas.

Carbono en suelo y fracciones de suelo de los sistemas labranza tradicional y bosque de pino en la región Mixe: Los resultados reportados en Cuadro 25 indican que, la cantidad de carbono de las fracciones separadas de los suelos de la región Mixe, empleando distintos niveles de energía, resultó ser igualmente afectada por la aplicación de ultrasonido, tal como ocurrió los suelos de las otras dos regiones estudiadas (Mazateca y Cuicateca).

Cuadro 25. Dinámica del carbono en el suelo y fracciones del suelo en los sistemas labranza tradicional y bosque de pino en la región Mixe.

LABRANZA TRADICIONAL (LT)						
Energía (J/mL ⁻¹)	Arena gruesa (Ag) (250-2000 μ)	Arena Fina (Af) (50-250 μ)	Limo (L) (2-50 μ)	Arcilla (Ar) (< 2 μ)	Recuperación total	suelo total
g/Kg suelo						
0	25.68 a	10.27 a	65.46 c	4.65 c	120.09 a	120.6
224	14.11 b	1.14 b	80.13 b	14.63 b	121.03 a	120.6
455	8.88 c	0.78 b	81.63 b	16.69 b	117.11 a	120.6
910	6.30 cd	0.50 b	78.83 a	20.34 a	117.89 a	120.6
1365	5.41 d	0.43 b	71.23 a	22.86 a	110.89 a	120.6
DMS	3.43	0.79	5.291	3.27	9.66	----
BOSQUE DE PINO (BP)						
Energía (J/mL ⁻¹)	Arena gruesa (Ag) (250-2000 μ)	Arena Fina (Af) (50-250 μ)	Limo (L) (2-50 μ)	Arcilla (Ar) (< 2 μ)	Recuperación total	suelo total
g/Kg suelo						
0	13.23 a	6.01 a	29.00 a	2.60 d	62.80 a	80.20
224	10.18 b	0.54 b	30.44 a	10.24 c	64.46 a	80.20
455	9.17 bc	0.39 b	29.64 a	13.01 b	68.17 a	80.20
910	8.17 cd	0.34 b	28.38 a	14.47 ab	66.95 a	80.20
1365	7.17 d	0.33 b	25.22 b	16.10 a	64.21 a	80.20

DMS	1.95	0.47	2.85	2.21	7.81	----
-----	------	------	------	------	------	------

Recuperación total= carbono (MOL+Ag+Af+L+Ar), MOL=materia orgánica ligera,
 Ag= arena gruesa, Af=arena fina, L=limo, Ar=arcilla.

También se dedujo que el carbono de la fracción Af en los sistemas (LT y BP) solamente fue afectado por la aplicación de niveles bajos de energía (224 Jml⁻¹), ya que a mayor energía ultrasónica aplicada, los valores de carbono no fueron significativamente diferentes. Por el contrario, el aumento de la energía aplicada, hasta 910-1365 Jml⁻¹, modificó la cantidad de carbono medida en la fracción (Ag) (250-2000 µm) la cual disminuyó, de 25.7 a 5.4 gKg⁻¹ en el sistema agrícola (LT) y de 13.2 a 7.2 g gKg⁻¹ en el bosque (BP).

Con la aplicación de estos mismos niveles de energía se observó un aumento en la cantidad de carbono, en las fracciones (Ar) de ambos sistemas (LT y BP) de 4.65 a 22.86 g gKg⁻¹ en (LT) y de 2.60 a 16.10 g gKg⁻¹ en el bosque (BP), así como en la fracción (L) del sistema agrícola (LT) (65.5 a 81.6 g gKg⁻¹). Por el contrario, la fracción (L) del bosque (BP), no mostró valores de carbono significativamente diferentes hasta después de aplicar 1365 Jml⁻¹.

El empleo de altos niveles de energía para obtener valores de carbono estables ante la aplicación de ultrasonido, indicó una mayor estabilidad de todas las fracciones separadas en ambos sistemas (LT y BP), con excepción de la fracción (Af) de (LT) y (BP). Las curvas de la Figura 21 muestran que para ambos sistemas (LT y BP) el comportamiento del carbono ante la aplicación de ultrasonido fue semejante al reportado en la Figura 18 para el fraccionamiento del suelo.

Estas curvas confirman, en el sistema agrícola (LT), la transferencia de masa y de carbono desde (Ag) y (Af) a la fracción (L) y (Ar) a niveles de energía bajos (224 Jml⁻¹) y medios (455 Jml⁻¹). Esta transferencia de carbono en el suelo del bosque (BP) de (Ag) y (Af) a la fracción (L), no fue perceptible en las curvas (Figura 21B) probablemente debido a los bajos niveles de carbono en este sistema. Al igual que lo observado en la región Mazateca, el bosque presentó menor cantidad de carbono que el sistema agrícola, lo que se puede explicar considerando la edad del bosque el cual es mas joven que en la Mazateca y en la Cuicateca , por el manejo del bosque y la importante incorporación de rastrojo en el sistema agrícola explican este resultado.

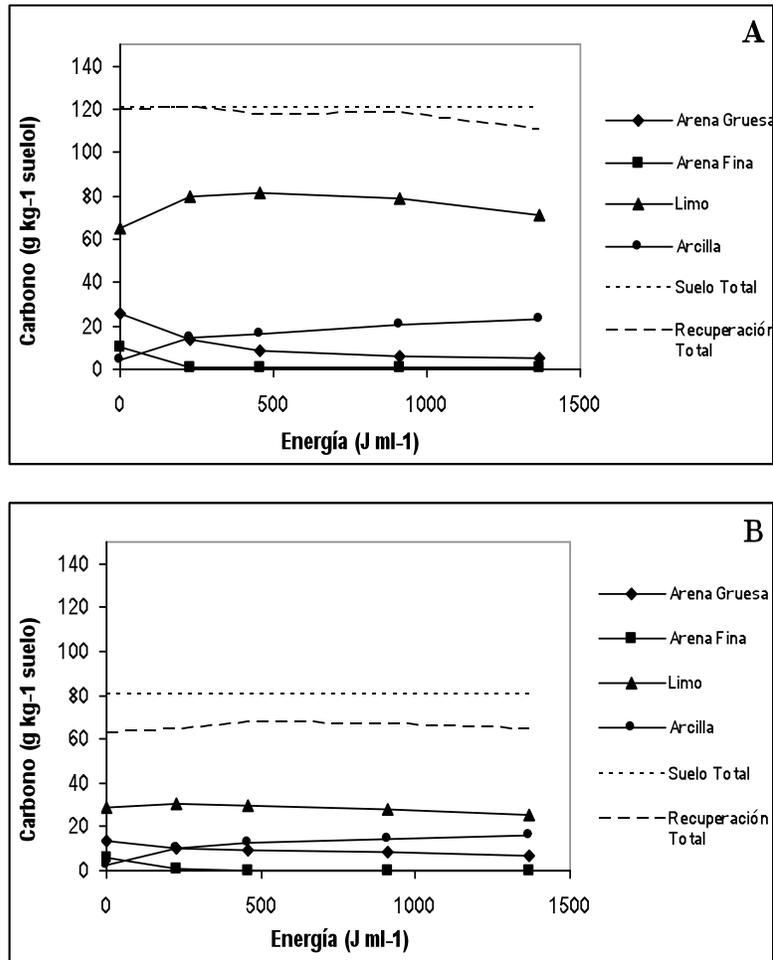


Figura 21. Dinámica del carbono en fracciones < 250 μm en los sistemas (A) labranza tradicional y (B) bosque de pino en la región Mixe.

Estos resultados permitieron también confirmar la importancia de la materia orgánica en la agregación del suelo se observó mayor eficiencia en la dispersión de la fracción (Ag) (250-2000 μm) del bosque (BP) con menos carbono respecto a la misma fracción pero del sistema agrícola (LT), con más carbono. La cantidad de carbono recuperado (sumatoria de carbono en todas las fracciones separadas más MOL) fue siempre menor a la cantidad de carbono determinado en suelo sin fraccionar (Cuadro 25), lo que corrobora la eficiencia de la molienda en la determinación de carbono, como fue el caso de los suelos de las otras dos regiones estudiadas. Morra et al., (1991) y Gregorich et al (1988), también reportaron una tendencia similar de disminución de la fracción arena e incremento en la fracción arcilla,

al aumentar la energía aplicada con ultrasonido, en cambio el limo presentó una tendencia a permanecer casi estable ante cualquier nivel de energía aplicada.

Variación de la cantidad de carbono asociado a las cinco fracciones separadas, para los dos sistemas de manejo, en las tres regiones de estudio (Mazateca, Cuicateca y Mixe): Con objeto de examinar por región, ya no por sistema dentro de cada región, la distribución de carbono en las fracciones separadas se presentan en el Cuadro 26 los porcentajes de carbono asociados a dichas fracciones que se obtuvieron con el mayor nivel de energía aplicado (1365 JmL⁻¹).

Cuadro 26. Carbono en fracciones del suelo en los sistemas y regiones estudiados.

región	MOL	AG	AF	L	AR	C suma fracciones	C suelo sin fraccionar
C (g kg ⁻¹ suelo)							
LT							
Cuicateca	6.81	0.34	0.09	10.14	6.92	24.30	25.78
Mazateca	2.74	1.31	0.27	14.86	13.39	32.57	36.49
Mixe	10.96	5.41	0.43	71.23	22.86	110.89	120.60
Bosque							
Cuicateca	5.88	0.55	0.11	9.34	4.91	20.79	20.14
Mazateca	8.03	3.32	0.23	18.22	12.58	42.37	43.94
Mixe	15.39	7.17	0.33	25.22	16.10	64.19	80.20

MOL=materia orgánica ligera separada por tamiz, Ag= arena gruesa, Af=arena fina, L=limo, Ar=arcilla.

El suelo entero, sin fraccionar, de la región Cuicateca es el que contiene menos carbono 25.78 gC kg⁻¹ suelo en (LT) y 20.14 gC kg⁻¹ suelo en el bosque (BE), y los de la región Mixe el que contiene más, 120 gC kg⁻¹ suelo en (LT) y 80 gC kg⁻¹ suelo en el bosque (BP), los de la región Mazateca, mostraron niveles de carbono intermedios entre los reportados para las regiones Cuicateca y Mixe (Cuadro 26).

Las diferencias entre los niveles de carbono entre las regiones estudiadas se asociaron con la naturaleza propia del sitio, a la vegetación que soportan y a los niveles de precipitación. En la región Cuicateca los residuos y la precipitación son bajos. Por otra parte, en el sistema agrícola de labranza, con manejo de roza-tumba-quema (RTQ), se generan cantidades variables de residuos de carbón mineral (black carbon), que es evaluado como carbono, lo que podría explicar los altos valores de carbono de la región Mixe.

En cuanto a la evaluación del carbono en las fracciones en las que se separó el suelo, de manera general, los resultados del Cuadro 26, muestran que en las tres regiones estudiadas, en ambos sistemas (agrícola y bosques), la arena fina (Af) (250-50 μm) fue la que presentó los menores contenidos de carbono (0.1-0.4 gC kg^{-1} suelo). De acuerdo con Christensen (1987) la MO del tamaño de la fracción Af se descompone más rápidamente que la que se encuentra en las fracciones Ar y L. El contenido de carbono en la fracción (Ag) (2000-250 μm) fue muy variable, muy bajo ($< 1 \text{ gC kg}^{-1}$ suelo) para los dos sistemas (LT y BE) de la región Cuicateca, intermedio para los sistemas (LT y BL) de la región Mazateca de 1 a 3 gC kg^{-1} suelo, y más alto de 5 a 7 gC kg^{-1} suelo para los sistemas (LT y BP) de la región Mixe.

El carbono en la fracción Ag (250-2000 μm) de la región Mixe y Mazateca actúa como un agente enlazante en el dominio de los macroagregados, lo que explica la baja eficiencia en la dispersión y los altos valores de carbono de esta fracción en los suelos de las regiones Mixe y Mazateca. Sin embargo, en las tres regiones, el carbono fue mayor en los sistemas agrícolas que en los bosques (Cuadro 26). Autores como Adams, 1980 y Christensen, 1992, han reportado que en los bosques, la mayor contribución a la MO del suelo se da en la fracción arena gruesa.

El carbono de la MOL de los suelos de los bosques de las regiones Mazateca y Mixe, fue mayor al carbono de los sistemas agrícolas, lo que se atribuye al efecto de las labores agrícolas, la labranza y la adición de fertilizantes, que promueven la oxidación de la MOS, y conducen a una menor cantidad de carbono en el sistema agrícola (LT), algo similar fue reportado por Stevenson (1986). Sin embargo, en la Cuicateca, la MOL de ambos sistemas (LT y BE) presentó niveles de carbono muy parecidos (Cuadro 26), lo cual se atribuyó al alto aporte de rastrojo en los sistemas agrícolas y a las edades recientes de los bosques de la región. Nuevamente el manejo es el factor determinante en explicar estos resultados, relegando a segundo término el efecto que tienen las características del suelo en la concentración de carbono de la MOL (Hassink, 1997). En ambos sistemas, el carbono de la MOL fue semejante o menor al carbono de la fracción arcilla (Ar), pero siempre menor al carbono de la fracción L (2-50 μm).

La Figura 22 muestra una tendencia clara a un aumento en el contenido de carbono conforme disminuye el tamaño de la fracción, el carbono se concentra principalmente en las fracciones menores a

50 μm esto es L (2-50 μm) y Ar (< 2 μm). Según Christensen (1987), en la fracción correspondiente al tamaño del L es donde la MO se descompone menos. Es de notar los valores elevados para el carbono de la fracción (L), entre 9 y 25 gC kg^{-1} suelo, sobre todo en el caso de la (LT) de la región Mixe, con 71 gC kg^{-1} suelo. Tiessen y Stewart (1983), reportaron contenidos elevados de carbono en la fracción limo fino respecto al carbono medido en otras fracciones de suelo separados por ellos. Otros autores Adams, 1980; Christensen, 1992, indicaron que, en suelos arados, las fracciones L y Ar son las que presentan mayor cantidad de carbono evidenciando la protección física de las partículas > 20 μm sobre la MOS (materia orgánica del suelo).

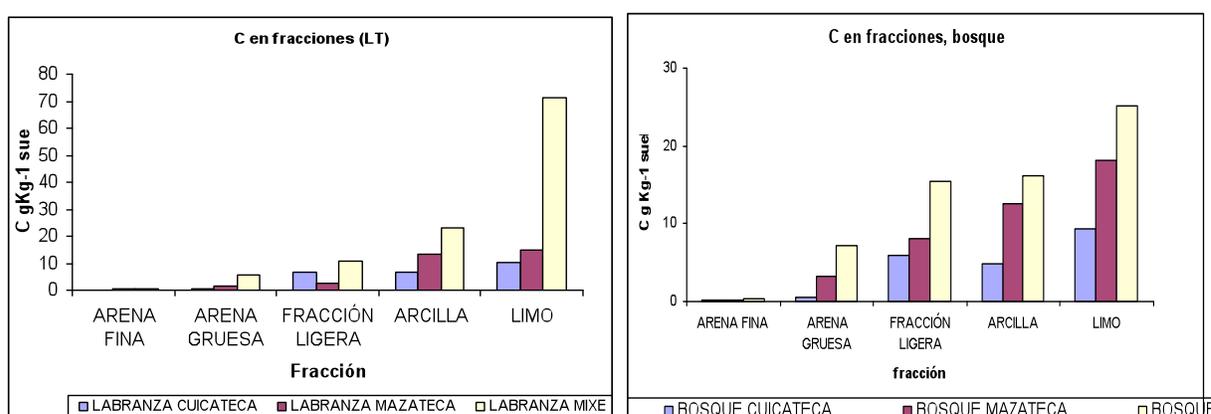


Figura 22. Distribución de carbono en fracciones de suelo, (a) sistemas agrícolas (LT) y (b) bosques, de las regiones Cuicateca, Mazateca y Mixe.

El carbono de la fracción (Ar) (< 2 μm) constituyó del 30 al 90 %, del carbono medido en la fracción (L) (50-2 μm), y ambas fracciones (L) y (Ar) corresponden al 69-87 % del carbono del suelo total sin fraccionar (Cuadro 23). Al igual que en este estudio, Anderson *et al.* (1981) también encontraron cantidades sustancialmente elevadas de carbono en las fracciones L y Ar en un estudio conducido, así como correlaciones altas entre el contenido de carbono de la fracción < 20 μm y el carbono en esta fracción (Hassink, 1997) y correlaciones positivas entre el carbono y la fracción arcilla (Ar) (< 2 μm) también han sido reportadas (Nichols, 1984; Spain, 1990; Monreal y Kodama, 1997; Monreal *et al.*, 1997; Parfitt *et al.*, 1997). Otros estudios atribuyen los altos valores de carbono en las fracciones finas a la naturaleza coloidal (2 μm) del material humificado el cual se acumula en las fracciones más pequeñas del suelo (Tan & Troth, 1981). De acuerdo a lo reportado por Chefetz *et al.* (2002), la mayoría del carbono orgánico se concentra en las fracciones arcilla y limo (Baldock *et al.*, 1992), y una baja

contribución a la MOS ha sido reportada para la fracción $> 250 \mu\text{m}$, misma que se asoció al manejo agronómico (Guggenberger *et al.*, 1994).

Morra *et al.*, (1991), Schnitzer and Khan (1972) y Theng (1979) atribuyeron los elevados contenidos de carbono a la mayor área superficial que generalmente exhibe la fracción arcilla y a su disponibilidad de superficies internas para la sorción de moléculas orgánicas. Por otra parte, los agregados de tamaño de la fracción arcilla pueden contener microporos y proteger físicamente la MOS (Wattel-Koekkoek *et al.*, 2001). De acuerdo con Chenu *et al.* (1998), las asociaciones arcilla-MO resisten la fuerte dispersión del suelo al usar ultrasonido, y los microagregados de arcilla conservan la MOS.

Observaciones en microscopía electrónica de barrido, realizadas por los mismos autores, mostraron que en estas asociaciones, la MO se localizó sobre las superficies externas de las partículas arcillosas o entre arreglos pequeños de láminas de arcillas de entre 3 a 10 unidades, indicando también que no fue evidente la presencia de MOS en los espacios interlaminares (Chenu *et al.*, 1998). La presencia de películas de sustancias húmicas que recubren la superficie de partículas de esmectitas y protoillitas en la fracción $\leq 0.2 \mu\text{m}$ con una relación C/N de 10, así como complejos húmico- metales de alta densidad con relación C/N 17, han sido observadas por Laird (2001). Los resultados de los trabajos de Forstner (1985) indican que la MOS en la fracción $< 250 \mu\text{m}$ queda protegida de la degradación microbiana al quedar adsorbida en los componentes arcillosos o quedar aislada en poros cuyo tamaño es tan pequeño, que los microorganismos no pueden penetrar.

También debe señalarse que una gran variabilidad espacial del carbono de los suelos, en estas regiones, lo que ha sido reportado en otros estudios (Acosta 2003, Vergara 2003, Báez 2001, Estrada 2003).

6.4. Caracterización mineralógica del suelo y su relación con el carbono del suelo.

La difracción de rayos X de los suelos de las tres regiones de Oaxaca (Mazateca, Cuicateca y Mixe), sin fraccionar, indicó que el cuarzo es el mineral primario predominante en el suelo y que la fracción fina ($< 2 \mu\text{m}$) está constituida por arcillas silicatadas cristalinas. A continuación se expondrán los resultados correspondientes a la caracterización de la fracción fina ($< 2 \mu\text{m}$) de los suelos estudiados y que corresponden a la interpretación de los difractogramas de rayos X (DRX).

Labranza Tradicional de la Región Mazateca: En el diagrama de difracción correspondientes al tratamiento al natural de LT (Figura 23), las reflexiones a 1.447, 0.731, 0.487 y 0.362 nm se asocian a la presencia de arcillas 2:1.

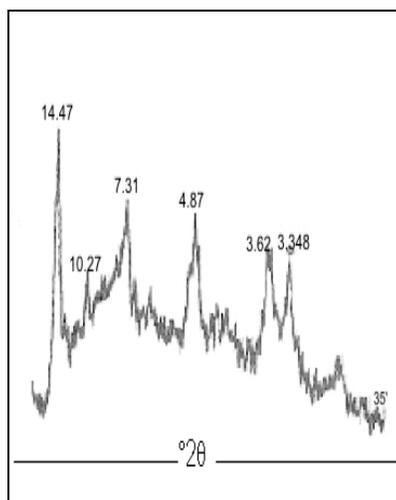


Figura 23. LT, Mazateca, Natural.

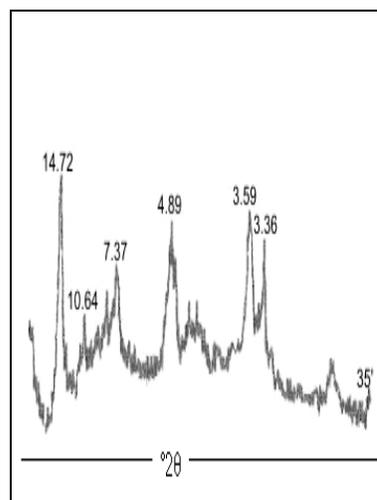


Figura 24. LT, Mazateca, Saturación con EG.

No se observó desplazamiento de las reflexiones después de la saturación con etilén glicol (1.472, 0.737, 0.490 y 0.359 nm, (Figura 24) lo que indica que no se trata de una arcilla expansible. Con ambos tratamientos se observaron dos reflexiones muy pequeñas a 1.027 y 0.3348 nm que se definieron mejor después del tratamiento con etilén glicol. Estas reflexiones y la ausencia de una reflexión a 0.500 nm, indicaría la presencia de glauconitas (Moore and Reynolds, 1997).

La saturación con potasio y calentamiento posterior a 300 °C (Figura 25) conserva la reflexión a 1.356 nm, lo que haría suponer la presencia de una mezcla de vermiculita con clorita. En el calentamiento a 490 °C (Figura 26) sólo se destaca una reflexión bien definida y larga a 0.3348 nm, y unas bandas pequeñas mal definidas centradas a 1.039 y 0.509 nm, estas tres reflexiones marcarían el diagrama de la illita..

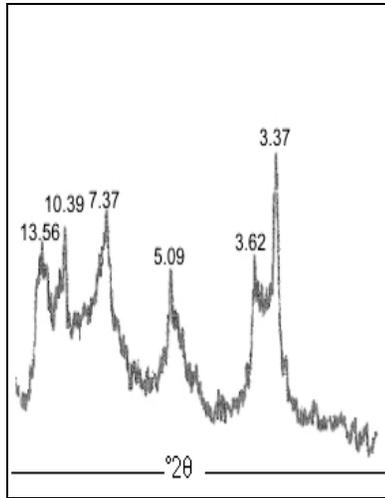


Figura 25. LT, Mazateca, saturación con K y calentamiento a 300°.

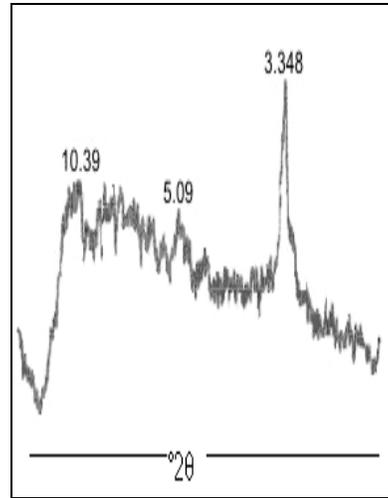


Figura 26. LT, Mazateca, Calentamiento a 490°.

Bosque de Liquidámbar de la Región Mazateca: El difractograma de la preparación al natural (sin tratamiento, Figura 27) presenta reflexiones a 1.447, 0.719, 0.506 y 0.356 nm, que se asociaron a la presencia de arcillas 2:1, así como otras a 1.027 y 0.336 nm, las cuales, conjuntamente con la reflexión a 0.506 nm, se asocian a la presencia de illitas. Después de la saturación con etilén glicol (Figura 28), no hay desplazamiento de la reflexión a 1.472 nm, ni de las otras reflexiones presentes. Lo cual indica que las arcillas 2:1 no son expansibles.

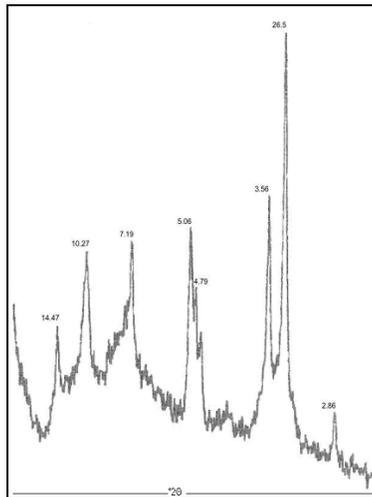


Figura 27. BL, Mazateca, Natural.

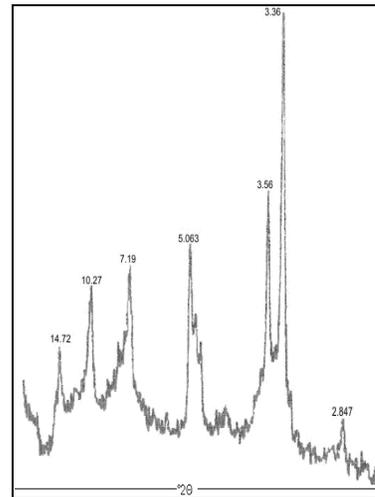


Figura 28. BL, Mazateca, Saturación con EG.

La saturación con potasio (Figura 29) y calentamiento posterior a 300 °C), muestra el colapso de la reflexión 1.472 nm a 1.039 nm, lo que confirma la presencia de vermiculita en esta muestra. El mayor tamaño de la reflexión a 0.719 nm respecto a la reflexión a 1.447 nm indicaría que no se trata de vermiculita-Mg ni vermiculita-Na, la reflexión a 0.719 nm, bien definida, indicaría un carácter dioctaédrico de esta arcilla debido a la presencia de Fe en la capa octaédrica (Moore and Reynolds, 1997).

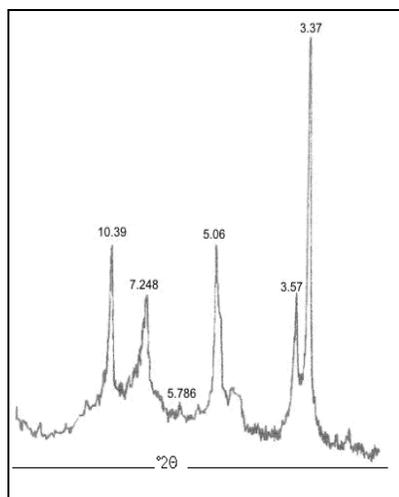


Figura 29. BL, Mazateca, Saturación con K y calentamiento a 300°.

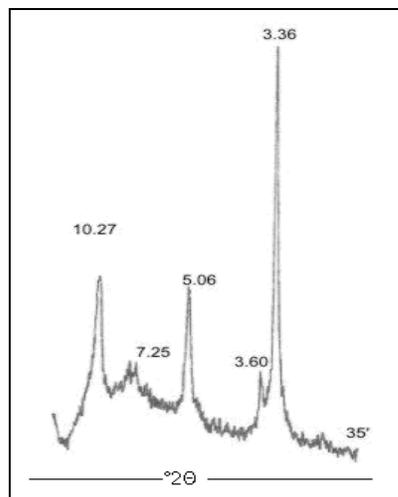


Figura 30. BL, Mazateca, Calentamiento a 490°.

El tratamiento con calentamiento a 490 °C (Figura 30), con reflexiones a 1.027, 0.506 y 0.336 nm corroboró la presencia de micas y de arcillas 2:1 en esta muestra. La presencia de una reflexión intensa a 0.336 nm en todos los tratamientos, aún después de la calcinación a 490 °C, se asociaría a la presencia de relictos de cuarzo muy fino en esta fracción que no han sido alterados. A diferencia de los diagramas de difracción del sitio forestal, en el caso del sitio agrícola con labranza tradicional (LT), las reflexiones que se observaron en los difractogramas fueron más pequeñas y menos desarrolladas. Lo anterior indicaría que las arcillas del sitio forestal son más frecuentes o presentan una mayor cristalinidad.

Labranza Tradicional de la Región Cuicateca: Las reflexiones del diagrama de difracción para este sitio son mejor definidas y más largas respecto al sitio forestal de la misma región, lo que indicaría arcillas en mayor cantidad o más cristalinas. La muestra orientada al natural (Figura 31) presenta dos grupos de reflexiones, uno de reflexiones pequeñas a 1.052, 0.506 y 0.341 nm que se asociaron a la

presencia de illitas, y otro a 0.731 y 0.3587 nm que corresponden a arcillas 1:1 del tipo de las caolinitas. La saturación con etilén glicol (Figura 32) prácticamente no provoca modificación de la posición de estas reflexiones: para el primer grupo 1.027, 0.5006 y 0.3348 nm ni para el segundo 0.731 y 0.3587 nm y la calcinación a 490 °C (Figura 38) conduce a la obtención de un diagrama característico de una illita, lo que confirmaría la presencia de ambas arcillas.

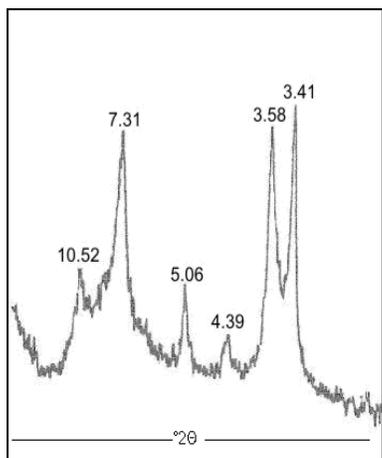


Figura 31. LT, Cuicateca, Natural.

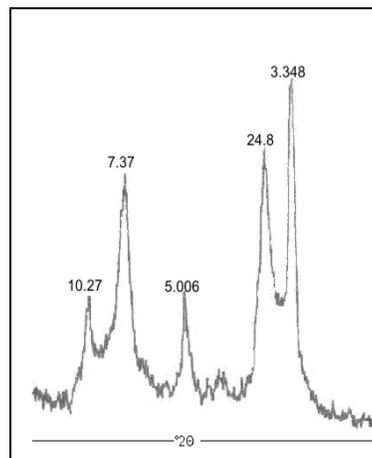


Figura 32. LT, Cuicateca, Saturación con EG.

La calcinación a 550 °C (Figura 33) conduce a la desaparición de las reflexiones asociadas a la caolinita, debido a que se calcina a esta temperatura, quedando sólo el diagrama de difracción característico a una illita (1.039, 0.509 y 0.337 nm), lo que confirmaría la presencia de caolinita en la muestra.

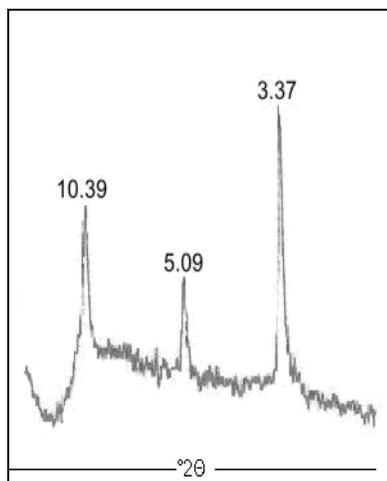


Figura 33. LT, Cuicateca, Calentamiento a 550°.

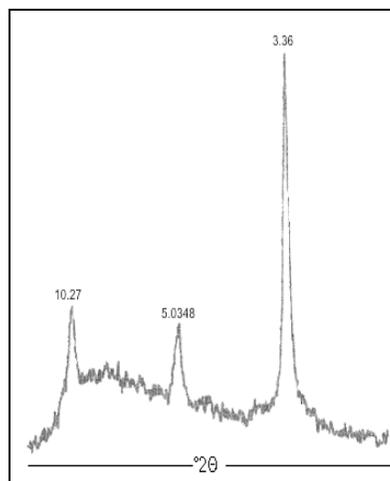


Figura 34. LT, Cuicateca, Calentamiento 490°.

Los resultados obtenidos indican que tenemos una mezcla de illita y caolinita como en el sitio forestal, con la diferencia que en este sitio agrícola las arcillas son más frecuentes o de mayor cristalinidad.

Bosque de Encino de la Región Cuicateca: El diagrama de difracción para el bosque mostró reflexiones anchas (Figura 35). Las más pequeñas a 1.0155, 0.503 nm y otra a 0.334 nm un poco mayor, que no mejoraron su definición con la saturación con etilén glicol (Figura 36). Este primer grupo de reflexiones se asociaron a la presencia de micas. Otro grupo, de reflexiones mejor definidas y de mayor tamaño, se ubicaron a 0.724 y 0.359 nm, y se desplazaron a 0.789 y 0.367 nm debido a la saturación con etilén glicol, se asociaron a la presencia de arcillas 1:1 del tipo de la caolinita.

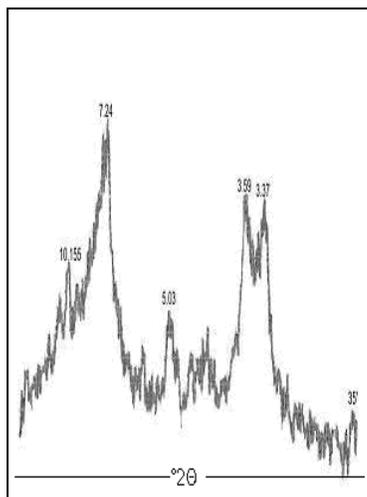


Figura 35. BE, Cuicateca, Natural.

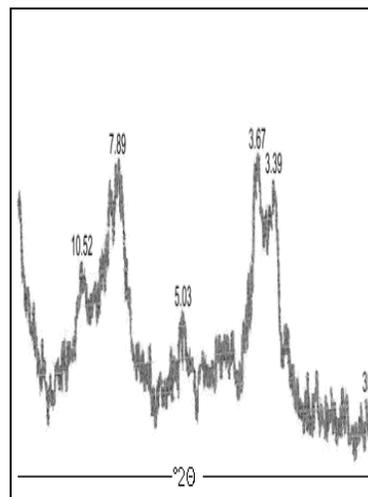


Figura 36. BE, Cuicateca, Saturación con EG.

Solamente el tratamiento de saturación con potasio y posterior calentamiento a 300 °C (Figura 37), permitió mejorar la definición de todas las reflexiones obtenidas en el diagrama de difracción: para el primer grupo 1.039, 0.512 y 0.336 nm y para el segundo 0.756 y 0.363 nm. Este tratamiento permitió precisar la existencia de illitas y de caolinita en este suelo.

El calentamiento a 550 °C (Figura 38) conduce a la desaparición de la reflexión a 0.724 nm, a esta temperatura la caolinita pasa a ser amorfa a los rayos X y su patrón de difracción desaparece, lo que

confirmaría la presencia de esta caolinita. Como resultado de este tratamiento y del calentamiento a 490°C (Figura 39) se confirma la presencia de illita en la muestra.

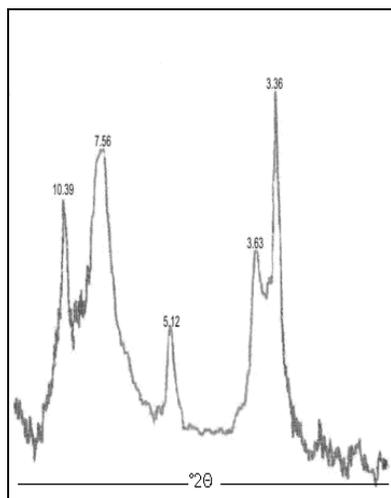


Figura 37. BE, Cuicateca, saturación con K calentamiento a 300°.

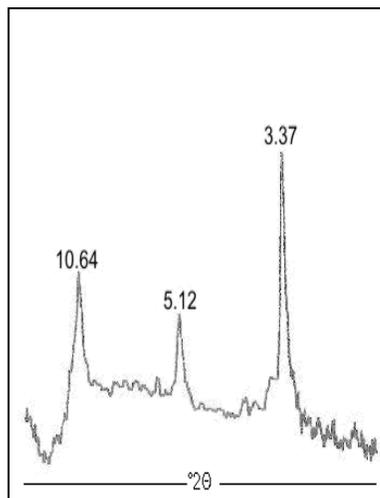


Figura 38. BE, Cuicateca, calentamiento a 550°.

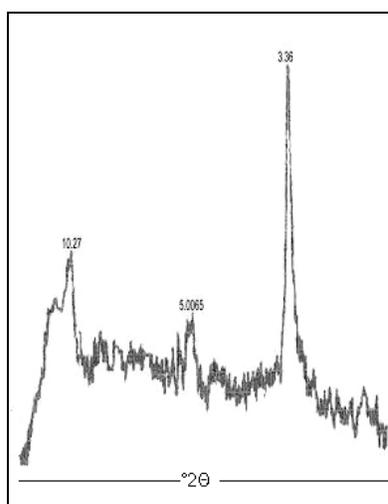


Figura 39. BE, Cuicateca, Calentamiento a 490°.

Labranza Tradicional de la Región Mixe: El diagrama de difracción muestra reflexiones finas y pequeñas, ubicadas a 1.4476, 0.731, 0.490 y 0.359 nm, las cuales se asocian a la presencia de una arcilla 2:1 (Figura 40). La saturación con etilén glicol (Figura 41), no conduce al desplazamiento de estas reflexiones: 1.472, 0.730, 0.492 y 0.360 nm, lo que indica que no se trata de una arcilla expandible.

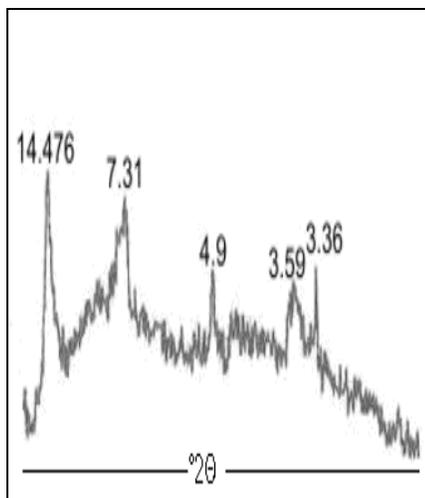


Figura 40. LT, Mixe, Natural.

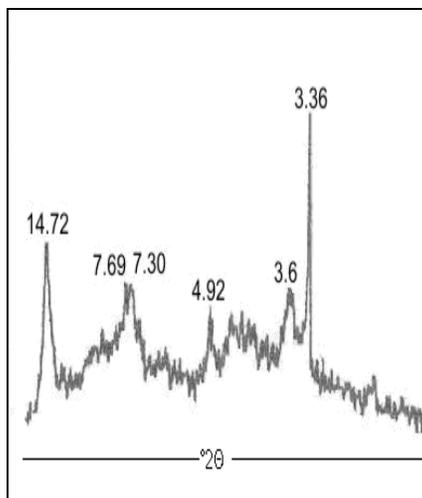


Figura 41. LT, Mixe, Saturación con EG.

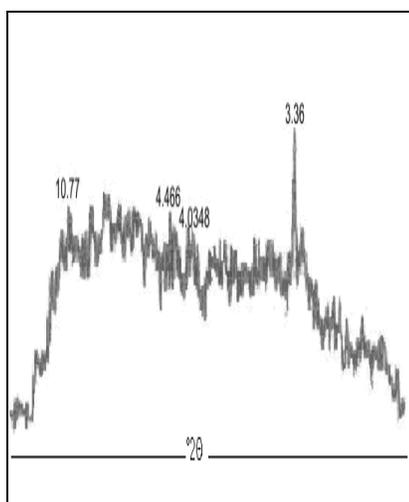


Figura 42. LT, Mixe, Calentamiento a 490°.

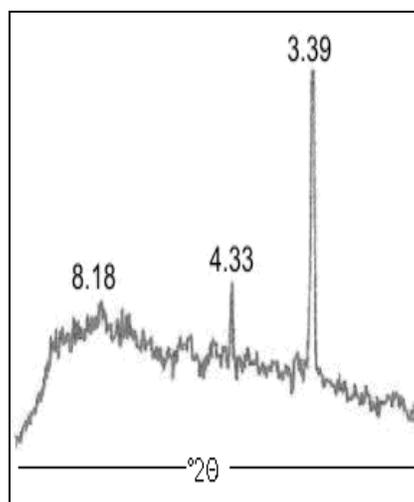


Figura 43. LT, Mixe, Calentamiento a 550°.

Este diagrama es característico al de una vermiculita con Mg y Fe en la capa octaédrica (Moore and Reynolds, 1997). La presencia de un pico largo y fino a 0.339 nm, en todos los dos tratamientos anteriores, y después de la calcinación a distintas temperaturas: 490 °C (Figura 42) y 550 °C (Figura 43) (muestra al natural) y 330 °C (después de saturación con potasio) (Figura 44), indicaría la presencia residual de cuarzo no alterado en esta fracción fina. Las calcinaciones a las temperaturas realizadas no muestran diagramas característicos a las micas, como se abría esperado en concordancia con los suelos antes descritos. Lo anterior estaría relacionado con una menor cantidad o menor grado de cristalinidad de estas arcillas respecto a las de los otros sitios estudiados.

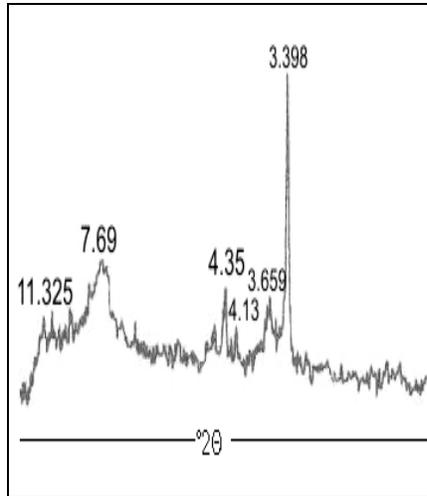


Figura 44. LT, Mixe, Saturación con K y calentamiento a 300°.

Bosque de pino de la Región Mixe: Las reflexiones del diagrama de difracción de rayos X para este sitio muestran reflexiones bien definidas ubicadas a 0.743 y 0.362 nm tanto en el tratamiento al natural (Figura 45) como después de la saturación con etilén glicol (Figura 46). Esto indicaría la presencia de arcillas 1:1 del tipo de las caolinitas.

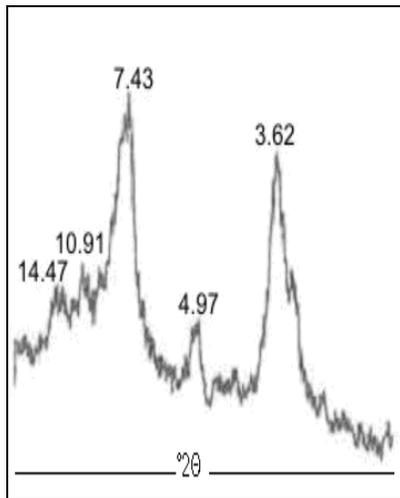


Figura 45. BP, Mixe, Natural.

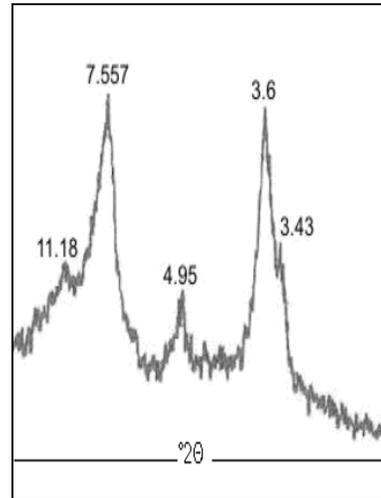


Figura 46. BP, Mixe, Saturación con EG.

Otras bandas, muy pequeñas y muy poco desarrolladas a 1.09, 0.495 y 0.343 nm, mejor definidas por la saturación con etilén glicol, indicarían la presencia apenas perceptible de micas. El diagrama de difracción sin picos resultante del calentamiento a 490 °C (Figura 47) corroboraría la degradación de la caolinita a esta temperatura y la muy pequeña presencia de esta micas.

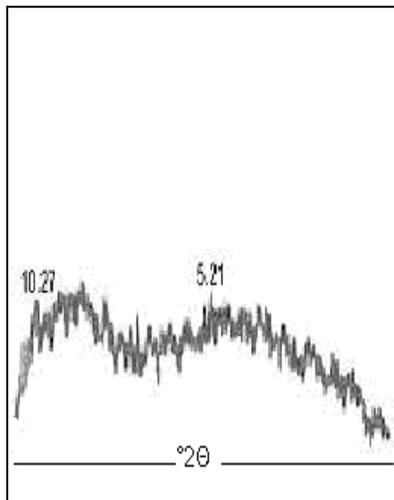


Figura 47. BP, Mixe, Calentamiento a 490°.

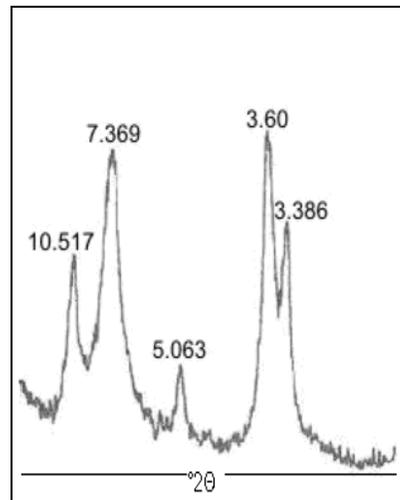


Figura 48. BP, Mixe, Saturación con K y calentamiento a 300°.

Sin embargo, la saturación con potasio y posterior calentamiento a 300 °C (Figura 48) mejora considerablemente la definición de las reflexiones asociadas a las micas, las cuales se presentan a 1.0517, 0.5063 y 0.3386 nm, largas y muy bien definidas, así como también las asociadas a la caolinita a 0.7369 y 0.360 nm lo que hace concluir que hay illitas presentes en esta muestra, conjuntamente con las caolinitas. La calcinación a 550 °C (Figura 49) corrobora la degradación de las caolinitas al aparecer solamente el diagrama característico de las illitas.

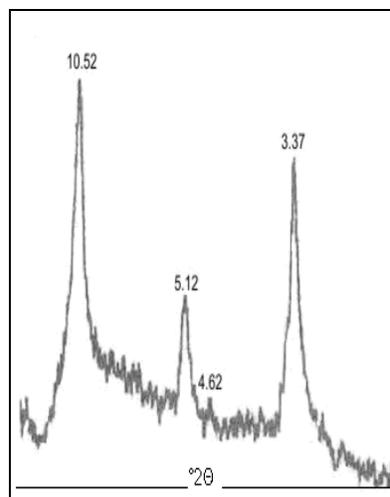


Figura 49. BP, Mixe, Calentamiento a 550°.

Relación del contenido de carbono con arcillas presentes en los suelos estudiados: En el Cuadro 27 se presentan las arcillas características de los suelos estudiados y la cantidad de carbono presente en la fracción arcilla < 2 μm .

Cuadro 27. Arcillas de los suelos de Oaxaca y carbono asociado en la fracción < 2 μm .

Región	Sistema	Tipo arcilla	Arcilla	C_f	C_f	C_s	C:	C:N
			g kg^{-1}	g kg^{-1} fracción)	g kg^{-1} suelo)			
Mazateca	LT	Vermiculita, Clorita, illita*	376.8	35.5	13.4	36.5	11	6
Mazateca	BL	Vermiculita-Fe, illita	278.7	45.1	12.6	43.9	12	11
Cuicateca	LT	Illita, caolinita	234.5	29.5	6.9	25.8	10	9
Cuicateca	BE	Illita, caolinita	141.7	34.7	4.9	20.1	15	9
Mixe	LT	Vermiculita-Mg y Fe	178.0	128.3	22.7	120.6	18	15
Mixe	BP	Illita, caolinita	243.2	66.2	16.1	80.2	15	20

LT: sistema agrícola (labranza tradicional); BL: bosque de liquidámbar; BE: bosque de encino; BP: bosque de pino; illita*: apenas perceptible ; C_f : C en la fracción < 2 μm , C_s : C en el suelo sin fraccionar; C:N_f : relación C:N en la fracción < 2 μm ; C:N_s : relación C:N en el suelo.

Los suelos presentaron diferente contenido de carbono en la fracción < 2 μm , de la misma manera que lo hicieron los suelos sin fraccionar; lo cual resulta de las diferencias en el aporte de MO de la vegetación y condiciones específicas de cada sitio. Los resultados del análisis mineralógico muestran, que los suelos con menor contenido de carbono, tanto en el suelo como en la fracción < 2 μm , (LT y BE de Cuicateca) son aquellos que presentaron una mineralogía dominada por illita y caolinita; en tanto que los altos contenidos de carbono correspondieron a los suelos en cuya fracción fina dominó la vermiculita (BL y LT de la Mazateca). Los valores de carbono semejantes en ambos sistemas LT y bosques, en cada una de las regiones estudiadas, indica que no existió un efecto significativo en el carbono de esta fracción debido al manejo. De acuerdo con Chenu et al. (1998), el manejo del suelo afecta menos las asociaciones arcilla-MO de tamaño micrométrico (< 2 μm) que las asociaciones de la MO con otras fracciones del suelo de mayor tamaño.

En el caso de la región Mixe, el sistema agrícola (LT), con vermiculita-Mg y Fe, presentó un contenido de carbono (23 g kg^{-1} suelo) 30 % mayor al contenido del mismo elemento en el bosque BP (16 g kg^{-1} suelo), con arcillas del tipo illita y caolinita; la diferencia encontrada en el carbono de los dos sistemas

de manejo, se atribuyó en este caso a las arcillas presentes. De acuerdo con los trabajos desarrollados por Monreal y Kodama (1997), el carbono orgánico del suelo se relaciona inversamente con arcillas no expandibles del tipo de las micas y las arcillas 1:1. La asociación preferencial del carbono con vermiculitas ha sido también encontrada por Righi *et al* (1995) en suelos ácidos humíferos. Estos autores señalan también que la asociación de carbono con micas es menos frecuente (en presencia de vermiculitas y esmectitas) debido a que las micas retienen K.

Los resultados anteriores indican que en los suelos estudiados si existe una relación entre el carbono de la fracción < 2 μm y el tipo de arcilla presente. Otros trabajos han concluido que el tipo de material arcilloso es importante en la retención y el secuestro de carbono, Monreal *et al.*, (1997), Monreal y Kodama, (1997) y Parfitt *et al.* (1997) a través de la relación establecida entre el carbono orgánico del suelo y el Al extractable con oxalato de amonio. Los resultados de los trabajos de Laird *et al* (2001) y Laird (2001) demuestran que existe una especificidad de las sustancias húmicas por la naturaleza mineralógica de las arcillas del suelo.

Los menores contenidos de carbono en los suelos con arcillas del tipo illita y caolinita (Cuicateca LT y BE, Mixe BP), se puede explicar por diferencias en el área superficial específica (S_{esp}) asociada a estas arcillas (Hassink, 1997, Tate and Theng, 1980). Arcillas como las caolinitas presentan valores de S_{esp} entre 10 y 70 $\text{m}^2 \text{g}^{-1}$ (Huang, 1990) y las illitas de 50-100 $\text{m}^2 \text{g}^{-1}$, valores menores a los reportados para las vermiculitas alrededor de 800 $\text{m}^2 \text{g}^{-1}$ (Robert and Chenu, 1992). El área superficial y la carga de las arcillas permite a éstas enlazar y, por lo tanto, estabilizar químicamente a la MOS (Wattel-Koekkoek *et al.*, 2001).

A pesar de lo señalado anteriormente hay estudios que indican que la cantidad de ácidos fúlvicos adicionados que son adsorbidos a los minerales arcillosos no se relacionaron al área superficial de las arcillas (Varadachari *et al.*, 1994) y los desarrollados por Hassink (1997) quien indica que el tipo dominante de mineral arcilloso presente en el suelo no afecta la relación entre el contenido de arcilla y limo en el suelo y la cantidad de carbono asociado a estas fracciones.

Los trabajos de Wattel-Koekkoek *et al.* (2003) indican que la MO asociada con caolinita se encuentra libre o enlazada a superficies de los hidroxil-aluminios de los bordes de las capas octaédricas de la caolinita, y que la dinámica de la MO es diferente en función de las superficies minerales de las arcillas presentes. Aún cuando no se encontraron reportes sobre el tipo de enlaces entre la MO y la vermiculita, se sabe que en el caso de la esmectita (arcilla muy semejante a la vermiculita) se forman puentes catiónicos que contienen componentes aromáticos difíciles de descomponer Wattel-Koekkoek *et al.* (2003).

De acuerdo con Schofield y Samson (1954), la caolinita generalmente está en estado floculado porque la atracción de los bordes cargados positivamente a las superficies planas cargadas negativamente da lugar a un modo de floculación del tipo borde a cara; de igual forma, Frenkel *et al.*, 1978 señalan que la presencia de esmectita en pequeñas cantidades incrementa la dispersabilidad de la caolinita (Levy *et al.*, 1993). Las laminillas de esmectita cargadas negativamente neutralizan la carga positiva de los bordes e interfiere en la floculación borde a cara, en este caso, la dispersión será semejante a la de la esmectita. En el caso de las illitas, Quirk (1978) indica que estas arcillas presentan una superficie planar irregular. De forma tal que se da un inevitable emparejamiento entre las partes irregulares de las superficies, lo que conduce a un débil contacto entre los cristales. Este débil contacto entre bordes y superficies de los cristales de illitas resulta en débiles fuerzas de atracción borde a cara y, por lo tanto, los suelos de illitas se dispersan más fácilmente y los microagregados que forman éstos no son estables. De acuerdo con Wattel-Koekkoek *et al.*, (2001) la MOS asociada con caolinita (que se extrae preferentemente con NaOH) está enriquecida con productos de polisacáridos. En el caso de las esmectitas, son los compuestos aromáticos los dominantes.

En varios estudios se ha mencionado que existe una fuerte correlación entre el contenido de carbono en el suelo y las arcillas, principalmente en suelos forestales (Nichols, 1984; Spain, 1990).

VII. CONCLUSIONES

Los suelos de las tres regiones, provienen del mismo material parental. Pertenecen el mismo orden en la Taxonomía de Suelos (Inceptisoles) pero pertenecen a diferente grupo en el Sistema WRB (Umbrisoles en la Mazateca y Mixe y Cambisol en la Cuicateca)

El sistema MIAF es una alternativa importante para capturar carbono además de presentar otras ventajas para los productores y para la conservación del suelo en zonas de ladera, ya sea con parcelas experimentales o como PAP adoptadas por los productores, presentan un potencial importante para capturar carbono de al menos 1 tonelada (Mg) por hectárea por año con café y de hasta 1.7 para durazno.

La aplicación de energía mediante el uso de ultrasonido provocó una transferencia de masa y de carbono (asociado a la fracción mineral o libre), desde las fracciones más gruesas Ag (250-2000 μm) y Af (50-250 μm) a la fracción más fina Ar (< 2 μm) del suelo. Sin embargo, la mayor cantidad de carbono se asoció a la fracción del tamaño L (2-50 μm), la cual resultó ser altamente estable al ultrasonido.

La cantidad de carbono presente en la fracción fina del suelo (< 2 μm) se asoció a la naturaleza de las arcillas silicatadas cristalinas presentes, suelos con arcillas 2:1 del tipo de las vermiculitas presentaron mayor cantidad de carbono que los que tienen arcillas 1:1 del tipo de las caolinitas.

VIII. LITERATURA CONSULTADA

- Anónimo, 2006. Secuestro de carbono forestal. <http://www.forestalnet.com/secuestro.htm>
- Anónimo, 2006. Simposio Internacional. Medición y Monitoreo de la Captura de Carbono en Ecosistemas Forestales. <http://smpt.uach.cl/simposiocarbono>
- Anónimo, 2006. Proyecto Internacional de secuestro de carbono. <http://www.ecosur.mx/scolel/proyecto.htm>
- Anónimo, 2006. Medición de la capacidad de captura de carbono en bosques de Chile y promoción en el mercado mundial de carbono. <http://www.capturacarbono.co.cl/>
- Acosta, M. M., H. Vargas J., M. A. Velázquez y J. D. Etchevers B. 2002. Estimación de la biomasa aérea mediante el uso de relaciones alométricas en seis especies arbóreas en Oaxaca, México. *Agrociencia* 36 (6): 724-735.
- Acosta, M. M., 2003. Diseño y aplicación de un método para medir los almacenes de carbono en sistemas con vegetación forestal y agrícolas de ladera en México. Tesis: Doctor en ciencias agrícolas. Colegio de Postgraduados, Montecillo, Texcoco, México.
- Adams, T. M. M. 1980. Macro organic matter content of some Northern Ireland soils. *Record Agric. Res.* 28: 1-11.
- Adams, W. A. And V. I. Stewart. 1969. The effect of ultrasonic dispersion on silurian shale particles. *Soil Sci.* 108: 227-228.
- Angers, D. and C. Chenu. 1998. Dynamics of soil aggregation and C sequestration. In: *Soil processes and the carbon cycle*. Lal, R. Kimble, J., Follet, R. And Stewart (ed). Chapter 1. CRC. Boca Raton, FL. USA. Pp: 199-223.
- Anderson, D. W., S. Saggar J. R. Bettany and J. W. B. Stewart. 1981. Particle size fractions and their use in studies of soil organic matter: I. The nature and distribution of forms of carbon, nitrogen and sulfur. *Soil Sci. Soc. Amer. J.* 45: 767-772.
- Andriulo, A., J. Galantini C., Pecorari and E. Torioni. 1990. Materia orgánica del suelo en la región pampeana. Un método de fraccionamiento por tamizado. *Agrochimica*, 34: 475-489.
- Antonie, J. 2001. Actividades de la FAO/AGLL sobre secuestro de carbono en el suelo, AGLL, FAO, Roma.
- Bain, C. D. and B. F. Smith. 1987. Chemical analysis. In: *A handbook of determinative methods in clay mineralogy*. M. J. Wilson (ed.), Blackie & Son Ltd, U. S. A. pp 248-273.
- Balesdent, J. 1996. Un point sur évolution des réserves organiques des sols de France. *Etude et Gestion des sols* 3 (4): 245-260.

- Balesdent, J., C. Chenu, and M. Balabane. 2000. Relationship of soil organic matter dynamics to physical protection and tillage. *Soil and Tillage Research* 53: 215-220.
- Baldock, J. A. J. M. Oades., A. G. Waters, X. Peng., A. M. Vasallo and M. A. Wilson. 1992. Aspects of the chemical structure of soil organic matter as revealed by solid-state ^{13}C -NMR-spectroscopy. *Biochemistry*. 16: 1-42.
- Bartelink, H.H. 1996. Allometric relationship on biomass and needle area of Douglas-fir. *For. Ecol. Manag.* 86:193-203.
- Bautista C, A., Ma. del C. Gutiérrez C., R. F del Castillo S, y J. D. Etchevers B. 2004. Cronosecuencia de un suelo y su clasificación en un área originalmente ocupada por bosque Mesófilo de Montaña. *TERRA Latinoamericana*, 23: 147-157
- Birkeland, P. W. 1984. *Soils and geomorphology*. Oxford University Press. pp: 119-161.
- Blyth, F. G. H., y M. H. de Freitas. 1995. *Geología para ingenieros*. Segunda reimpresión. CECSA, México, D.F. pp: 205-206.
- Brady, C. N., and R. R. Weil. 2000. *Elements of the nature and properties of soils*. Prentice Hall. Upper Saddle River, New Jersey. pp: 142-188.
- Brown, S. 2001. Measuring carbon in forest: current status and future challenges. *Environmental Pollution* 116: 363-372.
- Brown, S., J. R. Gillespe, and A. E. Lugo. 1989. Biomass estimation for tropical forest with applications to forest inventory data. *For. Sci.* 35 (4):881-902.
- Brown, S., J. Sathaye, M. Cannel, and P. Kauppi. 1996. Management of forests for mitigation of greenhouse gas emissions. En R.T. Watson, M.C. Zinyowera y R.H. Moss, eds. *Climate change 1995, impacts, adaptations and mitigation of climate change: scientific-technical analyses*. Report of Working Group II, Assessment Report, IPCC, pp. 773-797. Cambridge, Reino Unido, Cambridge University Press.
- Burke, I. C., C. M. Yonker., W. J. Parton., C. V. Cole., K. Flach. and D.S. Schimel. 1989. Texture, climate and cultivation effects on soil organic matter content in US Grassland soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 53: 800-805.
- Buyanovsky, G. G., M. Aslam, and G. H. Wagner. 1994. Carbon turnover in soil physical fractions. *Soil Science of America Journal*. 58:1167-1173.
- Cambardella, C. 1998. Experimental verification of simulated soil organic matter pools. In: Lal L., Kimble J.M., Follett R.A., Stewart B.A. eds. *Soil processes and the carbon cycle*. CRC Press, Boca Raton FL. pp 519-526.

- Cano-Morales, E. 1993. Relación alométrica entre el área foliar y el área de la albura en *Pinus patula* Schl et Chamb., en Zacatlán, Puebla. Tesis de Maestría en Ciencias. Colegio de Postgraduados. Programa Forestal. Montecillo, México. 89 p.
- Caravaca, F., Laz, A., Albaladejo, J. 2001. Soil aggregate stability and organic matter in clay and fine silt fractions in urban refuse-amended semiarid soils. *Soils Science Society American Journal*. 65:1235-1238.
- Castellanos, B. J., M. A. Velásquez, H. J. Vargas, F. C. Rodríguez y G. Fierros A. 1996. Producción de biomasa en un rodal de *Pinus patula*. *Agrociencia* 30: 123-128.
- Causton, D. R. 1985. Biometrical, structural and physiological relationships among tree parts. IN: attributes of trees as crop plants. Cannell, M., Jackson, J. E. (eds). *Inst. Terrestrial Ecology, Huntingdon*. Pp:137-159.
- Colegio de Postgraduados, 2005. Proyecto: Manejo Sostenible de Laderas. Regiones Cuicateca, Mazateca y Mixe, Oaxaca, México. Informe Final. Colegio de Postgraduados. Institución de Enseñanza e Investigación en Ciencias Agrícolas. Montecillo México.
- Cortés F. J. I., A. Turrent F., P. Díaz V., E. Hernández R., R. Mendoza R. y E. Aceves R. 2005. Manual para el establecimiento y manejo del sistema Milpa Intercalada con Árboles Frutales (MIAF) en Laderas. Colegio de Postgraduados, Montecillo México. pp: 1-4.
- Cuanalo C. H. 1990. Manual para la descripción de perfiles de suelos en el campo. 3ª ed. Colegio de Postgraduados, Chapingo, México.
- Chaney, K. and R. S. Swift. 1984. The influence of organic matter on aggregate stability in some British soils. *J. Soil Sci.* 35:223-230.
- Chapman, J. W., and S. T. Gower. 1991. Aboveground production and canopy dynamics in sugar maple and red oak trees in southwestern Wisconsin. *Can. J. For. Res* 21:1533-1543.
- Chefetz, B., M.J. Salloum, A.P. Deshmukh, and P.G. Hatcher. 2002. Structural components of humic acids as determined by chemical modifications and carbon-13 NMR, pyrolysis-, and thermochemolysis-gas chromatography/mass spectrometry. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 66:1159–1171.
- Chenu, C., P. Puget and J. Balesdent. 1998. Clay organic matter associations in soils: Microstructure contribution to soil physical stability. In: *Proceeding of the 16 th congress of soil science, CD-ROM, Cirad, Montpellier, France*.
- Chone, T., F. Andreux, J. C. Correa, B. Volkoff, and C.C. Cerri. 1991. Changes in organic matter in an Oxisol from the Central Amazonian forest during eight years as pasture determined by ¹³C isotopic composition. In Berthelin, J. Ed. *Diversity of environmental biogeochemistry*. Elsevier, Amsterdam. p. 397-405.

- Christensen, B.T. 1992. Physical fractionation of soil and organic matter in primary particle size and density separates. 1992. *Advances in Soil Science*. Vol. 20.
- Christensen, B.T. 1987. Use of particle size fractions in soil organic matter studies. *Intecol Bull.* 15: 113-123.
- Da Silva, A. P., B. D. Kay and E. Perfect. 1995. Characterization of the least limiting water range of soils. *Soil Sci Soc. Am. J.* 58:1755-1781.
- Deans, J. D., J. Mora, and J. Grace. 1996. Biomass relationships for tree species in regenerating semi-deciduous tropical moist forest in Cameroon. *For. Ecol. Manag.* 88: 215-225.
- De Jong, B. H. J., G. Montoya-Gómez, K. Nelson, L. Soto- Pinto, and R. Tipper. 1995. Community forest management and carbon sequestration: A feasibility study from Chiapas, México. *Interciencia* 20 (6): 409-416.
- De León G, F. y J. D. Etchevers B. 1999. Materia orgánica en el suelo y disponibilidad de nitrógeno. In: *Memoria 14 Congreso Latinoamericano de la Ciencia del Suelo*. Pucón, Chile. (CD-ROM)
- DOE. 2003. Carbon sequestration in terrestrial ecosystems. Department of energy reports on its research into using terrestrial ecosystems such as forest and wetland as carbon sinks. <http://www.csite.esd.org>.
- Edwards, A.P. and J. M. Bremner. 1967. Dispersion of soil particles by sonic vibration. *Journal of Soil Science*, 18:47-63.
- Escandón, C. J., Ben H. J., De Jong S., Ochoa G., March I. y Castillo M. A. 1999. Evaluación de dos métodos para la estimación de biomasa arbórea a través de datos Landsat TM en Jusnabaj, La Laguna Chiapas, México, estudio de caso. *Boletín del Instituto de Geografía, UNAM, México* Num. 40.
- Elliott, E. T. 1986. Aggregate structure and carbon, nitrogen, and phosphorus in native and cultivated soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 50:627-633.
- Elliott, E. T. and C. A. Cambardella. 1991. Physical separation of soil organic matter. *Agric. Ecosystems Environ.* 34: 407-419.
- Estrada, 2003. Carbono del suelo acumulado en sistemas agrícolas en tres microcuencas del estado de Oaxaca. Tesis. Tesis: Ingeniero Agrónomo Especialista en Suelos. Universidad Autónoma Chapingo. Chapingo, México.
- Eswaran, H. E., Van den Berg, P. Reich and J. Kimble. 1995. Global soil carbon resources, pp. 27-43. In: *Soil Processes and the Carbon Cycle*. Lal, E., Kimble, J. M., Follet., Stewart, B. A. (eds). CRC/Lewis P., Boca Raton, FL.

- Etchevers, J. D., Acosta M. M., Monreal C., Quednow K. y Jiménez, L. 2001. Los stocks de carbono en diferentes compartimientos de la parte aérea y subterránea en sistemas forestales y agrícolas de ladera en México. Memorias Simposio Internacional sobre "Medición y Monitoreo de la Captura de carbono en Ecosistemas Forestales", Valdivia, Chile. CD-ROM.
- Etchevers, B. J. D., M.C. Monreal, M. C. Hidalgo, M. M. Acosta, C. J. Padilla y López R. R. 2005. Manual para la determinación de carbono en la parte aérea y subterránea de sistemas de producción en laderas. Colegio de Postgraduados, Montecillo, México. México. pp: 8-10.
- Etchevers, B. J. D. 2006. El Carbono y los Sistemas Terrestres. Ciencia y Desarrollo, Diciembre 2006. pp 47-52.
- Etchevers, B. J. D., C. Prat., C. Balbontin., M. Bravo., Martínez. M. 2006. Influence of land use on carbon sequestration and erosion in México, a review. *Agronomy for Sustainable Development* 26: 21-28.
- FAO. 2001. Situación de los bosques del mundo. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación Roma-2001. Depósito de documentos de la FAO. Disponible en: http://www.fao.org/documents/show_cdr.asp?url_file=/docrep/003/y0900s/y0900s00.htm y consultado el 7 de Enero del 2006.
- FAO. 2002. Captura de carbono en los suelos para un mejor manejo de la tierra. Informes sobre recursos mundiales de suelos, Roma, 2002. Basado en el trabajo de Michel Robert Institut national de recherche agronomique Paris, Francia. Disponible en: <http://www.fao.org/DOCREP/005/Y2779S/y2779s00.htm/Contents>
- Feller, C. 1979. Une méthode de fractionnement granulométrique de la matière organique des sols: application aux sols tropicaux à texture grossière, très pauvres en humus. *Cahiers ORSTOM, série Pédologie* 17: 339-346.
- Frenkel, H., J. O. Goertzen and J. D. Roades. 1978. Effect of clay type and content, exchangeable sodium percentage in electrolyte concentration on clay dispersion and soil hydraulic conductivity. *Soil. Sci. Soc. Am. J.* 42:32-39.
- Figueroa, N. C. M. 2001. Comparación de la concentración de carbono en diferentes tipos de vegetación de la sierra norte de Oaxaca. Tesis de licenciatura. División de Ciencias Forestales. UACH. Chapingo, México. 86 p.
- Forstner, U. 1985. Chemical forms and reactivities of metals in sediments. pp 1- 30. In: R. Leschber, R. D. Davies and P. L'Hermite (eds.), *Chemical Methods for Assessing Bio-Available Metals in Sludges and Soils*. Elsevier Applied Science Publ., London UK.
- Foucault, A. y J. F. Raoult. 1985. Diccionario de geología. Versión castellana. Masson, Barcelona, España. pp: 193-194.
- Foyer, C. H. 1984. Fotosíntesis. Compañía Editorial Continental., pp 15 – 30.

- Fuller, L., Goh T. B. and Oscarson D. W. 1995. Cultivation effects on dispersible clay of soil aggregates. *Canadian Journal of Soil Science*. 75:101-107.
- Gaudinski, J. B., Trumbore, S. E., Davidson, E. A. y Zheng, S. 2000. Soil carbon cycling in a temperate forest: radiocarbon-based estimates of residence times, sequestration rates and partitioning fluxes. *Biogeochemistry*. 51: 33-69
- Gavinelly, E., Feller C., Larré-Larrouy M. C., Bacye B., Djegui N. and D. Nzila. 1995. A routine method to study soil organic matter by particle-size fractionation: examples for tropical soils. *Soils Science Plant Analysis*. 26 (11&12), 1749-1760.
- Geron, C. D. and Ruark G. A. 1988. Comparison of constant and variable allometric ratios for predicting foliar biomass of various tree genera. *Can. J. Res.* 18(10):1298-1304.
- Gregory, P. J., Simmonds L. P. and G.P. Warren. 1998. Interactions between plant nutrients, water and carbon dioxide as factors limiting crop yields. *Philosophical transactions of the Royal Society of London, Series B*, 352: 987-996.
- Gregorich, E. G., R. G. Kachanoski and R. P. Voroney. 1988. Ultrasonic dispersion of aggregates: distribution of organic matter in size fractions. *Canadian Journal of Soil Science*, 68: 395-403.
- Grier, C. C. and R.H. Waring. 1974. Conifer foliage mass related to sapwood area. *For. Sci.* 20:205-206.
- Grossman, R. B., R. J. Ahrens., L.H. Gile., E. Montoya and O. A. Chadwick. 1995. A real evaluation of carbonate carbon in a desert area of southern New México. P. 81-91. In: Lal, E., Kimble, J. M., Follet., Stewart, B. A. (eds). *Soil and Global change*. CRC/Lewis P. Boca Raton, FL.
- Guggenberger, G., B. T. Christensen and W. Zetch. 1994. Land-use effects on the composition of organic matter in particle-size separates of soil: I. Lignin and carbohydrate signature. *European J. Soil Sci.* 45: 449-458.
- Harris, R. F., G. Chesters & on allen. 1966. Dynamics of soil aggregation. *Advances in Agronomy* 18: 107-169.
- Hassink, J. 1997. The capacity of soils to preserve organic C and N by their association with clay and silt particles. *Plant and Soil*. 191:77-87.
- Heinrich & Hergt. 1990. La complejidad de los ecosistemas. Disponible en: <http://ambicenter.com.br/ea01052308.htm>. 23/07/04.
- Hereter, A., R. Josa and K. Candela. 2002. Changes in particle-size distribution influenced by organic matter and mechanical or ultrasonic dispersion techniques. *Soil Science Plant Anal.* 33 (7&8):1351-1362.

- Hidalgo, C. 2003. Separación de partículas de diferente tamaño para determinar CT en suelo. Procedimiento estándar de operación. Laboratorio de Fertilidad de Suelos. (Documento Interno).
- Holmann, P. S., P Sollins., T. Fiorella., T. Thorson and S.J. Kern. 1998. Regional soil organic carbon storage estimates for western Oregon by multiple approaches. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 62 789-796.
- Hodgson, J. M. 1978. Soil sampling and soil description monographs on soil survey. Clarendon Press: Oxford Univ. Press, Oxford, p. 125-132.
- Houghton, R. A. 1996. Converting terrestrial ecosystems from sources to sinks of carbon. *Ambio*, 25(4): 267-272.
- Houghton, R. A. 1999. The annual net flux of carbon to the atmosphere from changes in land use, 1850-1990. *Tellus Series B - Chemical and physical meteorology*, 51(2): 298-313.
- Hudnall, W. H., L. M. West., E. C. Benhman and L. P. Wilding. 2000. Inceptisols. Pp E-242-255. *In: Summer, E.D. (ed). Handbook of Soil Science.* CRC Press. Boca Raton, Fl. pp: 242-255.
- Hunter C. R. and A. J. Busacca. 1989. Dispersion of Three Andic Soils by Ultrasonic Vibration. *Soil Science Society of America Journal, Madison*, v. 53, p.1299-1302, 1989.
- Huxley, J. S. 1932. Problems of relative growth. The Dial Press, New York. 276 p.
- Huang, P. M. 1990. Role of soil minerals in transformations of natural organics and xenobiotics in soil. *In: Soil Biochemistry, Vol. 6.* J. M. Bollang and G. Stotzky (Ed). Pp. 29-115. Marcel Dekker Inc. New York.
- Ingram, J. S. and Fernández, E. C. M. 2000. Managing carbon sequestration in soils: concepts and terminology. *Agriculture Ecosystems & Environment*, 8: 111-117.
- INE (Instituto Nacional de Ecología), 2004. La ciencia de cambio climático. Disponible en: www.ine.gob.mx/dgicurg/cclimatico/ciencia.html. Fecha de consulta: 23/07/04.
- INE. Instituto Nacional de Ecología. 2002. Los ecosistemas de México. Disponible en: http://www.ine.gob.mx/dgoece/con_eco/conhc/ecomex.html. Consultado: Diciembre 2006
- INEGI. Instituto Nacional de Geografía e Informática. 1999. Síntesis Geográfica del Estado de Oaxaca. Aguascalientes, Ags. México. 166 p ilustr. 1 anexo cartográfico.
- International Geosphere biosphere program 1998. The terrestrial cycle: implications for the Kyoto protocol. *Science* 280:1393-1394.
- IPCC, 2000. Land use, land-use change, and forestry special report. Cambridge University Press 377 pp.

- IPCC, 1997. Impactos regionales del cambio climático: evaluación de la vulnerabilidad. Informe especial del grupo de trabajo II del IPCC.
- IPCC, 2007. The IPCC 4th assesment report coming out. Disponible en: <http://www.ipcc.ch/>. Consultado: Enero 2007.
- Kaiser, K. and W. Zech. 2000. Sorption of dissolver organic nitrogen by acidic subsoil horizons and individual minerals phases. *Eur. J. Soil. Sci.* 51: 403-411.
- Kaurichev, L. S. 1984. *Prácticas de Edafología*, Editorial Mir, Moscu, Rusia. Pp 79-85.
- Kern, J. S. 1994. Spatial patterns of soil organic carbon in the contiguous. United States, *Soil Sci, Soc.Am. J.* 58: 439-455.
- Konyushkov, D. Y. 1997. Geochemical history of carbon on the planet: implications for soil carbon studies. In: Lal, E., Kimble, J. M., Follet., Stewart, B. A. (eds). *Soil and Global change*. CRC/Lewis P. Boca Raton, FL.
- La Ciencia Ecológica, 2004. disponible en:
http://www.iespana.es/natureduca/cienc_ciclo_carbono.htm
- Laird. D. A. 2001. Nature of clay-humic complexes in an agricultural soil: II. Scanning Electron Microscopy Analysis. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 65: 1419-1425.
- Lal, R., J. Kimble y B. A. Stewart. 1995. Toward soil management for mitigating the greenhouse effect. pp 373-381. In: Lal, E., Kimble, J. M., Follet., Stewart, B. A. (eds). *Soil management and greenhouse effect*. Adv. Soil Sci. CRC. Lewis. Boca Ratón. FL.
- Lal, R., J. Kimble, E. Levine and B. A. Stewart. 1995. *Soils and global change*. CRC & Lewis publishers, Boca Raton Florida of soils of the tropics. CRC, press. Boca Raton, FL.
- Lal, R., J. Kimble, and R. F. Follett. 1997. Pedospheric processes and the carbon cycle.pp.1-8. In R. Lal, J. Kimble,. R Follett, and B.A. Stewart (eds.) *Soil processes and the carbon cycle*. CRC Press. Boca Ratón. FL.
- Lal, R. 1998. Land use and soil management effects on soil organic matter dynamics on alfisols in Western Nigeria. Pp. 109-126 In Lal, R.; Kimble, J.M.; Follet, R.F. y Stewart, B. A. [eds.] *Soil processes and the carbon cycle*. CRC Press. Boca Ratón. FL.
- Lal, R., M. Kimble, F. Follet and A. Stewart. 1998. Pedospheric processes and the carbon cycle. In: *Soil processes and the carbon cycle*. In: Lal, R., Kimble, J., Follet, R. and Stewart (ed). Chapter 1. CRC Boca Raton, FL. pp:1-7.
- Lal, R., D. Mokma and B. Lowery. 1999. Relation between soil quality end erosion. In: *Soil Quality and soil erosion*. Lal, R. (ed) CRC. Boca Raton, FL. pp 237-245.

- Landsberg, J. J. Gower, S. T. 1997. Applications of Physiological Ecology to Forest Management. Academic Press. San Diego, U.S.A. 354 p.
- Leeds-Harrinson, P., M. Rounsevell and K Goulding. 1998. Measuring and modeling clay particle interactions. Congreso Internacional Mont Pellier, 1998.
- Lehmann, J., C: M. Da Silva and W. Zech. 2001. Organic matter stabilization in a Xanthic ferralsol of the central Amazon as affected by single trees: chemical characterization of density, aggregate, and particle size fractions. *Geoderma* 99:147-168.
- Letey, J. 1985. Relationships between soil physical properties and crop production. *Adv. Soil Sci.* 1:277-294.
- Levy, G. L., M. Agassi, H. J. C. Smith and R. Stern. 1993. Microaggregate stability of kaolinitic and illitic soils determined by ultrasonic energy. *Soil. Sci. Soc. Am. J.* 57:803-808.
- Locatelli, B. and S. Leonard. 2001. Un método para medir carbono al almacenado en los bosques de Malleco (Chile), *Boist et Forêts des Tropiques* 276(1): 69-80.
- López Musalem Alejandro. 1998. Aporte de los sistemas silvopastoriles al secuestro de Carbono en suelo. Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza. (CATIE). Turrialba, Costa Rica.
- McGill, W. B., J. A. Shields, and E. A. Paul. 1975 Relation Between carbon and nitrogen turnover soil organic fractions of microbial origin. *Soil Biol. Biochem.* 7: 57-63.
- Mattus, F. J. 1994. The distribution of soil organic matter of various aggregate size classes in arable soils. I Relationships between clay content of aggregates of a sand and clay soil and carbon mineralization, nitrogen mineralization and microbial biomass carbon. Doctoral Thesis. The Netherlands. Agricultural University of Wageningen.
- Matus, J. F., R. Christian and G. Maire. 2000. Relación entre la materia orgánica y textura del suelo y tasas de mineralización de carbono y nitrógeno. *Agricultura Técnica (Chile)*. 60 (2):112-126. Abril-Junio, 2000.
- Matus, J. F. 2003. Enrichment of carbon in clay and silt particles in soils with different land use managements. Symposium de suelos. Universidad de Talca, departamento de producción agrícola, facultad de ciencias agrarias, universidad de concepción, Chile.
- Martin, J. P. and K. Haider. 1986. Influence of mineral colloids on turnover rates of soil organic carbon. In: P. M. Huang and M. Schnitzer (editors), Interactions of soil minerals with natural organics and microbes. *Soil Science of America Special Publication 17*. Soil Science Society of America, Madison, Wi, pp. 283-304.
- Monreal, C. and A. H. Kodama. 1997. Influence of aggregate architecture and minerals on living habitats and soil organic matter in aggregates of a Gleysol. *Can. J. Soil Sci.* 77: 379-788.

- Monreal, C. 2000. Un método para medir la captura de carbono en terrenos agrícolas de ladera. Colegio de Postgraduados, Montecillo, Texcoco, México.
- Monreal, C. M., H. R. Schulten and H. Kodama, 1997. Age, turnover and molecular diversity of soil organic matter. *Canadian Journal of Soil Science*. 77:379-388.
- Mooney, H. A. 1972. The carbon balance of plants. *Annual Review of Ecology and Systematics* 3: 315 – 346
- Morra, M. J., R. R. Blank, L. L. Freeborn and B. Shafii. 1991. Size fractionation of soil organo-mineral complexes using ultrasonic dispersion. *Soil Science*, 152: 294-303.
- More. D. and R.C. Reynolds. 1997. X-Ray diffraction and the identification and analysis of clay minerals 2a. Ed. USA: Oxford University Press.
- Nacro, H., D. Benest and L. Abbadie. 1998. Distribution of microbial activities and organic matter according to particle size in a humid savanna soil distribution de l'activité microbienne et de la matière organique en fonction de la granulométrie dans un sol desavane humide. Congreso Internacional Montpellier, 1998. Symposium 34. Poster.
- Nichols, J. D. 1983. Relation of organic carbon to soil properties and climate in the Southern Great Plains. *Soil Science Society of America Journal*. 48: 1382-1384.
- Nichols, J. D. 1984. Relation of organic carbon to soil properties and climate in the Southern Great Plains. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 48: 1382-1384.
- North. P. F. 1976. Towards an absolute measurement of soil structural stability using ultrasound. *J. Soil. Sci.* 27: 451-459.
- Oades, J. M. 1988. The retention of organic matter in soils. *Biogeochem.* 5: 35-70.
- Oades, J. M. 1989. An introduction to organic matter in mineral soil. Pp 89-159. In: J. B. Dixon and S.B. Weed (eds.). *Minerals in Soil Environments*, Second Edition. SSSA. Publ. Inc. Madison, Wi. Usa.
- OECD. 1993. OECD Core Set of Indicators for Environmental Performance Reviews. A Synthesis Report by the Group on the State of the Environment. OECD, Paris. 35 p.
- ONI, 2003. Olimpiadas Nacionales de Contenidos Educativos en Internet, 2003, Disponible en: www.oni.escuelas.edu.ar
- Parfitt, R. L., B. K. Theng., G. Whitton and T. G. Shepherd. 1997. Effects of clay minerals and land use on rganic matters pools. *Geoderma* 75:1-12.

- Percival, H. J., L. R. Parfitt and N. A. Scott. 1999. Factors controlling soil carbon levels in New Zealand Grasslands: Is clay content important?. *Soils Science American Journal*. 64 :1623-1630.
- Perry, D. A. 1994. *Forest Ecosystems*. The Johns Hopkins University Press. London. 649 p.
- PMSL. 1998. Proyecto Manejo Sostenible de Laderas. Regiones Mazateca, Cuicateca y Mixe, Oaxaca, México. Colegio de Postgraduados. Institución de Enseñanza e investigación en ciencias agrícolas. Montecillo, México. Seis Anexos.
- PMSL. 2004. Proyecto manejo sustentable de laderas, regiones Mazateca, Cuicateca y Mixe en Oaxaca, México. Informe final. Colegio de Postgraduados. Institución de Enseñanza e investigación en ciencias agrícolas. Seis anexos. Montecillo, Edo. de Méx.
- PMSL. 2007. Proyecto manejo sustentable de laderas, regiones Mazateca, Cuicateca y Mixe en Oaxaca, México. Disponible en: http://www.colpos.mx/proy_rel/ladera/index.htm
- Puget, P., C. Chenu and J. Balesdent. 1995. Total and young organic carbon distributions in aggregates of silty cultivated soil. *European Journal of Soil Science*. 29: 449-459.
- Quirk, J. P. 1978. Some physico-chemical aspects of soil structural stability- A review p. 3-16. In W.W. Emerson et al. (ed) *Modification of soil structure*. John Wiley & Sons, Chichester, England.
- Rice, C.W. and K. McVay. 2002. Carbon Sequestration: Top 10 Frequently Asked Questions, Kansas State University, October 2002. www.oznet.ksu.edu/kccm.
- Rigui, D., H. Dinel., H. R. Schulten and M. Schnitzer. 1995. Characterization of clay-organic matter complexes resistant to oxidation by peroxide. *European Journal of Soil Science*, 46:423-429.
- Robert, M. and C. Chenu. 1992. Interactions between soil minerals and microorganisms. In: *Soil Biochemistry*, Vol. 7. G. Stotzky and J. M. Bollang (Ed). pp. 307-404. Marcel Dekker Inc. New York.
- Roscoe, R., P. Buurman and E. J. Velthorst. 2000. Disruption of soil aggregates by varied amounts of ultrasonic energy in fractionation of organic matter of a clay Latosol: carbon, nitrogen and ¹³C distribution in particle-size fractions. *European Journal of Soil Science*, 51:445-454.
- Schlesinger, W. H. 1991. *Biogeochemistry: An analysis of global change*. Academic Press, San Diego, CA.
- Schimel, D. S. 1995: *Terrestrial ecosystems and the carbon cycle*. *Global Change Biol.*, 1, 77-91.
- Schofield. R. K. and H. R. Samson. 1954. Flocculation of kaolinite due to the attraction of oppositely charged crystal faces. *Faraday Discuss. Chem. Cos.* 18: 135-145.

- Schulthess, C. P., Huang, C. P. 1991. Humic and fulvic acid sorption by silicon and aluminum oxides surfaces on clay minerals. *Soil, Sci. Soc. Am. J.* 55: 34-42.
- Schulze, E. D., C. Wirth and M. Heinmann, M. 2000. Managing forest after Kyoto, *Science* 289:2058-2059.
- Schnitzer, M and S. U. Khan. 1972. *Humic Substances in the Environment*. Marcel Dekker, INC., New York.
- SEMARNAT, 2006. GEI en México. Disponible en: www.geimexico.org/downs/documentos/MDL_Acdos_ene06.pdf. Consultado. Enero, 2006.
- Smith, T. M., W. P. Cramer, R. K. Dixon, R. Leemans, R. P. Neilson y A. M. Solomon. 1993. The Global Terrestrial Carbon Cycle. *Water, Air and Soil Pollution* 70: 3-15. Tipper, R. y B.H. De Jong. 1998. Quantification and regulation of carbon offsets from forestry: comparison of alternative methodologies, with special reference to Chiapas, Mexico. *Commonwealth Forestry Review* 77: 219-228.
- Spain, A. 1990. Influence of environmental conditions and some soil chemical properties on the carbon and nitrogen contents of some tropical Australian rainforest soil. *Australian Journal of Soil Research*. 28: 825-839.
- Spycher, G., P. Sollins, and S. Rose. 1983. Carbon and nitrogen in the light fraction of a forest soil: Vertical distribution and seasonal patterns. *Soil Sci.* 135:79-87.
- Stevenson, F. J. 1986. *Cycles of Soil. Carbon, Nitrogen, Phosphorus, Sulphur, Micronutrients*. A Wiley-Interscience Publication. John Wiley and Sons. 380 p.
- Sollins, P., P. Omán and A. B. Caldewey. 1996. Stabilization and destabilization of soil organic matter: mechanism and controls. *Geoderma* 74: 65 – 105.
- Soil Survey Staff. 2003. *Keys to Soil Taxonomy*. United States Department of agriculture., Ninth Edition. Natural Resources Conservation Service. pp: 14-18, 165.
- Stott, D., A. Kennedy A. and C. Cambardella. 1999. Impacts of soil organism and organic matter on soil structure. In: *Soil Erosion*. Rattan, L. (ed). CRC Press. Pp: 57-60.
- Swift, R. S. 2001. Sequestration of carbon by soil. *Soil Science* 166: 858-871.
- Tan, H. H. and P.S. Troth. 1981. Increasing sensitivity of organic matter and nitrogen analysis using soil separates. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 45_574-577.
- Tate, K. R. and B. K. G. Theng. 1980. Organic matter and its interactions with inorganic soil constituents. In: *Soil with a variable charge*. B.G. K. G. Theng (Ed) pp. 225-249. New Zealand Soc. Soil. Sci. Lower Hutt.

- Ter-Mikaelian, and M. T., Korzukhin. D. 1997. Biomass equation for sixty-five North American tree species. *Forest Ecology and Management* 97:1-24.
- Tiessen, H. and J. W. B. Stewart. 1983. Particle-size fractions and their use in studies of soil organic matter: II. Cultivation effects on organic matter composition in size fractions. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 47: 509-514.
- Tisdall, J. M. and J. M. Oades. 1982. Organic matter and water stable aggregates. *J. Soil Sci.* 33:141-163.
- Theng, B. K. G. 1979. Formation and properties of clay-polymer complexes. Elsevier, Amsterdam.
- Thomasson, A. J. 1978. Towards and objective classification of soil structure. *J. Soil Sci.* 29:38-46.
- Torn, M., S. Trumbore, O. A. Chadwick, P. M. Vitousek and D. M. Hendricks. 1997. Mineral control of soil organic carbon storage and turnover. *Natur* 389:170-173.
- Truog, E. 1928. General exhibits. *Soil Sci.* 25: 89-91.
- Tucker, C. J., J. R. Townshend And T. E. Goff. 1985. African landcover classification using satellite data. *Science* 227: 369-375.
- Turchenek, L. W. and J. M. Oades. 1978. Organi- mineral particles in soils. Pp. 138-144. In: W.W. Emerson et al. (eds) *Modification of Soil Structure*. Wiley, Chichester.
- Valenzuela, H. T. 2001. Estimación de Secuestro de Carbono en Bosques Naturales de oyamel (*Abies religiosa*) en el Sur del Distrito Federal. DICIFO, UACH. Chapingo, Méx.
- van Baren J. H. W., and W. Bomer. 1982. Procedimientos para la Colección y Preservación de Perfiles de Suelo. *Publicación Técnica 1*. ISRIC, 1982. P. Manzanares (trad). Wageningen, Los Países Bajos. Pp: 2-21.
- Van Reeuwijk L. P. (ed.). 1995. Procedimientos para análisis de suelos, versión 1995. Gutierrez C. Ma. del C., E. A. Tavárez., y C. A. Ortiz. (trad) Primera edición en español, 1999. Especialidad de Edafología, Colegio de Postgraduados, Montecillo, México. pp: 3-31, 37-108.
- Varadachari Ch, a. H. Mondal, D. Kayak and K. Ghosh. 1994. Clay humus complexation: effect of pH and the nature of bonding. *Soil Bio. Biochem.* 26, 1145-1149.
- Watson, J. R. 1971. Ultrasonic vibration as a method of soil dispersion. *Soils Fert.* 34: 127-134.
- Wattel-Koekkoek, E. J. W., P. P. L. van Genuchten, P. Buurman and B. van Lagen. 2000. Amount and composition of clay-associated soil organic matter in a range of kaolinitic and smectitic soils. *Geoderma* 99: 27-49.
- Wiegand, C. L and A. J. Richardson. 1984. Leaf area, light interception and yield estimates from spectral components analysis. *Agronomical Journal* 76: 543-548.

Whittig, L. D. and W. R. Allardice. 1986. X-ray diffraction techniques. *In* : A. Klute (ed.) Methods of soil analysis. Physical and mineralogical methods. 2nd edition. Part 1, Book series 5, Agronomy 9. SSSA Madison, Wisconsin. pp: 331-362.

WRB, 1999. FAO, ISRIC y SICS (Organización de las Naciones Unidas para la agricultura y la alimentación, Centro Internacional de Referencia e Información de Suelos, Sociedad Internacional de la Ciencia del Suelo. 1999. Base Referencial Mundial del Recurso Suelo WRB. Roma. Italia. pp:19-62.

IX. ANEXO

Cuadro 28. Recuperación de fracciones en el sistema Labranza Tradicional en la región Mazateca

Recuperación de Masa (%)										
Energía Jml-1	Repetición	Suelo húmedo	Suelo seco	Fracción Liviana	Arena gruesa 250-2000	Arena Fina 50-250	Limo 2-50	Arcilla < 2	Limo + Arcilla 2-50	Total
		g	g	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)		
0	1	50.00	46.25	1.449	16.09	14.79	53.74	18.78	72.52	104.85
0	2	50.00	46.25	1.622	17.21	16.70	52.49	13.81	66.30	101.83
0	3	50.00	46.25	0.822	19.18	16.08	52.50	15.42	67.92	104.00
227.58	1	50.00	46.25	1.124	7.94	7.75	50.62	34.99	85.61	102.41
227.58	2	50.00	46.25	1.103	17.00	6.93	47.38	32.67	80.05	105.07
227.58	3	50.00	46.25	1.903	14.50	6.26	47.07	32.77	79.83	102.49
455.16	1	50.00	46.25	1.276	10.69	5.43	47.78	38.11	85.89	103.28
455.16	2	50.00	46.25	1.340	10.63	6.40	48.25	36.18	84.43	102.80
455.16	3	50.00	46.25	1.686	10.58	7.08	47.24	39.02	86.26	105.60
910.32	1	50.00	46.25	1.405	6.75	6.52	46.52	42.62	89.14	103.81
910.32	2	50.00	46.25	1.405	8.88	5.29	42.49	38.38	80.88	96.46
910.32	3	50.00	46.25	0.951	8.58	4.67	44.60	40.66	85.26	99.46
1365.48	1	50.00	46.25	0.670	10.72	4.69	45.77	38.45	84.22	100.30
1365.48	2	50.00	46.25	1.470	9.02	5.35	45.20	36.47	81.67	97.51
1365.48	3	50.00	46.25	0.886	10.37	5.19	46.02	38.14	84.16	100.61

Cuadro 29. Recuperación de fracciones en el sistema Bosque de Liquidámbar en la región Mazateca.

Recuperación de Masa %										
Energía Jml-1	Repetición	Suelo húmedo	Suelo seco	Fracción Liviana	Arena gruesa 250-2000	Arena Fina 50-250	Limo 2-50	Arcilla < 2	Limo + Arcilla 2-50	Total
		g	g	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	
0	1	50.00	47.57	0.568	33.665	13.47	45.341	4.272	49.613	97.32
0	2	50.00	47.57	1.366	33.402	14.78	46.565	6.207	52.772	102.32
0	3	50.00	47.57	2.501	36.458	11.47	40.776	5.282	46.058	96.48
227.58	1	50.00	47.57	1.703	29.349	5.69	42.128	16.850	58.977	95.71
227.58	2	50.00	47.57	1.955	27.301	7.32	44.128	19.280	63.408	99.98
227.58	3	50.00	47.57	1.850	21.977	7.00	48.318	19.269	67.588	98.41
455.16	1	50.00	47.57	1.619	21.989	6.08	47.468	22.699	70.167	99.85
455.16	2	50.00	47.57	2.165	21.245	6.20	48.891	22.499	71.390	101.00
455.16	3	50.00	47.57	1.997	21.706	6.55	48.465	24.200	72.665	102.92
910.32	1	50.00	47.57	1.408	20.000	6.25	46.868	27.217	74.084	101.74
910.32	2	50.00	47.57	1.513	21.349	5.90	49.658	23.650	73.307	102.07
910.32	3	50.00	47.57	1.513	21.231	5.67	45.460	25.427	70.886	99.30
1365.48	1	50.00	47.57	1.850	16.902	6.57	45.925	27.472	73.396	98.72
1365.48	2	50.00	47.57	2.796	18.397	6.02	46.331	26.080	72.411	99.63
1365.48	3	50.00	47.57	2.144	14.814	7.06	49.359	30.071	79.429	103.45

Cuadro 30. Recuperación de fracciones en el sistema Labranza Tradicional en la región Cuicateca.

Recuperación de Masa (%)										
Energía	Repetición	Suelo húmedo	Suelo seco	Fracción Liviana	Arena gruesa 250-2000	Arena Fina 50-250	Limo 2-50	Arcilla < 2	Limo + Arcilla 2-50	Total
Jml-1		g	g	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)
0	1	50.00	49.21	2.012	28.22	16.11	43.85	11.77	55.62	101.96
0	2	50.00	49.21	2.662	29.00	14.94	45.41	12.50	57.91	104.52
0	3	50.00	49.21	3.150	28.34	15.49	44.87	12.63	57.49	104.47
227.58	1	50.00	49.21	3.251	22.78	12.97	42.39	19.95	62.34	101.34
227.58	2	50.00	49.21	2.987	25.40	12.62	44.55	18.87	63.41	104.42
227.58	3	50.00	49.21	3.434	25.06	12.90	43.25	18.81	62.06	103.46
455.16	1	50.00	49.21	2.906	26.65	13.04	43.35	21.53	64.88	107.48
455.16	2	50.00	49.21	3.475	17.33	12.65	42.97	22.47	65.44	98.90
455.16	3	50.00	49.21	3.393	21.15	12.69	44.81	20.64	65.45	102.69
910.32	1	50.00	49.21	3.454	22.28	13.25	44.76	21.78	66.54	105.51
910.32	2	50.00	49.21	4.470	20.05	13.85	43.21	21.72	64.93	103.30
910.32	3	50.00	49.21	3.515	22.65	13.23	43.62	19.97	63.59	102.99
1365.48	1	50.00	49.21	4.816	20.84	12.42	43.90	23.66	67.56	105.63
1365.48	2	50.00	49.21	2.926	20.43	12.22	44.59	24.50	69.09	104.66
1365.48	3	50.00	49.21	3.861	22.33	12.81	43.54	22.18	65.73	104.73

Cuadro 31. Recuperación de fracciones en el sistema Bosque de Encino en la región Cuicateca.

Recuperación de Masa (%)										
Energía	Repetición	Suelo húmedo	Suelo seco	Fracción Liviana	Arena gruesa 250-2000	Arena Fina 50-250	Limo 2-50	Arcilla < 2	Limo + Arcilla 2-50	Total
Jml-1		g	g	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)
0	1	50.00	49.36	1.479	36.03	24.26	33.69	7.98	41.66	103.43
0	2	50.00	49.36	1.925	37.56	24.02	34.40	7.38	41.77	105.28
0	3	50.00	49.36	1.094	35.67	24.39	33.34	5.89	39.23	100.38
227.58	1	50.00	49.36	2.310	33.87	19.16	32.65	14.77	47.43	102.77
227.58	2	50.00	49.36	1.418	33.23	19.05	33.34	15.07	48.42	102.11
227.58	3	50.00	49.36	1.378	35.19	20.29	30.67	13.67	44.34	101.20
455.16	1	50.00	49.36	2.391	33.96	19.55	31.18	16.05	47.24	103.14
455.16	2	50.00	49.36	2.006	38.93	18.53	29.26	13.76	43.02	102.49
455.16	3	50.00	49.36	1.803	31.01	20.09	32.80	14.73	47.53	100.43
910.32	1	50.00	49.36	2.026	34.43	19.20	31.44	17.10	48.55	104.20
910.32	2	50.00	49.36	1.418	34.86	18.08	31.32	15.85	47.17	101.53
910.32	3	50.00	49.36	2.310	35.05	18.54	30.49	15.15	45.64	101.54
1365.48	1	50.00	49.36	1.499	36.64	16.19	33.85	12.58	46.43	100.76
1365.48	2	50.00	49.36	1.641	34.68	19.73	34.19	13.89	48.08	104.13
1365.48	3	50.00	49.36	1.803	28.85	20.54	33.31	16.04	49.34	100.54

Cuadro 32. Recuperación de fracciones en el sistema Labranza Tradicional en la región Mixe.

Energía	Repetición	Recuperación de Masa (%)								Total
		Suelo húmedo	Suelo seco	Fracción Liviana	Arena gruesa 250-2000	Arena Fina 50-250	Limo 2-50	Arcilla < 2	Limo + Arcilla 2-50	
Jml-1		g	g	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)
0	1	50.00	46.69	2.999	30.59	8.57	56.25	4.03	60.28	102.44
0	2	50.00	46.69	3.599	30.36	8.86	57.08	3.28	60.36	103.18
0	3	50.00	46.69	3.749	31.01	9.54	56.60	4.15	60.75	105.05
227.58	1	50.00	46.69	3.020	18.33	1.94	70.80	13.45	84.25	107.55
227.58	2	50.00	46.69	3.234	16.98	2.29	66.41	10.92	77.33	99.83
227.58	3	50.00	46.69	2.870	18.27	2.46	69.26	11.10	80.35	103.96
455.16	1	50.00	46.69	2.827	15.46	2.62	70.19	13.29	83.48	104.38
455.16	2	50.00	46.69	2.549	13.62	1.92	69.67	12.62	82.29	100.38
455.16	3	50.00	46.69	3.342	15.60	1.70	67.76	13.64	81.40	102.04
910.32	1	50.00	46.69	2.549	14.07	1.91	67.00	16.45	83.45	101.98
910.32	2	50.00	46.69	3.856	14.60	1.79	68.31	15.83	84.14	104.38
910.32	3	50.00	46.69	3.491	14.14	1.80	66.72	16.06	82.77	102.20
1365.48	1	50.00	46.69	2.892	15.08	1.95	64.01	18.88	82.89	102.82
1365.48	2	50.00	46.69	2.870	14.11	1.88	64.27	17.79	82.06	100.92
1365.48	3	50.00	46.69	3.042	14.68	1.49	60.48	16.74	77.22	96.43

Cuadro 33. Recuperación de fracciones en el sistema Bosque de Pino en la región Mixe.

Energía	Repetición	Recuperación de Masa (%)								Total
		Suelo húmedo	Suelo seco	Fracción Liviana	Arena gruesa 250-2000	Arena Fina 50-250	Limo 2-50	Arcilla < 2	Limo + Arcilla 2-50	
Jml-1		g	g	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)
0	1	50.00	48.22	4.812	26.464	19.53	45.682	5.684	51.367	102.17
0	2	50.00	48.22	4.314	25.622	22.25	45.800	4.771	50.571	102.76
0	3	50.00	48.22	4.936	24.794	23.29	45.112	3.963	49.075	102.09
227.58	1	50.00	48.22	4.418	21.573	16.16	43.380	17.870	61.249	103.40
227.58	2	50.00	48.22	5.828	18.029	16.04	46.223	17.598	63.821	103.72
227.58	3	50.00	48.22	4.542	18.052	17.54	45.548	16.576	62.124	102.26
455.16	1	50.00	48.22	6.098	18.131	14.41	45.208	20.139	65.347	103.98
455.16	2	50.00	48.22	5.019	17.699	16.16	45.146	21.898	67.045	105.92
455.16	3	50.00	48.22	4.459	17.918	13.79	46.627	21.082	67.709	103.87
910.32	1	50.00	48.22	4.584	14.111	17.17	44.949	20.735	65.685	101.55
910.32	2	50.00	48.22	4.915	15.512	14.96	44.933	23.895	68.828	104.22
910.32	3	50.00	48.22	5.351	15.158	15.08	45.216	22.944	68.160	103.75
1365.48	1	50.00	48.22	5.641	13.627	14.60	42.888	24.378	67.266	101.14
1365.48	2	50.00	48.22	4.438	14.354	15.94	43.370	24.774	68.145	102.88
1365.48	3	50.00	48.22	5.434	13.557	15.83	42.372	23.807	66.179	101.00

Cuadro 34. Contenido de carbono en fracciones de suelo en el sistema Labranza Tradicional en la región Mazateca.

Energía J/ml-1	Repetición	Contenido de Carbono											
		Suelo Total		Fracción Liviana		Arena gruesa 250-2000		Arena Fina 50-250		Limo Feb-50		Arcilla < 2	
		%	g /Kg de Suelo	%	g /Kg fracción de Suelo	%	g /Kg fracción de Suelo	%	g /Kg fracción de Suelo	%	g /Kg fracción de Suelo	%	g /Kg fracción de Suelo
0	1	3.65	36.49	24.80	248.00	3.59	17.81	2.87	26.15	3.87	35.49	19.07	26.46
0	2	3.65	36.49	27.66	276.60	4.49	19.41	3.34	28.93	4.83	34.88	18.31	30.29
0	3	3.65	36.49	28.01	280.10	2.3	20.86	4	27.08	4.35	33.79	17.74	31.60
227.58	1	3.65	36.49	29.07	290.70	3.27	5.61	0.45	9.12	0.71	35.93	18.19	35.63
227.58	2	3.65	36.49	28.19	281.90	3.11	23.18	3.94	9.398	0.65	35.04	16.6	31.99
227.58	3	3.65	36.49	28.05	280.50	5.34	8.86	1.28	7.905	0.49	34.26	16.13	31.49
455.16	1	3.65	36.49	30.90	309.00	3.94	5.30	0.57	7.332	0.4	34.64	16.55	32.52
455.16	2	3.65	36.49	26.10	261.00	3.5	17.27	1.84	7.052	0.45	35.03	16.9	32.64
455.16	3	3.65	36.49	28.67	286.70	4.83	12.50	1.32	7.037	0.5	34.83	16.45	32.51
910.32	1	3.65	36.49	24.83	248.30	3.49	10.42	0.7	4.876	0.32	33.78	15.72	34.57
910.32	2	3.65	36.49	25.31	253.10	3.56	22.70	2.02	5.352	0.28	33.99	14.44	26.26
910.32	3	3.65	36.49	32.73	327.30	3.11	18.35	1.57	4.98	0.23	33.15	14.79	32.23
1365.48	1	3.65	36.49	30.89	308.90	2.07	13.95	1.5	5.778	0.27	32.43	14.84	37.68
1365.48	2	3.65	36.49	24.50	245.00	3.6	11.16	1.01	5.057	0.27	32.64	14.75	33.31
1365.48	3	3.65	36.49	28.76	287.60	2.55	13.80	1.43	5.4175	0.28	32.54	14.97	35.50

Cuadro 35. Contenido de carbono en fracciones de suelo en el sistema Bosque de Liquidámbar en la región Mazateca.

Energía J/ml-1	Repetición	Contenido de Carbono															
		Suelo Total		Fracción Liviana		Arena gruesa 250-2000		Arena Fina 50-250		Limo Feb-50		Arcilla < 2					
		% de Suelo	g /Kg de Suelo	%	g /Kg de Suelo	%	g /Kg de Suelo	%	g /Kg de Suelo	%	g /Kg de Suelo	%	g /Kg de Suelo	%	g /Kg de Suelo		
0	1	4.39	43.94	33.43	334.30	3.23	29.81	10.04	2.82	28.18	3.8	4.09	40.88	18.54	3.94	39.42	1.68
0	2	4.39	43.94	33.48	334.80	4.57	33.77	11.28	2.61	26.09	3.86	4.13	41.27	19.22	3.87	38.67	2.4
0	3	4.39	43.94	34.55	345.50	8.64	32.64	11.9	2.71	27.14	3.11	4.14	41.38	16.87	3.84	38.41	2.03
227.58	1	4.39	43.94	34.09	340.90	5.8	23.15	6.79	0.55	5.50	0.31	4.25	42.50	17.9	4.10	41.00	6.91
227.58	2	4.39	43.94	31.26	312.60	6.11	30.12	8.22	0.51	5.08	0.37	4.28	42.83	18.9	3.94	39.38	7.59
227.58	3	4.39	43.94	32.83	328.30	6.07	36.11	7.93	0.54	5.41	0.38	4.19	41.93	20.26	3.34	33.36	6.43
455.16	1	4.39	43.94	31.75	317.50	5.14	24.82	5.46	0.51	5.06	0.31	4.11	41.07	19.5	4.54	45.42	10.31
455.16	2	4.39	43.94	30.12	301.20	6.52	33.62	7.14	0.48	4.81	0.3	4.10	41.04	20.06	4.08	40.78	9.18
455.16	3	4.39	43.94	31.83	318.30	6.36	29.02	6.3	0.48	4.78	0.31	4.37	43.65	21.16	4.25	42.50	10.28
910.32	1	4.39	43.94	33.20	332.00	4.68	11.91	2.38	0.35	3.48	0.22	4.01	40.06	18.78	4.64	46.36	12.62
910.32	2	4.39	43.94	37.03	370.30	5.6	34.38	7.34	0.44	4.45	0.26	3.93	39.31	19.52	4.42	44.15	10.44
910.32	3	4.39	43.94	36.55	365.50	5.53	28.69	6.09	0.38	3.80	0.22	3.87	38.67	17.58	4.20	42.00	10.68
1365.48	1	4.39	43.94	35.04	350.40	6.48	20.92	3.54	0.35	3.52	0.23	3.93	39.26	18.03	4.56	45.56	12.52
1365.48	2	4.39	43.94	36.65	366.50	10.25	18.90	3.48	0.34	3.39	0.2	3.79	37.93	17.57	4.47	44.68	11.65
1365.48	3	4.39	43.94	34.30	343.00	7.35	19.91	2.95	0.35	3.45	0.24	3.86	38.60	19.05	4.51	45.12	13.57

Cuadro 36. Contenido de carbono en fracciones de suelo en el sistema Labranza Tradicional en la región Cuicateca.

Energía J/ml-1	Repetición	Contenido de Carbono																
		Suelo Total		Fracción Liviana		Arena gruesa 250-2000		Arena Fina 50-250		Limo Feb-50		Arcilla < 2						
		% de Suelo	g /Kg de Suelo	% fracción de Suelo	g /Kg de Suelo	% fracción de Suelo	g /Kg de Suelo	% fracción de Suelo	g /Kg de Suelo	% fracción de Suelo	g /Kg de Suelo	% fracción de Suelo						
0	1	2.58	25.78	22.64	226.40	4.55	0.84	8.38	2.36	1.07	10.65	1.72	2.40	23.99	10.52	2.31	23.07	2.71
0	2	2.58	25.78	19.10	191.00	5.08	0.70	6.95	2.02	1.23	12.34	1.84	2.40	24.00	10.9	2.26	22.58	2.82
0	3	2.58	25.78	17.02	170.20	5.36	0.86	8.61	2.44	1.11	11.05	1.71	2.38	23.77	10.66	2.26	22.58	2.85
227.58	1	2.58	25.78	19.57	195.70	6.36	0.38	3.78	0.86	0.30	3.00	0.39	2.43	24.28	10.29	2.68	26.78	5.34
227.58	2	2.58	25.78	20.64	206.40	6.17	0.22	2.16	0.55	0.26	2.59	0.33	2.46	24.59	10.95	2.67	26.66	5.03
227.58	3	2.58	25.78	18.94	189.40	6.5	0.37	3.72	0.93	0.38	3.81	0.49	2.40	24.00	10.38	2.46	24.56	4.62
455.16	1	2.58	25.78	18.94	189.40	5.5	0.21	2.09	0.56	0.25	2.50	0.33	2.40	24.03	10.42	2.63	26.33	5.67
455.16	2	2.58	25.78	16.78	167.80	5.83	0.02	0.23	0.04	0.21	2.10	0.27	2.42	24.24	10.42	2.94	29.39	6.6
455.16	3	2.58	25.78	19.44	194.40	6.6	0.20	2.01	0.42	0.24	2.37	0.3	2.45	24.45	10.96	2.86	28.56	5.9
910.32	1	2.58	25.78	19.48	194.80	6.73	0.32	3.25	0.72	0.17	1.68	0.22	2.34	23.43	10.49	2.64	26.37	5.74
910.32	2	2.58	25.78	19.83	198.30	8.86	0.20	1.98	0.4	0.20	2.03	0.28	2.35	23.50	10.15	2.88	28.78	6.25
910.32	3	2.58	25.78	17.46	174.60	6.14	0.43	4.25	0.96	0.20	2.03	0	2.35	23.47	10.23	3.26	32.62	6.52
1365.48	1	2.58	25.78	18.78	187.80	9.04	0.21	2.09	0.44	0.06	0.64	0.08	2.25	22.48	9.87	2.91	29.13	6.89
1365.48	2	2.58	25.78	17.09	170.90	5	0.24	2.42	0.49	0.09	0.87	0.11	2.36	23.58	10.52	2.99	29.89	7.32
1365.48	3	2.58	25.78	16.50	165.00	6.37	0.05	0.46	0.1	0.08	0.76	0.1	2.30	23.03	10.03	2.95	29.51	6.55

Cuadro 37. Contenido de carbono en fracciones de suelo en el sistema Bosque de Encino en la región Cuicateca.

Energía Jml-1	Repetición	Contenido de Carbono																
		Suelo		Fracción		Arena gruesa		Arena Fina		Limo		Arcilla						
		%	g /Kg de Suelo	% fracción de Suelo														
0	1	2.01	20.14	35.81	358.10	5.3	0.20	1.97	0.71	0.95	9.53	2.31	2.61	26.14	8.81	2.63	26.30	2.1
0	2	2.01	20.14	34.62	346.20	6.66	0.00	1.97	0	0.90	9.02	2.17	2.59	25.89	8.91	2.65	26.50	1.95
0	3	2.01	20.14	38.27	382.70	4.19	0.24	2.44	0.87	0.70	6.98	1.7	2.62	26.21	8.74	2.55	25.50	1.5
227.58	1	2.01	20.14	34.82	348.20	8.04	0.24	2.44	0.83	0.22	2.24	0.43	2.80	27.96	9.13	2.67	26.70	3.94
227.58	2	2.01	20.14	31.73	317.30	4.5	0.20	1.95	0.65	0.20	2.00	0.38	2.93	29.33	9.78	2.68	26.80	4.04
227.58	3	2.01	20.14	36.65	366.50	5.05	0.20	1.97	0.69	0.20	1.97	0.4	2.81	28.13	8.63	2.70	27.00	3.69
455.16	1	2.01	20.14	29.22	292.20	6.99	0.01	0.11	0.04	0.19	1.86	0.36	2.76	27.59	8.6	2.82	28.20	4.53
455.16	2	2.01	20.14	28.97	289.70	5.81	0.00	0.11	0	0.15	1.45	0.27	2.92	29.19	8.54	2.86	28.60	3.93
455.16	3	2.01	20.14	30.42	304.20	5.49	0.02	0.23	0.07	0.14	1.41	0.28	2.77	27.67	9.08	2.80	28.00	4.12
910.32	1	2.01	20.14	28.03	280.30	5.68	0.21	2.15	0.74	0.12	1.21	0.23	2.74	27.39	8.61	2.96	29.60	5.06
910.32	2	2.01	20.14	38.69	386.90	5.49	0.21	2.06	0.72	0.14	1.40	0.25	2.77	27.65	8.66	3.08	30.80	4.88
910.32	3	2.01	20.14	26.36	263.60	6.09	0.20	2.04	0.71	0.13	1.26	0.23	2.72	27.21	8.3	3.17	31.68	4.8
1365.48	1	2.01	20.14	36.59	365.90	5.49	0.15	1.50	0.55	0.07	0.67	0.11	2.74	27.37	9.26	3.51	35.06	4.41
1365.48	2	2.01	20.14	35.78	357.80	5.87	0.17	1.70	0.59	0.05	0.48	0.1	2.79	27.91	9.54	3.43	34.26	4.76
1365.48	3	2.01	20.14	34.91	349.10	6.29	0.18	1.80	0.52	0.06	0.58	0.12	2.76	27.64	9.21	3.47	34.66	5.56

Cuadro 38. Contenido de carbono en fracciones de suelo en el sistema Labranza Tradicional en la región Mixe.

		Contenido de Carbono															
Energía J/ml-1	Repetición	Suelo		Fracción Liviana			Arena gruesa 250-2000			Arena Fina 50-250			Limo Feb-50		Arcilla < 2		
		%	g /Kg de Suelo	%	g /Kg de Suelo	%	g /Kg de Suelo	%	g /Kg de Suelo	%	g /Kg de Suelo	%	g /Kg de Suelo	%	g /Kg de Suelo	%	g /Kg de Suelo
0	1	12.06	120.6	40.27	402.70	12.08	7.78	23.8	11.35	113.50	9.73	11.61	116.10	65.3	12.23	122.30	4.93
0	2	12.06	120.6	40.56	405.60	14.6	9.04	27.46	11.66	116.60	10.33	11.48	114.80	65.53	12.16	121.60	3.99
0	3	12.06	120.6	41.07	410.70	15.4	8.32	25.79	11.27	112.70	10.75	11.58	115.80	65.54	12.13	121.30	5.03
227.58	1	12.06	120.6	36.58	365.80	11.05	8.68	15.91	4.98	49.75	0.97	11.50	115.00	81.42	12.53	125.30	16.85
227.58	2	12.06	120.6	38.08	380.80	12.32	7.82	13.27	4.86	48.59	1.11	11.62	116.20	77.16	12.30	123.00	13.44
227.58	3	12.06	120.6	33.70	337.00	9.67	7.20	13.16	5.47	54.67	1.35	11.81	118.10	81.79	12.26	122.60	13.61
455.16	1	12.06	120.6	31.64	316.40	8.95	6.15	61.54	4.48	44.81	1.17	11.89	118.90	83.46	12.53	125.30	16.65
455.16	2	12.06	120.6	31.51	315.10	8.03	5.36	53.58	7.3	32.39	0.62	11.77	117.70	82.01	12.50	125.00	15.77
455.16	3	12.06	120.6	31.15	311.50	10.41	6.30	63.04	3.22	32.17	0.55	11.72	117.20	79.42	12.94	129.40	17.64
910.32	1	12.06	120.6	37.10	371.00	9.46	4.49	44.87	6.31	23.77	0.46	11.48	114.80	76.91	12.70	127.00	20.89
910.32	2	12.06	120.6	35.00	350.00	13.49	4.25	42.51	6.21	22.48	0.4	11.71	117.10	79.99	12.61	126.10	19.97
910.32	3	12.06	120.6	36.77	367.70	12.84	4.50	45.02	6.36	34.99	0.63	11.93	119.30	79.59	12.55	125.50	20.15
1365.48	1	12.06	120.6	36.77	367.70	10.63	3.85	38.52	5.81	26.68	0.52	11.36	113.60	72.72	12.97	129.70	24.49
1365.48	2	12.06	120.6	35.23	352.30	10.11	3.26	32.58	4.6	21.67	0.41	11.28	112.80	72.5	12.70	127.00	22.59
1365.48	3	12.06	120.6	39.91	399.10	12.14	3.97	39.72	5.83	24.18	0.36	11.32	113.20	68.46	12.84	128.35	21.49

Cuadro 39. Contenido de carbono en fracciones de suelo en el sistema Bosque de Pino en la región Mixe.

Energía Jml-1	Repetición	Contenido de Carbono															
		Suelo		Fracción		Arena gruesa		Arena Fina		Limo		Arcilla					
		Total	%	Liviana	%	250-2000	%	50-250	%	Feb-50	%	< 2	%				
g/Kg de Suelo	%	g/Kg fracción de Suelo	%	g/Kg fracción de Suelo	%	g/Kg fracción de Suelo	%	g/Kg fracción de Suelo	%	g/Kg fracción de Suelo	%	g/Kg fracción de Suelo	g/Kg de Suelo				
0	1	8.02	80.2	25.09	12.07	4.83	48.30	12.78	2.99	29.92	5.84	6.50	64.95	29.67	5.42	54.19	3.08
0	2	8.02	80.2	28.53	12.31	5.18	51.76	13.26	2.59	25.89	5.76	6.47	64.73	29.65	5.43	54.32	2.59
0	3	8.02	80.2	23.30	11.5	5.50	55.02	13.64	2.76	27.63	6.43	6.14	61.37	27.69	5.36	53.56	2.12
227.58	1	8.02	80.2	28.64	12.65	5.10	51.03	11.01	0.41	4.13	0.67	6.69	66.88	29.01	6.09	60.92	10.89
227.58	2	8.02	80.2	26.70	15.56	4.83	48.30	8.71	0.29	2.85	0.46	6.78	67.78	31.33	6.00	59.95	10.55
227.58	3	8.02	80.2	24.12	10.96	6.00	60.01	10.83	0.28	2.82	0.49	6.80	68.02	30.98	5.60	55.97	9.28
455.16	1	8.02	80.2	32.20	19.63	5.33	53.30	9.66	0.26	2.57	0.37	6.79	67.92	30.71	6.14	61.39	12.36
455.16	2	8.02	80.2	30.30	15.21	5.06	50.64	8.96	0.28	2.83	0.46	6.18	61.83	27.91	6.45	64.50	14.12
455.16	3	8.02	80.2	29.21	13.03	4.95	49.54	8.88	0.25	2.49	0.34	6.50	65.00	30.31	5.96	59.55	12.55
910.32	1	8.02	80.2	29.16	13.37	5.54	55.39	7.82	0.23	2.32	0.4	6.15	61.50	27.64	6.35	63.50	13.17
910.32	2	8.02	80.2	30.21	14.85	5.58	55.82	8.66	0.19	1.95	0.29	6.44	64.37	28.92	6.49	64.89	15.51
910.32	3	8.02	80.2	34.65	18.54	5.30	52.99	8.03	0.22	2.22	0.33	6.32	63.21	28.58	6.42	64.23	14.74
1365.48	1	8.02	80.2	29.94	16.89	5.02	50.20	6.84	0.21	2.15	0.31	5.91	59.05	25.33	6.65	66.50	16.21
1365.48	2	8.02	80.2	29.72	13.19	4.70	46.98	6.74	0.22	2.16	0.34	5.86	58.57	25.4	6.59	65.88	16.32
1365.48	3	8.02	80.2	29.60	16.08	5.86	58.57	7.94	0.22	2.15	0.34	5.88	58.81	24.92	6.62	66.19	15.76