



COLEGIO DE POSTGRADUADOS

INSTITUCION DE ENSEÑANZA E INVESTIGACION EN CIENCIAS AGRÍCOLAS

CAMPUS MONTECILLO

POSTGRADO DE EDAFOLOGÍA

Uso de Geomática en captura de carbono en sistemas agroforestales de café, Huatusco, Veracruz

Eva Aurora Bautista Calderon

T E S I S

PRESENTADA COMO REQUISITO PARCIAL

PARA OBTENER EL GRADO DE:

MAESTRA EN CIENCIAS

MONTECILLO, TEXCOCO, EDO. DE MEXICO

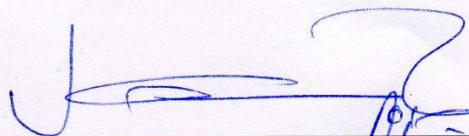
Marzo 2016

La presente tesis titulada: **Uso de Geomática en captura de carbono en sistemas agroforestales de café, Huatusco, Veracruz**, realizada por la alumna: **Eva Aurora Bautista Calderon** 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
POSTGRADO DE EDAFOLOGÍA**

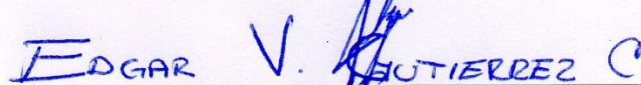
CONSEJO PARTICULAR

CONSEJERO



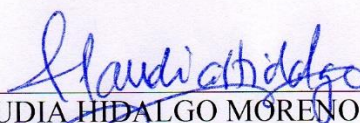
DR. VICTOR MANUEL ORDAZ CHAPARRO

ASESOR



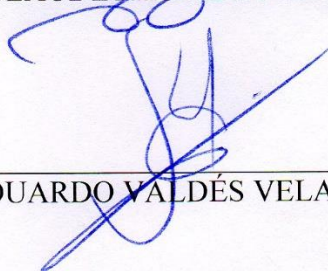
DR. EDGAR VLADIMIR GUTIERREZ CASTORENA

ASESOR



DRA. CLAUDIA HIDALGO MORENO

ASESOR



DR. EDUARDO VALDÉS VELARDE

Montecillo, Texcoco, Estado de México, Marzo de 2016

USO DE GEOMÁTICA EN CAPTURA DE CARBONO EN SISTEMAS AGROFORESTALES DE CAFÉ, HUATUSCO, VERACRUZ

Eva Aurora Bautista Calderon
Colegio de Postgraduados, 2016

La región de las montañas es considerada un ecosistema complejo tanto por su fisiografía como por su vegetación, lo que restringe áreas para uso agrícola. El manejo del cultivo de café es limitado por múltiples factores y la selección de áreas son muy específicas por sus características particulares. Los sistemas agroforestales son considerados por los productores de gran valor económico, la zonificación y clasificación en mapas temáticos ofrece información tanto a productores como a técnicos sobre el manejo del cultivo y su interacción con otras especies vegetales, por ser un sistema productivo sostenible. El objetivo del presente trabajo es identificar los diferentes sistemas agroforestales de café, mediante colecta de datos directos en campo, uso de programas espaciales y técnicas con enfoque paramétrico a partir de bases de datos digitales en SIG, clasificación interpretativa de las tierras y percepción remota, para posteriormente analizar la cantidad de carbono capturado por cada uno de estos sistemas.

Los resultados en mapas temáticos ubicaron y cuantificaron tanto los agroecosistemas como a sus componentes, donde la Zonas Urbanas cubre el 2.99%, el Bosque Mesófilo el 27.03%, los Poteros el 16.92%, y únicamente la Agricultura fue subdividida en subcomponentes como: Policultivo Tradicional y Policultivo Comercial que representaron el 36.99% y Monocultivo Especializado con 3.23% de la superficie bajo estudio. El sistema agroforestal que presentó la mayor cantidad de COS fue el PT con 67.899 Mg ha⁻¹ seguido del ME con 65.611 Mg ha⁻¹ y PC con 54.440 Mg ha⁻¹, en cuanto a los sistemas no agroforestales se obtuvo que la mayor concentración 142.526 Mg ha⁻¹ y Pot con 107.046 Mg ha⁻¹. Para el caso del carbono en la biomasa superficial el ME fue el que presento mayor contenido de carbono para hojarasca y mantillo con 3.168 y 6.331 Mg ha⁻¹ respectivamente, y el menor fue le PC con 2.378 y 5.623 Mg ha⁻¹.

Palabras clave: Clasificación interpretativa, Sistemas de Información Geográfica, Análisis de imágenes de satélite, Zonificación del cultivo de Café en Bosques Mesófilo, concentración de carbono, carbono orgánico del suelo

GEOMATICS USE FOR CARBON CAPTURE IN COFFEE AGROFORESTRY SYSTEMS, HUATUSCO VERACRUZ

Eva Aurora Bautista Calderon
Colegio de Postgraduados, 2016

The mountains region is considered as a complex ecosystem both for its physiography and its vegetation, which may restrict areas for agricultural use. Handling coffee cultivation is limited for several factors as well as choosing correct areas for their specific characteristics.

Agroforestry systems are considered with great economic value for the agricultural producers. When the maps are zoned and classified they offer substantial information for producers and technicians about the crops, how to handle them and their interaction with other vegetables spices, due to its productive and sustainable system.

The objective of this thesis is to identify the different coffee agroforestry systems through collecting data straight from the field, using special techniques and programs with parametrical approach based on SIG digital bases, interpretative classification of the land and remote perception, so that we can after that analyze the quantity of captured carbon through each of this systems.

The results obtained with this thematic maps located and quantified both the agroecosystems and their components, they cover 2.99% in urban zones, 27.03% on mesophyll forest, 16.92% on pots and just the farming was subdivided in Traditional Polyculture and Commercial Polyculture which represented 36.99% and 3.23% for Specialized Monoculture within the surface study. The agroforestry system which presented the higher quantity of OCL was the TP with 67.899 Mg ha⁻¹ followed by EM with 65.611 Mg ha⁻¹ and CP with 54.440 Mg ha⁻¹, as for no agroforestry systems it was obtained that the higher concentration was 142.526 Mg ha⁻¹ and Pot with 107.046 Mg ha⁻¹. In the case of carbon in above-ground biomass the EM was the one with highest content of carbon for litter and compost with 3.168 and 6.331 Mg ha⁻¹ respectively, and the lower was the CP with 2.378 and 5.623 Mg ha⁻¹.

Keywords: interpretative classification, Geographic Information Systems, Analysis of Satellite Images, coffee crops zonation in the mesophyll forest, carbon concentration, organic carbon from the land.

AGRADECIMIENTOS

Al **Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología** (CONACYT), por el apoyo otorgado para realizar los estudios de maestría, Institución sin la cual muchos no tendríamos la oportunidad de desarrollarnos y alcanzar un logro más en nuestra formación y preparación académica.

Al **Colegio de Postgraduados**, institución que me brindó la oportunidad de realizar mis estudios de maestría en un gran ambiente de amistades y profesionalismo de toda la gente que conforma su comunidad.

A los **Drs. Víctor Manuel Ordaz Chaparro** y **Edgar V. Gutiérrez Castorena**, por la oportunidad de poder trabajar con ellos, por su apoyo, consejos y enseñanzas durante la realización de mi trabajo de tesis, pero muy en especial por la sincera amistad forjada.

A los **Drs. Claudia Hidalgo Moreno** y **Eduardo Valdés Velarde** por sus observaciones, sugerencias y consejos respecto a la investigación.

A todos los **profesores del Colegio de Postgraduados** que en un determinado trecho de mi estancia en esta institución me brindaron sus enseñanzas.

A todos **mis amigos** que me brindaron su apoyo incondicional durante este proceso.

A todas aquellas personas que me brindaron la confianza y el apoyo necesario para la elaboración de mi trabajo de investigación

DEDICATORIA

*A mis padres: **Sara Lilia y Antonio** por su amor, confianza y consejos brindados, porque son los pilares de mi vida y un claro ejemplo de lucha, amor incondicional, perseverancia y parte esencial de mi vida y formación profesional.*

*A mi hermano **Rubén Bautista** por su cariño y por todos los momentos felices que hemos pasado juntos.*

*A la familia **Barrera Perales** por su cariño, comprensión y apoyo, en especial a Mariana Perales por el cariño y por sus sabios consejos.*

*A **Miguel Barrera Perales**, por ser mi compañero de vida, por su comprensión, apoyo y amor.*

*Al gran amor de mi vida, mi hijo **Santiago** por ser el motor que me inspira cada día para ser mejor persona.*

CONTENIDO

1	MARCO DE REFERENCIA.....	1
1.1	INTRODUCCIÓN GENERAL.....	1
1.2	OBJETIVO.....	2
1.2.1	General.....	2
1.3	REVISIÓN DE LITERATURA.....	3
1.3.1	Cambio climático y calentamiento global.....	3
1.3.1	Efecto invernadero (EI) y gases de efecto invernadero (GEI).....	3
1.3.1	Ciclo del Carbono	4
1.3.1	Captura de C en el suelo	6
1.3.1	Principales sumideros terrestres de carbono en el mundo y México	6
1.3.2	Carbono en sistemas agroforestales de café.....	7
1.3.1	Clasificación de los Sistemas Agroforestales de Café.....	9
1.3.1	Sistema rusticano o de montaña.....	9
1.3.2	Policultivo tradicional.....	9
1.3.1	Policultivo comercial	10
1.3.1	Sistema especializado o semi-sombreado.....	11
1.3.1	Monocultivo sin sombra	12
1.3.1	Medición de biomasa en materia orgánica muerta	13
1.3.2	Medición de C en el suelo.....	13
1.3.3	Mantillo.....	13
1.3.4	Sistemas de Información Geográfica (SIG).....	14
1.3.5	Uso de Imágenes de Satélite	15
1.3.6	Clasificación de imágenes.....	16
1.3.7	Levantamiento Fisiográfico	20
1.3.8	Desarrollo del Levantamiento Fisiográfico	21
1.3.9	Levantamiento Fisiográfico en México	21
1.3.10	Enfoques del Levantamiento Fisiográfico	22
1.4	ÁREA DE ESTUDIO.....	23

1.4.1	Localización Geográfica	23
1.4.2	Orografía y Fisiografía.....	24
1.4.3	Clima.....	26
1.4.4	Hidrología	27
1.4.5	Suelos	28
1.4.6	Vegetación y uso del suelo	29
2	TECNICAS PARA IDENTIFICAR Y CUANTIFICAR SISTEMAS AGROFORESTALES DE CAFÉ	31
2.1	INTRODUCCION	31
2.2	OBJETIVOS E HIPOTESIS	33
2.2.1	General	33
2.2.2	Particulares.....	33
2.2.3	Hipótesis	33
2.3	MATERIALES Y METODOS	33
2.3.1	Análisis de Imagen de Satelital.....	33
2.3.2	Enfoque paramétrico de calidad de grano de Café	34
2.3.3	Entrevista a Productores	35
2.3.4	Clasificación interpretativa	35
2.4	RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	36
2.4.1	Fotointerpretación de la Imagen de Satélite.....	36
2.4.2	Suelo	39
2.4.3	Pendiente.....	39
2.4.4	Temperatura	40
2.4.5	Precipitación	41
2.4.6	Mapa temático de calidad de grano de Café	42
2.4.7	Polígonos de verificación y comprobación sobre el mapas temáticos vectoriales .	43
2.4.8	Validación de la clasificación interpretativa.....	46
2.5	CONCLUSIONES	50
3	CARBONO EN SISTEMAS AGROFORESTALES DE CAFÉ, BOSQUE MESOFILO DE MONTAÑA Y POTRERO.....	51
3.1	INTRODUCCION	51

3.2	OBJETIVOS E HIPOTESIS	53
3.2.1	General	53
3.2.2	Particulares.....	54
3.2.3	Hipótesis	54
3.3	MATERIALES Y METODOS	54
3.3.1	Descripción de los sitios de muestreo	54
3.3.2	Obtención de las muestras de suelo	55
3.3.3	Preparación de las muestras de suelo para la determinación de C.....	56
3.3.4	Medición de los reservorios de C en el suelo	56
3.3.5	Determinación de la densidad aparente	57
3.3.6	Determinación de la composición mecánica del suelo	57
3.3.7	Determinación de pH y Conductividad Eléctrica (C.E) del suelo	58
3.3.8	Medición de los reservorios de C en la biomasa superficial (hojarasca y mantillo)58	
3.4	RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	59
3.4.1	Reservorios de C en el suelo.....	59
3.4.2	Carbono almacenado en hojarasca y mantillo	62
3.4.3	Carbono total.....	65
3.4.4	Características del suelo: pH, conductividad eléctrica y composición mecánica..	67
3.4.5	Mapa temático de carbono	69
3.5	CONCLUSIONES	70
3.6	CONCLUSIONES GENERALES	71
3.7	LITERATURA CITADA.....	72
3.8	ANEXOS.....	88

LISTA DE CUADROS

Cuadro 1 Tipo de suelos en el área de estudio (Huatusco).....	28
Cuadro 2. Caracterización de componentes y subcomponentes de los sistemas agroforestales de café.....	36
Cuadro 3. Superficie de los componentes y subcomponentes del área de estudio obtenido en procesos de análisis de imagen.	38
Cuadro 4 Comparación de áreas entre componentes y subcomponentes con la verificación de linderos.....	49
Cuadro 5 Contenido de carbono orgánico ($Mg\ ha^{-1}$) en suelo (0 a 20cm), en los sistemas agroforestales de café, potrero y bosque mesófilo de montaña en el municipio de Huatusco, Ver.	60
Cuadro 6 Contenido de carbono orgánico ($Mg\ ha^{-1}$) en hojarasca y mantillo de los sistemas agroforestales de café, potrero y bosque mesófilo de montaña en el municipio de Huatusco.	63
Cuadro 7 Contenido de carbono orgánico ($Mg\ ha^{-1}$) en suelo, mantillo y hojarasca en los sistemas agroforestales de café, potrero y bosque mesófilo de montaña en el municipio de Huatusco.	66
Cuadro 8 pH y Conductividad eléctrica (CE) de los sistemas evaluados	68
Cuadro 9 Composición mecánica de cada uno de los sistemas estudiados	68
Cuadro 10 Carbono total por cada sistema agroforestal	69
Cuadro 11 Sistema Bosque Mesófilo de Montaña (BMM)	88
Cuadro 12 Sistema Potrero (PTO)	88
Cuadro 13 Sistema de Policultivo Comercial (PCO).....	88
Cuadro 14 Sistema de Policultivo Tradicional (PTR)	88
Cuadro 15 Sistema de Monocultivo Especializado (ESP).....	89
Cuadro 16 Sistema Bosque Mesófilo de Montaña (BMM)	89
Cuadro 17 Sistema de Policultivo Comercial (PCO).....	89
Cuadro 18 Sistema de Policultivo Tradicional (PTR)	90
Cuadro 19 Sistema de Monocultivo Especializado (ESP).....	90
Cuadro 20 Sistema Bosque Mesófilo de Montaña (BMM)	91
Cuadro 21 Sistema de Policultivo Comercial (PCO).....	91
Cuadro 22 Sistema de Policultivo Tradicional (PTR)	91
Cuadro 23 Sistema de Monocultivo Especializado (ESP).....	92

Cuadro 24 Sistema Bosque Mesófilo de Montaña (BMM)	92
Cuadro 25 Sistema Potrero (Pto)	92
Cuadro 26 Sistema de Policultivo Comercial (PC).....	93
Cuadro 27 Sistema de Policultivo Tradicional (PT).....	93
Cuadro 28 Sistema de Monocultivo Especializado (ME).....	93
Cuadro 29 Sistema Bosque Mesófilo de Montaña (BMM)	94
Cuadro 30 Sistema Potrero (Pto)	94
Cuadro 31 Sistema de Policultivo Comercial (PC).....	94
Cuadro 32 Sistema de Policultivo Tradicional (PT).....	95
Cuadro 33 Sistema de Monocultivo Especializado (ME).....	95
Cuadro 34 Sistema Bosque Mesófilo de Montaña (BMM)	96
Cuadro 35 Sistema Potrero (Pto)	96
Cuadro 36 Sistema de Policultivo Comercial (PC).....	96
Cuadro 37 Sistema de Policultivo Tradicional (PT).....	96
Cuadro 38 Sistema de Monocultivo Especializado (ME).....	97

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 Diagrama simplificado de flujo y almacenes de carbono en un ecosistema forestal (Fuente: Ordoñez y Masera, 2001).	5
Figura 2 Sistemas de producción de café en México (Moguel y Toledo, 2004).	9
Figura 3 Ejemplo de un sistema de Policultivo Tradicional	10
Figura 4 Ejemplo de un sistema de Policultivo Comercial.....	11
Figura 5 Ejemplos de sil sistema de monocultivo especializado	12
Figura 6 Ejemplo de sil sistema de monocultivo sin sombra.....	12
Figura 7 Localización de la zona de estudio (Huatusco de Cuellar).....	24
Figura 8 Orografía y Fisiografía del área de estudio (Huatusco).....	25
Figura 9 Topoformas del área de estudio (Huatusco).....	25
Figura 10 Distribución de los tipos de clima dentro del área de estudio (Huatusco)	27
Figura 11 Cuencas, sub-cuencas y corrientes de agua localizadas en la zona de estudio (Huatusco)	28
Figura 12 Vegetación y uso de suelo en la zona de estudio (Huatusco).....	30
Figura 13. Cobertura del área de estudio para los componentes y subcomponentes con enfoques paramétricos. (a) ZU, (b) BMM, (c) Pot, (d) PT, (e) PC, (f) ME y (g) AgrG.	38
Figura 14 Mapa temático de suelo con clase tipo A = NO APTO, y tipo B = APTO.	39
Figura 15 Mapa temático de pendiente	40
Figura 16 Mapa temático de temperatura	41
Figura 17 Mapa temático de precipitación.....	42
Figura 18 Mapa temático por calidad de grano	43
Figura 19 Mapa temático polígonos de muestreo	44
Figura 20 Mapa temático con puntos de comprobación y verificación	46
Figura 21 Mapa temáticos de transectos de comprobación	47
Figura 22 Mapa temático resultante de componentes y subcomponentes	48
Figura 23 Indica los sitios de comprobación de los componentes y subcomponentes de los sistemas agroforestales de café.....	49
Figura 24 Localización de los sitios de muestreo para la estimación del contenido de C, en el Mpio. de Huatusco, Ver.....	55

Figura 25 Contenido de COS en SAF's de café, bosque mesófilo de montaña y potrero, del Mpio. Huatusco, Ver.	59
Figura 26 Contenido de carbono orgánico (Mg·ha-1) en el suelo de tres sistemas agroforestales de café, un potrero y un bosque mesófilo de montaña en el municipio de Huatusco, Ver.....	60
Figura 27 Contenido de C en hojarasca (Mg·ha-1) en el suelo (0-20 cm) de tres sistemas agroforestales de café, un potrero y un bosque mesófilo de montaña en el municipio de Huatusco, Ver.....	62
Figura 28 Contenido de C en mantillo (Mg·ha-1) en el suelo de tres sistemas agroforestales de café, un potrero y un bosque mesófilo de montaña en el municipio de Huatusco, Ver.....	64
Figura 29 Contenido de C total (Mg·ha-1) en el suelo de tres sistemas agroforestales de café, un potrero y un bosque mesófilo de montaña en el municipio de Huatusco, Ver.	65
Figura 30 Carbono total almacenado en el suelo, mantillo y hojarasca, del Mpio. de Huatusco, Ver.	66
Figura 31 Mapa temático de carbono total en el Mpio. de Huatusco, Ver.	69

1 MARCO DE REFERENCIA

1.1 INTRODUCCIÓN GENERAL

La destrucción y los daños de los ecosistemas por causas antrópicas comenzaron hace 15,000 años aproximadamente, con el cambio de hábito del hombre de nómada a sedentario, en ese momento los ecosistemas naturales fueron transformados en sistemas agrícolas, pecuarios o urbanos (Barrera-Cataño *et al.*, 2010). Si bien estas transformaciones han contribuido a mejorar la calidad de vida de muchas personas, por otro lado han debilitado la capacidad de los sistemas naturales para brindar otros servicios ambientales (captura de carbono) esenciales para el bienestar de la población, introduciendo además profundas desigualdades ecológico-distributivas entre las distintas regiones del planeta (González *et al.*, 2008).

De acuerdo con los modelos globales sobre el impacto del cambio climático, México es un país que se verá afectado en una parte importante de su territorio por este fenómeno (IPCC, 2007). Debido a esto se han instituidos acuerdos internacionales, se han gestado planes nacionales para mitigar y adaptarse a las nuevas circunstancias, que tienen como meta disminuir las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) para el 2020 y 2050 (PECC, 2012).

El sector agropecuario forestal desempeñara un papel importante en la mitigación del dióxido de carbono (CO₂), por lo que la captura y secuestro de C se han convertido en temas que son parte de los estudios del medio ambiente global en el país. Debido a un destrucción es necesario la creación de nuevas alternativas sustentables, tal es el caso de los sistemas agroforestales (SAF's) los cuales son de gran importancia para combatir el cambio climático debido a que representan sumideros importantes de CO₂, son capaces de almacenarlo en la biomasa aérea y subterránea donde se almacenan por largos periodos (Ávila *et al.*, 2001; Gayoso y Guerra 2005). Los SAF's, son sistemas potenciales en la captura de carbono, ya que representan una opción para los productores de café debido a que se les brinda un valor ecológico agregado así como una fuente económica alterna lo que les permite integrarse al desarrollo sostenible del país.

En la presente investigación se tuvo por objetivo determinar la cantidad de C que capturan y almacenan los SAF's con el propósito de determinar su potencial en la captura de C mediante muestreos en campo de suelo y biomasa superficial (hojarasca y mantillo) implementando para su

identificación en campo la utilización de Geomática para la elaboración final de un mapa de captura de carbono en el cual se plasme de manera cuantitativa y espacial el potencial que presentan cada uno de los SAF's.

1.2 OBJETIVO

1.2.1 General

- ✚ Determinar la eficiencia del uso de la Geomática como herramienta para la elaboración de cartografía de captura de carbono en sistemas agroforestales de café en un mapa temático de la zona del Bosque Mesófilo de Montañas.

1.3 REVISIÓN DE LITERATURA

1.3.1 Cambio climático y calentamiento global

El cambio climático es definido como “todo cambio que ocurre en el clima a través del tiempo, siendo resultado de la variabilidad natural o de las actividades realizadas por el hombre” (SEMARNAT, 2009), el IPCC (2007) lo definen como una “variación estadística en el estado medio del clima o en su variabilidad, que persiste durante un periodo prolongado”. Por otro lado, el calentamiento global, es la manifestación más evidente del cambio climático, es referido al incremento promedio de las temperaturas terrestres y marinas globales, es provocado por el grupo de gases que se acumulan constantemente en la atmósfera, funcionando como un cobertor que arropa la Tierra, permitiendo la penetración de la radiación solar, pero impidiendo que una parte del calor reflejado escape al espacio. (SEMARNAT, 2009). El cambio climático por el que atraviesa actualmente la Tierra es un fenómeno provocado por el incremento de las concentraciones de los Gases de Efecto Invernadero (GEI) en la atmosfera (Bernardus, 2013).

1.3.1 Efecto invernadero (EI) y gases de efecto invernadero (GEI)

El efecto invernadero resulta ser un fenómeno natural el cual es provocado por el hombre, quien es el responsable de convertirlo en una amenaza para la seguridad (Pérez *et al.*, 2005), se propicia por el consumo de energía que es generada por la combustión de los derivados del petróleo, gas natural y carbón mineral además de la deforestación y el cambio de uso de suelo. Esto ha reducido la habilidad natural de la tierra para restablecer el equilibrio al ciclo del carbono, lo que está ocasionando los cambios globales actuales en las temperaturas medias. Los tipos más importantes de GEI producidos por el hombre son: dióxido de carbono (CO₂), metano, óxido nitroso, halocarbonos y otros gases fluorados (ONU, 2011).

El IPCC (2007), define a los gases de efecto invernadero como un componente gaseoso de la atmosfera, natural o antropogénico, que absorbe y emite radiación en determinadas longitudes de onda del espectro de radiación infrarroja térmica emitida por la superficie de la tierra, por la propia atmósfera y por las nubes. Esta propiedad da lugar al efecto invernadero. Son generados desde hace miles de millones de años de diversas fuentes naturales como el vulcanismo, la vegetación y

los océanos, durante las erupciones volcánicas e hidrotermales se generan grandes cantidades de CO₂ y vapor de agua. La actividad biológica como la respiración de las plantas y los animales y la descomposición microbiana de la materia orgánica (MO) también contribuyen a la producción de los GEI (SEMARNAT, 2009).

El Dióxido de Carbono (CO₂) es el gas más importante de los Gases de Efecto Invernadero (GEI) ya que representa el 60% del total de los cambios en las concentraciones de todos ellos. Su incremento (del CO₂) fue de 1.5 ppm por año para los últimos dos decenios del siglo XX; durante los años noventa la tasa anual aumento de 0.9 ppm a 2.8 ppm. Para el año 2005 su incremento fue de 379 ppm (IPPC, 2008).

1.3.1 Ciclo del Carbono

Los científicos han descrito los llamados ciclos biogeoquímico, con el propósito de explicar el movimiento y transformación de los elementos por medio de la actividad biológica y las reacciones químicas que se producen en la atmosfera, ríos, lagos, mares, suelos y rocas e incluso seres vivos. El ciclo del C es de gran importancia, ya que a partir de los compuestos que forma es posible la vida en la Tierra. Este ciclo está constituido por la circulación de C en la biosfera, mediante procesos biológicos y geológicos (SEMARNAT, 2009). Su ciclo se interrelaciona estrechamente con los ciclos de Oxígeno (O), Nitrógeno (N), Fosforo (P) y Azufre (S) (Gregorich y Janzen, 1996).

En los ecosistemas terrestres la vía más importante para el flujo del C de la atmosfera hacia la vegetación y el suelo es la biológica, el C se encuentra de manera natural en la atmosfera, el ciclo del C inicia con la fijación del anhídrido carbónico atmosférico a través de la fotosíntesis que es realizada por las plantas y algunos microorganismos, utilizándolo para la construcción de sus estructuras (tallos, hojas, raíces, flores, frutos y semillas), el regreso del C a la atmosfera por medio de la descomposición de la materia orgánica (García-Oliva, 1998; Jaramillo, 2004; (La ciencia ecológica, 2004; SEMARNAT, 2009). Durante este proceso el anhídrido carbónico y el agua reaccionan y forman los carbohidratos, liberando oxígeno en forma simultánea, que pasa a la atmosfera. Parte de esos carbohidratos son consumidos directamente para suministrar energía a las

plantas, y el anhídrido carbónico es liberado a través de sus hojas y raíces (Schimel, 1995; Smith *et al.*, 1993).

La segunda fase del ciclo del C es denominada geológica, la cual es mucho más lenta que la fase biológica, el bióxido de carbono que se encuentra libre en la atmósfera puede disolverse en el océano, allí es transformado en bicarbonato el cual se combina con calcio para formar grandes acumulaciones de roca caliza. Es así, como el C se integra a la corteza terrestre constituyendo la mayor reserva de carbono en todo el ciclo. Después de mucho tiempo los volcanes o la disolución de las rocas calizas regresan el C a la atmósfera como CO₂ cerrando de esta manera el ciclo geológico (Jaramillo, 2004; SEMARNAT, 2009) (Figura 1).

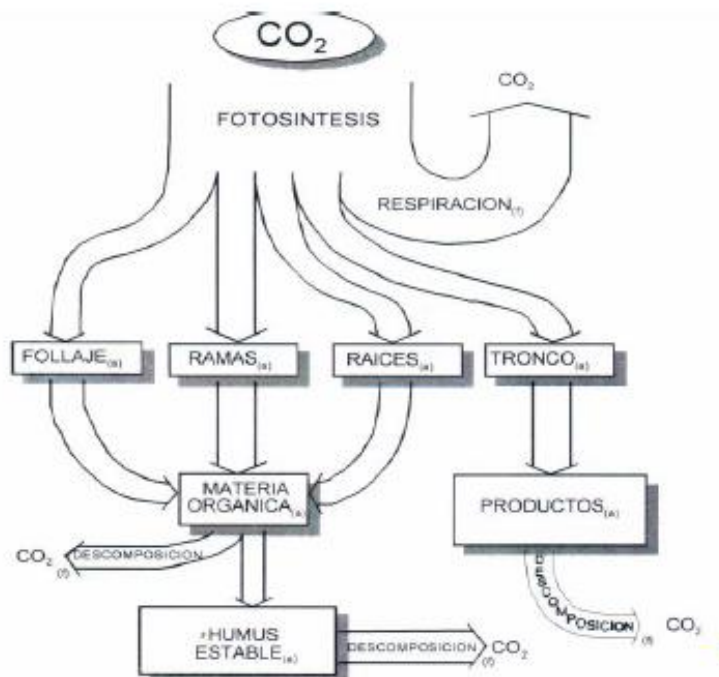


Figura 1 Diagrama simplificado de flujo y almacenes de carbono en un ecosistema forestal (Fuente: Ordoñez y Masera, 2001).

Durante la fotosíntesis se fija el C en el tejido vivo, el cual es regresado a la atmósfera por medio de la respiración, la fotosíntesis es ligeramente mayor, por lo que una parte de C se queda depositado en la biomasa; este C se concentra en los bosques y en las selvas (Caballero, 2007; López, 2009).

Los organismos vivos están compuestos de C el cual es obtenido del resultado de sus procesos metabólicos realizados durante el crecimiento y desarrollo, liberados cuando estos mueren. Aproximadamente, el 50% del peso seco de cualquier organismo está constituido por C, por lo que es considerado uno de los más importantes de la vida (Smith *et al.*, 1993).

1.3.1 Captura de C en el suelo

La captura de C ocurre al almacenarse en los suelos, bosque y otros tipos de vegetación. El carbono orgánico del suelo (COS) contribuye de manera positiva a la fertilidad, resiliencia, servicios ambientales, productividad y sostenibilidad. La captura de C en el suelo aumenta la calidad y mejora su capacidad como un regulador ambiental (Lal *et al.*, 1998). En los ecosistemas terrestres la cantidad de carbono contenido en el suelo es mayor que el carbono estructural de los organismos vivos (Post y Know, 2002).

El COS se encuentra en forma de residuos orgánicos de animales, vegetales y microorganismos, como humus y formas condensadas de composición cercana al C elemental. De manera natural, el COS resulta del balance entre la incorporación del material orgánico fresco y la salida de C del suelo en forma de CO₂ a la atmosfera, erosión y lixiviación (Martínez *et al.*, 2008).

El termino captura de C, el cual fue empleado en el protocolo de Kioto (1997), es utilizado para indicar el almacenamiento de C por periodos prolongados (FAO, 2002), es utilizado para indicar la cantidad de CO₂ capturado de la atmosfera por las plantas y que permanece como C orgánico después de la biodegradación de la materia orgánica (Angers y Chenue, 1998).

La cantidad de C almacenado en el suelo está en función sobre todo de la relación de la temperatura y a la precipitación, la cantidad de C hasta un metro de profundidad varía entre 4 kg m⁻² en las zonas áridas y 21 a 24 kg m⁻² en las regiones polares o boreales, con valores intermedios de 8 a 10 kg m⁻² en las zonas tropicales (FAO, 2002).

1.3.1 Principales sumideros terrestres de carbono en el mundo y México

Los ecosistemas terrestres funcionan como sumideros de C, debido a que los cambios globales del medio ambiente han favorecido la fotosíntesis más que a la respiración, y es por medio de la fotosíntesis que la vegetación puede asimilar el C incorporándolo a su estructura. Los arboles

tienen la capacidad de almacenar C en sus estructuras leñosas por periodos muy prolongados, por lo que son considerados reservorios naturales de C (Acosta *et al.*, 2002). Sin embargo cuando un ecosistema es alterado por incendios forestales o remoción de su vegetación también es considerado como una fuente emisora de CO₂ hacia la atmosfera (SEMARNAT, 2013).

En México los recursos naturales son muy susceptibles a la degradación, esto debido al aprovechamiento que se les da, así como al incremento de la población la cual demanda una mayor superficie y recursos para su sostenimiento, lo que repercute en un alto deterioro del suelo, agua y bosques (Etchevers *et al.*, 2006).

Desde el año 1960 se ha visto una reducción del 30% de la superficie forestal de México en las zonas templadas y 75% en las regiones tropicales, ocasionado principalmente por el aumento de las áreas de pastoreo y de cultivo las cuales crecen 4.0% cada año. Los bosques templados de la Sierra Madre Occidental han reducido un 0.69%, pero los bosque tropicales han reducido una tasa de 1.58%. Dichas deforestaciones alteran el proceso de adición y descomposición de la materia orgánica de los suelos (Etchevers *et al.*, 2006).

1.3.2 Carbono en sistemas agroforestales de café

Los sistemas agroforestales (SAF's) son una forma de uso de la tierra en donde las especies leñosas y perennes interactúan de manera biológica en un área con cultivos o animales; su principal propósito es diversificar y optimizar la producción respetando el principio de la sostenibilidad (Nair, 1993, López, 2007).

Los SAF's presentan diversas ventajas relacionadas a los servicios ambientales, sobre todo en la captura de C sobre sistemas de cultivo, esto se debe a que los cafetos son especies leñosas las cuales retienen por mayor tiempo importantes cantidades de C en sus estructuras (De Melo y Abarca, 2006).

Los sistemas agroforestales en general, son importantes reservorios de carbono, mismos que dependen de la productividad, la finalidad para la cual se hayan diseñado y las condiciones ambientales bajo las que se desarrollan, además de ser una fuente de alimento para los dueños y proporcionar alimento para animales. La acumulación de carbono (C) secuestrado es más evidente en la biomasa de árboles y arbustos; las cantidades de almacenamiento de C en la biomasa

dependen de la proporción de árboles presentes y del tamaño del árbol (Montagnini y Nair, 2004). Sin embargo, la mayoría de las veces el mayor aporte de C en este tipo de agroecosistemas lo hacen los árboles que se utilizan como sombra.

Young (1997), menciona que la producción de biomasa aérea en los diferentes SAF's varía de 2.3 a 48 Mg C ha⁻¹, dependiendo del número de componentes, los estratos presentes así como el arreglo temporal y espacial. La producción de biomasa subterránea puede variar de 1 a 4.5 Mg C ha⁻¹.

De acuerdo con Oelbermann *et al.* (2004), el potencial de almacenamiento de C en biomasa viva en SAF's de zonas tropicales es de 2.1 x 10⁹ Mg C·año⁻¹, mientras en zonas templadas es de 1.9 x 10⁹ Mg C·año⁻¹.

Rajagopal (2004) realizó un estudio en Tlapacoyan, Veracruz, en el cual estimó la cantidad de C almacenado en SAF's de cítricos en diferentes arreglos espaciales y componentes; los sistemas cítrico + café + plátano, cítrico + café, cítrico + potrero y cítrico + plátano almacenaron 196, 186, 181 y 144 Mg C ha⁻¹.

Callo-Concha (2001), en un estudio realizado en la Amazonia peruana, reportó que la mayor cantidad de C se encontraba en el suelo. Los sistemas como huerto casero, café bajo sombra y silvopastura almacenaron 196, 193 y 120 Mg C ha⁻¹, respectivamente, de los cuales más de 58 % se ubicaba en el suelo.

Ávila *et al.*, (2001) realizaron evaluaciones sobre almacenamiento de C en cuatro SAF's, en andisoles de Costa Rica. Reportaron que el sistema que almacenó más C fue café – *Erythrina poeppigiana*, de 10 años (195 Mg C ha⁻¹); seguido de café-*Eucalyptus deglupta*, de ocho años (169 Mg C ha⁻¹); *Brachiaria brizantha*-*Acacia mangium*, de tres años (96 Mg C ha⁻¹); y *B. brizantha*-*E. deglupta*, de tres años (95 Mg C ha⁻¹). En una profundidad de 0.25 m más de 90 % del C se presentó, concluyendo que el suelo es el principal reservorio y que la cantidad de C almacenado en cada SAF depende del clima, de las condiciones edáficas y del manejo que se brinde al sistema.

1.3.1 Clasificación de los Sistemas Agroforestales de Café

Existen cinco tipos de producción de café (Figura 2): sistema rusticano o de montaña, policultivo tradicional, policultivo comercial, monocultivo semisombreado y monocultivo bajo sol (Nolasco, 1985; Moguel y Toledo, 1999; Escamilla y Díaz 2002).

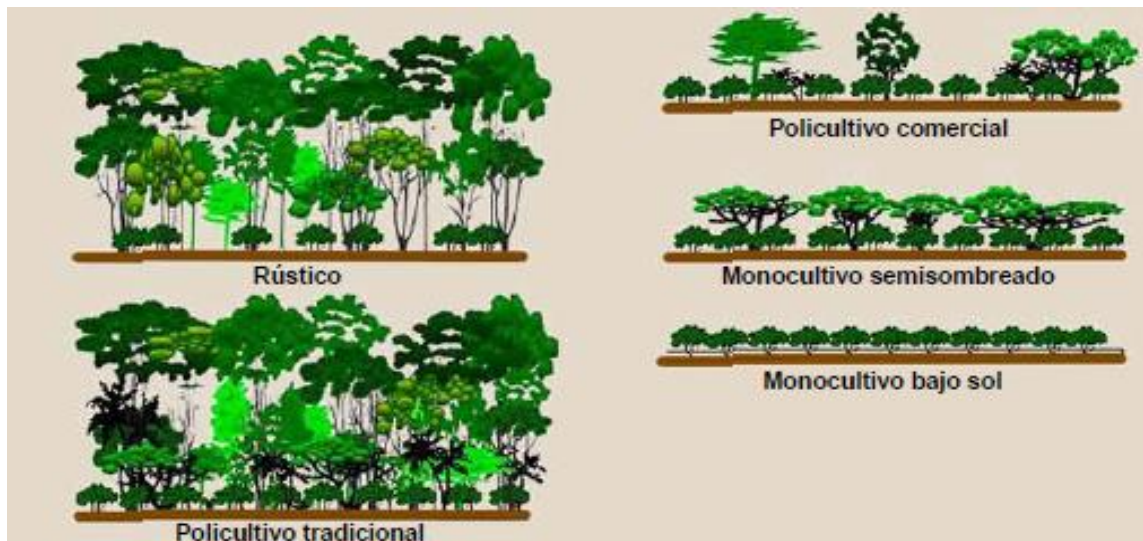


Figura 2 Sistemas de producción de café en México (Moguel y Toledo, 2004).

1.3.1 Sistema rusticano o de montaña

El sistema rusticano o de montaña es aquel donde la vegetación arbórea y herbácea es sustituida en las selvas o bosques por plantas de café, en este sistema se tiene una mínima afectación del ecosistema forestal debido a que solo se remueve el sotobosque el cual es el estrato bajo de las selvas y bosques, conservando así la cubierta original de árboles (Moguel y Toledo, 1999).

Algunas de sus principales características en el sistema rusticano son el uso bajo o incluso nulo de agroquímicos así como laboreas agrícolas mínimas (Villavicencio, 2013).

1.3.2 Policultivo tradicional

En este sistema se introduce el café debajo de las selvas o bosques originales, la principal diferencia que presenta con respecto al sistema rusticano es que el café es acompañado de numerosas especies de plantas que son útiles por lo que se exige un manejo de las especies nativas

(al favorecer o eliminar algunas especies nativas) e introducidas (Moguel y Toledo, 1996; Moguel y Toledo, 1999) (Figura 3).

Las especies introducidas pueden ser comercializadas como combustible o madera, algunas otras son especies exóticas como es el caso de los cítricos y otros frutales de los que se llega a obtener un ingreso económico para el productor (Villavicencio, 2013).

En la gran mayoría de las regiones tropicales del país, los SAF's del sistema tradicional son considerados como policultivos multiestratificados, debido a que la gran diversidad de árboles con fines múltiples funcionan como sombra para los cultivos de café (Raintree, 1989). Estos sistemas son de gran importancia para la conservación de las especies de los países mega diversos como lo es México, Ecuador, Perú, Tanzania y Australia (Mittermeier *et al.*, 2004).



Figura 3 Ejemplo de un sistema de Policultivo Tradicional

1.3.1 Policultivo comercial

El tercer sistema es el policultivo comercial, que se diferencia de los dos anteriores ya que aquí se remueve en su totalidad los bosques y selvas originales y se introduce un conjunto de árboles de sombra que son apropiados para el cultivo de café. La cobertura forestal ya no se encuentra integrada por los árboles nativos del sitio, si no por especies arbóreas introducidas las cuales son empleadas por considerarse adecuadas como árboles de sombra, son plantaciones homogéneas

donde solo es utilizada una variedad de café, de cítricos u otro tipo de árboles frutales. Dentro de los árboles de sombra destacan los del genero *Inga* spp. o *Erythrina* y/o unos cuantos árboles maderables como cedro (*Cedrela spp.*) o laurel (*Cordia spp.*) (Moguel y Toledo, 1999) (Figura 4).



Figura 4 Ejemplo de un sistema de Policultivo Comercial

1.3.1 Sistema especializado o semi-sombreado

Es un sistema que se caracteriza por ser monocultivo (Figura 5), en el cual solo se produce café bajo sombra y se caracteriza por utilizar de manera casi dominante para el sombreado leguminosas del genero *Inga*. También son utilizadas otras especies útiles para dar sombra (Escamilla *et al.*, 1993). En este sistema se hace uso de agroquímicos ya que la unidad productiva se concentra en una producción exclusivamente dirigida al mercado (Moguel y Toledo, 1999).



Figura 5 Ejemplos de sil sistema de monocultivo especializado

1.3.1 Monocultivo sin sombra

Este sistema se caracteriza por no tener ninguna cobertura arbórea por lo que las plantaciones de café son expuestas de manera directa al sol, este sistema es totalmente agrícola por lo que pierde las características agroforestales de los sistemas antes mencionados. Es un sistema convertido en una plantación especializada por lo que al café se le aplican grandes insumos de agroquímicos. En este sistema se presentan los rendimientos más altos de café por unidad de superficie (Moguel y Toledo, 1999) (Figura 6).



Figura 6 Ejemplo de sil sistema de monocultivo sin sombra

1.3.1 Medición de biomasa en materia orgánica muerta

Para muestrear la hojarasca es recomendable establecer parcelas aleatorias, las cuales se delimitan utilizando un marco de 0.25 m² (50 * 50 cm). El proceso consiste en colocar todo el material localizado en el interior del marco, posteriormente de cada muestra se elabora una sub-muestra debidamente identificadas, para ser secadas en una estufa de aire forzado a 70°C con el fin de obtener el peso seco constante. De esta manera se determina la relación entre la cantidad de materia seca y la cantidad de carbono. Con los datos obtenidos se calcula el total de Mg de materia seca por hectárea (Mg/MS/ha), posteriormente se puede calcular la cantidad de carbono por hectárea (Mg/ ha⁻¹ de C) (Rügnitz *et al.*, 2009).

1.3.2 Medición de C en el suelo

El carbono del suelo está presente en la forma orgánica e inorgánica. La forma orgánica equivale a la mayor reserva en interacción con la atmósfera. El carbono orgánico que se encuentra en el suelo representa un balance dinámico entre la absorción del material vegetal que está muerto y la pérdida por la descomposición (mineralización). La información sobre stock de carbono en el suelo es importante para la elaboración de la línea de base. Entre tanto, la dinámica del carbono del suelo en el tiempo es difícil de ser estimada (Rügnitz *et al.*, 2009).

1.3.3 Mantillo

El mantillo (en inglés “Surface litter” o “standing crop litter”) es conocido como la capa de residuos orgánicos que se encuentran en la superficial de los suelos forestales, se encuentra conformado por los residuos vegetales y animales: hojas, ramas, raíces, excretas de animales y la biomasa microbiana (Martínez, 1993; Fisher and Binkley, 2000).

El mantillo es un elemento fundamental de los ecosistemas forestales ya que en esta capa se llevan a cabo muchos procesos de descomposición, siendo fuentes importantes del ciclo del nitrógeno y fósforo (Albrechtova *et al.*, 2008; Galicia *et al.*, 2002). Su profundidad y complejidad en una determinada zona dependen de la caída de la hojarasca y su destrucción por diversos agentes físicos, reacciones químicas y la actividad de los organismos del suelo (Faceli y Pickett, 1991).

El mantillo representa uno de los principales sitios de almacenamiento de C y otros elementos minerales en los suelos de algunos ecosistemas (Vogt *et al.*, 1986). De manera física el mantillo representa una capa que protege al suelo contra las temperaturas y contenidos de humedad considerados extremos, sirve como amortiguador de los procesos de erosión hídrica y favorece la infiltración a las zonas más profundas del suelo (Greiffenhagen *et al.*, 2006). Representa un componente dinámico en los procesos de flujo de energía y la circulación de nutrientes dentro del ecosistema (Jordan, 1985; Vogt *et al.*, 1986). El mantillo se puede clasificar en diferentes capas, dependiendo sus grados de descomposición, es posible distinguir las capas de acuerdo a los tipos de vegetación y las condiciones de los ecosistemas.

Fisher and Binkley, (2000) propusieron la siguiente clasificación: capa identificable (O_1) el cual se encuentra conformado por residuos vegetales, ramas, hojas, frutos y excretas de animales, no presenta ningún grado de descomposición, capa intermedia (O_e) es localizado debajo del primer horizonte, está conformado de residuos orgánicos fragmentados y con cierto grado de descomposición y la capa de residuos mineralizados (O_a) está conformado por materia orgánica amorfa con alto grado de descomposición, la actividad microbiana es muy activa.

1.3.4 Sistemas de Información Geográfica (SIG)

Los Sistemas de Información Geográfica (SIG o GIS, por sus siglas en inglés) son una herramienta útil para el control ambiental (Clarke, 2001) así como la investigación y la planificación de diversos niveles de organización espacial y de los sistemas terrestres. Una de las mayores aplicaciones de los SIG está relacionada con los estudios en la vegetación ya que el primer SIG fue creado en Canadá a finales de los sesenta para realizar inventarios forestales (Lara, 1998). Para realizar una adecuada planeación de los recursos naturales es necesario contar con conocimientos del aspecto temporal estancial debido a que estos sufren constantes cambios, para lo cual existen varias herramientas (Rosete, 2003), con el fin de comprender la complejidad espacial y temporal es necesario tener enfoques en escalas múltiples, así como el uso de herramientas novedosas (Galicia, 2014).

Los SIG se pueden definir como un conjunto de hardware, software, datos geográficos y personal capacitado organizado para capturar, almacenar, consultar, analizar y presentar todo tipo de

información que pueda tener una referencia geográfica, conformando de esta manera una base de datos espacial (Chuvienco, 2008; Puerta et al., 2011). Han sido definidos de diversas maneras, por lo que se puede decir que existen múltiples definiciones por lo que cada uno puede elegir la que más se aproxime al contexto que se está utilizando (Barredo,2005).

Los SIG son ideales para la generación de información para grandes superficies terrestres, sin embargo en ocasiones la complejidad de la zona de estudio demanda no solo la información obtenida de imágenes de satélite, sino de su interrelación con información espacial de otras fuentes (Rosete, 2003). La importancia actual de los SIG es que posibilitan el análisis no espacial, los análisis espaciales y la integración de datos mediante el manejo simultáneo de tablas con información diversa (Torregroza et al., 2014).

Para realizar una correcta planeación del manejo de los recursos naturales es necesario tener conocimiento sobre el uso actual de los mismos, ya que los recursos sufren constantes cambios a lo largo del tiempo, el impacto que han generado estos cambios ha sido estudiado por procesos de interpretación de fotografías aéreas, sin embargo, el desarrollo de los sensores remotos ha facilitado el análisis de las imágenes de satélite, el cual otorga mayor rapidez y confiabilidad cartográfica de los recursos naturales digitalizados. (Rodríguez *et al*; 2002).

Para lograr la sostenibilidad de los recursos naturales en la toma de decisiones es fundamental contar con información confiable, oportuna y pertinente, en aspectos de ubicación, extensión, distribución espacial, entre otros (García, 2010).

Los SIG han pasado, en pocos años, de ser una tecnología emergente a posicionarse como una herramienta de uso cotidiano en la resolución de problemas complejos de planificación y gestión de los recursos naturales (Escobar *et al.*, 2008).

1.3.5 Uso de Imágenes de Satélite

Los orígenes de SIG y la Percepción Remota siguieron de una trayectoria paralela, ya que ambas técnicas surgieron como disciplinas independientes, sólo unidas por su orientación medioambiental (Chuvienco, 2008).

El uso de imágenes de satélite procedentes de sensores remotos es una alternativa que permite obtener datos cuantitativas para ubicar y caracterizar los recursos naturales con el fin de tomar decisiones para su planificación y manejo (García, 2010).

La Percepción Remota es una técnica que permita adquirir imágenes de la superficie terrestre desde sensores remotos aéreos o espaciales, se asume que entre el suelo y el sensor existe una interacción energética, ya sea por la reflexión de la energía solar o de un haz energético artificial o por emisión propia (Chuvioco, 2008). Los sensores remotos son considerados como una herramienta ideal para la generación de datos de grandes extensiones de terreno (García, 20010). Sin embargo en algunas ocasiones la complejidad del fenómeno de estudio demanda no solo la información obtenida de las imágenes, sino de su interrelación con información espacial de otras fuentes.

Cámara, 1983 menciona que el mayor potencial de los sensores remotos es el mapeo periódico (monitoreo) que se puede realizar, el cual nos permite medir el sentido, intensidad y periodicidad de los cambios que sufren los recursos naturales. Al ser considerado como una fuente de información de la superficie terrestre, se convirtió en una herramienta para el reconocimiento de la cobertura vegetal (Trejo, 1996).

El uso de estas tecnologías a distancia, como son los SIG y Percepción Remota en conjunto han revelado nuestra capacidad para definir mapas de patrones de distribución de la vegetación, estimaciones de tasas de pérdida de vegetación, evaluación de los bosques y servicios ambientales que estos proporcionan, entre otros (Newton, 2007). Adicional a lo anterior, los SIG son una potente herramienta de ayuda para la planificación cuando se dispone de una base de datos suficientemente amplia para los fines que se plantean (González, 2014).

1.3.6 Clasificación de imágenes

a) Clasificación Interpretativa

Este método de clasificación fue el pionero en la clasificación de imágenes de satélite a nivel mundial, la discriminación de las coberturas y los objetos de interés se identifican por analistas entrenados con pleno conocimiento de área de estudio y patrones espectrales y espaciales de las diferentes coberturas (Lencinas. 2011).

La clasificación interpretativa es una de las técnicas más utilizadas para describir la heterogeneidad estructural del territorio y para describir patrones espaciales de las categorías estructurales (Paruelo, 2008).

La diferencia entre color y tono de los píxeles son aspectos importantes en clasificación interpretativa, en lenguaje de datos satelitales resultan ser las variables en respuesta a las distintas coberturas y diferentes longitudes de onda del espectro electromagnético, denominado “*Perfiles espectrales*” (Lencinas. 2011). Los perfiles espectrales se fundamentan en la proporción de radiación que es reflejada por distintos objetos en longitudes de onda determinadas (Jensen, 2000), la textura es disposición espacial de píxeles de igual color o tono por lo que las diferencias estructurales en la vegetación y sus tamaños relativos hacen que existan diferencias. Mientras que el cambio temporal es otro aspecto importante, ya que puede ser utilizado para identificar coberturas mediante datos multitemporales e interanuales (Lencinas. 2011).

b) Clasificación digital

Al conjunto de técnicas y procesos para descubrir o hacer resaltar información contenida en una imagen usando como herramienta principal una computadora se le conoce como procesamiento digital de imágenes (Domínguez, 1996).

La clasificación digital de imágenes es una forma de aprendizaje, un proceso que acumula y concentra experiencias dentro de modificaciones internas de un sistema; no razona para deducir un resultado o tomar decisiones. La clasificación se limita a agrupar conjuntos de objetos en clases a través del uso de técnicas de inteligencia artificial o estadísticas (Rullán, 2011).

Es el proceso para desarrollar mapas temáticos con base a la interpretación de imágenes de sensores remotos. La clasificación digital se considera como el aspecto más importante del procesamiento para los SIG (Eastman, 2012) ya que se obtiene una cartográfica e inventario de las categorías de los objetos de interés (Chuvienco, 2008).

La clasificación se lograba a través de la interpretación visual de características y delineación manual de sus límites, con el avance de las computadoras se incursiono con la interpretación

asistida, aunque el humano (clasificador) brinda un conjunto superior de capacidades para el proceso de clasificación geográfica (Eastman, 2012).

Los procesos básicos empleados en el análisis de imágenes de satélite para agrupar objetos con propiedades similares son fundamentalmente dos. El primero consiste en agrupar a los objetos mediante una clasificación supervisada de los componentes a partir de la experiencia del clasificador, mientras que el segundo deja al softwares la toma de decisiones para la agrupación de un mismo tipo y es denominada como clasificación no supervisada (Eastman, 2012).

El método de clasificación supervisada parte del conocimiento previo de la zona de estudio, el cual permite delimitar sobre la imagen áreas lo suficientemente representativas de cada una de las categorías con mismas características visibles. Estas áreas son denominadas “áreas de entrenamiento” o “sitios de entrenamiento”, y sirve para caracterizar las diferentes clase de la imagen, con el fin de asignar el resto de los pixeles de la imagen en una de las categorías en función a la similitud de los números digitales extraídos (Chuvieco, 2008 y Carretera *et al.*, 2003).

La información obtenida a partir de estos campos sirve para generar una firma espectral de cada una de las clases seleccionadas (Berlanga, 2007), que posteriormente serán empleadas para evaluar la verosimilitud de que cada pixel asignada a una clase determinada (Johnston, 1998).

Eastman (2012) menciona que para realizar una clasificación supervisada existen una serie de pasos con secuencia lógica de operaciones básicas sin importar el tipo de clasificador a emplear, dichos pasos son descritos a continuación:

1. **Sitios de entrenamiento:** áreas identificadas directamente en una imagen o fotografía digital y verificada en campo. Los sitios son utilizados para que el clasificador observe las diferencias visibles en la imagen de las diversas clases, la cantidad de clases estará determinada a la diversidad de la cobertura vegetal, y serán empleadas para obtener las firmas espectrales de cada clase en la imagen **Extracción de firmas espectrales:** es el valor numérico (0 – 255) del color del espectro electromagnético de las bandas azul, verde y rojo de la imagen digital que presenta cada pixel, y la caracterización estadística de la información perteneciente a cada clase. La información requerida contiene los valores mínimo, máximo, promedio y la matriz de varianza/covarianza.

2. **Clasificación de la imagen mediante clasificadores duros o blandos:** esto puede realizarse con cualquiera de los clasificadores rígidos o blandos que se describirán más adelante.
3. **Evaluación de la clasificación en proceso:** es la comparación de los resultados de los clasificadores duros con los resultados de sus respectivos clasificadores blandos.
4. **Generalización:** es un proceso opcional aplicable después de clasificar la imagen, algunos de los píxeles no son asignados en alguna clase y quedan aislados pertenecientes a clases diferentes a su entorno.
5. **Evaluación de la exactitud en la clasificación:** es la etapa final, realizada mediante la generación de un conjunto aleatorio de localidades con base a un esquema estratificado y la posterior verificación de campos para determinar la verdadera cobertura presente en cada uno de ellos (Johnston, 1998).

Los clasificadores tradicionales (denominados clasificadores duros) parte de una decisión rígida acerca de la identidad de cada píxel, mientras que los clasificadores blandos expresan el grado en que un píxel pertenece a cada una de las clases consideradas (Eastman, 2012). Además, se les denominan rígidos porque todos alcanzan una decisión rígida (inequívoca) acerca de la clase a la que pertenece.

Todos los clasificadores duros están basados en la representación de la reflectancia de cada clase en un sistema de ejes cartesiano (x, y, z) (Johnston, 1998). Este es conocido como espacio de banda y sirve para medir la posición de cada píxel y clasificarlo en el espacio de banda relativo de la clase (Eastman, 2012).

Distancia mínima a la media

Es el criterio más sencillo para asignar un píxel a una de las categorías, consiste en asignarlo al más cercano, en aquel que minimice la distancia entre ese píxel y el centroide de clase (Johnston, 1998). La distancia es espectral, consecuencia de comparar los números digitales de cada píxel

con los del centro de las distintas categorías para todas las bandas que intervienen en el análisis (Chuvienco, 2008).

Máxima verosimilitud

El método utiliza la teoría de probabilidades bayesianas y la matriz de varianza covarianza de los datos de las firmas espectrales para estimular la probabilidad de que un pixel pertenezca a cada clase (Johnston, 1998).

Paralelepípedo

En este método el usuario fija un área de dominio para cada categoría, teniendo en cuenta sus valores de centralidad y dispersión. Posteriormente, un pixel es asignado a dicha clase si sus números digitales (ND) están dentro de esa área de dominio en todas las bandas consideradas (Chuvienco, 2008). El rango puede ser definido por los valores mínimos y máximos observables en cada sitio de entrenamiento o por un rango estandarizado con base a la desviación estándar y la media (Johnston, 1998).

Este método tiene la ventaja de la velocidad y la habilidad para considerar la variabilidad cambiante de las clases (Eastman, 2012) pero tiene un desempeño limitado debido al frecuente traslape entre los rangos de las diferentes clases. El traslape es frecuente debido a la alta correlación entre los valores de cada banda (Johnston, 1998).

Análisis discriminante lineal (clasificador Fisher)

Este clasificador conduce a un análisis discriminante lineal de los datos del sitio de entrenamiento para formar un grupo de funciones lineares que expresan el grado de apoyo por cada clase. La clase asignada a cada pixel es la clase que recibe el apoyo más alto luego de la evaluación de todas las funciones (Eastman, 2012).

1.3.7 Levantamiento Fisiográfico

El hombre se ha enfrentado durante mucho tiempo al problema de tener información sobre el medio natural en el que esté desarrolla sus actividades. Para obtener este conocimiento el hombre ha tenido que evaluar sus recursos naturales en función de sus cualidades, cantidades y ubicación geográfica, por lo cual resulta ser necesario clasificar el medio ambiente (Jaimes, 1987). Una buena

opción paico ara generar dicha información es el levantamiento fisiográfico, siendo este la subdivisión del paisaje en Facetas y Sistemas Terrestres.

1.3.8 Desarrollo del Levantamiento Fisiográfico

La regionalización fisiográfica se originó a fines del siglo XIX y los científicos que trabajaron en ella fueron geógrafos, geomorfólogos, ingenieros en vías de comunicación y científicos de recursos naturales (Gómez, 1984). A finales del Siglo XIX y principios del Siglo XX, Bowman dividió a los Estados Unidos de América dentro de tipos fisiográficos y observo las relaciones que presentaban la topográfica y el uso de la tierra (Aguirre, 1977). En el año de 1916, la Asociación de Geógrafos Norteamericanos estableció un comité al mando de Fennerman para definir las regiones fisiográficas de los E.U.A (Diakite, 1978).

Bourne (1931) en Inglaterra propuso dos unidades que fueron “sitio” y “región”, en donde se definió a sitio como la unidad que para todos los propósitos prácticos presenta en la totalidad de su extensión condiciones similares de clima, geología, relieve y suelos; así mismo, se definió a región como una agrupación de sitios.

En Australia, Christian y Stewart en 1946 realizaron levantamientos fisiográficos en partes no desarrolladas, con el objetivo de evaluar el potencial agrícola de grandes extensiones. Las unidades de clasificación que propusieron fueron el sitio, la unidad terrestre y el sistema terrestre. En África del Sur, el “National Institute for Road Research” (NIRR) bajo la dirección de Brink (1962-1965), empezó estudios de mapas de ingeniería de suelos para la localización de materiales de construcción y caracterización de suelos para propósitos de desarrollo de carreteras.

En Inglaterra el grupo Mexe-Oxford dirigido por Beckett y Webster, de 1962 a 1966 diseñaron un método basado en hacer pocas observaciones e inferencias de lugares conocidos a lugares no estudiados por no ser accesibles, utilizando intensamente la fotointerpretación deductiva. Ellos establecen como unidad básica a la faceta terrestre y el Sistema terrestre como padrón recurrente de Facetas, las cuales interaccionan unas con otras (Ortiz y Cuanalo, 1978).

1.3.9 Levantamiento Fisiográfico en México

En 1970, el Dr. Cuanalo introdujo a México estas ideas, debido a la necesidad de coleccionar información en poco tiempo acerca de los recursos naturales, con el propósito de la planeación del desarrollo agrícola, ya que es una técnica de reconocimiento rápido de bajo costo.

Uno de los primeros levantamientos fisiográficos en México lo realizó R. León Arteta en 1972, quien propone al Levantamiento Fisiográfico como una alternativa para recomendaciones regionales del uso de la Tierra. Otros estudios que han utilizado el Levantamiento Fisiográfico son los realizados por Peña (1973), Zuelta (1975), Cerda (1976), Ponce (1976), Ortiz (1978), Baus (1978), Diaquite (1978), Aveldaño (1979), López (1980), Rojo (1980) y Gómez (1984) entre otros. La utilidad del Levantamiento Fisiográfico en México ha sido de la siguiente manera:

- ✚ Como marco de referencia en la generación de tecnología de producción, como son las recomendaciones de dosis de fertilización. Algunos trabajos han tratado de encontrar relaciones empíricas que se establecen entre los rendimientos de cultivos y las unidades de clasificación del Levantamiento Fisiográfico.
- ✚ En la cartografía de tierras erosionadas es utilizado en programas de conservación de tierras, León (1975) y Ortiz y Cuanalo (1984).
- ✚ Para la generación de Agro-hábitats. Ponce (1978) desarrolló una metodología con el propósito de dar recomendaciones de producción a partir de tecnología agrícola tradicional. Entendiendo por agro-hábitat, como “un área geográfica donde los factores ambientales de la producción presentan condiciones tales para que de una comunidad vegetal bajo el mismo sistema de manejo, se obtengan rendimientos similares de cada ciclo de cultivo”. La delimitación de agro-hábitats se relaciona a las facetas del levantamiento fisiográfico, considerando que un agro-hábitat está constituido por una o varias facetas. .

1.3.10 Enfoques del Levantamiento Fisiográfico

Existen diferentes sistemas de clasificación de tierras y aunque todos presentan interacciones, se pueden diferenciar tres grupos de acuerdo a su enfoque (Mabbutt, 1968;), que son el enfoque genético, el paisajista o morfológico y el paramétrico (Ortiz y Cuanalo, 1984).

El enfoque *genético* trabaja con el concepto de región natural; los trabajos más conocidos sobre este enfoque se basaron fundamentalmente en el clima y sus delineaciones se apoyaban en el relieve. Sin embargo, las regiones naturales resultaron ser demasiado grandes, con una gran complejidad interna y sus límites eran muy vagos. Como consecuencia en 1930 se elaboraron las investigaciones sobre regiones naturales y se iniciara el estudio de objetos reales en partes distintivas observables del medio ambiente, lo cual es conocido como el enfoque *paisajista* o *morfológico*. El enfoque más moderno es el *paramétrico*, el cual consiste en dividir y clasificar a las tierras con base en valores de parámetros claves para propósitos específicos. (Ortiz y Cuanalo, 1984).

El levantamiento fisiográfico puede ser considerado prácticamente como una subdivisión del paisaje pues a nivel regional cuenta con un sistema de clasificación muy simple, ya que tiene dos tipos de unidades: la Faceta y el Sistema Terrestre (Ortiz y Cuanalo, 1977).

1.4 ÁREA DE ESTUDIO

1.4.1 Localización Geográfica

Para el desarrollo del presente trabajo se seleccionó el municipio de Huatusco perteneciente a la región de las “Las Montañas” (Figura 7). Este se encuentra ubicado en la zona centro del Estado de Veracruz. Limita al Norte con los municipios Tlatetela y Sochiapa; al Noreste con Comapa; al Sureste con Zentla y Tepatlaxco; al Sur con Ixhuatlán del Café y Coscomatepec; al Oeste con Calchualco y al Noroeste con el Estado de Puebla (Centro Nacional de Desarrollo Municipal, 2010).

Para el desarrollo del presente trabajo se seleccionó el municipio de Huatusco perteneciente a la región de las “Las Montañas” (Figura 7). Este se encuentra ubicado en la zona centro del Estado de Veracruz. Limita al Norte con los municipios Tlatetela y Sochiapa; al Noreste con Comapa; al Sureste con Zentla y Tepatlaxco; al Sur con Ixhuatlán del Café y Coscomatepec; al Oeste con Calchualco y al Noroeste con el Estado de Puebla (Centro Nacional de Desarrollo Municipal, 2010).

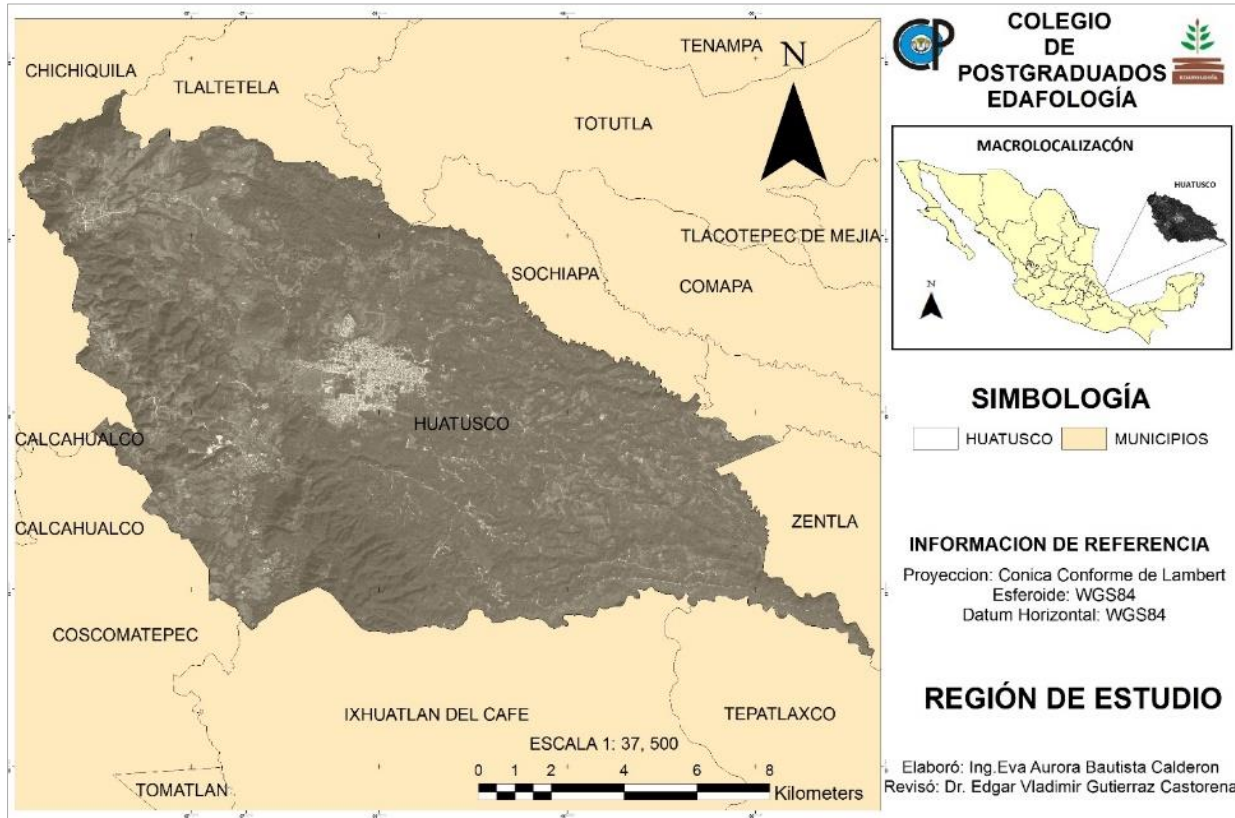


Figura 7 Localización de la zona de estudio (Huatusco de Cuellar)

Cuenta con una superficie de 16,995 hectáreas. La ubicación geográfica del municipio de Huatusco se encuentra entre las coordenadas 19° 04' y 19° 13' de latitud norte; los meridianos 96° 41' y 97° 04' de longitud oeste (INEGI, 2009).

1.4.2 Orografía y Fisiografía

El relieve del área de estudio es montañoso, de norte a sur, la región esta recorrida por la provincia del Eje Neovolcánico o también llamado Sistema Tarasco Nahua, cuya línea de crestas se mantiene constante por arriba de los 2,200 m de altitud. Al norte del eje Neovolcánico se desprende la Sierra de Chiconquiaco la cual llega hasta el Golfo de México (Figura 8) (INEGI, 2009).

El municipio se encuentra ubicado en la zona central montañosa del Estado (Figura 8), sobre las estribaciones de la Sierra Madre Oriental. Su topografía es bastante accidentada observándose barrancas y algunas alturas notables (PIGMEUN, 2009).

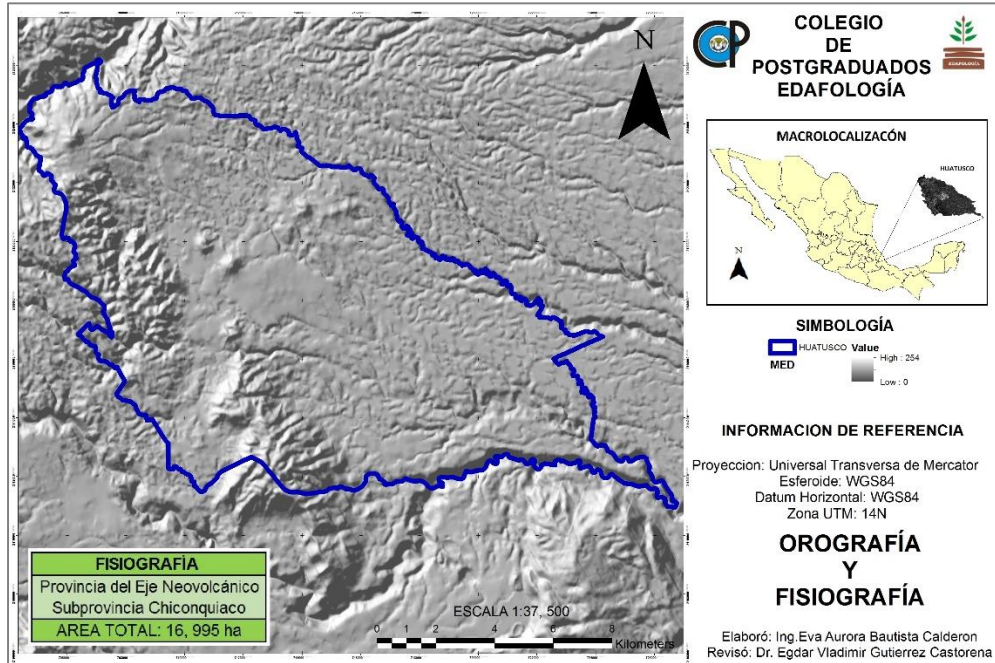


Figura 8 Orografía y Fisiografía del área de estudio (Huatusco)

El sistema de toposformas (Figura 9) que encuentran en el área de estudio son: la primera denominada Lomerío de aluvión antiguo (61.56%) (Figura 9), Lomerío de basalto (37.31%) y Sierra volcánica de laderas tendidas (1.13%) (INEGI, 2009 y PIGMEUN, 2009).

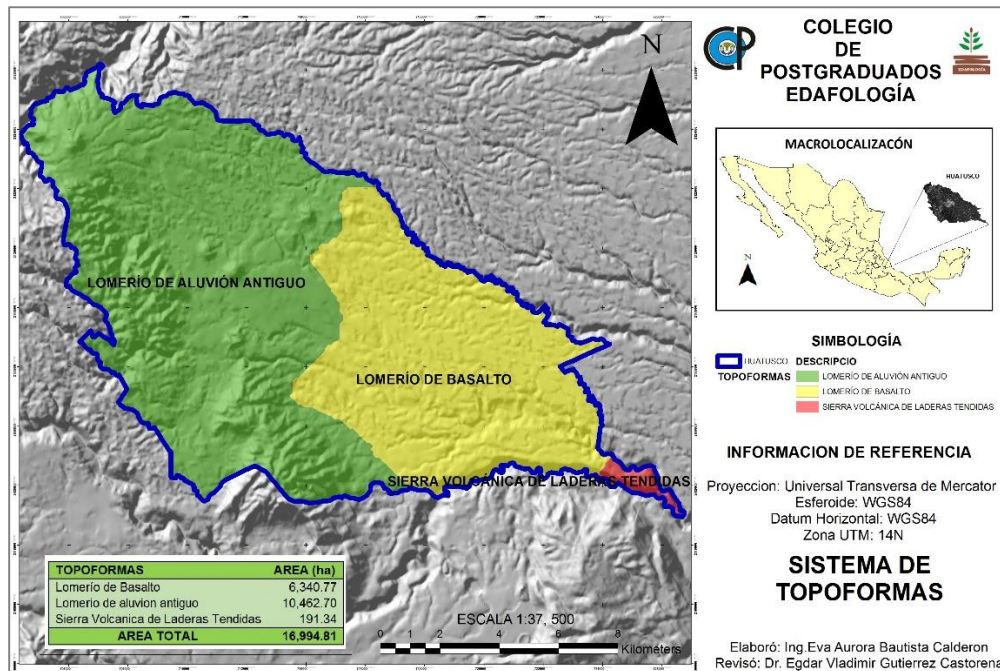


Figura 9 Topoformas del área de estudio (Huatusco)

1.4.3 Clima

En el área de estudio se encuentran presentes seis tipos de climas predominantes, (Figura 10), de acuerdo con INEGI 2009 sus características son (Figura 10):

- ✚ *C(f)*: Templado, húmedo, temperatura media anual entre 12°C y 18°C, temperatura del mes más frío entre -3°C y 18°C y temperatura del mes más caliente bajo 22°C.
- ✚ *(A)C(w2)*: Semi-cálido sub-húmedo del grupo C, temperatura media anual mayor de 18°C, temperatura del mes más frío menor de 18°C, temperatura del mes más caliente mayor de 22°C.
- ✚ *(A)C(m)(f)*: Semi-cálido húmedo del grupo C, temperatura media anual mayor de 18°C, temperatura del mes más frío menor de 18°C, temperatura del mes más caliente mayor de 22°C.
- ✚ *(A)C(fm)*: Semi-cálido húmedo del grupo C, temperatura media anual mayor de 18°C, temperatura del mes más frío menor de 18°C, temperatura del mes más caliente mayor de 22°C.
- ✚ *C(m)(f)*: Templado, húmedo, temperatura media anual entre 12°C y 18°C, temperatura del mes más frío entre -3°C y 18°C y temperatura del mes más caliente bajo 22°C.
- ✚ *(A)C(m)*: Semi-cálido húmedo del grupo C, temperatura media anual mayor de 18°C, temperatura del mes más frío menor de 18°C, temperatura del mes más caliente mayor de 22°C.

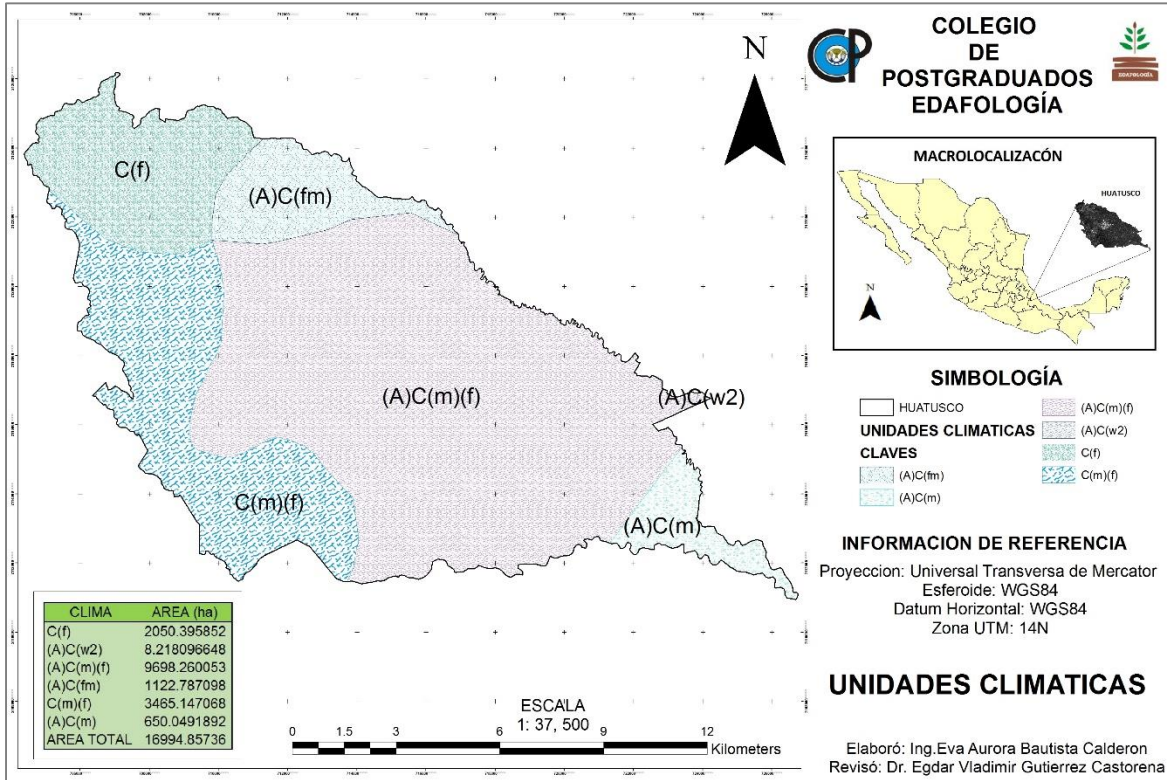


Figura 10 Distribución de los tipos de clima dentro del área de estudio (Huatusco)

1.4.4 Hidrología

El municipio de Huatusco se encuentra dentro de la región Hidrológica Papaloapan “RH28”, el 95.58% del área de estudio se encuentra dentro de la sub-cuenca R. Jamaca, mientras que el 4.42% restantes del área de estudio pertenece a la sub-cuenca Decozalapa. La cuenca predominante para toda la zona es la del río R. Jamapa y otros (Figura 11).

Dentro de la región Hidrológica del Papaloapan se encuentran las siguientes corrientes de agua perennes: Capula, Chiquito, El Castillo, Jamapa, Seco y Tlilapa y dentro de las intermitentes se encuentran: Aguacapa, Capulapa, Citlalapa, Sonso y Zocapa (PIGMEUN, 2009).

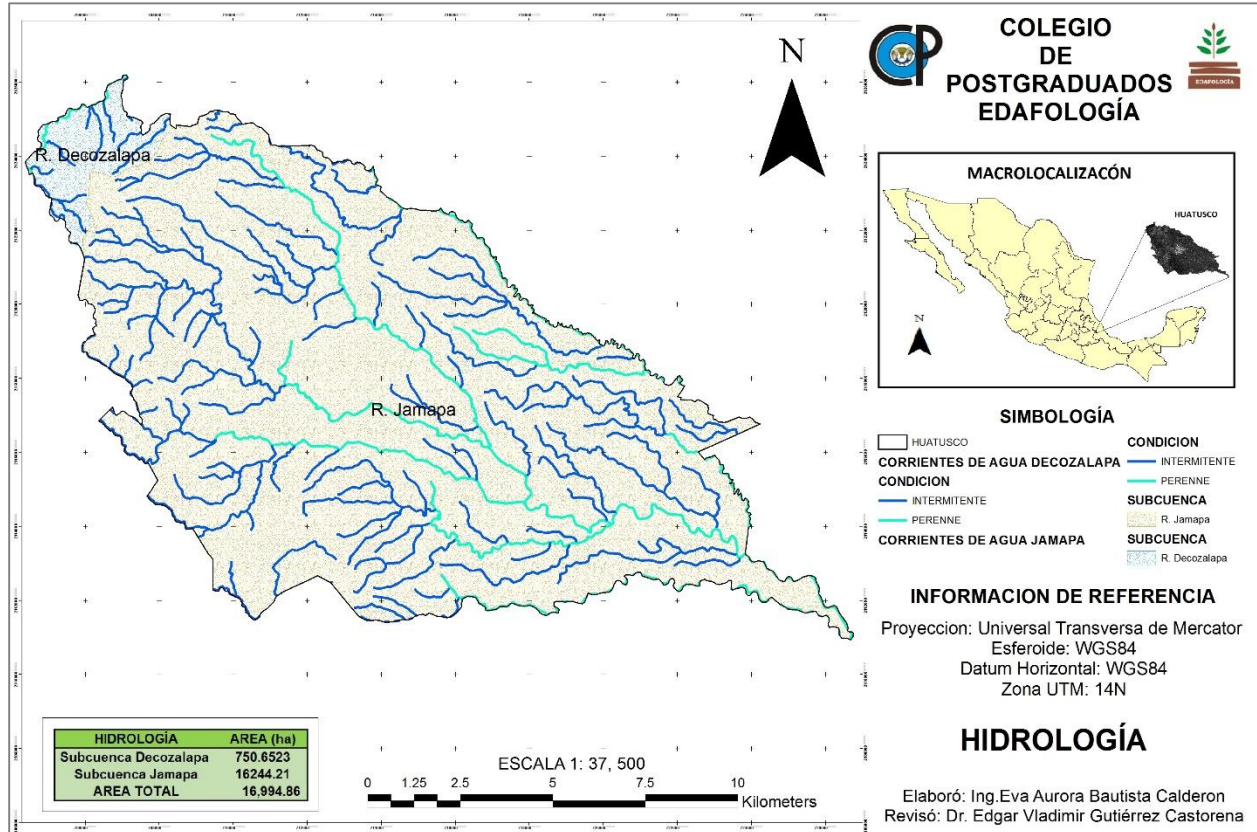


Figura 11 Cuencas, sub-cuencas y corrientes de agua localizadas en la zona de estudio (Huatusco)

1.4.5 Suelos

La composición de los suelos en el municipio de Huatusco es variada, predominando los suelos denominados Andosol, Luvisol, Cambisol y Leptosol (Cuadro 1).

Cuadro 1 Tipo de suelos en el área de estudio (Huatusco)

SUELOS	ÁREA (ha)
Andosol	9,156.79
Luvisol	6,830.00
Cambisol	644.66
Leptosol	3.54

FUENTE: INEGI, 2009

1.4.6 Vegetación y uso del suelo

Para determinar el tipo de vegetación y uso del suelo predominante en el área de estudio, se tomó como base la información proporcionada por el INEGI en su carta de vegetación y uso del suelo serie V, estas se muestra en la Figura 12, y se describen a continuación (INEGI, 1997):

Zona urbana: Referido al espacio físico construido con diversas edificaciones e infraestructura de servicios, donde habitan poblaciones mayores de 2,500 personas. En el área de estudio la superficie que ocupa es de 362.94 ha, representando el 2.14% del área total.

Asentamientos humanos: es considerado como toda manifestación o presencia de personas con residencia fija en un lugar determinado, a partir del cual desarrollan sus actividades vitales, la superficie que ocupa es de 61.22 hectáreas, representando el 0.36%.

Agricultura: Actividad humana en la que se producen del suelo diferentes tipos de cultivos, puede ser de temporal o de riego. En el zona de estudio la agricultura de temporal ocupa 194.61 ha, equivalentes al 1.15%, la agricultura de temporal anual y permanente ocupa 1,275.48 ha, equivalente al 7.51%, la agricultura de temporal permanente ocupa 3, 060.80 ha, equivalente al 18% la cual es la categoría que ocupa la mayor superficie, la agricultura de temporal semipermanente ocupa 118.97 ha, equivalente al 0.70% y por último la agricultura de temporal semipermanente y permanente ocupan 1,374.43 ha equivalente al 8.09% de la superficie del área de estudio.

Bosque: Se define como una masa de vegetación arbórea, principalmente de zonas templadas y semi-frías, en climas subhúmedos a muy húmedos (CONABIO, 2011). Existen distintos tipos de bosques dependiendo de las especies presentes en ellos. En la zona de estudio se encuentran presentes los siguientes tipos de bosque:

- ✚ **Bosque mesófilo de montaña:** Se encuentra en 2,036.68 ha de la zona, representando el 11.98%. Localizado en lugares con relieve accidentado, en laderas escarpadas y cañadas protegidas contra el viento y la insolación, con mayor gradiente de humedad que en el resto de los tipos de bosques, se establece entre los 1,000 y los 2,500 msnm. Algunos de los géneros característicos son Liquidambar, Quercus, Clethra, Meliosma y una gran gama de epífitas, especialmente orquídeas y bromeliáceas (CONABIO, 2011).

✚ **Vegetación secundaria arbórea de Bosque Mesófilo de Montaña:** Se encuentra en 1,374.43 ha de la zona, representando el 8%.

✚ **Bosque de encino:** son comunidades vegetales muy características de las zonas montañosas de México, se caracteriza por ser son bosques mixtos de montaña con predominio de pinos y encinos. Se encuentra en tan sólo 126 ha de la zona, representando el 0.74%.

Pastizal cultivado: Comunidad vegetal dominada por gramíneas (pastos o zacates), originado por influencia humana, se desarrolla al eliminarse la vegetación original (bosque, selva, matorral, etc.) o en áreas agrícolas abandonadas (INEGI, 1997). Es tipo de vegetación la encontramos en 3,942.84 ha de la zona, aproximadamente el 23.20% de la superficie total de estudio.

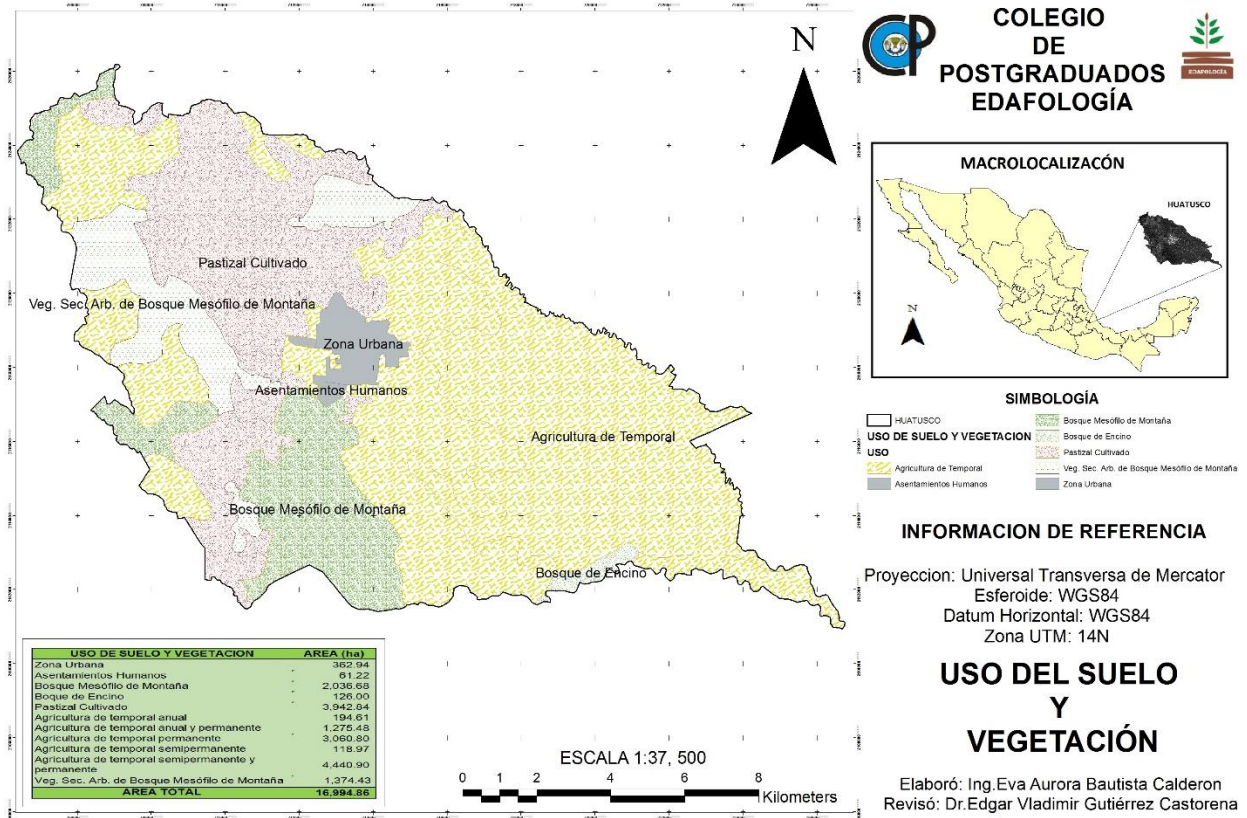


Figura 12 Vegetación y uso de suelo en la zona de estudio (Huatusco)

2 TÉCNICAS PARA IDENTIFICAR Y CUANTIFICAR SISTEMAS AGROFORESTALES DE CAFÉ

2.1 INTRODUCCION

Los Sistemas de Información Geográfica (SIG) emplean bases de datos diseñados para representar el mundo físico en mapa temáticos, el cual manipula desde un contexto geoespacial (Brody, 1999), esto permite la captura, el ingreso, el almacenamiento y el análisis espaciales cuantitativo de la abstracción resultante (Rosete & Bocco, 2003), y auxilia en la toma de decisiones (Gómez et al., 2003) por su capacidad de análisis, organización y equipamiento en su implementación (Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander Von Humboldt, 2006), y es considerada una herramienta fundamental en la evaluación de coberturas vegetales en los ecosistemas (Nazareno, 2014).

La importancia y uso de los SIG es ampliamente aplicada a estudios de flora y fauna, que desde la década de los 70's se emplearon para inventarios forestales (Gutiérrez & Gould, 1998); en la compilación temporal de datos de comunidades vegetales en estudios dinámicos del medio biótico y abiótico (Bermejo et al., 2005); en combinación con metadatos sobre imágenes de satélite en procesos automáticos y semiautomáticos de análisis (García, 2006), en evaluación y manejo de agroecosistemas con base en cambios temporales sobre fotografías aéreas, y en procesos computarizados con interpretación visual (Buendía et al., 2002). No obstante, los mapas temáticos generan incertidumbre cuando solo se limitan a trabajos de gabinete, en análisis sobre imágenes con poca o nulo recorridos en campo para su capacitación y verificación de linderos.

La combinación de técnicas entre los SIG y análisis de imágenes de satélite brindan al intérprete rapidez y confiabilidad en la extracción cartográfica de los recursos naturales (a corto, mediano y largo plazo) y ofrece mapas con determinada periodicidad (Rullán et al., 2011). Las imágenes de satélite observan objetos de diferentes tamaños, formas y colores, los cuales son identificados a simple vista. Sin embargo, muchos de ellos no suelen ser clasificados de forma correcta, lo que depende de la experiencia y percepción individual del interprete (técnico) para su correcta categorización (García, 2006). El especialista agrupa componentes visibles sobre la imagen o fotografía e incorpora elementos de un conjunto de objetos con criterios complejos como textura,

brillo, tamaño o combinación entre ellos, contrariamente al método de clasificación digital clásico que se fundamenta en la intensidad radiométrica (Chuvieco, 2008) con poca intervención del interprete.

Otra técnica en la extracción de la realidad es por clasificación interpretativa. La cual se fundamenta en la identificación del objeto visible por el intérprete y su representación cartográfica en estudios de clasificación de tierras agrícolas con diversidad de cultivos (usos /cobertura) Cayssials et al., (1983), en elaboración de una calificación biológica del tipo de vegetación y usos de suelo en áreas naturales protegidas Vega et al., (2008), en evaluación de cobertura y uso de la tierra Zorogastua et al. (2011), en la diversificación forestal en bosques andinos Lencinas (2011), en delimitación y prevención de zonas en situación de inundación permanente y semipermanente Nazareno (2014), en detección de áreas con alta probabilidad de incendios forestales Verdú y Salas (2010), en estudios de suelos dirigidos a proyectos de drenaje agrícolas subterráneos Gutiérrez (1997), o en combinación con procesos digitales-analógicos (interpretación visual sobre el monitor de la computadora) en imágenes de satélite (INRENA, 1998). Sin embargo, la utilización entre técnica de clasificación interpretativa en combinación con SIG y análisis de imágenes en las zonas de las montaña para la zonificación de los sistemas agroforestales de Café no ha sido ampliamente utilizada, debido a la diversidad y complejidad de las estructuras vegetales de la región y manejo agrícola.

El análisis digital de imágenes y su representación en mapas temáticos está directamente relacionado con enfoques paramétricos, por considerar un clasificador para cada componente. El enfoque es empleado con base a características físicas, químicas o estructurales para la clasificación de tierras (Ortiz & Cuanalo, 1984). Sin embargo, a pesar de las ventajas particulares, estas técnicas individualmente o en combinación, por si solas no expresan divergencias entre los objetos de los sistemas de producción agrícolas intensivo, siendo de importancia tanto económica como técnica la extracción y representación en mapas temáticos de zonas cafetaleras.

Por ello, se propone como objetivo generar una clasificación interpretativa, con identificación directa de objetos en imágenes mediante campos de entrenamiento, análisis espacial y técnicas de enfoque paramétrico en SIG para ordenar los componentes en relación a la distribución espacial del cultivo de café en los sistemas agroforestales ubicados en el municipio de Huatusco, Veracruz.

2.2 OBJETIVOS E HIPOTESIS

2.2.1 General

- ✚ Generar una clasificación interpretativa, con identificación directa de objetos en imágenes mediante campos de entrenamiento, análisis espacial y técnicas de enfoque paramétrico en SIG, para ordenar los componentes en relación a la distribución espacial del cultivo de café en los sistemas agroforestales ubicados en el municipio de Huatusco, Veracruz.

2.2.2 Particulares

- ✚ Determinar la utilidad de la capacitación en campo y la fotointerpretación para la identificación de los sistemas agroforestales de café mediante una clasificación interpretativa.
- ✚ Identificar mediante el uso de Sistemas de Información Geográfica combinado con técnicas de enfoque paramétrico y elaborar un mapa temático de los sistemas agroforestales de café verificado en campo.

2.2.3 Hipótesis

- ✚ El uso de herramientas de Geomática genera el mapa temático de distribución y localización de los sistemas agroforestales de Café en la zona de estudio.

2.3 MATERIALES Y METODOS

2.3.1 Análisis de Imagen de Satelital

La imagen de satélite considerada es de la plataforma SPOT 5 (s5_593312_20081221_3a_J ortorrectificada) con resolución espacial de 20 x 20 m por pixel a profundidad de análisis de 8 Bits, georreferenciada a la proyección Universal Transversa de Mercator (UTM) y esferoide WGS84, los metadatos fueron homogenizados cartográficamente (Martínez & Gaona, 2005).

2.3.2 Enfoque paramétrico de calidad de grano de Café

A partir de los datos paramétricos de las clases de Suelo por aptitud, Pendiente, Temperatura y Precipitación fue propuesto el mapa temático de calidad de granos de Café, los cuales fueron evaluados, reclasificados y adaptados a valores de “0” y “1”, donde el “cero” representa las clases con baja calidad y el valor de “uno” con clase de alta calidad de grano. Además se categorizó a los elementos paramétricos como “APTOS” y “No APTOS” según sus características particulares para la producción agrícola.

Los suelos fueron categorizados con estos dos elementos a partir de las entrevistas a productores y uso de softwares ArcGis® v10.1 y ERDAS ®v10 sobre imágenes de satélite, para ser expresado en el mapa temático de suelo por aptitud. El mapa de pendiente se realizó con base al Manual de Conservación de Suelo y Agua, se aplicó el módulo Surface para obtener la pendiente y el modelo de Elevación Digital, donde se limitaron 8 clases según el manual (0-2, 2-6, 6-10, 10-15, 15-25, 25-40, 40-100 y >100%), todas ellas fueron consideradas como “APTAS” para la producción de café al no reportar ninguna restricción en la producción del cultivo.

Los mapas de temperatura y precipitación fueron generados a partir de información reportada por el Servicio Meteorológico Nacional (SMN) en Normales Climatológicas (1951-2010) y uso del modelo de interpolación de Kriging. Las clases de temperatura fueron en rangos de: <19°C, 19 a 22°C y >22°C, donde las dos primeras fueron consideradas “APTAS” (con valor de uno) y la clase de temperatura >22°C como “No APTA” (con valor a cero). Mientras que la precipitación constituyó cuatro rangos: entre 1700 a 1800; entre 1800 a 1900; entre 1900 a 2000 mm y mayor de 2000 mm. Todas ellas fueron consideradas como “APTAS” (valor de uno) por no tener restricción para la producción intensiva de Café.

Finalmente, el mapa de cobertura fue creado con la participación e identificación directa en campo del tipo de vegetación por los productores, delimitada sobre la imagen digital. Y sus polígonos empleados como centroides de campos de entrenamiento y campos de verificación de los sistemas agroforestales.

2.3.3 Entrevista a Productores

Los recorridos y entrevistas a productores se establecieron sin remuneración económica, el cuestionario aplicado fue con base a las siguientes preguntas: ¿Variedad de café establecido?, ¿Arreglo al que tenía sembrado el café? ¿Nombre común de especies arbóreas?, ¿Destino de las especies maderables?, ¿Propósito de las especies asociadas al cultivo de café?, ¿Número de especies asociadas a su plantación?, ¿Zonas cafetaleras?, ¿zonas y el motivo donde se encuentran las plantaciones?, ¿Por qué la ausencia de plantaciones en la zona norte?, ¿Calidad de grano obtenido en su predio? y ¿Causas por baja y alta calidad del grano, según su experiencia?. La encuesta finalizó cuando la información fuese repetitiva.

2.3.4 Clasificación interpretativa

Consiste en tres procesos. El primero Pre-campo, este interpreta y delimita componentes con apariencia semejante (escala 1:50,000, intensidad media) sobre la imagen digital, convertidos a metadatos con patrones de similitud (Bolstand, 2012; Gutiérrez, 1997) que empleados en la selección de sitios de entrenamiento, verificación y comprobación de los sistemas agroforestales.

El proceso De-Campo, el cual consiste de dos fases. La primera fase es enfocada al reconocimiento directo de coberturas vegetales, focalizada a patrones de vegetación con georreferenciación en la imagen, y descripción de características particulares de tono, color, textura, sombras y aspecto de temporalidad (García, 2006), finaliza la fase al elaborar el mapa base que esquematiza los tipos de cobertura (Fernández, 2001). La segunda fase emplea técnicas del levantamiento fisiográfico, modelos de elevación digital del terreno, cartas temáticas edafológicas (INEGI, 2009b), y usos de suelo y vegetación (1:250000) (INEGI, 1997, INEGI, 2014), técnicas con datos paramétrico, y la consulta a productores sobre la aptitud de las tierras para la producción del Café. Del conjunto de información (bases de datos y mapas temáticos) se extrajo polígonos de verificación de coberturas, y finaliza al pasar de unidades de fotointerpretación a unidades cartográficas (Gutiérrez, 1997).

Por último, proceso de Post-campo, que consistió en ejecutar correcciones sobre las unidades cartográficas digitales y un Área Mínima Cartografía (AMC) de 1 cm² (Ortiz & Cuanalo, 1984).

La cartografía finalizó con la identificación de los componentes y subcomponentes de los sistemas agroforestales y elaboración del mapa digital temático de los agroecosistemas de café.

2.4 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

2.4.1 Fotointerpretación de la Imagen de Satélite

La fotointerpretación y clasificación interpretativa sobre la imagen delimitó cuatro componentes de igual nivel jerárquico, estos fueron verificados durante las encuestas a productores en campo y mapas temáticos del enfoque paisajista. Tales componentes fueron: a) Zona urbana (Zu), b) Bosque Mesófilo de Montaña (BMM), c) Potreros (Pot) y d) Agricultura (Agr).

Los primeros tres mapas temáticos fueron caracterizados sin ninguna confusión por sus firmas espectrales en parámetros de: texturas, brillantes y tonalidad. Sin embargo, el cuarto “Agricultura”, presentó confusión por la complejidad de sus estructuras vegetativas nativas propias del manejo del cultivo, siendo necesario la división del componente tal como lo propuso Moguel & Toledo (2004).

Las clases que comprendieron a los subcomponentes fueron: a) Policultivo Tradicional (PTR) constituidos por especies vegetales inducidas e incluso nativas y plantaciones de Café bajo sombra, b) Monocultivo Especializado (ME) establecido por especie vegetal del género Inga o cultivo semi-sombreado, c) Policultivo Comercial (PC), constituida por especies vegetales comerciales, y d) agricultura de grano o vegetales (AgrG) (Cuadro 2).

Cuadro 2. Caracterización de componentes y subcomponentes de los sistemas agroforestales de café.

Componente	Sub-Componente
1) Zona Urbana (ZU)	
2) Bosque Mesófilo de Montaña (BMM)	
3) Potrero (Pot)	
4) Agricultura (Agr)	a) Policultivo Tradicional (PT) b) Policultivo Comercial (PC) c) Monocultivo Especializado (ME) d) Agricultura de Granos o Vegetal (AgrG)

El proceso de identificación y diferenciación de las coberturas vegetales en los subcomponentes y uso de suelo fue logrado mediante firmas espectrales (brillo y color) que distaron de la vegetación vigorosa del componente BMM y otras estructuras en las bandas visibles de espectro electromagnético azul y rojo (Chuvienco, 2008) y absorción en luz verde.

Los componentes BMM, Pot y AgrG no representaron cartográficamente problemas de identificación y separabilidad como objetos visibles sobre la imagen digital. Sin embargo en la tonalidad de gris oscuro los subcomponentes PT, PC y ME fueron semejantes en la mayoría de los campos de capacitación y verificación por lo que se propuso establecer combinación entre bandas 123 de la imagen (Spot 5), mediante los procesos de análisis de imagen en falso color, textura, forma y tamaño.

Además, los objetos de cada subcomponente fueron relacionados a tonalidades de falso color (Combinación de bandas 321), y la separabilidad se produjo en color rojo intenso (155-200) para vegetación densa en BMM con las de menor intensidad (75-150) para coberturas en subcomponentes PT, PC y ME. No obstante, fue en el proceso de análisis por textura donde se encontró mayor discrepancias y heterogeneidad espacial entre los subcomponentes por rugosidad y suavidad. De manera que, el componente BMM presentó alta heterogeneidad a nivel de gris y textura rugosa tal como fue reportado por García (2006) y Chuvienco (2008); en Pot y AgrG las texturas fueron lisas y homogéneas, mientras que en los sub-componentes PT, PC, y ME la textura fue de baja rugosidad con mediana suavidad lo que permitió su separabilidad.

Por otra parte, se efectuó procesos de identificación de objetos por “forma” lo que fortaleció la divergencia entre el subcomponente ME con los subcomponentes PT y PC, y no así entre el componentes BMM con PT y PC debido a las características semejantes por manejo del cultivo. Por último, en el proceso por “tamaño”, este fue muy limitado para la separación de las áreas entre componentes y subcomponentes debido a la resolución espacial de la imagen.

El mapa temático de cobertura y distribución espacial obtenido en el proceso tanto de los componentes ZU, BMM y Pot como de los subcomponentes PT, PC, ME y AgrG es mostrada en la Figura 13, mientras que el Cuadro 3 reporta el área que cubre cada una de ellas. La superficie estimada con base a la fotointerpretación, clasificación interpretativa y análisis de imágenes para los componentes ZU, BMM y Pot fue de 3%, 22% y 10% respectivamente, mientras que para los

subcomponentes PTR, PC, ME y AgrG fue de 47%, 12%, 1% y 5% respectivamente al área de estudio.

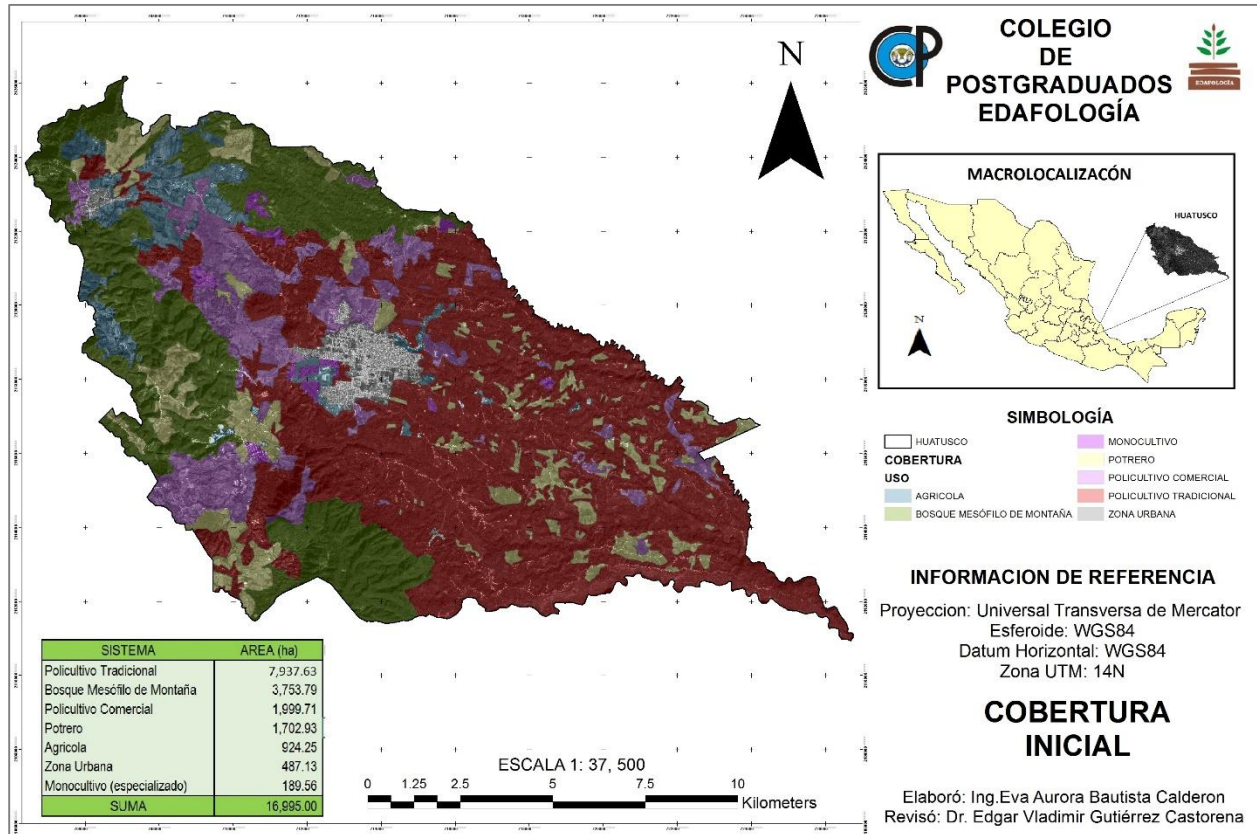


Figura 13. Cobertura del área de estudio para los componentes y subcomponentes con enfoques paramétricos. (a) ZU, (b) BMM, (c) Pot, (d) PT, (e) PC, (f) ME y (g) AgrG.

Cuadro 3. Superficie de los componentes y subcomponentes del área de estudio obtenido en procesos de análisis de imagen.

Componentes y Subcomponentes	Superficie (ha)
Zona Urbana (ZU)	487.13
Bosque Mesófilo de Montaña (BMM)	3,753.79
Potrero (Pot)	1,702.93
Agricultura (Agr)	
Policultivo Tradicional (PT)	7,937.63
Policultivo Comercial (PC)	1,999.71
Monocultivo Especializado (ME)	189.56
Agricultura de grano o vegetal (AgrG)	924.25

2.4.2 Suelo

El mapa temático por aptitud de suelo por la clasificación campesina (entrevista a productores) y recorridos en campo para la producción de Café (Figura 14) fueron: primeramente la zona NO APTA que se encuentra localizada en la parte Noroeste, tiene suelos someros y textura muy fina denominada por los pobladores como “polvillo”, mientras que la segunda clasificada como APTOS se localizada en la parte sur, son suelos profundos, con mayor captación y retención de humedad.

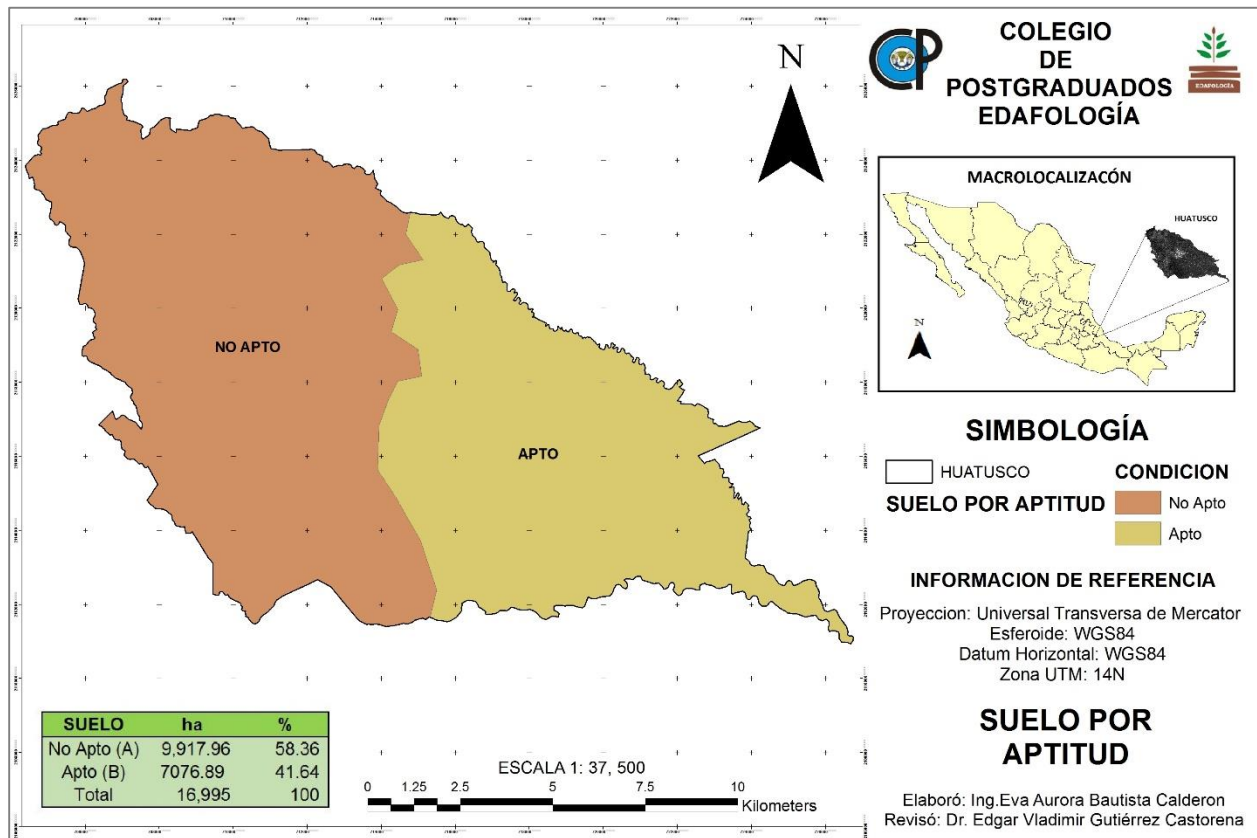


Figura 14 Mapa temático de suelo con clase tipo A = NO APTO, y tipo B = APTO.

2.4.3 Pendiente

El mapa temático de pendiente (Figura 15) fue obtenido con base a la reclasificación del Modelo de elevación digital. Por consiguiente, las áreas con pendiente de 0-2% reportan una superficie de 28.3%, la pendiente de 2-6% cubre el área de 29.3%, las pendientes del 6-10% presentan una superficie de 19.6%, la pendiente de 10-15% tiene 11.1% de la superficie, pendientes de 15-25%

cubren el 6.4% de la superficie, pendientes de 25-40% cubren una superficie de 3.2, pendientes de 40-100% cubren el 1.5% de la superficie y finalmente las pendientes mayores a 100% cubren el 0.5% de la superficie total.

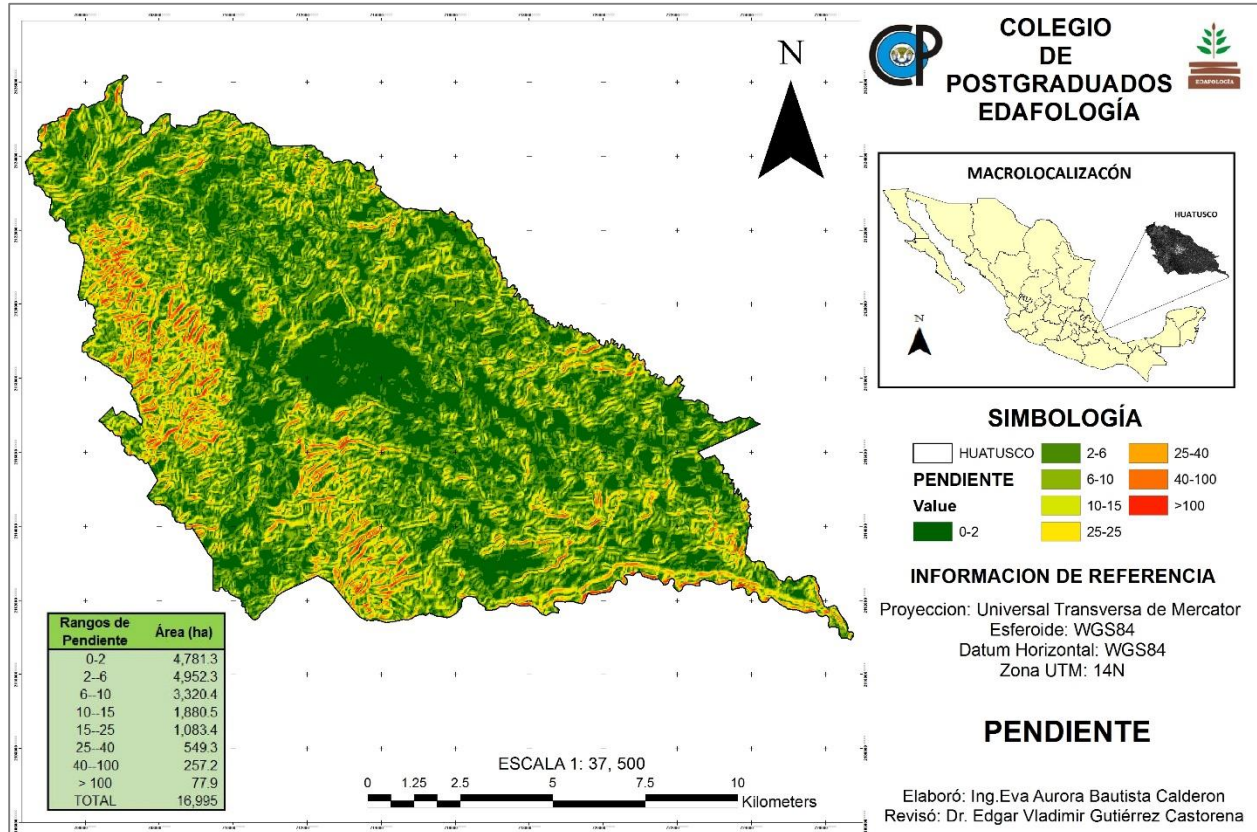


Figura 15 Mapa temático de pendiente

2.4.4 Temperatura

La temperatura óptima para la producción del Café en los sistemas agroforestales reportados por Martinez et al., (2004) y Perez et al., (2005) establecieron que los parámetros para obtener un alta calidad del grano deben ser menor a 19°C, o máximo entre 19 y 22 °C para una grano de mediana calidad, y a temperatura por encima de 22 °C se producen granos de menor calidad.

El mapa temático de temperatura (Figura 16) ubicó y cuantificó la superficie correspondiente a cada uno de los rangos, donde para obtener granos de alta calidad corresponde una superficie de

19.59%, mediana calidad cubre un área de 59.02% y baja calidad cubre una superficie de 22.39% del área de estudio.

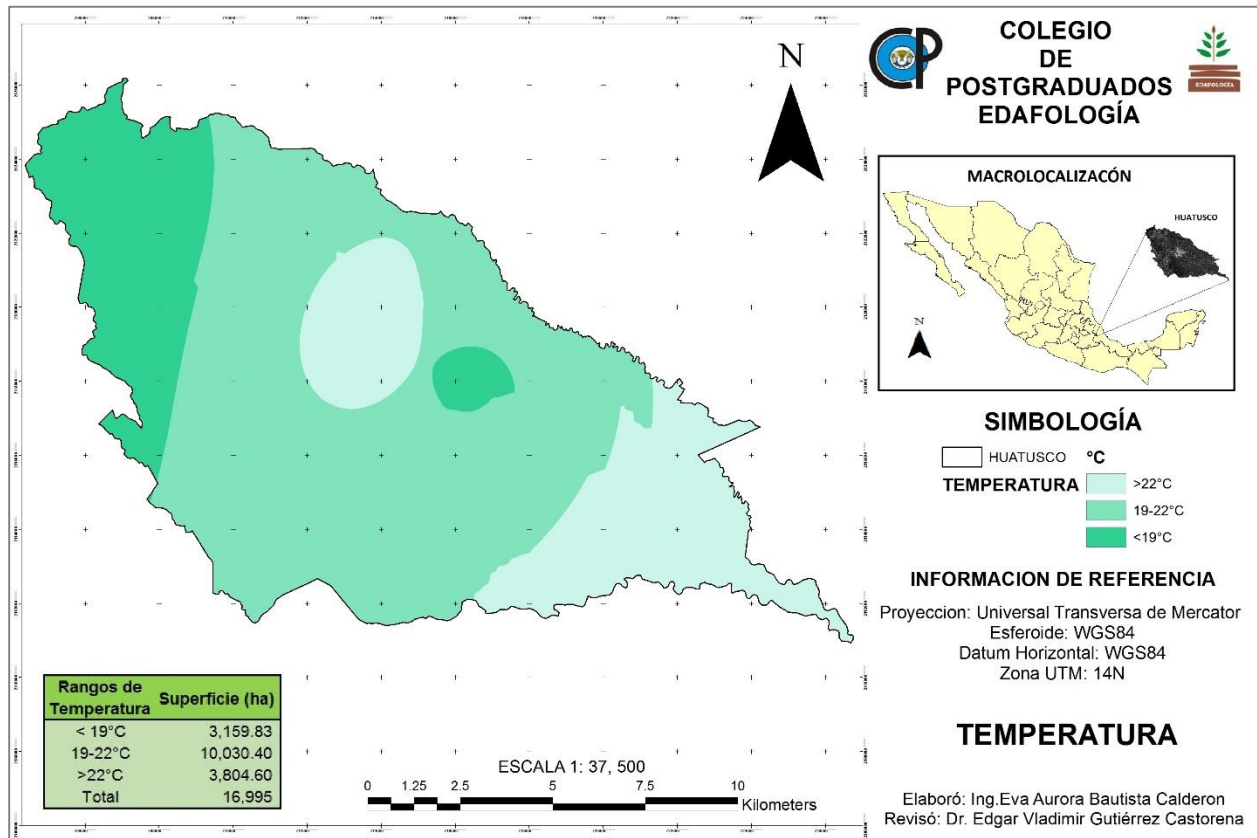


Figura 16 Mapa temático de temperatura

2.4.5 Precipitación

El mapa temático de precipitación (Figura 17) obtenido con base al modelo espacial de Kriging es categorizado con clase APTA para toda el área, debido a las necesidades hídricas del cultivo que son cubiertas por la lluvia y establecida como un óptimo mínimo entre 1400 a 2000 mm anuales (Lara, 2005) o entre 1600 y 1800 mm anuales (Benegas, 2009) para obtener granos con alta calidad. El mapa muestra áreas que delimitan zonas de menor a mayor precipitación, sin embargo la precipitación se ubica por arriba del requerimiento para la producción del cultivo.

Como resultado se obtuvieron áreas con una superficie del 16.3% en rangos de 1700 a 1800 mm/anuales, otra que cubre el 31.4% con precipitación que oscila entre 1800 a 1900 mm, una

tercera que cubre el 25.8% con rangos entre 1900 y 2000 mm cubre el 26.5% y por ultimo una precipitación mayor a los 2000 mm que cubre una superficie del 25.8%.

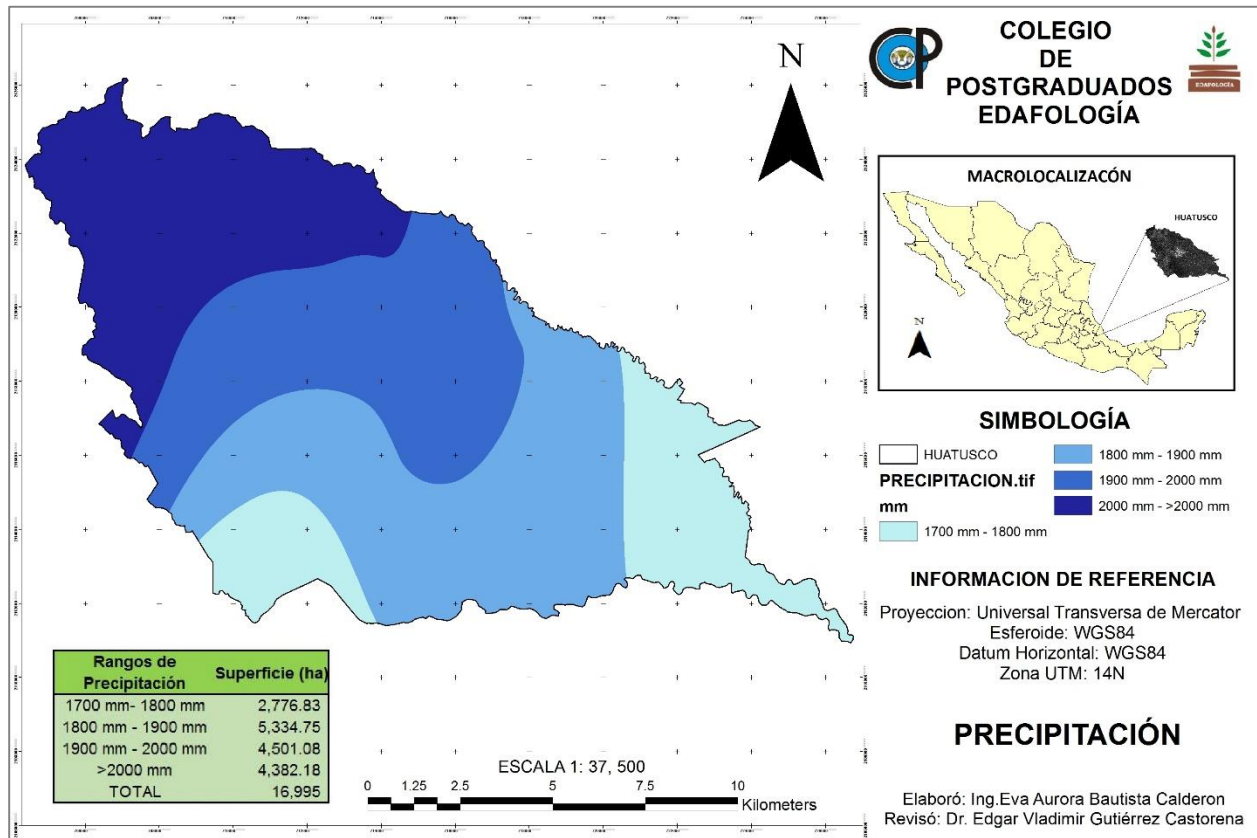


Figura 17 Mapa temático de precipitación

2.4.6 Mapa temático de calidad de grano de Café

El mapa temático (Figura 18) de calidad de grano fue obtenido a partir de los mapas temáticos con datos paramétrico y la experiencia del productor. Para la obtención del mapa fue necesario realizar una recategorización y asignación de valores a las clases de datos, de modo que: a) al suelo por aptitud se asignó un valor de cero a zonas NO APTAS y un valor de uno a zonas APTAS; b) para las clases de pendiente la valorización fue: un valor de uno a todas las clases, debido que no presentan restricción que limiten la buena calidad del grano; c) a las clases de precipitación se recategorizó con valor de uno APTO al no tener una limitante hídricas en el área de estudio, y d) a las clases de temperatura, que se recategorizaron en tres: el primero, con valores de cero a zonas NO APTO y temperaturas promedio mensuales mayores a 22°C, con valor de 0.5 medianamente

APTO a temperaturas entre 19 y 22°C y finalmente el valor de uno a temperaturas menores a 19°C APTOS.

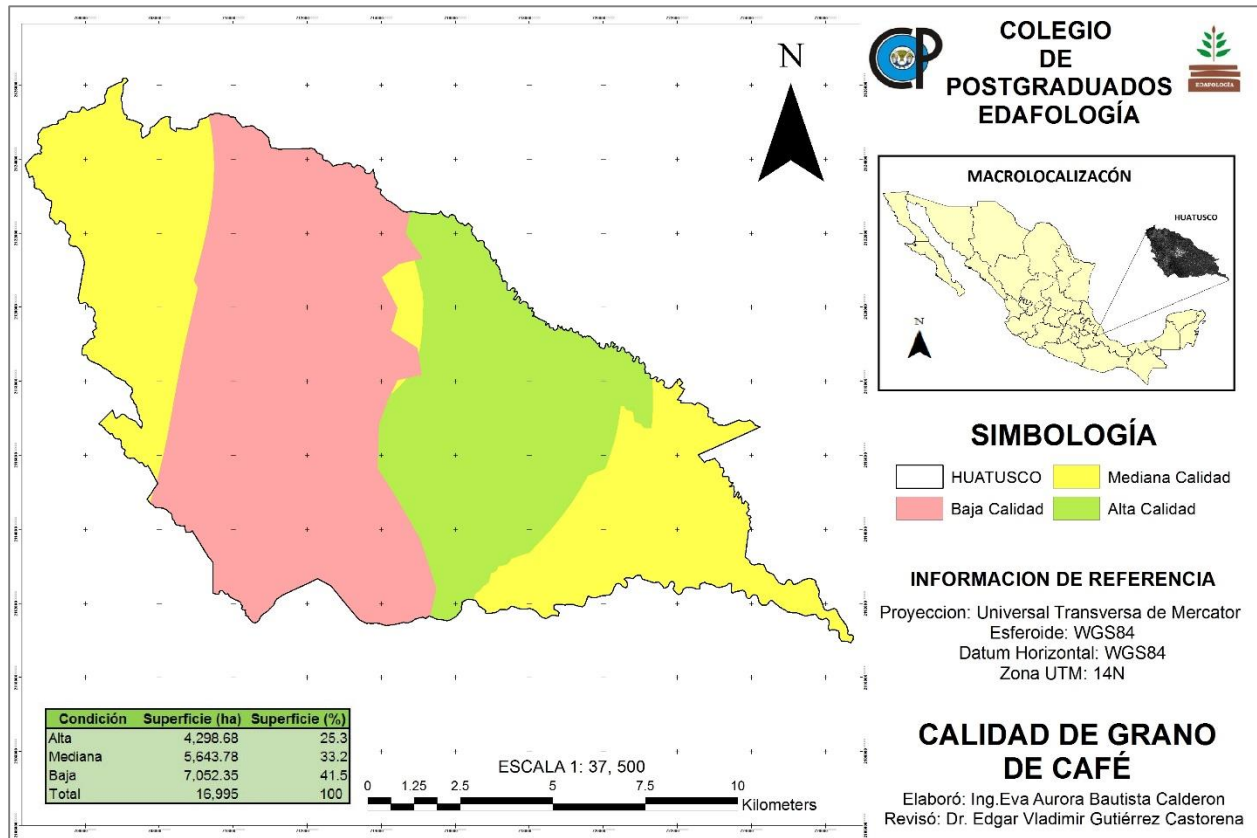


Figura 18 Mapa temático por calidad de grano

Los resultado de ubicación y superficie cubierta por clase de calidad fueron: a) de la clase C que representa el 45.5% de la una superficie con baja calidad, b) la clase B de mediana calidad que cubre una superficie de 33.2% y finalmente c) la clase A de alta calidad de grano con el 25.3% de la superficie total.

2.4.7 Polígonos de verificación y comprobación sobre el mapas temáticos vectoriales

Para crear el mapa temático vectorial fue necesario sobre-posicionar los mapas temáticos de suelo por aptitud, pendiente, temperatura y precipitación, el cual generó 526 polígonos con características particulares entre componentes y subcomponentes, sin embargo al establecer un criterio cartográfico de área mínima cartografiada mínima de 6.25 ha según la escala de trabajo

(1:50,000) esto los reagrupo en tan solo 60 polígonos (Figura 19), dando como resultado al mapa temático vectorial de los sistemas agroforestales del cultivo de Café.

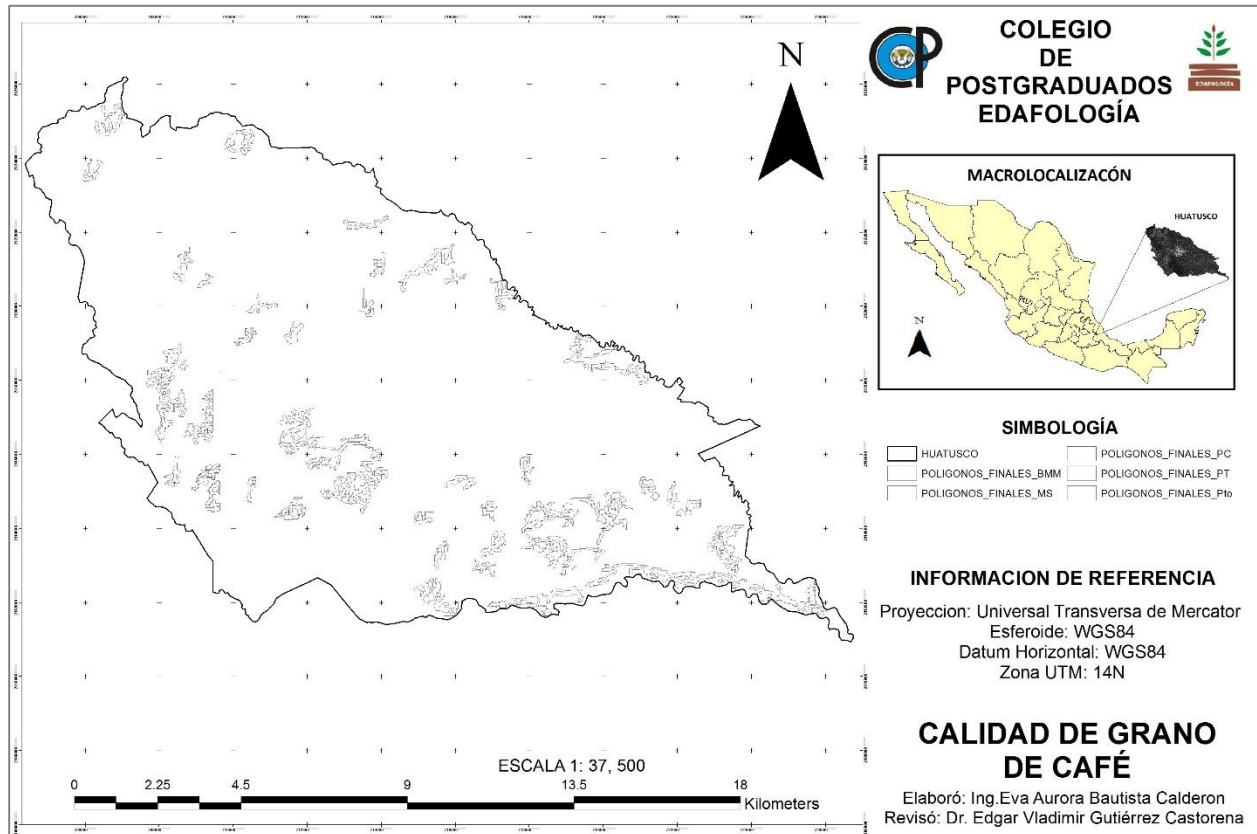


Figura 19 Mapa temático polígonos de muestreo

A partir de los polígonos fueron creados centroides georreferenciados respectivamente para cada uno de ellos (Figura 20) que a su vez fueron empleados como puntos de verificación y comprobación de los componentes y subcomponentes sobre el mapa temático por clasificación interpretativa.

De tal manera, los componentes BMM y Pot fueron asignados tres puntos de verificación respectivamente, debido a la divergencia y heterogeneidad con los subcomponentes de los sistemas (PT, PC y ME) (Figura 20). Además de identificar las principales características de los puntos de verificación por componente, las cuales son: para el BMM fueron suelos por aptitud NO APTO, pendientes entre los 40 y 100%, precipitación mayor a los 1900 mm anuales y temperatura media anual entre los 16 y 20 °C, en una superficie de 68.37 ha. Mientras que, para el componente Pot,

las características fueron: suelos NO APTOS, con pendientes entre 40 y 100%, precipitación media anual por arriba de los 1900 mm, y temperatura media anual menor a los 18°C, de los cuales ambos representan una superficie de 98.21 ha.

Por otra parte, la capacitación y verificación de los subcomponentes en los centroides fueron: a) para el subcomponente ME, únicamente fue seleccionado un punto con característica de suelo NO APTO, pendiente entre el 40 y 100%, precipitación media anual por arriba de los 1900 mm, temperatura media anual que oscila entre los 16 y 18 °C que cubre una superficie de 5.81 ha; b) para el subcomponente de PT fueron 46 sitios de verificación, estos variaron principalmente en dos tipos de pendiente, los primeros en terrenos que oscilan entre el 10% y el 15% y los segundas con pendientes entre el 40% y el 100%, la precipitación media anual fue desde 1700 hasta 2000 mm, la temperatura media anual osciló entre los 16 y 20°C, los centroides por aptitud del suelo fueron recategorizados como 9 sitios APTOS y 37 NO APTOS (Figura 20).

Para el subcomponente de PC del sistema agroforestal se estableció 7 sitios de verificación, de los cuales seis de ellos se ubican en pendientes mayores del 40% y solo un se ubicó entre 2 y 4%, la precipitación media anual oscila entre los rangos entre 1800 a 2000 mm y una temperatura media anual entre los 16 y 20°C, el tipo de suelo según la experiencia de los productores fue NO APTO para el cultivo del Café (Figura 20).

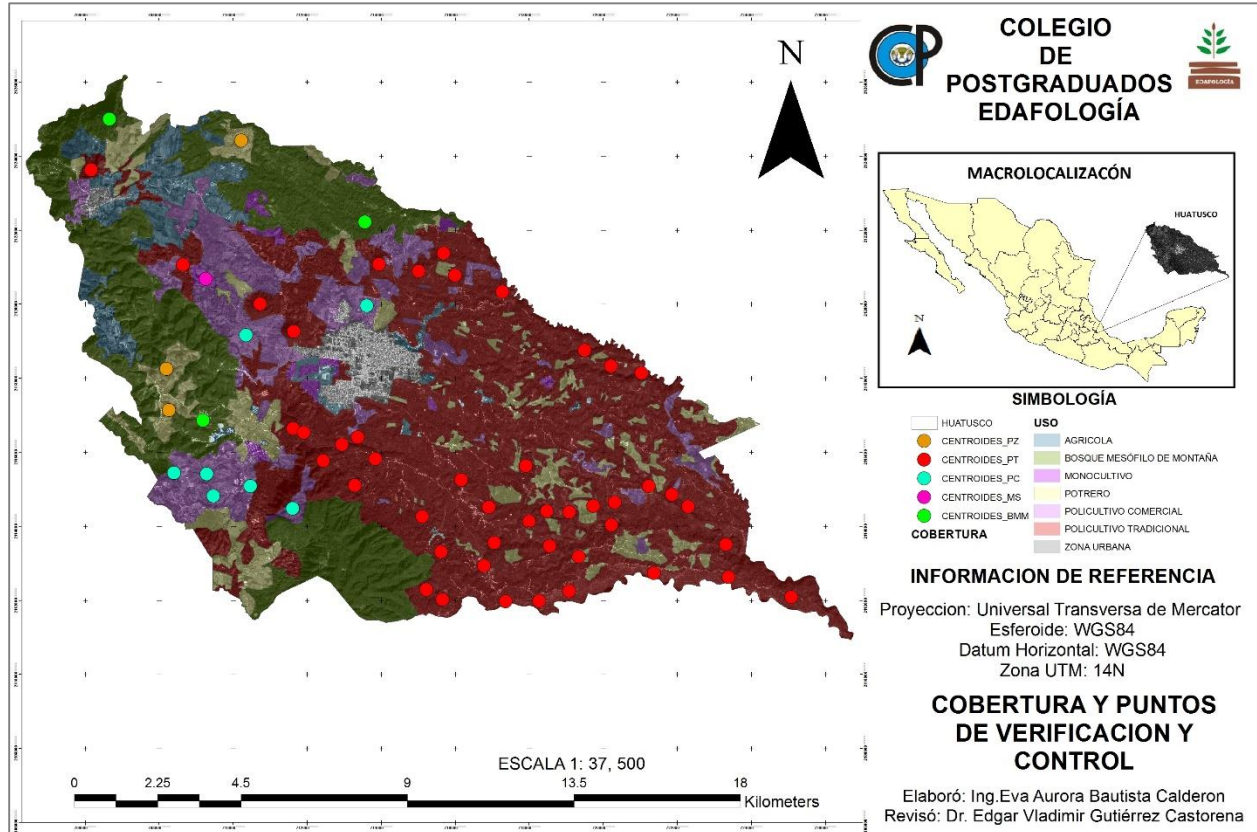


Figura 20 Mapa temático con puntos de comprobación y verificación

2.4.8 Validación de la clasificación interpretativa

La validación de componentes y subcomponentes obtenida por la clasificación interpretativa de la imagen fue a partir de recorridos directos en campo, y su comparación sobre el mapa temático de cobertura. Este recorrido verificó y corrigió los linderos entre componentes y subcomponentes y fueron realizados con apoyo del personal técnico de la Coordinación de Fomento Agropecuario, que juntos se estableció una estrategia de verificación de polígonos mediante la división del área de estudio en cuatro cuadrantes bajo el criterio de accesibilidad a los sitios y en sentido de las manecillas del reloj (Figura 21) evitando recorridos repetitivos. Los comentarios y experiencias vertidas por productores de Café definió el mapa final y pasó de un levantamiento fisiográfico con enfoque paisajista a un mapa de zonificación campesina de los sistemas agroforestales de café de la región montañosa tal como indica (Ortiz & Cuanalo, 1984) en otros estudios.

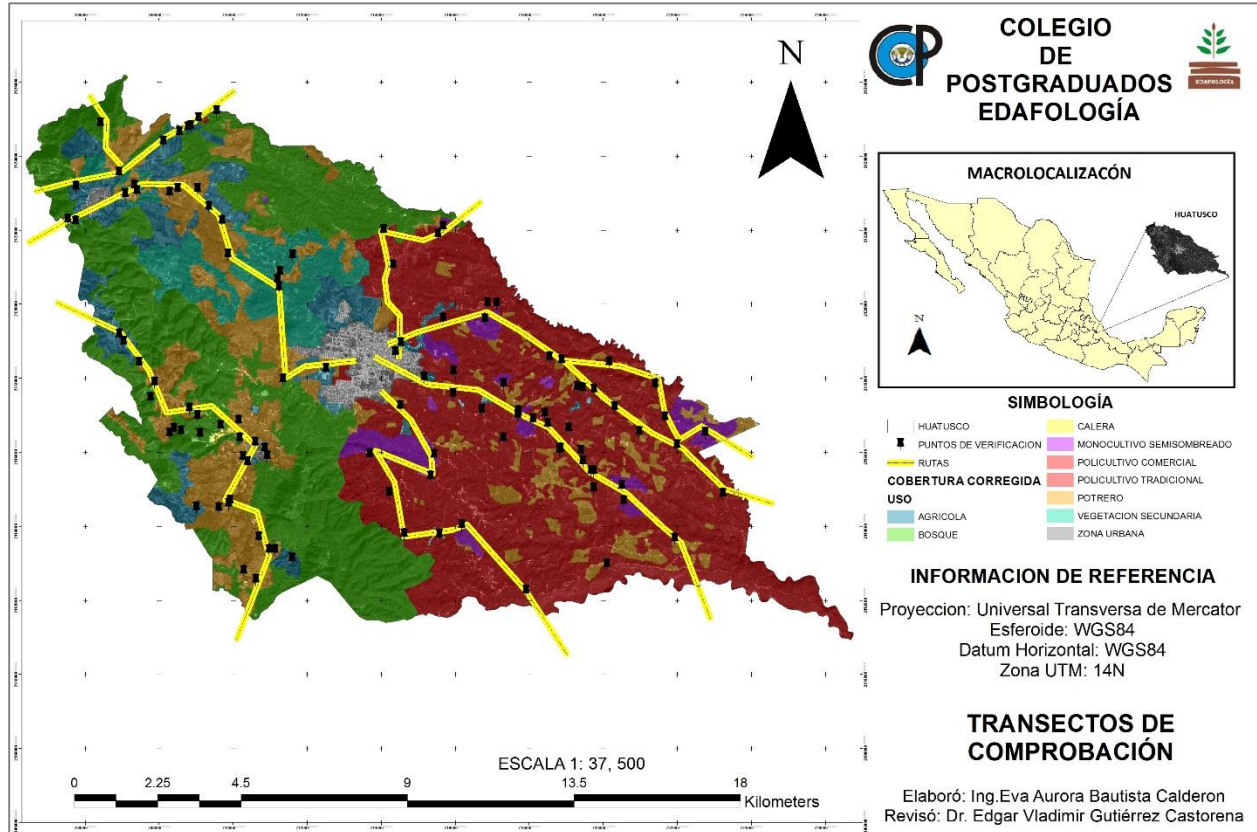


Figura 21 Mapa temáticos de transectos de comprobación

El mapa resultante de zonificación campesina fue empleado para establecer y ubicar 111 sitios georreferenciados que precisan el tipo de cobertura vegetal agroforestal, entre los cuales, fueron seleccionados 40 sitios como campos de comprobación. La Figura 22 muestra los sitios finales de comprobación para cada sistema agroforestal del cultivo de Café en componentes del BMM y Pot, obtenidos, así como los subcomponentes PT, PC, Me y AgrG mediante el álgebra de mapas, levantamiento fisiográfico de la clasificación interpretativa y zonificación campesina por los productores.

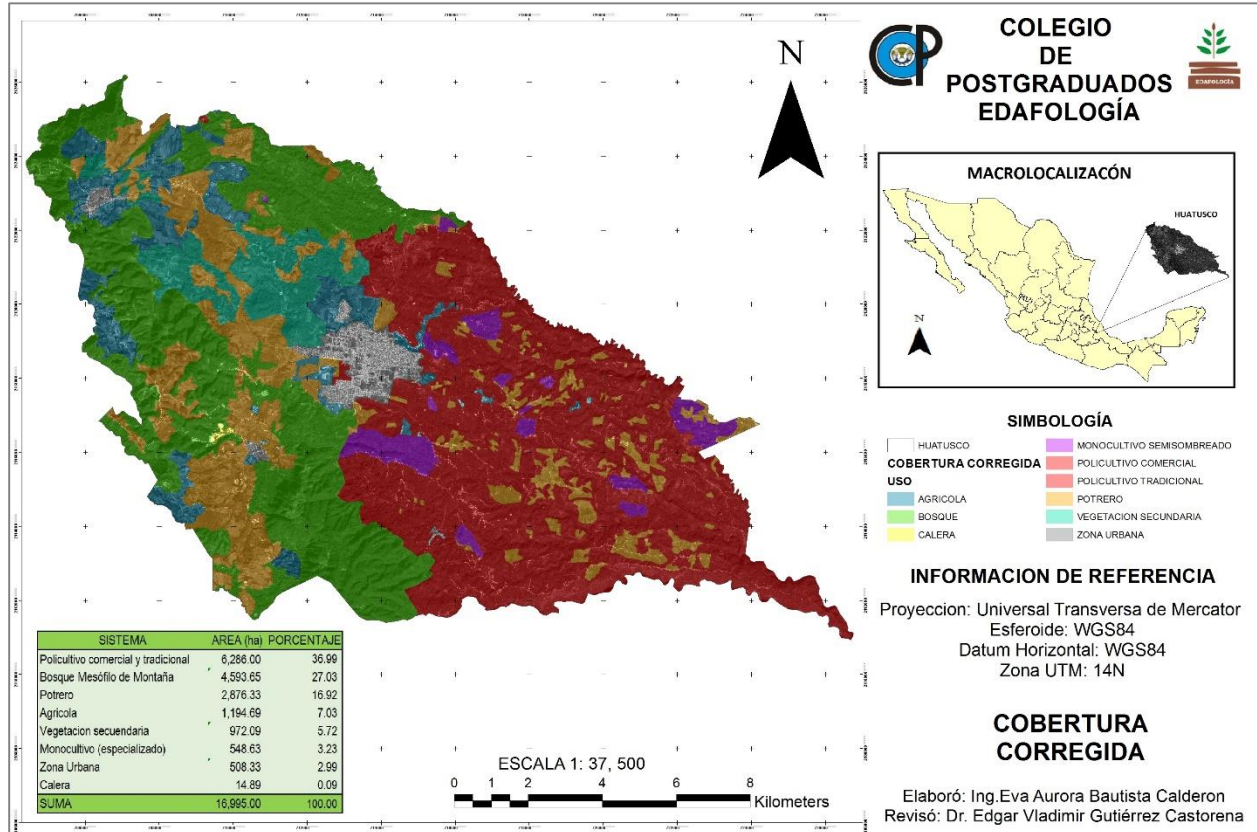


Figura 22 Mapa temático resultante de componentes y subcomponentes

Una vez efectuado todas las correcciones se realizó una comparación de áreas entre los componentes y subcomponentes (Cuadro 4) denotando que: a) el BMM incrementó la superficie en un 4.94% pero decremento en el número de polígonos; b) en el Pot reporto un ampliación del 6.9% con incremento en el número de polígonos. Mientras que, los subcomponentes fueron: a) en los PT y PC un decremento la superficie del 21.48%, b) en el ME un incremento del 2.11%. Además del incremento en la zona agrícola del 0.12% y coberturas en vegetación secundaria y zona de caleras.

Además de las correcciones de linderos, las entrevistas en campo a productores enfatizaron las especies vegetativas más utilizadas como sombra en la producción de café, los cuales fueron identificadas como: Coquito plumoso, Primavera, Cedro rosado, Mango piña, palma criollito, Cedro rojo, Cacao, Aguacate, Chalahuite, Naranja, Vainillo de hoja ancha, Macadamia, Chichene, Palma, Plátano tabasco, Fresno, Tinaja, Malta, Roatán, Brebil, Jinicuil, Ixpepe, Sopa de pan, Luminaria, Pimienta y Zapote.

Mientras que las especies vegetales nativas en el componente BMM fueron: Guayabillo, Encino rojo, encino blanco, Roble, Liana, y Aguacatillo.

Cuadro 4 Comparación de áreas entre componentes y subcomponentes con la verificación de linderos

Sistema	Cobertura inicial			Cobertura final		
	Área (ha)	Polígonos	%	Área (ha)	Polígonos	%
Bosque mesófilo de montaña	3,753.79	10	22.09	4,593.65	18	27.03
Policultivo Tradicional	7,937.63	111	46.71	6,286.00	109	36.99
Policultivo Comercial	1,999.71	36	11.77			
Potrero	1,702.93	96	10.02	2,876.33	116	16.92
Agrícola	924.25	26	5.44	1,194.69	32	7.03
Zona Urbana	487.13	4	2.87	508.33	5	2.99
Monocultivo (especializado)	189.56	11	1.12	548.63	17	3.23
Vegetación secundaria	-	-		972.09	14	5.72
Calera	-	-		14.89	1	0.09
Suma	16,995.00	294.00	100.00	16,995	312	100

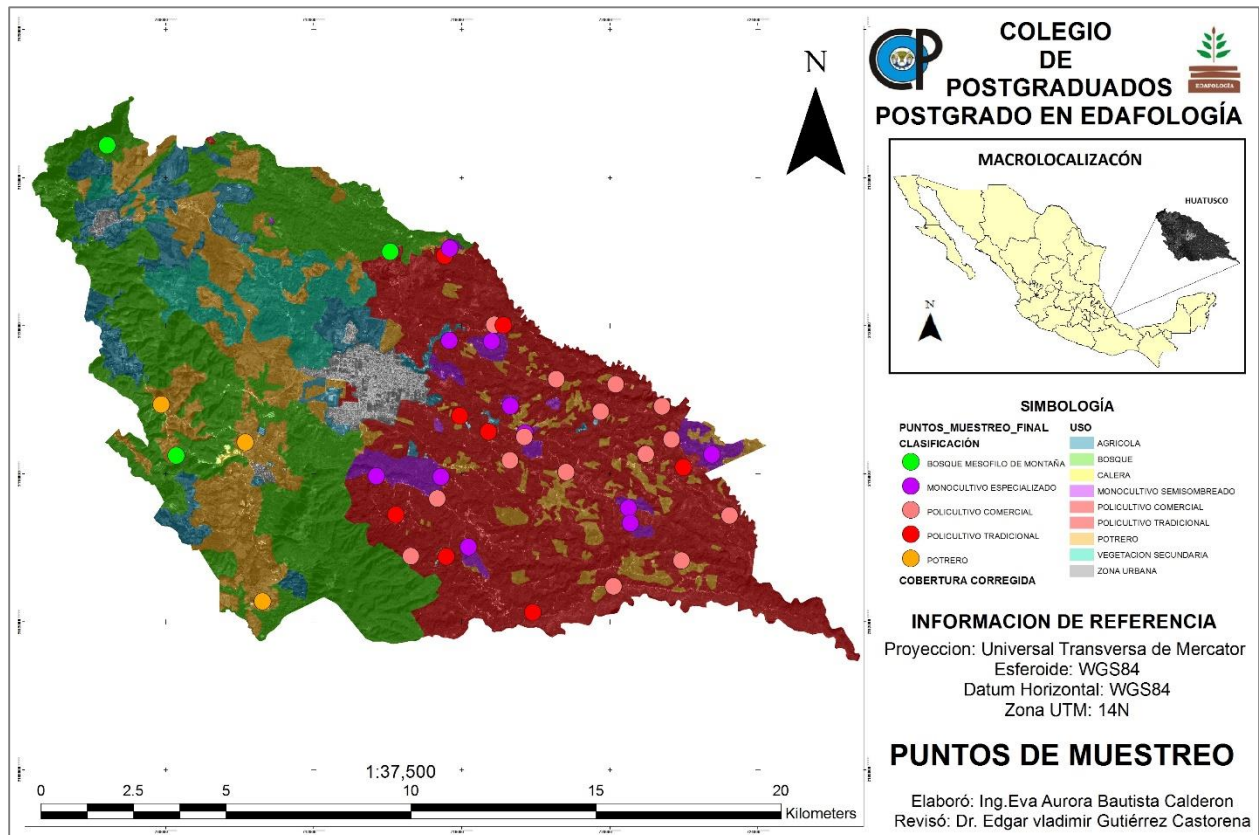


Figura 23 Indica los sitios de comprobación de los componentes y subcomponentes de los sistemas agroforestales de café

2.5 CONCLUSIONES

La capacitación directa en campo por recorridos ya sea puntual o por transectos en los diversos sistemas agroforestales de café y su comparación con las imágenes de satélite (fotointerpretación) evidencia que no es posible realizar interpretación visual sobre la imagen de los subcomponentes de Policultivo tradicional, Policultivo comercial y Monocultivo Especializado debido a las características espectrales y espaciales de la propia escena (textura, brillo, color, reflectancia).

Los Sistemas de Información Geográfica permiten optimizar el trabajo previo en campo, así como posterior al mismo, al combinarse con técnicas de datos paramétrico ofrecen una visión amplia de las características particulares ambientales, y permiten establecer estrategias aplicadas en campo para la verificación y comprobación de las diversas coberturas. Por otra parte, la técnica de clasificación interpretativa otorga una gran aproximación a los tipos de cobertura vegetal nativa o comerciales. Sin embargo, el intérprete debe tener capacitación previa y conocimiento en campo para poder identificar las coberturas sobre las imágenes de satélite y minimizar los errores de caracterización y agrupación.

A pesar de que la clasificación interpretativa da buenos resultados en cuanto al reconocimiento de los tipos de cobertura es necesario aplicar otros tipos de procesamientos digitales con el fin de añadir información específica de la intensidad radiométrica y contribuir a mejorar la interpretación visual. Sin embargo, en cualquier técnica de clasificación es importante realizar visitas a campo con el propósito de capacitar, verificar y comprobar las clasificaciones de los objetos con objetivo de validar nuestra clasificación.

3 CARBONO EN SISTEMAS AGROFORESTALES DE CAFÉ, BOSQUE MESOFILO DE MONTAÑA Y POTRERO

3.1 INTRODUCCION

De acuerdo con el Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC), el término “cambio climático” se refiere a un cambio en el estado del clima que es identificable, provocado por un cambio en el valor medio y/o en la variabilidad de sus propiedades, persistiendo por un periodo prolongado (decenios o periodos más largos). Denota todo cambio del clima a lo largo del tiempo, tanto si es debido a la variabilidad natural como si es consecuencia de la actividad humana (IPCC, 2007).

El clima global está siendo alterado significativamente debido a la emisión masiva de los gases de efecto invernadero (GEI), tales como el dióxido de carbono (CO₂) el cual contribuye más al calentamiento global (Ávila *et al.*, 2001), metano (CH₄), óxido nitroso (N₂O), clorofluorocarbonos y vapor de agua, que contribuyen a un incremento global de la temperatura (IPCC,2001; Cerda, 2013). Las emisiones anuales de GEI crecieron alrededor de 80% entre 1970 y 2004, pues pasaron de 21 a 38 Giga Toneladas (Gt) (IPCC, 2007).

El CO₂ es el gas de mayor importancia desde el punto de vista del calentamiento global (Casanova, 2011) convirtiéndose en un problema de preocupación mundial ya que en los últimos 200 años ha aumentado de 280 a 350 ppm de CO₂ en la atmósfera, su aumento continua con una tasa promedio superior a 1 ppm al año (Deans *et al.*, 1996). Algunos de los factores que inducen a las emisiones de los GEI son el cambio de uso de la tierra (FAO, 2007), la deforestación, el uso masivo de combustibles fósiles con fines industriales y de transporte (Brown 1992, Dixon 1995), los cuales afectan la salud humana, la seguridad alimentaria y los ecosistemas naturales (IPCC 2007, CEPAL 2009).

A nivel mundial, el C se cicla a través de cuatro depósitos principales en el planeta, lo cuales son la atmósfera, la tierra, los océanos y otros ambientes acuáticos, así como los sedimentos y las rocas. Gran cantidad de carbono orgánico se encuentra en las plantas terrestres, lo que representa el carbono de los bosques y pastos; constituye el sitio principal de la fijación fotosintética de CO₂ (Alfaro *et al.*, 2006). Los ecosistemas contienen depósitos importantes de carbono con una

dinámica que puede impactar e interactuar con concentraciones de CO₂ atmosférico (Bradford *et al.*, 2008).

Una forma de mitigar sus efectos es almacenarlo, el suelo es el almacén de carbono más importante en los ecosistemas terrestres, la mayor concentración de C se encuentra en las capas superficiales del suelo (Acosta, 2009). El sistema suelo-vegetación desempeña un papel importante en el aumento o en la reducción de las concentraciones de CO₂ dependiendo de la velocidad de formación y descomposición de la materia orgánica (Segura *et al.*, 2005).

Ecosistemas como los bosques y las selvas lo capturan, almacenan y liberan CO₂ como resultado de los procesos de fotosíntesis, respiración y degradación de la materia orgánica (MO). Este servicio ambiental que proporcionan estos ecosistemas como secuestradores de C (sumideros) en sus estructuras leñosas por periodos prolongados, permite equilibrar la concentración de este elemento. (Ávila *et al.*, 2001; Acosta *et al.*, 2002; Acosta *et al.*, 2009).

La importancia de la captura de C por los bosques, se debe a que mitigan el proceso de cambio climático global y actualmente contribuyen a casi un sexto de las emisiones de carbono mundial cuando han sido abiertos, explotados en exceso o degradados y además poseen el potencial de absorber un décimo de las emisiones mundiales de carbono previstas para la mitad de este siglo en sus biomásas, suelos y productos y almacenarlos a perpetuidad (FAO, 2014). El potencial de captura de carbono por parte de las comunidades vegetales varía dependiendo de la composición florística, la edad y la densidad de población de cada estrato por comunidad vegetal (Acosta *et al.*, 2002).

De manera general, en los bosques naturales el C se encuentra en equilibrio, pero cuando son deforestados este equilibrio es alterado y da lugar a considerables emisiones de CO₂, sin embargo, existen lugares donde la deforestación no puede ser detenida, por ello es necesario un manejo adecuado para reducir al mínimo posible las pérdidas de C hacia la atmósfera (FAO, 2002).

México se encuentra en el lugar 15 de países con mayores emisiones de gases de efecto invernadero a nivel mundial (Casanova, 2011), el 70% de las emisiones son provocadas principalmente por los procesos de combustión de los sectores energéticos, industriales, de transporte y otros servicios y el 30% por el proceso de cambio del uso de la tierra (Maser y Sheinbaum, 2004).

Ante esta situación es necesario encontrar estrategias productivas, ecológicas y económicamente sostenibles, una alternativa para la restauración y recuperación de aquellos ecosistemas que han sido alterados son los Sistemas Agroforestales (SAF), los cuales son formas de uso de la tierra en donde los árboles o los arbustos presentan una interacción biológica y económica en un misma superficie con especies agrícolas, árboles y ganado, combinados deliberadamente o de manera simultaneo o secuencial (Nair, 2004; Ávila *et al.*, 2001; Mendieta y Rocha, 2007).

Los SAF's son de gran importancia para combatir el cambio climático debido a que representan sumideros importantes de CO₂, son capaces de almacenarlo en la biomasa aérea y subterránea donde se almacenan por largos periodos (Ávila *et al.*, 2001; Gayoso y Guerra 2005); actualmente su importancia para mitigar el cambio climática es reconocida, pero las investigaciones realizadas con respecto a captura de carbono en SAF's siguen siendo pocas en comparación con otros usos de la tierra (bosques y plantaciones forestales) (Andrade e Ibrahim 2003), por tal motivo los SAF's no han sido considerados en el pago de servicios ambientales por la falta de información que cuantifica el potencial que estos tienen sobre el almacenamiento y fijación de C (Ávila *et al.*, 2001). Por ello, es necesario conocer la capacidad de estos sistemas para capturar C y así determinar la compensación económica que los productores deberían recibir por los servicios ambientales que brindan con sus actividades de acuerdo con lo establecido por los mercados de C (Mena *et al.*, 2011).

En el municipio de Huatusco de Cuellar, Veracruz existen diferentes usos de la tierra ,entre ellos destacan los SAF's de café, ya que además generan otros bienes como madera, frutas, medicinas, fibra y proveen servicios ambientales como la captura de C y la conservación de la biodiversidad. El presente estudio pretende contribuir con datos sobre su capacidad de captura de carbono por estos sistemas.

3.2 OBJETIVOS E HIPOTESIS

3.2.1 General

- ✚ Cuantificar el contenido de C orgánico del suelo y biomasa superficial en diferentes sistemas Agroforestales de café, en el municipio de Huatusco de Cuellar, Veracruz.

3.2.2 Particulares

- ✚ Determinar el contenido de C orgánico almacenado en el suelo de bosque mesófilo de montaña y potrero.
- ✚ Obtención del contenido de C presente en la biomasa del mantillo y hojarasca de bosque mesófilo de montaña y potrero.

3.2.3 Hipótesis

- ✚ Los contenidos de C orgánico almacenado en el suelo depende de la asociación vegetal y del uso del suelo.
- ✚ El bosque mesófilo de montaña almacena mayor cantidad de C en el suelo que los agroecosistemas de café y potrero.

3.3 MATERIALES Y METODOS

3.3.1 Descripción de los sitios de muestreo

En el municipio de Huatusco de Cuellar, situado en la región de “Las Montañas” se muestrearon 40 sitios ubicados en: tres en Bosque Mesófilo de Montaña (BMM), tres en Potrero (Pto), ocho en Policultivo Tradicional (PT), quince en Policultivo Comercial (PC) y once en Monocultivo Especializado (ME) (Figura 24).

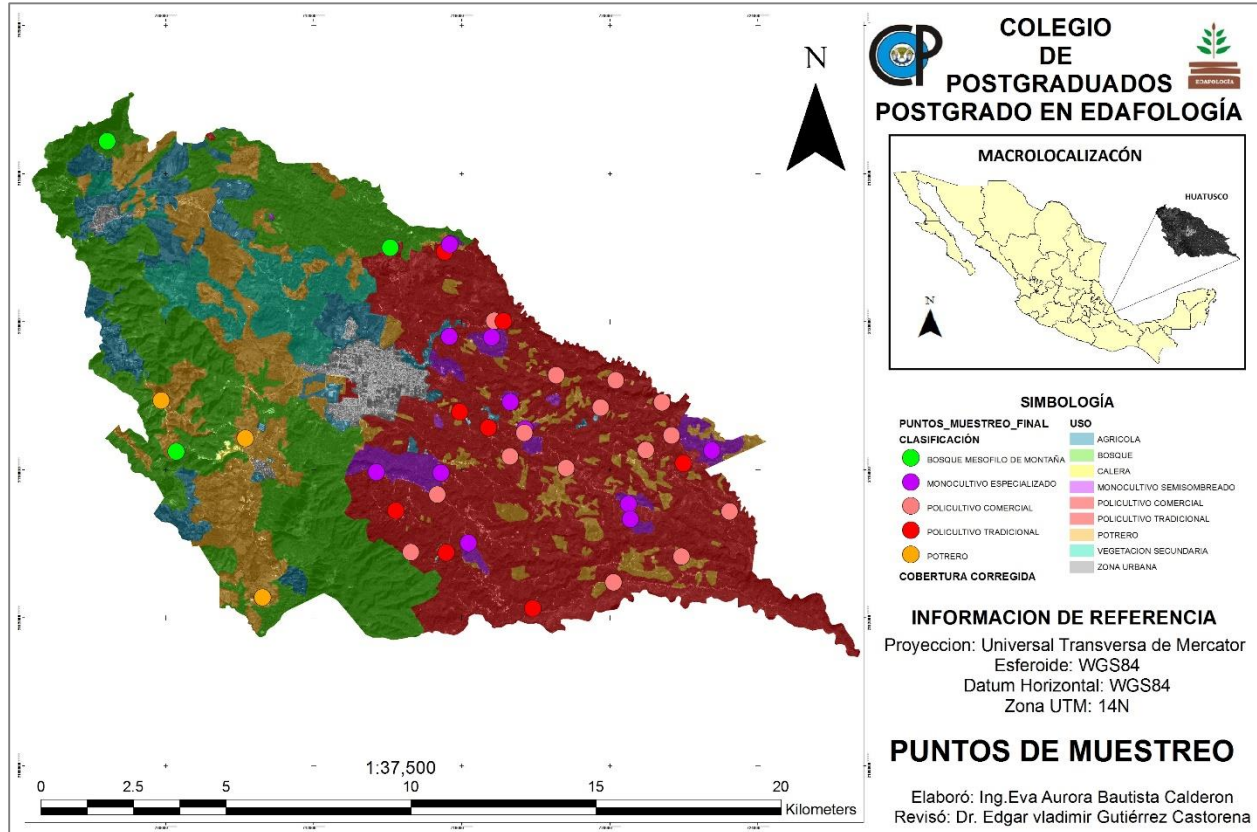


Figura 24 Localización de los sitios de muestreo para la estimación del contenido de C, en el Mpio. de Huatusco, Ver.

3.3.2 Obtención de las muestras de suelo

En cada uno de los sistemas de estudio se delimitó una unidad de muestreo (UM) la cual consistió en un marco rectangular de 25 m x 4 m (100m²) (Etchevers *et al.*, 2005).

Para la cuantificación del C edáfico se colectaron tres muestras simples distribuidas lo más heterogéneamente posible dentro cada una de las UM para posteriormente homogenizar las muestras y obtener una muestra compuesta.

El muestreo consistió en realizar una excavación de 20 cm de ancho por 20 cm de largo y 20 cm de profundidad, en el cual se seleccionó una cara para tomar la muestra de suelo.

A la profundidad de 20 cm, que se obtuvo la muestra se encuentra la mayor concentración de C y según García *et al.*, (2006) y Acosta *et al.*, (2009) la concentración de carbono es menor a medida que aumenta la profundidad provocado principalmente por la falta de perturbación del suelo en las

capas inferiores. Cada una de las muestras de suelo se guardó en una bolsa de plástico etiquetada para posteriormente transportarse al laboratorio.

3.3.3 Preparación de las muestras de suelo para la determinación de C

La preparación del suelo en laboratorio consistió en homogenizar cada una de las muestras compuestas, realizando el procedimiento de cuadrantes extremos sobre una superficie plana y dividiendo en cuatro cuadrantes, de los cuales se descartan dos cuadrantes extremos y se toma una sub-muestra de aproximadamente 100 g, la cual se secó, se molió y tamizo por una malla con abertura de 2 mm (malla 10) con el propósito de uniformizar el tamaño del material (Etchevers *et al.*, 2005).

3.3.4 Medición de los reservorios de C en el suelo

Para la determinación del C del suelo, se tomó la sub-muestra representativa de la muestra compuesta, aproximadamente 2 g de suelo, la cual se molió hasta pasar de manera íntegra la malla con abertura de 0.49 mm (malla 100). Antes de realizar el análisis de las muestras de suelo se colocaron en la estufa para secarse a una temperatura de 105 °C por aproximadamente 2 horas, posteriormente fueron colocadas en un desecador hasta el momento de realizar la medición. La determinación de C se realizó por combustión seca en un analizador automático de C Shimadzu TOC 5000-A, donde se pesó aproximadamente ± 180 mg de muestra de suelo en crisoles especiales del equipo, se registró el peso en la computadora y se combustionó en una corriente de aire purificado a 900°C, en 5 minutos aproximadamente. El instrumento entregó directamente el resultado en porcentaje de este elemento de la muestra.

Para determinar la cantidad de C en toneladas por hectárea (C Mg ha⁻¹) se empleó la fórmula propuesta por Etchevers *et al.*, (2005):

$$COS \left(\frac{Mg}{ha} \right) = \%C * P * \rho b$$

Donde:

COS= contenido de Carbono Organico del Suelo (Mg/ha)

%C = porcentaje de C obtenido del analizador automático

P = Profundidad de muestreo (m)

ρb = Densidad aparente (Mg/ m³)

3.3.5 Determinación de la densidad aparente

La densidad aparente (ρb) es definida como el peso de los sólidos del suelo seco por unidad de volumen total del mismo, incluyendo espacios porosos, es expresada en Mg/m³. Se determinó con el método de la probeta, el cual consiste en introducir una cantidad conocida de suelo seco y tamizado en una probeta y posteriormente se golpeó sobre una superficie hasta que todas las partículas fueran acomodadas en los espacios vacíos. Se tomó el peso de la probeta y el volumen del suelo. Se aplicó la siguiente formula:

$$Dap = \frac{P}{V}$$

Donde:

P = peso (gr)

V= volumen (cm³)

3.3.6 Determinación de la composición mecánica del suelo

La composición mecánica del suelo es la proporción relativa de arena, limo y arcilla, las cuales al combinarse generan las clases texturales. La clasificación textural se basa en asignar un nombre de los doce que clasifican al suelo. (Ortiz y Ortiz, 1990).

Para determinar la composición mecánica del suelo de los sitios de muestreo se utilizó el método de Bouyoucos, para ello, se colocaron 50 g de suelo en un vaso de precipitado y se agregaron 25 ml de Hexametáfosfato de sodio (HMFN) al 10%, se agitó la mezcla y se dejó reposar durante 1 minuto y 2 horas y en cada tiempo de reposo se tomó una lectura con un hidrómetro y se calcularon las proporciones de arena, limo y arcilla; estos valores se llevaron al triángulo de texturas para determinar la clase textural de cada sitio de muestreo.

3.3.7 Determinación de pH y Conductividad Eléctrica (C.E) del suelo

El pH es la cantidad en mg de hidrogeno presente, se define como el índice numérico para expresar el grado de acidez o alcalinidad de un suelo, expresado en términos de la escala logarítmica de pH, de 0 a 14. Es una medición muy común e importante, ya que el pH controla las reacciones químicas y biológicas del suelo (Cuevas, 2012).

El pH se midió en una mezcla de relación suelo: agua 1:2, se pesaron 20 g de suelo y se adicionaron 40 mL de agua destilada, se agito la mezcla durante 5 minutos, se dejó reposar durante 15 minutos, se calibró el potenciómetro con una solución buffer de pH 7.0 y 4.0, se agito nuevamente la mezcla y posteriormente se introdujo el electrodo en la suspensión y se registró el pH.

La conductividad eléctrica (C.E) o conductividad especifica de una solución es el reciproco de la resistencia especifica de una corriente alterna medida entre las caras opuestas de 1 cm³ de una solución acuosa (Cuevas, 2012). Los datos de conductividad eléctrica de las muestras se tomaron con el mismo potenciómetro en el extracto acuoso, las unidades son expresadas en dS.m⁻¹.

3.3.8 Medición de los reservorios de C en la biomasa superficial (hojarasca y mantillo)

Para la medición del C presente en cada uno de los sistemas de estudio, se determinó la cantidad de biomasa existente de la hojarasca y mantillo, éstos se colectaron en cuadrantes de 1 * 1m (1 m²), el mantillo se colecto en un marco de 0.5*0.5 (0.25 m²), las muestras colectadas se pusieron a secar a la sombra. Posteriormente se aplicó el procedimiento de cuadrantes extremos y se extrajo una sub-muestra aproximadamente de 3 gr la cual fue molida en un molino de imanes durante 1 minuto, tamizada por una malla 100 (0.49 mm de diámetro) para su posterior análisis. Antes de realizar el análisis de las muestras se colocaron en la estufa para secarse a una temperatura de 60° por 24 horas, posteriormente fueron colocadas en un desecador hasta el momento de realizar la medición. La determinación de C se realizó por combustión seca en un analizador automático de C Shimadzu TOC 5000-A, donde se pesó aproximadamente ±30 mg de muestra de hojarasca y mantillo en crisoles especiales del equipo, se registró el peso en la computadora y se combustionó en una corriente de aire purificado a 900°C, en 5 minutos aproximadamente. El instrumento entrego directamente el resultado en porcentaje de este elemento de la muestra.

Con los datos de la biomasa y el porcentaje de carbono en la hojarasca y el mantillo se calculó los reservorios de carbono en toneladas por hectárea (Mg/ha) presentes en cada sistema de estudio.

3.4 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

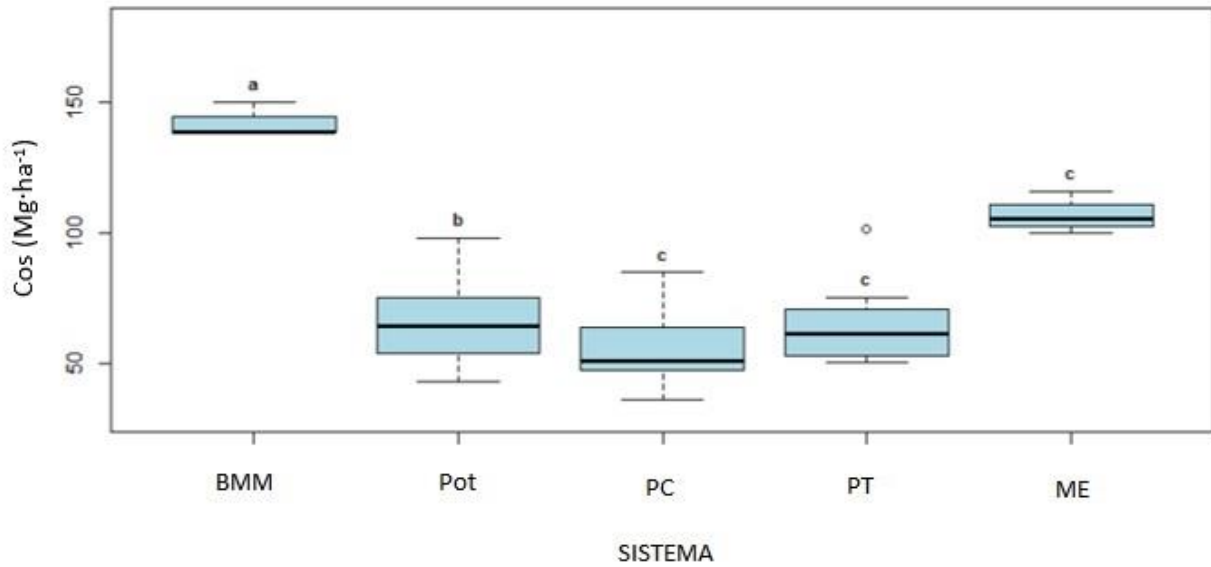
3.4.1 Reservorios de C en el suelo

Los resultados presentados muestran el comportamiento del COS de cada uno de los sitios evaluados obtenido en los análisis de C que se realizaron a suelos de los sistemas agroforestales de café, bosque mesófilo de montaña y potrero a una profundidad de 20 cm (Figura 25).



Figura 25 Contenido de COS en SAF's de café, bosque mesófilo de montaña y potrero, del Mpio. Hatusco, Ver.

Se encontraron diferencias estadísticas entre el BMM y el Pot de acuerdo a la prueba de Tukey ($p \leq 0.05$) (Figura 26).



Barras con letras diferentes indican diferencias estadísticas significativas, Tukey ($p \leq 0.05$).

Figura 26 Contenido de carbono orgánico (Mg·ha⁻¹) en el suelo de tres sistemas agroforestales de café, un potrero y un bosque mesófilo de montaña en el municipio de Huatusco, Ver.

El CO almacenado en el suelo fue mayor en el sistema de BMM (142.526 Mg ha⁻¹), seguido del Pot (107.046 Mg ha⁻¹), PT (67.899 Mg ha⁻¹) ME (65.611Mg ha⁻¹) y PC (56.440 Mg ha⁻¹) (Cuadro 5). Los Cuadros 8, 9, 10,11 y 12 que se encuentran en el Anexo 1 contienen la información de cada punto de muestreo por sistema estudiado.

Cuadro 5 Contenido de carbono orgánico (Mg ha⁻¹) en suelo (0 a 20cm), en los sistemas agroforestales de café, potrero y bosque mesófilo de montaña en el municipio de Huatusco, Ver.

Sistema	Profundidad (cm)	C (Mg ha ⁻¹)
BMM	20	142.526
Pto	20	107.046
PT	20	67.899
ME	20	65.611
PC	20	56.440

Dónde: BMM = bosque mesófilo de montaña, Pto = potrero, PT = Policultivo tradicional, ME = Monocultivo especializado y PC = Policultivo comercial.

Etchevers *et al.*, (2001) reporta para Oaxaca 152 Mg ha⁻¹ en un bosque de liquidámbar, valor que resulta mayor pero muy similar al reportado en el presente estudio de (142.526 Mg ha⁻¹), dentro de la misma región Mazateca y a una profundidades de 0 a 30 cm Acosta *et al.*, 2001 reportan

valores de 91 Mg ha⁻¹ para el mismo bosque. Álvarez *et al.*, 2013 reportan valores de COS en BMM de la sierra norte de Oaxaca, en un rango de 220 a 158 Mg ha⁻¹, los valores que reportan mencionan que se encuentran en función de la altitud, ya que está influye en el espesor de la capa superficial y los horizontes minerales del suelo por lo que al aumentar la altitud el COS disminuye. Todos los valores de COS que se reportan en diversos estudios son similares, esto se puede atribuir a que como menciona González-Medrano (2004) dentro de un BMM se encuentran una gran cantidad de géneros, entre los cuales destacan: *Magnolia*, *Liquidambar*, *Carpinus*, *Ostrya*, *Clethra*, *Pinus*, *Cercis*, *Acer*, *Berberis*, *Carya*, *Juglans*, *Litsea*, *Fraxinus*, *Prunus*, *Celtis*, entre otros, por lo que la cantidad de COS varía de acuerdo a las especies dominantes que se encuentren en cada BMM.

Ávila *et al.*, (2001) realizaron un estudio en Grecia y Naranjo provincia de Alajuela, Costa Rica, donde cuantificaron el C almacenado en plantaciones de café (*Coffea arabica*) asociado con eucalipto (*Eucalyptus deglupta*, con poró (*Erythrina poeppogiana*) y café a pleno sol. Los contenidos de C almacenado en el suelo a una profundidad de 0 – 25 cm en el sistema café-poró fue de 184 Mg ha⁻¹ y del sistema café- eucalipto se encontró entre 108.6 a 161 Mg ha⁻¹. En el sistema de monocultivo reportaron un valor de 153.9 Mg ha⁻¹, todos los valores son mayores que los correspondientes a nuestros sitios de estudio (65.61 Mg), lo cual indica que las especies reportadas para la zona de Costa Rica capturan una cantidad mayor de C que las que se encuentran en nuestra región de estudio, Acosta *et al.*, 2001 en la región Mazateca reportan valores de 58 Mg ha⁻¹ para plantaciones de café, en su mayoría variedades criollas, las cuales se encuentran asociadas con plantas que les proporcionan sombra del género *Inga*. Para la región Mixe el mismo autor reporta valores de 88.92 Mg ha⁻¹ en plantaciones de café.

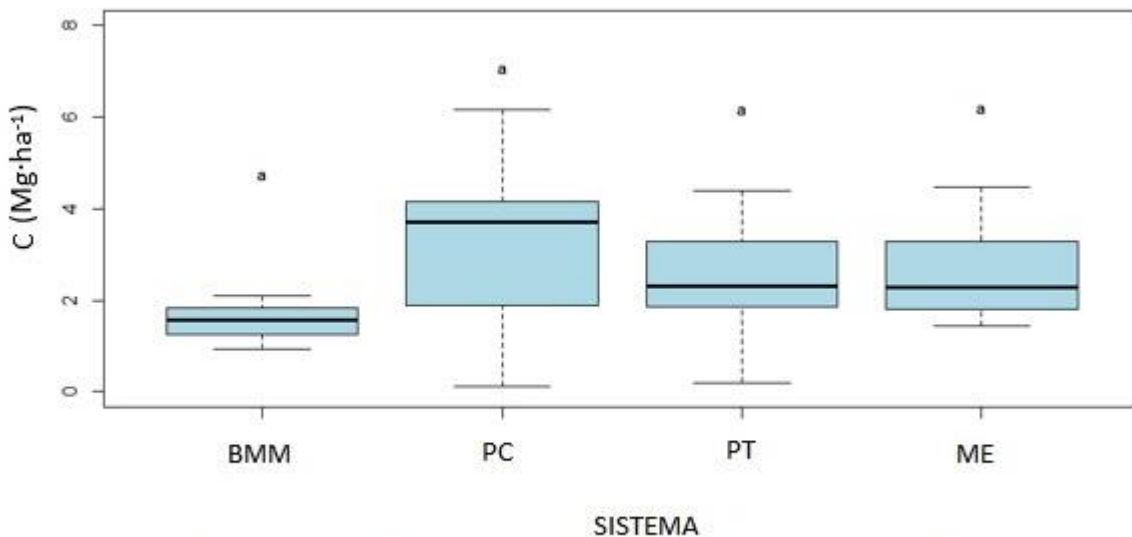
En el Mpio. de Huatusco, Veracruz, se han encontrado contenidos de COS de 86 (Mg ha⁻¹) correspondiente al bosque caducifolio y para el caso de los SAF's se reportan valores de 54, 50, 58 y 73 (Mg ha⁻¹), correspondientes a cuatro sistemas especializados de café (Café-chalahuite, café-macadamia, café-cedro rosado, café con plátano) (Espinoza *et al.*, 2012), estos valores son similares a los reportados en el presente estudio (café-chalahuite, café-cedro rosado y café-plátano), obteniendo valores de COS de 54.041, 59.062, y 42.997 Mg ha⁻¹, en el Anexo 1, Cuadro 12 se muestran los valores de cada sitio de muestreo del sistema de Monocultivo Especializado.

Etchevers *et al.*, (2001) reportaron para potreros de Oaxaca de 99 a 181 Mg ha⁻¹. Ávila *et al.*, (2001) en la provincia de Alajuel, Costa Rica reportaron para un potrero valores de 95 Mg ha⁻¹, ambos casos los valores reportados son similares aunque menores a los obtenidos por el presente estudio (107.046 Mg ha⁻¹), en contraste Torres *et al.*, (2011) reportaron para un potrero convencional y un potrero silvopastoril en Huatusco 48.2 y 59.8 Mg ha⁻¹ los cuales son valores más bajos a los encontrados en este estudio.

Cruz (2013), menciona que en los suelos de México, dentro de los primeros 30 cm, el contenido promedio de carbono es de 65 Mg ha⁻¹, lo cual está en función de diversos factores y del historial de los usos de la tierra, las entradas y salidas de materia orgánica del sistema y el manejo de estos usos de la tierra.

3.4.2 Carbono almacenado en hojarasca y mantillo

En este componente no existieron diferencias estadísticamente significativas de acuerdo a la prueba de Tukey ($p \leq 0.05$) entre los sistemas (Figura 27), aunque en el Cuadro 5 se distinguen ligeras desigualdades cuantitativas entre los sistemas evaluados.



Barras con letras diferentes indican diferencias estadísticas significativas, Tukey ($p \leq 0.05$).

Figura 27 Contenido de C en hojarasca (Mg·ha⁻¹) en el suelo (0-20 cm) de tres sistemas agroforestales de café, un potrero y un bosque mesófilo de montaña en el municipio de Huatusco, Ver.

La hojarasca comprende todos los residuos orgánicos (hojas, ramas, frutos y semillas) sobre la superficie del suelo. En el Cuadro 6 se muestran los resultados del C almacenado en la hojarasca de los diferentes sistemas estudiados, existió una ligera tendencia a presentar valores de C más elevados en los sistemas de ME, PR y PC con 3.168, 2.585 y 2.378 Mg·ha⁻¹ respectivamente y valores menores para el BMM con 1.541 Mg·ha⁻¹. (En el Anexo 2. Cuadros 13, 14, 15 y 16 se muestran los valores individuales de los sitios de muestreo para cada sistema estudiado).

Cuadro 6 Contenido de carbono orgánico (Mg ha⁻¹) en hojarasca y mantillo de los sistemas agroforestales de café, potrero y bosque mesófilo de montaña en el municipio de Huatusco.

Sistema	Hojarasca	Mantillo
	C (Mg ha ⁻¹)	C (Mg ha ⁻¹)
ME	3.168	6.331
PT	2.585	5.747
PC	2.378	5.623
BMM	1.541	5.351

Dónde: BMM = bosque mesófilo de montaña, PT = Policultivo tradicional, ME = Monocultivo especializado y PC = Policultivo comercial.

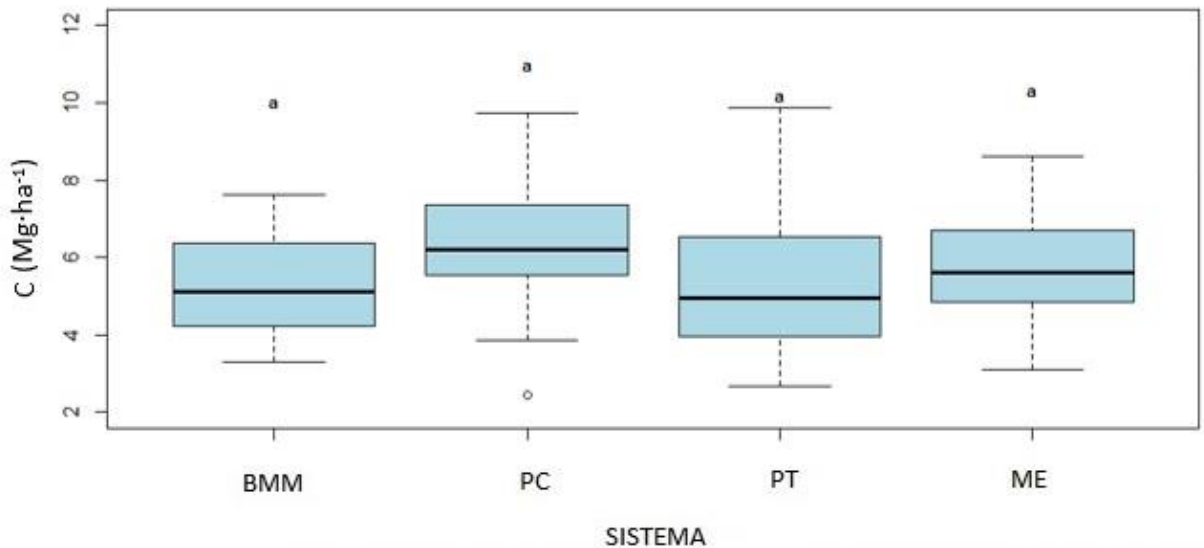
La acumulación de carbono en la materia orgánica puede ser afectada por la cobertura y el tipo de vegetación presente, ambos factores influyen en la humedad relativa y la temperatura del medio (Gómez-Pompa y Vázquez- Yanes, 1981; Waring y Schlesinger, 1985). La composición química de la hojarasca afecta la tasa de descomposición y la liberación de los nutrientes y CO₂, lo que significa que con pH ácido (pH <6) la capa de mantillo tardara más tiempo en ser descompuesta que una capa de mantillo con un pH relativamente alto (pH >6) (Pritchett, 1986).

Espinoza *et al.*, (2012) reportan para el bosque caducifolio y el SAF's café –chalahuite en el Mpio. de Huatusco, Veracruz contenidos de C de 1.9 Mg ha⁻¹, en el presente estudio se reportan tres ME de café-chalahuite lo cuales presentaron valores de 6.165, 1.94 y 5.44 Mg ha⁻¹ respectivamente, siendo solamente uno de ellos similar al reportado., esta similitud esta similitud se debe a que en los SAF's tradicionales una de las especies más utilizadas es el chalahuite debido a su incorporación de materia orgánica.

Los resultados determinados en este estudio sobre la cantidad de CO capturado en la hojarasca en el sistema de BMM es similar con otros estudios llevados a cabo en zonas tropicales, Figueroa *et al.*, 2004 realizaron un estudio de la concentración de C en diferentes tipos de vegetación en la Sierra Norte de Oaxaca donde mencionan que el Bosque de liquidámbar presenta una

concentración de 44.6 % de C, valor que resulta ser muy similar al reportado en el presente estudio (35.4%).

En el componente mantillo no existieron diferencias estadísticamente significativas de acuerdo a la prueba de Tukey ($p \leq 0.05$) entre los sistemas (Figura 28), aunque en el Cuadro 4 se distinguen ligeras desigualdades cuantitativas entre los sistemas evaluados.



Barras con letras diferentes indican diferencias estadísticas significativas, Tukey ($p \leq 0.05$).

Figura 28 Contenido de C en mantillo ($\text{Mg}\cdot\text{ha}^{-1}$) en el suelo de tres sistemas agroforestales de café, un potrero y un bosque mesófilo de montaña en el municipio de Huatusco, Ver.

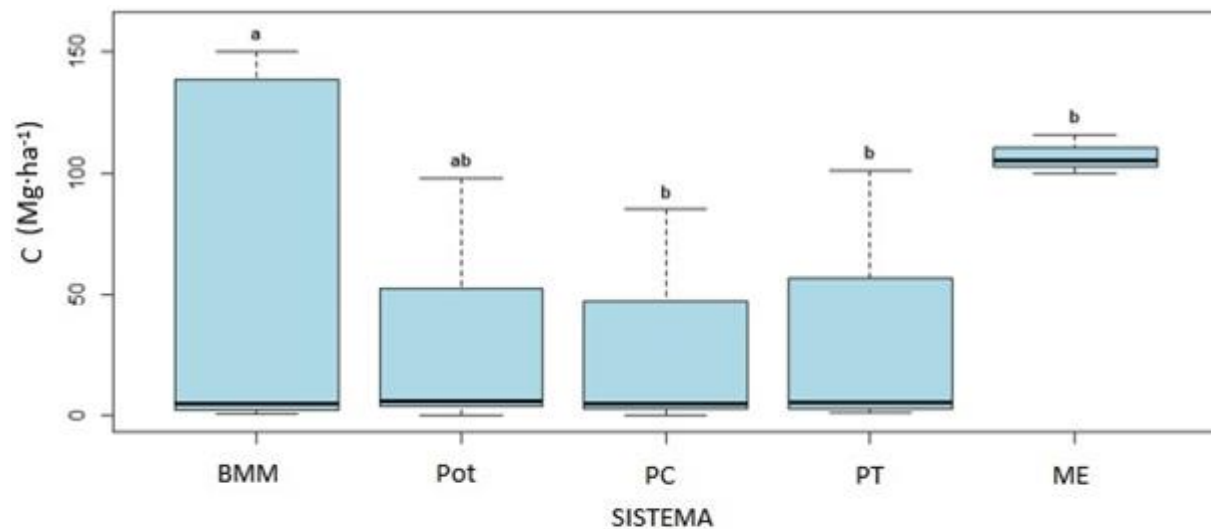
En el Cuadro 6 se muestran los resultados del C almacenado en mantillo de los diferentes sistemas estudiados. El C almacenado en mantillo fue mayor en el sistema ME (6.331 Mg ha^{-1}) seguido del PT (5.746 Mg ha^{-1}), PC (5.623 Mg ha^{-1}) y BMM (5.351 Mg ha^{-1}). (Los Cuadros 17,18,19 y 20 que se encuentran en el Anexo 3 muestran los valores individuales para cada sistema estudiado).

En los SAF's de café en México se han encontrado contenidos de C en mantillo de 1.9, 0.9, 0.3 y 1.0 Mg ha^{-1} (Espinoza *et al.*, 2012) los cuales corresponden a cuatro sistemas de café: café-chalahuite, café-macadamia, café-cedro rosado y café-plátano, dichos valores son menores que los correspondientes a nuestros sitios de muestreo del sistema ME. Por otro lado, Suárez (2002) reportó contenidos de C de 5.2, 5.5 y 9.6 Mg ha^{-1} en SAF's de café productivo con sombra diversificada y a diferentes rangos de altura de los árboles de sombra en Nicaragua.

Etchevers *et al.*, (2001) reporta valores similares a los del BMM para el caso de un bosque de liquidámbar (5.86 Mg ha^{-1}) en la Sierra Norte de Oaxaca, Figueroa *et al.*, (2005) reporta valores similares para un bosque de liquidámbar (5.9 Mg ha^{-1}) y n Álvarez *et al.*, (2013) reporta en un BMM en la Sierra Norte de Oaxaca (5.22 Mg ha^{-1}). Callo-Concha *et al.*, (2001) reportan valores menores para un bosque primario de la región amazónica del Peri (3.3 Mg ha^{-1}).

3.4.3 Carbono total

En el presente estudio se considera C total a la suma del C almacenado en la biomasa superficial (mantillo y hojarasca) y en el suelo (Cuadro 7). En relación al C total estadísticamente existieron diferencias significativas (Figura 29) de acuerdo a la prueba de Tukey ($p \leq 0.05$), entre el BMM y el Pto con 149.418 y $107.046 \text{ Mg ha}^{-1}$ respectivamente, mostraron los valores más altos de los sistemas estudiados.



Barras con letras diferentes indican diferencias estadísticas significativas, Tukey ($p \leq 0.05$).

Figura 29 Contenido de C total ($\text{Mg}\cdot\text{ha}^{-1}$) en el suelo de tres sistemas agroforestales de café, un potrero y un bosque mesófilo de montaña en el municipio de Huatusco, Ver.

Las concentraciones de C más altas se presentaron en el BMM ($149.428 \text{ Mg ha}^{-1}$), esto se atribuye principalmente a la cantidad de árboles encontrados en este sitio. Por debajo del contenido de C del BMM se encontraron el Pto ($107.04 \text{ Mg ha}^{-1}$) y para los SAF's, en el orden siguiente: PT, ME y PC en un intervalo que va de 64.4 a 76.23 Mg ha^{-1} (Cuadro 6).

Cuadro 7 Contenido de carbono orgánico (Mg ha⁻¹) en suelo, mantillo y hojarasca en los sistemas agroforestales de café, potrero y bosque mesófilo de montaña en el municipio de Huatusco.

COMPONENTE	SISTEMAS				
	BMM	Pto	PT	ME	PC
	C (Mg ha ⁻¹)				
Suelo	142.526	107.046	67.899	65.611	56.440
Hojarasca	1.541		2.585	3.168	2.378
Mantillo	1.338		1.437	1.583	1.406
Total	149.418	107.046	76.231	75.110	64.440

Dónde: BMM = bosque mesófilo de montaña, Pto = potrero, PT = Policultivo tradicional, ME = Monocultivo especializado y PC = Policultivo comercial.

En la Figura 30 se puede observar que independientemente del sistema el mayor aporte de CO hizo el suelo (93%) lo que indica que este es el reservorio más grande del ciclo del carbono (Ávila *et al.* 2001).



Figura 30 Carbono total almacenado en el suelo, mantillo y hojarasca, del Mpio. de Huatusco, Ver.

3.4.4 Características del suelo: pH, conductividad eléctrica y composición mecánica

De acuerdo a la NOM-021-SEMARNAT-2000 el pH del sistema de Bosque Mesófilo de Montaña los sitios BMM1 fue de 5.43, clasificados como moderadamente ácidos, para los sitios BMM2 de 3.9 y BMM3 de 4.3, en ambos se clasificaron como fuertemente ácidos. Para el sistema potrero los sitios Pto1 el pH fue 3.8 y Pto2 4.7, clasificados como fuertemente ácidos, el Pto3 pH de 5.8, se clasifico como moderadamente acido. Para el caso del sistema de PC, en un promedio de los 15 sitios se obteniendo un pH de 3.7 considerándose como fuertemente acido. Para el PTR en un promedio de 8 sitios de muestreo, se obtuvo un pH de 4.2, clasificándose como fuertemente acido. Finalmente para los 11 sitios del ME se obtuvo un pH promedio de 3.5, clasificado como fuertemente acido. En el Cuadro 8 se muestra e pH promedio del suelo de los 5 sistemas estudiados (En los Cuadros 21, 22, 23, 24 y 25 del Anexo 4 se muestran los valores individuales para cada sistema estudiado).

Estos suelos son óptimos para el desarrollo del cultivo del café, ya que de acuerdo a Aranda (2012) menciona que los rangos de pH para el buen desarrollo de las plantaciones de café se encuentra entre 4.2 a 5.1, por otro lado Ortiz y Ortiz (1990) establecen un rango más amplio el cual se encuentra de 4.5 a 7, por lo tanto, el pH de los suelos de la región del presente estudio son óptimos para la producción de café (pH de 3.5 a 4.2).

Las variaciones de pH están relacionadas con el tipo de suelo presente así como la descomposición de los restos vegetales, la actividad biológica del suelo, la descomposición del humus, la respiración y la actividad de los organismos del suelo (Lilienfein, *et al.*, 2000).

El nivel de concentración de sales en el suelo determinada a traves de su conductividad eléctrica (CE), de acuerdo con la NOM-021-SEMARNAT-2000, los suelos de los sitios de los 5 sistemas se clasificaron como suelos no salinos, sus valores se encuentran en el intervalo <1.0 (Cuadro 8), esto resulta favorable para el cultivo de café el cual no tolera suelos salinos. En el Anexo 5: Cuadros 26, 27, 28, 28 y 30 se muestran los valores individuales para cada sistema.

Cuadro 8 pH y Conductividad eléctrica (CE) de los sistemas evaluados

SISTEMA	CE (dS m ⁻¹)	pH promedio (1:2)
Pto	0.120	4.7
BMM	0.060	4.5
PT	0.166	4.2
PC	0.131	3.7
ME	0.143	3.5

Dónde: BMM = bosque mesófilo de montaña, Pto = potrero, PTR = Policultivo tradicional, ME = Monocultivo especializado y PC = Policultivo comercial.

La composición mecánica del suelo de los diferentes sistemas estudiados se clasificó de acuerdo a su clase textural.

El Cuadro 9 muestra los resultados obtenidos de la composición mecánica de cada uno de los sistemas, es importante mencionar que la clase textural es la predominante por sistema. El 67% del BMM presenta características de suelo migajón arenoso, mientras que el 33% es Limoso, para el Pto es 100% migajón limoso, en el PC el 87% son suelos Arcillosos, el 13% son suelos Arcillo Limosos, el PT presenta el 50% suelos arcillosos y el otro 50% suelos arcillo limosos y, finalmente el ME el 82% del suelo es arcilloso mientras que el 18% restantes es migajón arcilloso limoso (En el Anexo 6. Cuadros 31, 32, 33, 34 y 35 se muestran los valores individuales para cada sistema).

Cuadro 9 Composición mecánica de cada uno de los sistemas estudiados

Clave	Clase Textural Predomínate
BMM	Migajón limoso
PTO	Migajón limoso
PC	Arcilla
PTR	Arcilla
ESP	Arcilla

Dónde: BMM = bosque mesófilo de montaña, Pto = potrero, PTR = Policultivo tradicional, ME = Monocultivo especializado y PC = Policultivo comercial.

Los suelos en donde se encuentran los SAF's de café presentan una textura fina en los que predomina la arcilla, por lo que tienen una superficie más activa que los suelos arenosos, por lo tanto poseen mayor capacidad de adsorción de nutrimentos y usualmente son más fértiles (Ortiz y Ortiz, 1990).

3.4.5 Mapa temático de carbono

El mapa temático de Carbono es mostrado en la Figura 31, mientras que en Cuadro 10 reporta la cantidad de Carbono total almacenado en cada sistema agroforestal. El sistema que mayor cantidad de Carbono reporto fue el BMM con 686,371.97 Mg/año, seguido del PT y PC, Pot y ME con 442,130.11, 307,900.58 y 41,207.44 Mg/ año respectivamente.

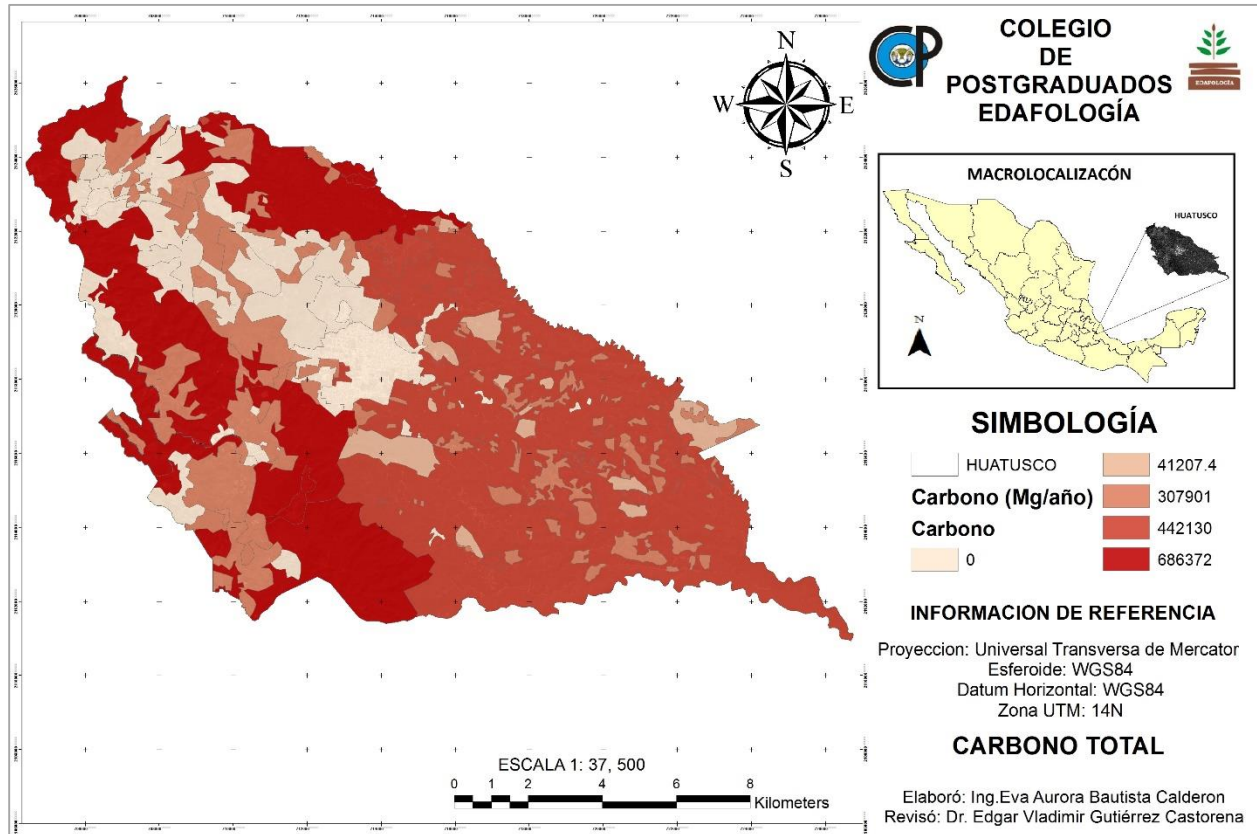


Figura 31 Mapa temático de carbono total en el Mpio. de Huatusco, Ver.

Cuadro 10 Carbono total por cada sistema agroforestal

SISTEMA	C (Mg)
Bosque mesófilo de montaña	686,371.97
Policultivo Tradicional	442,130.11
Policultivo Comercial	307,900.58
Potrero	41,207.44
Monocultivo (especializado)	41,207.44
TOTAL	1,477,610.10

3.5 CONCLUSIONES

De forma natural el componente BMM ha secuestrado carbono en el suelo estimado en 142. 526 Mg ha⁻¹, a pesar del cambio de uso y manejo de suelo que ha sufrido el ecosistema natural durante la última década, modificado en un componente pastoril (Pot), este ha decrecido en 25% del total de carbono en el suelo (107.046 Mg ha⁻¹), tal transformación es considerada la de menor impacto respecto a los sub-componentes (PT, PC y ME) debido al manejo no intensivo de pastoreo que permite conservar la cobertura vegetal todo el año, evitando la erosión y degradación del carbono.

Con respecto a la acumulación en los sub-componentes PT, PC y ME la liberación de carbono del suelo al ambiente producido por propio manejo de los agroecosistemas fueron estimados en 53%, 54% y 61% (76.231, 75.110, 64.440 Mg ha⁻¹) respectivamente, lo que indica un impacto negativo al reservorio de carbono en el suelo provocado por el cambio de uso de suelo.

Por otra parte, la cantidad de carbono almacenado en la biomasa superficial (hojarasca y mantillo) reportó un comportamiento estable en los sub-componentes PT, PC y ME al no presentar diferencias significativas en la prueba de Tukey ($p \leq 0.05$). La estimación de carbono secuestrado en hojarasca varió en 3.16 Mg ha⁻¹ (ME), 2.58 Mg ha⁻¹ (PT) y 2.37 Mg ha⁻¹ (PC). Sin embargo, los agroecosistemas están capturando en 52%, 40% y 35% respectivamente más carbono que el BMM (1.54 Mg ha⁻¹), lo que significa que pueden considerarse agroecosistemas sustentables para la producción de café.

El mismo proceso se presentó al cuantificar la acumulación de carbono en mantillo dando resultado en 6.33 Mg ha⁻¹(ME), 5.74 Mg ha⁻¹ (PT) y 5.62 Mg ha⁻¹ (PC) muy similar al ecosistema natural 5.35 Mg ha⁻¹ (BMM). Si bien existió un impacto negativo inicial por el cambio de uso de suelo, en la actualidad no puede considerarse con tal percepción, ya que el secuestro de carbono en mantillo tanto en los agroecosistemas como en el ecosistema natural son muy semejantes, lo que proyecta una acumulación constante al paso del tiempo en ambos.

3.6 CONCLUSIONES GENERALES

El uso individual y en combinación de técnicas en Geomática (clasificación interpretativa, análisis espacial y técnicas de enfoque paramétrico), primeramente permitió la identificación y ubicación del ecosistema natural así como de los diversos sistemas agroforestales de café en el área de estudio, y posteriormente ser reportados en un mapa temático de ecosistemas y agroecosistemas.

Por otra parte, el mapa temático generado de ecosistemas y agroecosistemas para la producción de café otorgo la posibilidad de estimar y cuantificar el secuestro de carbono y el impacto que este conlleva en la actualidad por emisión y captura de CO₂ del medio ambiente a los sistemas de producción intensivos de café, y considerar un sistema sostenible a largo plazo.

3.7 LITERATURA CITADA

- Acosta, M. M; Carrillo, A.F; Díaz, L.M. (2009). Determinación del Carbono total en bosques mixtos de *Pinus patula* Shl. Et Cham. Terra Latinoamericana. 27 (2). 105-114 p.
- Acosta, M., M.; J. D. Etchevers B; C, Monreal; K, Quednow; C, Hidalgo. (2001). Un método para la medición del carbono en los compartimientos subterráneos (raíces y suelo) de sistemas forestales y agrícolas en terrenos de ladera en México. Simposio Internacional Medición y monitoreo de la captura de carbono en ecosistemas forestales. Valdivia, Chile. 15 p.
- Acosta, M., M.; J. Vargas H.; A. Velázquez M.; 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): 725-736.
- Aguirre, R, F. (1977). Evaluación del Levantamiento Fisiográfico de los Valles centrales de Oaxaca en un programa de productividad de cultivos. Tesis de Maestría, Colegio de Postgraduados. Montecillos, Texcoco, Estado de México.
- Alfaro, Ba. J. M; Limón, R. B; Martínez, T.G.A; Ramos, G. M.M., Reyes, A. J.M. y G. Tijerina, M. (2006). Ciencias del ambiente. Universidad Autónoma de Nuevo León. Octava reimpresión, México. Compañía Editorial Continental. pp. 24-26.
- Álvarez, A.G; García, C.N.E; Krasilnikov, P; García, O.F. (2013). Almacenes de carbono en bosques montañosos de la sierra norte de Oaxaca, México. Agrociencia 47: 171-180. 10 p.
- Andrade, H; Ibrahim, M. (2003). ¿Cómo monitorear carbono en sistemas silvopastoriles? Agroforestería en las Américas 10: 109-116.
- Angers, D. and C, Chenue. (1998). Dynamics of soil aggregation and 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: J. 199-223.
- Aranda, B.G.J. (2012). Café sustentable. Manual de buenas prácticas para la producción de café sustentable. Agencia de los Estados Unidos para el Desarrollo Internacional (USAID). 120 p.

- Ávila, G., Jiménez, F., Beer, J., Gómez, M., & Ibrahim, M. (2001). Almacenamiento, fijación de carbono y valoración de servicios ambientales en sistemas agroforestales en Costa Rica. *Agroforestería de las Américas* 8(30), 32 - 35.
- Ávila, G; F. Jiménez; J. Beer, M. Gómez y M. Ibrahim. (2001). Almacenamiento, fijación de carbono y valoración de servicios ambientales en sistemas agroforestales en Costa Rica. *Agroforestería en las Américas* 8 (30), 9 p.
- Barredo, C. J. I. (2005). *Sistemas de Información geográfica y evaluación multicriterio, en la ordenación del territorio*. 2º edición. RA-MA. Madrid, España. 279 p.
- Barrera, C, J.I., Contreras, S. M., Garzón, Y. N.V., Moreno, C.A.C., y Montoya, V. S.P. (2010). *Manual para la Restauración Ecológica de los Ecosistemas Disturbados del Distrito Capital*. Secretaría Distrital de Ambiente (SDA) y Pontificia Universidad Javeriana (PUJ). Bogotá, Colombia. 402 p.
- Berlanga-Robles, C.A., Ruiz-Luna,A. (2007). Análisis de las tendencias de cambio del bosque de Mangle del sistema lagunar Teacapán-agua brava, México. una aproximación con el uso de imágenes de satélite Landsat. *Universidad y Ciencia*. 23(1):29-46
- Bermejo, D. J., Juan, A., Pérez de la Paz, P. L y Del Arco Aguilar, M.J. (2005). Aplicación de los sistemas de información geográfica (SIG) en el análisis predictivo de flora en peligro de extinción: *Lotus eremicus*. Santos (Isla de la Palma – Islas Canarias). XI Congreso Nacional de Teledetección
- Bernardus, H.J. de J. (2013). *Actual del Conocimiento del Ciclo del Carbono y sus Interacciones en México: Síntesis a 2013*. Programa Mexicano del Carbono. Colegio de Postgraduados. Universidad Autónoma de Chapingo. Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey. México.
- Bolstand, P. (2012) *GIS Fundamentals. A First Text on Geographic Information Systems*, (4ta ed.).
- Bourne, R. (1931). *Regional Survey and its relation to stocktaking of the agricultural resources of the British Empire*. Oxford Forestry Memoris 13.

- Bradford, J. B., Weishampel, P., Smith, M. L., Kolka, R., Birdsey, R. A., Ollinger, S. V. and Ryan, M. G. (2010). Carbon pools and fluxes in small temperate forest landscapes: Variability and implications for sampling design. *Forest Ecology and Management* 259:1245-1254.
- Brody, R. (1999). Geographic Information systems. *Journal of Business & Finance Librarianship*, 5(1), 3-18. doi: 10.1300/J109v05n01_02
- Brown, S; Iverson, LR. (1992). Biomass estimates for tropical forests. *World Resources Review* 4(3): 366-383.
- Buendía, R.E., Terrazas, D.S., Vargas, P.E. (2002). Aplicación de imágenes de satélite en la cartografía de uso de suelo y vegetación en una región del Oriente del Valle de México. *Revista Chapingo. Serie ciencias forestales y del ambiente*, 8(1): 13-19
- Caballero, M.; S. Lozano; B. Ortega. (2007). Efecto invernadero, calentamiento global y cambio climático: una perspectiva desde las ciencias de la Tierra. *Revista Digital Universitaria* 8(10): 1-12. México.
- Callo-Concha A., D.; L. Krishnamurthy; J. Alegre. (2001). Cuantificación del carbono secuestrado por algunos SAF's y testigos, en tres pisos ecológicos de la Amazonía del Perú. In: *Simposio Internacional y Monitoreo de la Captura de Carbono en Ecosistemas Forestales*. 18 al 20 de Octubre del 2001. Valdivia, Chile. 23 p.
- Callo-Concha, D. A. (2001). Cuantificación del carbono secuestrado por algunos sistemas agroforestales y testigos en tres pisos Ecológicos de la Amazonia del Perú. *Universidad Autónoma Chapingo. Maestría en Agroforestería para el Desarrollo Sostenible*. México.
- Carretera de Tapasta, A. P., & San José de Las Lajas, P. (2003). Enfoques para la clasificación digital de imágenes mono y multiespectrales y su implementación en el software cubano TN Estudio V2. 0. *Revista de Teledetección*, 20, 35-52.
- Casanova, L. F; J. Petit A; J. Solorio S. (2011). Los sistemas agroforestales como alternativa a la captura de carbono en el trópico mexicano. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del ambiente*. 17 (1): 5-118. 11 p.

- Cayssials, R. (1983). Interpretación agronómica de la carta de reconocimiento de suelos del Uruguay. Boletín Técnico No.9
- Centro Nacional de Desarrollo Municipal. (1999). Enciclopedia de los Municipios de México: Los Municipios de Veracruz Ignacio de la Llave. Gobierno del Estado de Veracruz. En línea. Disponible en <http://www.inafed.gob.mx/work/enciclopedia/EMM30veracruz/municipios/30071a.html> Consultado el 12 de agosto de 2015.
- CEPAL (Comisión Económica para América Latina y el Caribe). (2009). Cambio climático y desarrollo en América Latina y el Caribe: una reseña. Santiago, Chile, CEPAL. 148 p.
- Cerda, B. R; T. Espin C; M, Cifuentes. Cifuentes, M. (2013). Carbono en sistemas agroforestales de caca de la Reserva Indígena Bribi de Talamanca, Costa Rica. *Agroforestería de las Américas* (49): 9 p.
- Chuvieco, S. E. (2008). Teledetección ambiental. La observación de la Tierra desde el Espacio. 3° ed. Ariel. Barcelona, España. 594 p.
- Chuvieco, S.E. (2008). Teledetección ambiental. La observación de la tierra desde el espacio (3ª ed.) Barcelona, España. Editorial Ariel
- Cruz, G.C; Pellat, F.P. (2013). pp. 183-187. *In* F. Paz P., J. Wong G., M. Bazan, V. Saynes Ed. Estado Actual del Conocimiento del Ciclo del Carbono y sus Interacciones en México: Síntesis a 2013. Programa Mexicano del Carbono. Colegio de Postgraduados. Universidad Autónoma de Chapingo. Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey. México.
- Cuevas, G.R; Salvador, C.J.L; Barrios, de la C. J.A. (2012). Manual de prácticas: campo y laboratorio. Universidad autónoma de Chiapas. Facultad de ciencias agrícolas. Campus IV. 44 p.
- De Melo, V. E.; S. Abarca M. (2006). Cafetales para servicios ecosistémicos, con énfasis en el potencial de sumideros de carbono. El caso de cooperativas cafetaleras afiliadas a

- COOCAFE Costa Rica. Ed. CATIE-FUNCAFOR-COOCAFE-OIKOCREDIT. Costa Rica. 61 p.
- Deans, J. D., J. Mora., and J. Grace. (1996). Biomass relationships for tree species in regenerating semi-deciduous tropical moist forest in Cameeroon. *For. Ecol. Manag.* 88: 215-225.
- Diakite, L. (1978). Evaluación de influencia del plan Chiautla, Tesis de Maestría. Colegio de Postgraduados, Chapingo, México.
- Dixon, RK; (1995). Agroforestry systems: sources or sinks of greenhouse gases? *Agroforestry Systems* 31: 99-116.
- Domínguez, T.A. (1996). Procesamiento digital de imágenes. Instituto de investigaciones sobre la Universidad y la Educación. 72
- Eastman, R. J. (2012). IDRISI Selva. Guía para SIG y procesamiento de imágenes. Manual versión 17. Clark University. Argentina. 321 p.
- Escamilla P., E. (1993). El café cereza en México: tecnología de la producción. Universidad Autónoma Chapingo. Chapingo, México. 116 p.
- Escamilla P., E.; S. Díaz C. (2002). Sistema de cultivo de café en México. Universidad Autónoma Chapingo. Veracruz, México. 57 p.
- Escobar, J., Betancur, T., Palacio, C.A., Muriel, R.D. (2008). Los retos de la enseñanza de los sistemas de información geográfica integrados a la gestión del medio ambiente y los recursos naturales. *Gestión y ambiente* 11 (3): 125-136
- Espinoza, D; W; L. Krishnamurthy; A. Vázquez A.; A. Torres R. (2012). Almacén de carbono en sistemas agroforestales con café. *Revista Chapingo. Serie Ciencias Forestales y del Ambiente* 8 (1): 57-70.
- Etchevers, B, J. D.; C. M. Monreal; C. Hidalgo; M. Acosta; J. Padilla; R. M. López. (2005). Manual para la determinación de carbono en la parte aérea y subterránea de sistemas de producción en laderas. Ed. Colegio de Postgraduados. México. 29 p.

- Etchevers, B. J. D.; C. M. Monreal; K. Quednow; L. Jiménez. (2001). Los stocks de carbono en diferentes compartimientos de la parte aérea y subterránea en sistemas forestales y agrícolas de ladera en México. Colegio de Postgraduados. México. 19 p.
- Etchevers, B. J.D; Masera, O; Balbontin, C; Gómez D; Monterroso, A; Martínez, R; Acosta, M; Martínez, M. and Ortiz, C. (2006). Soil carbon sequestration in México and central America (Biome A). pp. 119-146. In: LAI, R.,C.C. Cerri, M. Bernoux, J. Etchevers and E. Cerri (Eds.). Carbon sequestration in soils of Latin America. Howarth Press, Inc. New York, USA. 554 p.
- FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación). (2002). Captura de carbono en los suelos para un mejor manejo de la tierra. Servicio de Publicaciones y multimedia FAO. Roma, Italia. 83 p.
- 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 internet <http://www.fao.org/DOCREP/Y2779S/y2779s00.htm/Contents> (Citado el 8 de agosto 2015).
- FAO. (2007). El estado mundial de la agricultura y la alimentación. Pagos a los agricultores por servicios ambientales. Agricultura - 38. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación. Roma, 255 p.
- FAO. (2014). Los bosques y el cambio climático. Las funciones de los bosques en el cambio climático. Documento en línea en: <http://www.fao.org/docrep/017/i2906s/i2906s00.pdf>. Consultado en 5 de diciembre 2015.
- Figueroa, N., C.; J. Etchevers B.; D. Velázquez M., A. Acosta M. 2(005). Concentración de carbono en diferentes tipos de vegetación de la Sierra Norte de Oaxaca. TERRA Latinoamericana 23 (1): 57-64.
- Figueroa, N.C; J.D. Etchevers B; Velásquez M.A y Acosta M.M.(2004). Concentración de carbono en diferentes tipos de vegetación de la Sierra Norte de Oaxaca. TERRA Latinoamericana, 23: 57-64. 8 p.

- Fisher, R.F; and Binkley, D. (2000). Ecology and management of forest soils. Third edition. Ed. John Wiley & sons. INC. 139-160 p.
- Galicia, L., Fernández, M. L. C., Ramírez, L. M. G., & Couturier, S. (2014). Detección de cambio ambiental en selvas y bosques de México con percepción remota: un enfoque multiescalar de espacio y tiempo. *Interciencia*,39(6), 368.
- Galicia, L; Cuevas F., María L; González., Laura M; Couturier, S. (2014). Detección de cambio ambiental en selvas y bosques de México con percepción remota: un enfoque multiescalar de espacio y tiempo. *Interciencia*, vol. (39):6: 368-374
- García, F y Oliva, M. (1998). Un nuevo campo de acción en la química biológica: Parte I. Generalidades sobre el cambio global. Educación Química. UNAM. México.
- García, M. E. (2006). Análisis visual de imágenes. Área de Geodinámico Externa
- García, S. A., & Martínez, L. J. (2010). Método para identificación de cultivos de arroz (*Oryza sativa* L.) con base en imágenes de satélite. *Agronomía Colombiana*, 28(2), 281-290.
- García, Silva, R.; Espinosa, Victoria, D.; Figueroa, Sandoval, B.; García, Calderón, N.E.; Gallardo, Lancho, J.F. (2006). Reservas de carbono orgánico y de fracciones húmicas en un Vertisol sometido a siembra directa. UACH, México. *TERRA Latinoamericana*, Vol. 24, Núm. 2, abril-junio, 2006, pp. 241-251
- Gayoso, J; Guerra, J. (2005). Contenido de carbono en la biomasa aérea de bosques nativos en Chile. *Bosque* 26(2). 33-38.
- Gil, J.L., García, E.B., Ponvert, D.D.R., Sánchez, R., Vega, M.B. (2003). Enfoques para la clasificación digital de imágenes mono y multiespectrales y su implementación en el software cubano TN Estudio V2.0. *Revista de teledetección*. (20): 35-52
- Gómez, D. J. D. (1984). Evaluación de la Homogeneidad de algunas propiedades del suelo dentro de tres sistemas terrestres del Área de Influencia a Chapingo. Tesis de Licenciatura, Universidad Autónoma Chapingo, Texcoco, México.

- Gómez, P.A y Vásquez, Y. (1981). Successional studies of a rain forest in Mexico. In: Forest succession. Concepts and application. D. C. West, H. H. Shugart and D. B. Botkin (eds.). Springer-Verlang. New York, U.S.A. 246-266 p.
- Gómez, T.C.A., Chávez, H.Y., Morales, M.L.M., Díaz, F.E., Gómez, T.R.A, & Zepeda, C.H. (2003). Predicción espacial de carbono edáfico superficial en zonas forestales mediante análisis digital de terreno y sig: Uso de la radiación solar potencial. *Foresta Veracruzana*, 5(2): 49-56
- González, J.A., Montes, I. C., Monedero, C. (2008). Invirtiendo en capital natural: un marco para integrar la sostenibilidad ambiental en las políticas de cooperación. *Ecosistemas* 17(2):52-69.
- González, O.M.L. (2014). Identificación de áreas prioritarias para restauración ecológica, en la región Chignahuapan – Zacatlán, Puebla. Tesis de maestría, Colegio de Postgraduados, Texcoco, Edo. de México, México
- González-Medrano, F. (2004). Tierra de ríos y montañas. En: Robles, G.P., E. Ezcurra, E. Peters, E. Pallares y A. Ezcurra (Comps.). *La Gran Provincia Natural Tamaulipeca*. Gobierno del Estado de Tamaulipas. Agrupación Sierra Madre. Tamaulipas, México, pp. 41-64.
- Gregorich, E.G; and Janzen, H.H. (1996). Storage of soil carbon in the light fraction and macroorganic matter. Carter MR, Stewart BA (Eds.). *Structure and organic matter storage in agricultural soils*. Lewis publishers. Boca Raton Florida. 167-192 p.
- Gutiérrez, C.EV. (1997). Clasificación interpretativa de suelos para proyectos de drenaje agrícola subterráneo. Tesis de Maestría, Colegio de Postgraduados, Texcoco, Edo. de México, México
- Gutiérrez, P.J y Gould, M. (1994). *SIG: Sistemas de información geográfica*. Editorial Síntesis, Madrid, 251 pp
- INEGI. (2009a). Conjunto de datos vectoriales del Marco Geoestadístico Municipal 2005 versión 1.0 (Censo de Población y Vivienda 2005).
- INEGI. (2009b). Conjunto de datos vectoriales Edafología Serie I. Aguascalientes, México.

- INEGI. (2009c). Conjunto de datos vectoriales de las Sub provincias fisiográficas. Aguascalientes, México.
- INEGI. (2014). Conjunto de datos vectoriales de Uso de Suelo y Vegetación. Conjunto de datos vectoriales de la Carta de Uso de Suelo y Vegetación. . Aguascalientes, México.
- Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander Von Humboldt. (2006). Los sistemas de información geográfica. *Geoenseñanza*, 11(1), 107-116
- Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI). 1997. Diccionario de datos de uso del suelo y vegetación, escala 1:250 000. Documento en línea en: http://www.inegi.org.mx/geo/contenidos/reclnat/usuarios/doc/dd_usyv_v3_250k.pdf Consultado en 5 de mayo 2015.
- Instituto Nacional de Recursos Naturales (INRENA). (1998). Mapa de Bosques Secos del Departamento de Piura. Memoria Descriptiva. Ministerio De Agricultura, Instituto Nacional de Recursos Naturales, Proyecto Algarrobo y Gobierno de los Países Bajos. Edit. INRENA, Lima.
- IPCC (2007). Cambio climático 2007: Informe de síntesis. Contribución de los Grupos de trabajo I, II y III al Cuarto Informe de evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático [Equipo de redacción principal: Pachauri, R.K. y Reisinger, A. (directores de la publicación)]. IPCC, Ginebra, Suiza, 104 p.
- IPCC. (2001). Cambio climático 2001: Impactos, adaptación y vulnerabilidad. Resumen del grupo de trabajo II. IPCC, Ginebra, Suiza, 95 p.
- IPCC. (2008). Report of the 29th session of the IPCC. Geneva, 31 August - 4 September. pp.53.
- Jaimes, A.F.(1987). Definición de Agrohabitats “A priori” en el Oriente del Estado de Morelos a partir del Levantamiento Fisiográfico. Tesis de Licenciatura, Universidad Autónoma Chapingo, Texcoco, México.
- Jaramillo, V.J. (2004). El ciclo global del carbono. In: Martínez, J; A. Fernández B. (eds.). Cambio climático: una visión desde México. Ed. Instituto Nacional de Ecología. México. 525 p.

- Johnston, C. A. (1998). Geographic information systems in ecology. Blackwell Science.
- La ciencia Ecológica. (2004). Disponible en:
http://iespana.es/natureduca/cienc_ciclo_carbono.htm (citado 15 Julio 2015).
- Lal, R.M. Kimble, K. Follet and A. Atewart. (1998). Pedospheric processes and the carbon cycle. In; Soil processes and the carbon cycle. In: Lal, R, Kimble, J., K Follet, R. and Stewart (ed). Chapter 1. CRC Boca Raton, FL. 1-7 p.
- Lara, E. L., Simeón, C. P., & Navarro, J. G. M. (1998). LOS SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA.
- Lencinas, D.J. (2011). Tecnología geomática para la evaluación de bosques nativos en Patagonia. CIEFAP - Serie Ciencia y Tecnología
- León Arteta Regulo, (1972). Levantamiento Fisiográfico como una alternativa para hacer recordaciones regionales del uso de la tierra. Tesis de Licenciatura, Chapingo, México. 48 Pág.
- Lilienfein J; W. Wilcke; M. Ayarza; L. Carmo; W. Zech. (2000). Soil acidification in Pinus caribea forest on Brazilian savanna Oxisols. Forest Ecology & Management 128: 145-157.
- López L., V. M. (2009). Cambio Climático y Calentamiento Global: ciencia, evidencias, consecuencias y propuestas. Ed. Trillas. México. 227p.
- López T. G. (2007). Sistemas agroforestales 8. SAGARPA. Subsecretaría de Desarrollo Rural. Colegio de Postgraduados. Puebla. 8 p.
- Martínez, E.H; Fuentes, E.J.P; y Acevedo, H.E. (2008). Carbono orgánico y propiedades del suelo. J. Soil Sc. Plant Nutr. 8(1): 68-96.
- Martínez, P.D., Pérez, P.E., Partida, S.J.G., Escamilla, P.E., López, G.F.J., Díaz, C.S., Morales, R.V., Castillo, P.G., Contreras, L.A. (2004). El manejo agronómico de la calidad del café. Avances en la investigación agrícola, pecuaria, forestal y acuícola en el trópico mexicano, Veracruz, México.

- Martínez, V. G. y Gaona, S. O. (2005). Identificación y variación de la vegetación y uso del suelo en la reserva pantanos de Centla, Tabasco (1990-2000) mediante sensores remotos y sistemas de información geográfica. *Ra Ximhai*, 1(2).
- Martinez, Y. A; Sarukhan, J. (1993). Cambios estacionales en el suelo de un boque tropical caducifolio u uno subcaducifolio en Chamela, Jalisco, México. *Acta Botánica Mexicana*. Núm. 21. 1-6 p.
- Masera, O.; Sheinbaum, C. (2004). Mitigación de emisiones de carbono y prioridades de desarrollo nacional". In: Fernández, A.; Martínez, J.; Osnaya P. (eds.). *Cambio climático: una visión desde México*". INE-Semarnat, México.pp.355-368
- Mena V., E; J. Andrade H.; M. Navarro C. (2011). Biomasa y carbono almacenado en sistemas agroforestales con café y en bosques secundarios en un gradiente altitudinales en Costa Rica. *Agroforestería Neotropical*, No. 1: 5-17.
- Mendiet,a L., M; L. R. Rocha M. (20079). *Sistemas agroforestales*. Ed. Universidad Nacional Agraria. Nicaragua. 115 p.
- Mittermeier, R. A., Robles-Gil, P., Hoffmann, M., Pilgrim, J., Brooks, T., Goettsch-Mittermeier, C., ...Da Fonseca, G. A. B. (2004). Hotspots revisited: Earth's biologically richest and most endangered terrestrial ecoregions. USA: Conservation International, CEMEX S.A. DE C.V., Agrupación Sierra Madre.
- Moguel, P y V. M. Toledo. (2004). Conservar produciendo: biodiversidad, café orgánico y jardines productivos. *Biodiversitas* (55): 2-7.
- Moguel, P. y V. M. Toledo. (1996). Review: Biodiversity conservation in tradicional coffe systems of Mexico. *Conservation Biology* 13 (1) 11-21 p.
- Moguel, P. y V. M. Toledo. (2004). Conservar produciendo: biodiversidad, café orgánico y jardines productivos. *Biodiversitas*55: 2-7.
- Moguel, P. y V.M. Toledo. (1999). El café en México. *Ecología, cultura indígena y sustentabilidad*. *Ciencias* 43: 40-51.

- Montagnini, F., & Nair, P. K. R. (2004). Carbon sequestration: An underexploited environmental benefit of agroforestry systems. *Agroforestry Systems* 61, 281 – 295.
- Nair, P. K. (2004). Agroforestry: Trees in support of sustainable agriculture. In: Hillel, H.; Rosenzweig, C.; Powlson, D.; Scow, K.; Singer, M.; Sparks, D. (eds). *Encyclopedia of Soils in the Environment*. Elsevier, London, U.K. pp. 35-44.
- Nair, P. K. R. (1993). *An introduction to agroforestry*. The Netherlands. Kluwer Academic Publishers.
- Nazareno, O.M. (2014). Métodos de clasificación de imágenes satelitales para la determinación de usos del suelo agrícola en el partido de Tandil (Provincia de Buenos Aires, Argentina). *Geografía y Sistemas de Información Geográfica (GEOSIG)*, 6(6): 11-28
- Nolasco, M. (1985). *Café y sociedad en México*. Centro de Ecodesarrollo, México D.F. 454 p.
- Oelbermann, M., Voroney, P. R., & Gordon, M. A. (2004). Carbon sequestration in tropical and temperate agroforestry systems: a review with examples from Costa Rica and southern Canada. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 104, 359 - 377.
- ONU. (2011). *Las ciudades y el cambio climático: orientaciones para políticas Informe mundial sobre asentamientos humanos 2011*. Acerto. Rio de Janeiro, Brasil. 66 p.
- Ortiz S.C. y Cuanalo H.E. (1984). *Metodología del levantamiento fisiográfico: un sistema de clasificación de tierras*. Colegio de Postgraduados. Chapingo, México.
- Ortiz, Villanueva, B y Ortiz Solorio, C. A. (1990). *Edafología*. Universidad Autónoma Chapingo. Texcoco, México. 394 p.
- Paruelo, J.M. (2008). La caracterización funcional de ecosistemas mediante sensores remotos. *Asociación Española de Ecología Terrestre*. 17 (3): 4-22
- PECC. (2012). *Informe de avances del Programa Espacial del Cambio Climático 2009-2012*. Primera edición, SEMARNAT. Mexico. Disponible en <http://www.cambioclimatico.gob.mx/index.php/es/publicaciones.html> (citado el 15 de agosto de 2015)

- Pérez, E. *et al.*, (2005). Potencial de plantación y fijación de carbono. Tomo MAGFORPROFOR. Pp. 15, 16,18, 165p.
- Pérez, P.E., Partida, S. J.G., Martínez, P.D. (2005). Determinación de las subdenominaciones de origen del café Veracruz (estudio preliminar) *Revista de Geografía Agrícola*. (35): 23-56
- Ponce H. R. (1978). Metodología para la definición de agrohabitats y generación de recomendaciones de producción en base a tecnología tradicional. Tesis de Maestría, Colegio de Postgraduados, Chapingo, México.
- Post W. M., K. C. Know. (2002). Soil Carbon Sequestration and Land-Use Change: Processes and Potential. *Global Change Biology* 6:317-328.
- Pritchett, W.L. (1986). Suelos forestales. Propiedades, conservación y mejoramiento. Limusa. México, D.F.
- Prontuario de Información Geográfica Municipal de los Estados Unidos Mexicanos, Huatusco (PIGMEUM). (2009). Clave geoestadística 21053 y 21208. Documento en línea en <http://mapserver.inegi.org.mx/dsist/prontuario/index2.cfm>. Consultado en abril de 2015.
- Puerta, T. R., J. Rengifo T. y N. Bravo M. /2011(. *ArcGis básico 10*. Editorial Facultad de Recursos Naturales Renovables. Universidad Nacional Agraria de la Selva. Perú. 148 p.
- Raintree, J. B. (1989). *Theory and practice of agroforestry diagnosis and design*. Nairobi, Kenia: ICRAF.
- Rajagopal, R. I. (2004). Estimación del secuestro de carbono en sistemas agroforestales a base de cítricos en el trópico húmedo mexicano. Universidad Autónoma Chapingo. Maestría en Agroforestería para el Desarrollo Sostenible. México.
- Rodríguez, E. B., Domínguez, S. T., & Pérez, E. V. (2002). Aplicación de imágenes de satélite en la cartografía de uso de suelo y vegetación en una región del oriente del valle de México. *Revista Chapingo. Serie ciencias forestales y del ambiente*, 8(1), 13-19.

- Rosete, F y Bocco, G. (2003). Los sistemas de información geográfica y percepción remota. Herramientas integradas para los planes de manejo en comunidades forestales. *Gaceta Ecológica*, (68): 43-54
- Rügnitz, M. T.; Chacón, M. L.; Porro R. (2009). Guía para la Determinación de Carbono en Pequeñas Propiedades Rurales -- 1. ed. -- Lima, Perú.: Centro Mundial Agroforestal (ICRAF) / Consorcio Iniciativa Amazónica (IA). 79 p.
- Rullán, S.C.D., Gama, C.L.M., Galindo, A, A., Olthoff, A. E. (2011). Clasificación no supervisada de la cobertura de suelo de la región Sierra de Tabasco mediante imágenes LANDSAT ETM+. *Universidad y ciencia*, 27(1): 33-41
- Rullán-Silva, C. D., Gama-Campillo, L. M., Galindo-Alcántara, A., & Olthoff, A. E. (2011). Clasificación no supervisada de la cobertura de suelo de la región Sierra de Tabasco mediante imágenes LANDSAT ETM+. *Universidad y ciencia*, 27(1), 33-41.
- Sánchez, V.G; Obrador, O. J. J; Padilla, L. D. J; Salgado, G. S. (2003). Densidad en un vertisol con diferentes agroecosistemas. *Interciencia*, vol. 28, Asociación Interciencia Caracas, Venezuela 347-351 p.
- Schimel, D.S: (1995). Terrestrial Ecosystems and the Carbon Cycle. *Global Change Biology*, 1, 77-91.
- Segura, C; M. A., P. Sánchez G., C. A. Ortiz S. y Ma. C. Gutiérrez C. (2005). Carbono orgánico de los suelo de México. *Terra Latinoamericana* 1: 21-27.
- SEMARNAT. (2009). Cambio climático: ciencia, evidencia y acciones. Ed. SEMARNAT. México. 84 p.
- SEMARNAT. (2013). Informe de la situación general del medio ambiente en México. Compendio de estadísticas ambientales indicadores clave y de desempeño ambiental. Edición 2012. Ed. Semarnat. D. F., México. 361 p.
- Smith, T.M; W.O. Cramer, R.K. Dixon; Leemans, R.P, Neilson, and A.M. Salomon. (1993). The global terrestrial carbon cycle. En Wisniewski, J. y R.N. Sampson 8Eds.) *Terrestrial*

- biospheric Carbon Fluxes: Quantification and sources of Co₂. Kluwer Academic Publishers, Netherlands. 19-37 p.
- Suárez, P., D. A. (2002). Cuantificación y valoración económica del servicio ambiental almacenamiento de carbono en sistemas agroforestales de café de la Comarca Yassica Sur, Matagalpa Nicaragua. Tesis Mag. Sc. CATIE, Turrialba, Costa Rica. 117 p.
- Torregroza, F.E., Gómez, J.A., Borja, B.F. (2014). Aplicación del sistema de información geográfico Quantum GIS en la regionalización ecológica de la cuenca Cienega de la virgen (Cartagena de Indias – Colombia). RITI Journal 2, 1
- Torres, J.; A. Tenorio; A. Gómez (ed.). 2011. Agroforestería: una estrategia de adaptación al cambio climático. Propuesta de adaptación tecnológica del cultivo de café y cacao en respuesta al cambio climático en San Martín. Ed. Soluciones prácticas-ITDG. Lima. Perú. 124 p.
- Trejo, I., & Hernández, J. (1996). Identificación de la selva baja caducifolia en el estado de Morelos, México, mediante imágenes de satélite. Investigaciones Geográficas, 5, 11-18.
- Vega, G.Á., López, G, J., Manzo, D. L de L. (2008). Análisis espectral y visual de vegetación y uso del suelo con imágenes Landsat ETM+ con apoyo de fotografías aéreas digitales en el Corredor Biológico Chichinautzin, Morelos, México. Investigaciones geográficas, (67): 59-75.
- Verdú, F y Salas, J. (2010). Cartografía de áreas quemadas mediante análisis visual de imágenes de satélite en la España peninsular para el periodo 1991-2005. Revista Internacional de la Ciencia y Tecnología de la Información Geográfica, (10): 54-81
- Vergés, F. A. R., & Bocco, G. (2003). Los sistemas de información geográfica y la percepción remota. Herramientas integradas para los planes de manejo en comunidades forestales. Gaceta ecológica, (68), 43-54.
- Villavicencio, E. L. (2013). Caracterización agroforestal en sistemas de café tradicional y rustico en San Miguel, Veracruz, México. Revista Chapingo. Serie ciencias forestales y del ambiente. 19 (1): 67-80 p.

Warin,g H.R y Schlesinger W.H.(1985). Forest ecosystems concepts and management. Academic Press. Orlando, Florida.

Young, A. (1997). Agroforestry for soil management. 2da ed. UK. CAB International. International Centre for Research in Agroforestry (ICRAF).

Zorogastúa, C. P., Quiroz, G.R. y Garatuza, P. J. (2011). Evaluación de cambios en la cobertura y uso de la tierra con imágenes de satélite en Piura-Perú. *Ecología Aplicada*, 10(1): 3-22

3.8 ANEXOS

Anexo.1 Reservorios de Carbono en suelo

Cuadro 11 Sistema Bosque Mesófilo de Montaña (BMM)

ID	Sistema	% Carbono	Dap (Mgm ⁻³)	COS (Mg ha ⁻¹)	Promedio de C por sistema (Mg ha ⁻¹)
1	BMM1	7.792	0.96	150.159	142.526
2	BMM2	8.484	0.82	138.639	
3	BMM3	8.191	0.85	138.779	

Cuadro 12 Sistema Potrero (PTO)

ID	Sistema	% Carbono	Dap	COS (Mg ha ⁻¹)	Promedio de C por sistema
4	PTO1	5.479	0.91	99.784	107.046
5	PTO2	6.799	0.85	116.049	
6	PTO3	6.591	0.80	105.305	

Cuadro 13 Sistema de Policultivo Comercial (PCO)

ID	Sistema	% carbono	Dap	Cos (Mg ha ⁻¹)	Promedio de C por sistema
7	PC1	2.661	1.04	55.092	56.440
9	PC3	1.749	1.03	36.150	
13	PC7	3.977	1.00	79.275	
19	PC13	2.443	0.97	47.237	
22	PC16	2.266	1.00	45.244	
23	PC17	2.438	1.00	48.646	
26	PC20	2.817	0.86	48.356	
27	PC21	2.343	1.00	46.751	
32	PC26	4.264	1.00	84.967	
33	PC27	2.755	1.00	54.990	
34	PC28	2.298	1.03	47.561	
35	PC29	2.411	1.08	51.888	
36	PC30	3.413	1.07	73.038	
37	PC31	2.563	1.00	51.004	
40	PC34	3.962	0.96	76.403	

Cuadro 14 Sistema de Policultivo Tradicional (PTR)

ID	Sistema	% carbono	Dap	Cos (Mg ha ⁻¹)	Promedio por sistema
10	PTR4	2.44	1.03	50.449	67.899

11	PTR5	3.642	0.97	70.373
14	PTR8	5.255	0.96	101.269
17	PTR11	3.021	1.00	60.460
18	PTR12	2.75	0.97	53.119
28	PTR22	3.651	1.03	75.387
29	PTR23	3.377	0.91	61.298
39	PTR33	3.797	0.93	70.838

Cuadro 15 Sistema de Monocultivo Especializado (ESP)

ID	Sistema	% carbono	Dap	Cos (Mg ha ⁻¹)	Promedio por sistema
8	ESP2	2.573	1.00	51.374	
12	ESP6	4.88	0.88	86.089	
15	ESP9	2.775	1.07	59.246	
16	ESP10	3.493	1.00	69.767	
20	ESP14	3.658	1.00	73.258	
21	ESP15	3.767	1.00	75.290	65.61
24	ESP18	2.96	1.00	59.062	
25	ESP19	2.612	1.03	54.041	
30	ESP24	2.152	1.00	42.997	
31	ESP25	2.627	1.00	52.540	
38	ESP32	5.24	0.94	98.054	

Anexo.2 Reservorios de Carbono en hojarasca

Cuadro 16 Sistema Bosque Mesófilo de Montaña (BMM)

ID	Clave	% carbono	Peso (kg)*m ²	C (Mg ha ⁻¹)	Promedio de C por sistema
81	BMM1	42.94	0.491	2.108	
82	BMM2	36.53	0.430	1.571	1.541
83	BMM3	26.91	0.351	0.945	

Cuadro 17 Sistema de Policultivo Comercial (PCO)

ID	Clave	% carbono	Peso (kg)* m ²	C (Mg ha ⁻¹)	Promedio de C por sistema
87	PC1	31.14	0.531	1.654	
89	PC3	35.17	1.248	4.389	
93	PC7	23.25	1.028	2.390	2.378
99	PC13	27.64	0.305	0.843	
102	PC16	11.05	0.171	0.189	
103	PC17	39.59	0.957	3.789	

106	PC20	13.37	0.327	0.437
107	PC21	38.65	1.008	3.896
112	PC26	38.69	0.942	3.645
113	PC27	34.66	0.784	2.717
114	PC28	35.51	0.636	2.258
115	PC29	34.88	0.833	2.906
116	PC30	37.67	0.615	2.317
117	PC31	26.5	0.825	2.186
120	PC34	25.17	0.815	2.051

Cuadro 18 Sistema de Policultivo Tradicional (PTR)

ID	Clave	% carbono	Peso (kg)* m ²	C (Mg ha ⁻¹)	Promedio de C por sistema
90	PTR4	33.46	1.051	3.517	
91	PTR5	29.38	0.862	2.533	
94	PTR8	26.12	0.549	1.434	
97	PTR11	31.73	0.645	2.047	
98	PTR12	32.88	0.537	1.766	2.585
108	PTR22	35.61	0.858	3.055	
109	PTR23	44.78	1.001	4.482	
119	PTR33	37.75	0.490	1.850	

Cuadro 19 Sistema de Monocultivo Especializado (ESP)

ID	Clave	% carbono	Peso (kg)* m ²	C (Mg ha ⁻¹)	Promedio de C por sistema
88	ESP2	32.83	1.221	4.009	
92	ESP6	36.24	0.363	1.316	
95	ESP9	19.04	0.067	0.128	
96	ESP10	42.8	1.005	4.301	
100	ESP14	36.1	0.608	2.195	
101	ESP15	45.14	0.844	3.810	3.17
104	ESP18	33.03	0.553	1.827	
105	ESP19	42.75	1.442	6.165	
110	ESP24	33.13	1.122	3.717	
111	ESP25	26.52	0.732	1.941	
118	ESP32	31.72	1.716	5.443	

Anexo.3 Reservorios de Carbono en mantillo

Cuadro 20 Sistema Bosque Mesófilo de Montaña (BMM)

ID	Clave	% carbonono	Peso (kg)0.25 m ²	Peso (kg)* m ²	C (Mg ha ⁻¹)	Ton/ha	Promedio de C por sistema
41	BMM1	35.01	0.545	2.18	7.63		
42	BMM2	18.14	0.705	2.82	5.12		5.351
43	BMM3	22.51	0.367	1.468	3.30		

Cuadro 21 Sistema de Policultivo Comercial (PCO)

ID	Clave	% carbonono	Peso (kg)0.25 m ²	Peso (kg)* m ²	C (Mg ha ⁻¹)	Ton/ha	Promedio de C por sistema
47	PC1	7.837	1.791	7.164	5.61		
49	PC3	21.01	1.176	4.704	9.88		
53	PC7	13.57	1.702	6.808	9.24		
59	PC13	13.71	0.728	2.912	3.99		
62	PC16	5.342	1.8	7.2	3.85		
63	PC17	10.23	1.574	6.296	6.44		
66	PC20	8.512	2.677	10.708	9.11		
67	PC21	9.966	1.665	6.66	6.64		5.623
72	PC26	10.53	1.523	6.092	6.41		
73	PC27	6.081	1.109	4.436	2.70		
74	PC28	9.469	1.037	4.148	3.93		
75	PC29	8.154	1.332	5.328	4.34		
76	PC30	5.191	1.29	5.16	2.68		
77	PC31	9.9	1.248	4.992	4.94		
80	PC34	8.7	1.312	5.248	4.57		

Cuadro 22 Sistema de Policultivo Tradicional (PTR)

ID	Clave	% carbonono	Peso (kg)0.25 m ²	Peso (kg)* m ²	C (Mg ha ⁻¹)	Ton/ha	Promedio de C por sistema
50	PTR4	10.79	1.295	5.18	5.59		
51	PTR5	11.32	0.682	2.728	3.09		
54	PTR8	10.93	1.398	5.592	6.11		5.746
57	PTR11	12.37	1.738	6.952	8.60		
58	PTR12	9.522	1.273	5.092	4.85		
68	PTR22	7.949	1.762	7.048	5.60		

69	PTR23	10.11	1.796	7.184	7.26
79	PTR33	7.271	1.674	6.696	4.87

Cuadro 23 Sistema de Monocultivo Especializado (ESP)

ID	Clave	% carbono	Peso (kg)0.25m ²	Peso (kg)*m ²	C (Mg ha ⁻¹)	Ton/ha	Promedio de C por sistema
48	ESP2	10.02	0.61	2.44	2.44		
52	ESP6	11.82	2.06	8.24	9.74		
55	ESP9	5.47	2.767	11.068	6.05		
56	ESP10	15.64	0.62	2.48	3.88		
60	ESP14	11.45	1.912	7.648	8.76		
61	ESP15	9.679	1.75	7	6.78		6.33
64	ESP18	10.73	1.41	5.64	6.05		
65	ESP19	10.05	1.828	7.312	7.35		
70	ESP24	9.803	1.581	6.324	6.20		
71	ESP25	8.645	1.46	5.84	5.05		
78	ESP32	12.75	1.44	5.76	7.34		

Anexo.4 Características del suelo: pH

Cuadro 24 Sistema Bosque Mesófilo de Montaña (BMM)

ID	Clave	pH 1:2	Interpretación	pH promedio	Interpretación
1	BMM1	5.4	Moderadamente ácido		
2	BMM2	3.9	Fuertemente ácido	4.5	Fuertemente ácido
3	BMM3	4.3	Fuertemente ácido		

Cuadro 25 Sistema Potrero (Pto)

ID	Clave	pH 1:2	Interpretación	pH promedio	Interpretación
4	PTO1	3.8	Fuertemente ácido		
5	PTO2	4.7	Fuertemente ácido	4.7	Fuertemente ácido
6	PTO3	5.8	Moderadamente ácido		

Cuadro 26 Sistema de Policultivo Comercial (PC)

ID	Clave	pH 1:2	Interpretación	pH promedio	Interpretación
7	PC1	3.6	Fuertemente ácido	3.7	Fuertemente ácido
9	PC3	3.9	Fuertemente ácido		
13	PC7	4.0	Fuertemente ácido		
19	PC13	2.8	Fuertemente ácido		
22	PC16	2.8	Fuertemente ácido		
23	PC17	3.9	Fuertemente ácido		
26	PC20	3.2	Fuertemente ácido		
27	PC21	3.3	Fuertemente ácido		
32	PC26	4.1	Fuertemente ácido		
33	PC27	3.1	Fuertemente ácido		
34	PC28	4.3	Fuertemente ácido		
35	PC29	3.2	Fuertemente ácido		
36	PC30	4.4	Fuertemente ácido		
37	PC31	4.0	Fuertemente ácido		
40	PC34	5.3	Moderadamente ácido		

Cuadro 27 Sistema de Policultivo Tradicional (PT)

ID	Clave	pH 1:2	Interpretación	pH promedio	Interpretación
10	PTR4	3.5	Fuertemente ácido	4.2	Fuertemente ácido
11	PTR5	4.7	Fuertemente ácido		
14	PTR8	4.2	Fuertemente ácido		
17	PTR11	3.4	Fuertemente ácido		
18	PTR12	6.2	Moderadamente ácido		
28	PTR22	4.5	Fuertemente ácido		
29	PTR23	3.8	Fuertemente ácido		
39	PTR33	3.0	Fuertemente ácido		

Cuadro 28 Sistema de Monocultivo Especializado (ME)

ID	Clave	pH 1:2	Interpretación	pH promedio	Interpretación
8	ESP2	4.0	Fuertemente ácido	3.5	Fuertemente ácido
12	ESP6	3.5	Moderadamente ácido		
15	ESP9	4.6	Fuertemente ácido		
16	ESP10	3.9	Fuertemente ácido		
20	ESP14	2.9	Fuertemente ácido		

21	ESP15	3.6	Moderadamente ácido
24	ESP18	2.9	Fuertemente ácido
25	ESP19	3.4	Fuertemente ácido
30	ESP24	3.1	Fuertemente ácido
31	ESP25	3.3	Fuertemente ácido
38	ESP32	3.3	Fuertemente ácido

Anexo.5 Características del suelo: Conductividad Eléctrica (C.E)

Cuadro 29 Sistema Bosque Mesófilo de Montaña (BMM)

ID	Clave	C.E(dS.m ⁻¹)	Interpretación	C.E promedio (dS.m ⁻¹)
1	BMM1	0.12	No Salino	0.060
2	BMM2	0.01	No Salino	
3	BMM3	0.05	No Salino	

Cuadro 30 Sistema Potrero (Pto)

ID	Clave	C.E(ds= m ⁻¹)	Interpretación	C.E promedio
4	PTO1	0.15	No Salino	0.120
5	PTO2	0.15	No Salino	
6	PTO3	0.06	No Salino	

Cuadro 31 Sistema de Policultivo Comercial (PC)

ID	Clave	C.E(ds= m ⁻¹)	Interpretación	C.E promedio
7	PC1	0.04	No Salino	0.131
9	PC3	0.27	No Salino	
13	PC7	0.26	No Salino	
19	PC13	0.2	No Salino	
22	PC16	0.08	No Salino	
23	PC17	0.15	No Salino	
26	PC20	0.15	No Salino	
27	PC21	0.18	No Salino	
32	PC26	0.22	No Salino	
33	PC27	0.03	No Salino	
34	PC28	0.06	No Salino	

35	PC29	0.07	No Salino
36	PC30	0.14	No Salino
37	PC31	0.03	No Salino
40	PC34	0.09	No Salino

Cuadro 32 Sistema de Policultivo Tradicional (PT)

ID	Clave	C.E(ds= m ⁻¹)	Interpretación	C.E promedio
10	PTR4	0.1	No Salino	
11	PTR5	0.07	No Salino	
14	PTR8	0.1	No Salino	
17	PTR11	0.05	No Salino	
18	PTR12	0.27	No Salino	0.166
28	PTR22	0.26	No Salino	
29	PTR23	0.02	No Salino	
39	PTR33	0.46	No Salino	

Cuadro 33 Sistema de Monocultivo Especializado (ME)

ID	Clave	C.E(ds= m ⁻¹)	Interpretación	C.E promedio
8	ESP2	0.05	No Salino	
12	ESP6	0.17	No Salino	
15	ESP9	0.2	No Salino	
16	ESP10	0.07	No Salino	
20	ESP14	0.08	No Salino	
21	ESP15	0.31	No Salino	0.143
24	ESP18	0.08	No Salino	
25	ESP19	0.04	No Salino	
30	ESP24	0.33	No Salino	
31	ESP25	0.14	No Salino	
38	ESP32	0.1	No Salino	

Anexo.6 Características del suelo: Composición Mecánica

Cuadro 34 Sistema Bosque Mesófilo de Montaña (BMM)

ID	Clave	Distribución del tamaño de partículas (%)			Clase textural
		Arena	Arcilla	Limo	
1	BMM1	44	14	42	Franco
2	BMM2	32	12	56	Migajón limoso
3	BMM3	36	14	50	Migajón limoso

Cuadro 35 Sistema Potrero (Pto)

ID	Clave	Distribución del tamaño de partículas (%)			Clase textural
		Arena	Arcilla	Limo	
4	PTO1	26	18	56	Migajón limoso
5	PTO2	23	20	57	Migajón limoso
6	PTO3	24	18	58	Migajón limoso

Cuadro 36 Sistema de Policultivo Comercial (PC)

ID	Clave	Distribución del tamaño de partículas (%)			Clase textural
		Arena	Arcilla	Limo	
7	PC1	6	68	26	Arcilla
9	PC3	4	70	26	Arcilla
13	PC7	5	56	39	Arcilla
19	PC13	3	70	27	Arcilla
22	PC16	5	62	33	Arcilla
23	PC17	7	54	39	Arcilla
26	PC20	6	62	32	Arcilla
27	PC21	3	66	31	Arcilla
32	PC26	11	46	43	Arcillo limoso
33	PC27	1	72	27	Arcilla
34	PC28	3	68	29	Arcilla
35	PC29	5	62	33	Arcilla
36	PC30	3	62	35	Arcilla
37	PC31	12	54	34	Arcilla
40	PC34	12	40	48	Arcillo limoso

Cuadro 37 Sistema de Policultivo Tradicional (PT)

ID	Clave	Distribución del tamaño de partículas (%)			Clase textural
		Arena	Arcilla	Limo	
10	PTR4	5	66	29	Arcilla
11	PTR5	15	38	47	Arcillo limoso
14	PTR8	12	36	52	Arcillo limoso
17	PTR11	6	58	36	Arcilla

18	PTR12	6	66	28	Arcilla
28	PTR22	5	62	33	Arcilla
29	PTR23	11	46	43	Arcillo limoso
39	PTR33	11	44	45	Arcillo limoso

Cuadro 38 Sistema de Monocultivo Especializado (ME)

Punto	Clave	Distribución del tamaño de partículas (%)			Clase textural
		Arena	Arcilla	Limo	
8	ESP2	5	64	31	Arcilla
12	ESP6	18	30	52	Migajón arcilloso limoso
15	ESP9	3	60	37	Arcilla
16	ESP10	7	58	35	Arcilla
20	ESP14	8	54	38	Arcilla
21	ESP15	4	64	32	Arcilla
24	ESP18	4	68	28	Arcilla
25	ESP19	12	52	36	Arcilla
30	ESP24	3	66	31	Arcilla
31	ESP25	3	64	33	Arcilla
38	ESP32	15	38	48	Migajón arcilloso limoso