

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA CHAPINGO



DEPARTAMENTO DE SUELOS

MAESTRÍA EN CIENCIAS EN AGROFORESTERÍA PARA EL
DESARROLLO SOSTENIBLE

"CAPTURA DE CARBONO Y CAPACIDAD DE CARGA ANIMAL DE UN
SISTEMA SILVOPASTORIL EN BOSQUE TROPICAL CADUCIFOLIO".

TESIS QUE COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL GRADO DE
MAESTRO EN CIENCIAS

PRESENTA:

LAURA FRESSIA AMADOR ALFARO

DIRECTOR DE TESIS:

JORGE LUIS CASTRELLÓN MONTELONGO

Chapingo, Texcoco, México, Julio de 2013



DIRECCION GENERAL ACADEMICA
DEPTO. DE SERVICIOS ESCOLARES
OFICINA DE EXAMENES PROFESIONALES

CAPTURA DE CARBONO Y CAPACIDAD DE CARGA ANIMAL DE UN SISTEMA
SILVOPASTORIL EN BOSQUE TROPICAL CADUCIFOLIO

Tesis realizada por **LAURA FRESSIA AMADOR ALFARO** bajo la dirección del
comité asesor indicado, aprobada por el mismo y aceptada como requisito parcial
para obtener el grado de:

**MAESTRA EN CIENCIAS EN AGROFORESTERÍA PARA EL DESARROLLO
SOSTENIBLE.**

DIRECTOR: _____
M.C. JORGE LUIS CASTRELLÓN MONTELONGO

ASESOR: _____
DRA. ELVIA LÓPEZ PÉREZ

ASESOR: _____
M.C. MIGUEL URIBE GÓMEZ

DEDICATORIA

Este trabajo de tesis quiero dedicarlo principalmente a mi mamá

Martha Alfaro Herrera

porque sin su amor y sin su apoyo me hubiera resultado difícil continuar con mis metas en la vida. Gracias mami una vez más por dar todo incondicionalmente.

Al hombre que me dio la vida, mi padre

Raúl Amador Bravo

quien a pesar de haberlo perdido hace mucho tiempo, ha estado siempre presente en mi mente y en mi corazón, guiándome desde el cielo.

A mi preciosa hija y motor de mi vida

Zyanya Valeria

porque a pesar de su corta edad sabe esperar pacientemente, sabe preguntar oportunamente y porque definitivamente fue una compañera más -en sentido literal- en esta travesía.

Al amor de mi vida

Israel Hernández Flores Verdad

Pues él fue una pieza importante en todo este recorrido, y sin su amor poco hubiese logrado. Gracias por el apoyo y la tolerancia infinita.

Y a mis hermanos:

Fátima Lizbeth, Antonio Martín y Marco Aarón

Los quiero mucho

AGRADECIMIENTOS

Agradezco al CONACYT por el apoyo financiero recibido.

Mis más sinceros agradecimientos al Maestro Jorge Castrellón Montelongo por su apoyo en la realización de este trabajo. Su revisión y aporte fueron de gran ayuda para la culminación del mismo.

De igual manera deseo agradecer al comité asesor, a la Doctora Elvia López Pérez y al Maestro Miguel Uribe Gómez por su revisión, aportación y asesoramiento en este trabajo, así como por su valiosa guía.

Un agradecimiento especial al M.C. José Luis Luna Palacios por la colaboración, la guía y el constante asesoramiento brindado durante la elaboración de este proyecto. Finalmente quiero expresar mis agradecimientos a su apreciable familia, especialmente a sus padres, por el apoyo otorgado para la realización de esta tesis.

GRACIAS

DATOS BIOGRÁFICOS

Laura Fressia Amador Alfaro, nace el nueve de septiembre de 1986 en Metepec, Estado de Puebla, México, siendo la hija mayor. La madre Martha Alfaro Herrera y el padre Raúl Amador Bravo, originarios de Izúcar de Matamoros Puebla, ella enfermera y él músico de profesión. Los estudios de primaria los realizó en la Escuela Miguel Hidalgo de Atencingo, Chietla de 1992 a 1998; la educación media básica en la Escuela Secundaria Técnica Núm. 6 de la misma población del año 1998 al 2001. En ese mismo año ingresa a la Preparatoria Agrícola de la Universidad Autónoma Chapingo, escuela en la cual estudia también la licenciatura en la División de Ciencias Forestales. Su servicio social lo realizó con el tema “Delimitación del predio “El pedregal” e inventario de flora y fauna, ejido “El Súchil”, municipio de Técpan de Galeana, Guerrero” entre el año 2007 y 2008. Su estancia profesional la llevó a cabo con el tema “Realización de Reforestaciones como parte del programa PROGAN en SAGARPA Distrito de Desarrollo 06, Izúcar de Matamoros, Puebla” finalizándola en Febrero de 2009. Se graduó en el año 2009 como Ingeniera en Restauración Forestal, su examen de grado lo sustentó en Octubre del 2010 con la tesis titulada “Monografía del guaje: *Leucaena leucocephala* (Lam.) De Wit”. En enero de 2011 ingresa a la Maestría en Ciencias en Agroforestería para el Desarrollo Sostenible del departamento de Suelos donde, con el presente trabajo de tesis, se gradúa en julio de 2013.

CAPTURA DE CARBONO Y CAPACIDAD DE CARGA ANIMAL DE UN SISTEMA SILVOPASTORIL EN BOSQUE TROPICAL CADUCIFOLIO

CARBON SEQUESTRATION AND ANIMAL CARRYING CAPACITY OF A SILVOPASTORAL SYSTEM IN A TROPICAL DECIDUOUS FOREST

Laura Fressia Amador Alfaro¹ y Jorge Luis Castellón Montelongo²

RESUMEN

En este estudio se determinó la captura de carbono y capacidad de carga (cc) de un sistema silvopastoril en Bosque Tropical Caducifolio localizado en la Sierra Gorda de Querétaro. Estudiando 4 sitios se realizó ANAVA y prueba de Tukey generando una ecuación alométrica de la especie *Lysiloma microphylla* para determinar biomasa aérea y C aéreo ($Y=2.02379X$). Se determinó la MS de hojarasca, de suelo y el C total ha^{-1} . En los sitios estudiados no se encontraron diferencias significativas ($P \leq 0.05$) en C total, las diferencias se encontraron en el C almacenado por componente siendo el sitio 2 el que tiene mayor fijación de C en su parte aérea (25.809 t ha^{-1}) y el sitio 3 por su nivel de C en hojarasca (8.6343 t ha^{-1}). La producción de forraje de especies leñosas y herbáceas se determinó en 2 sitios para estimar la cc animal. Para la producción de especies herbáceas y arbustivas no forrajeras, no hubo diferencias significativas entre sitios. Por otro lado en la producción de especies arbustivas forrajeras por sitio, si existió diferencia significativa siendo el sitio 1 el que produce mayor forraje para el ganado ($0.28133 \text{ t ha}^{-1}$ por mes). Se concluye que el DAP es la variable que mejor predice el contenido de biomasa aérea. Los 4 sitios son excelentes reservorios de C dentro del bosque tropical caducifolio. La producción de herbáceas y arbustivas forrajeras de este SSP dan una cc animal aceptable (0.22 UA/Ha/año) para las condiciones locales de suelo, clima y relieve por lo que no es necesario eliminar la vegetación nativa para establecer otras especies forrajeras.

Palabras clave: captura de carbono, capacidad de carga animal, sistema silvopastoril

ABSTRACT

Carbon sequestration and carrying capacity of a silvopastoral system was determined in four sites located in the Sierra Gorda of Querétaro. An ANOVA and a Tukey comparison of means test were performed to generate an allometric equation for *Lysiloma microphylla* to determine aerial biomass and above ground carbon ($Y=2.02379X$). Dry matter of litter, soil and total carbon were determined. No significant differences were found among the sites studied ($P \leq 0.05$) in total C. Differences were found in C stored per plant component; site 2 was that where more C was fixed in the aboveground part (25.809 t ha^{-1}), while in site 3 more C was fixed in the litter C (8.6343 t ha^{-1}). Fodder production of herbaceous and woody species were determined in 2 sites to estimate carrying capacity. For non-forage herbaceous plants and shrubs, there were no statistically significant differences between the two sites. In addition, in the production of forage shrubs per site, site 1 produced significantly more fodder for livestock ($0.28133 \text{ t ha}^{-1}$ per month). It is concluded that the diameter at breast height is a variable that best predicts the aerial biomass content. The 4 sites are excellent C pools in the tropical deciduous forest. The production of herbaceous plants and shrubs for fodder in this SPS offers an acceptable carrying capacity (0.22 AU/Ha/year) for the local conditions of soil, climate and topography, and thus elimination of native vegetation to establish another forage species is not recommended.

Key words: Sequestration carbon, animal carrying capacity, silvopastoral system

¹ Tesista

² Director

ÍNDICE	Pág.
DEDICATORIA	iii
AGRADECIMIENTOS	iv
DATOS BIOGRÁFICOS	v
RESUMEN.....	vi
ABSTRACT	vi
LISTA DE CUADROS	xi
LISTA DE FIGURAS	xii
ABREVIATURAS USADAS	xiii
1 INTRODUCCIÓN	1
2 REVISIÓN DE LITERATURA	5
2.1 Cambio climático.....	5
2.2 Captura de carbono	6
2.3 Componentes de almacenamiento de carbono.....	11
2.3.1 Carbono en el suelo	12
2.3.2 Carbono en biomasa aérea.....	12
2.3.3 Carbono en raíces.....	13
2.3.4 Carbono en biomasa seca	13
2.4 Sistemas Agroforestales	13

2.5	Sistemas silvopastoriles.....	15
2.6	Metodología para determinar carbono almacenado.....	16
2.7	Unidades de paisaje.....	17
2.8	Ubicación de los sitios de muestreo.....	19
2.9	Sitios permanentes de muestreo.....	20
2.10	Atributos de Vegetación.....	22
2.10.1	Densidad.....	22
2.10.2	Cobertura.....	22
2.10.3	Producción.....	23
2.10.4	Estructura.....	24
2.10.5	Composición florística.....	24
2.11	Medición de atributos de vegetación.....	25
2.11.1	Métodos de Muestreo en Parcelas.....	25
2.12	Tipos de muestreo de vegetación.....	26
2.12.1	Transectos.....	26
2.12.2	Transectos variables.....	26
2.12.3	Cuadrantes.....	27
3	JUSTIFICACIÓN.....	29
4	OBJETIVOS.....	33
4.1	Objetivo General.....	33

4.2	Objetivos específicos	33
5	HIPÓTESIS	33
6	MATERIALES Y MÉTODOS.....	35
6.1	Descripción del área de estudio.....	35
6.1.1	Localización.....	35
6.1.2	Geología.....	37
6.1.3	Fisiografía.....	37
6.1.4	Edafología	38
6.1.5	Hidrología.....	40
6.1.6	Climatología	41
6.1.7	Características Biológicas	42
6.1.8	Problemática socio-ambiental de la Reserva de la Biosfera Sierra Gorda. 45	
6.2	Elección de unidades de paisaje representativas de “El Pemoche” dentro de la Sierra Gorda.....	46
6.3	Ubicación de sitios permanentes de muestreo dentro de las unidades de paisaje.....	47
6.4	Producción de forraje	49
6.5	Evaluación de Captura de carbono	51
6.5.1	Biomasa aérea	51

6.5.2	Carbono en hojarasca	52
6.5.3	Estimación de carbono en suelo	53
7	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	54
8	CONCLUSIONES	64
9	ANEXOS	66
10	LITERATURA CITADA	69

LISTA DE CUADROS

Cuadro 1.	Densidades estimadas de C según peso por superficie.....	9
Cuadro 2.	Patrón nacional de uso de suelo y sus reservorios de carbono en 1990.	10
Cuadro 3.	Captura de carbono acumulado, para diferentes opciones en los bosques mexicanos.....	11
Cuadro 4.	Ecuaciones alométricas que mejor predicen la producción de materia seca para palo de arco (<i>Lysiloma microphylla</i>).	54
Cuadro 5.	Ecuaciones utilizadas para determinar la producción de materia seca para cada especie.	55
Cuadro 6.	Contenido de carbono por componente y total en cuatro sitios de Bosque tropical caducifolio de la Sierra Gorda de Querétaro.....	57
Cuadro 7.	Efecto de sitio en la cantidad de carbono almacenado en cada componente y total en Bosque tropical caducifolio.....	57
Cuadro 8.	Producción de forraje por parcela y por sitio de muestreo en Bosque tropical caducifolio de la Sierra Gorda de Querétaro.....	60
Cuadro 9.	Efecto de sitio en la producción de forraje y captura de carbono de herbáceas.....	61
Cuadro 10.	Carga animal y Coeficiente de agostadero de dos sitios del bosque tropical caducifolio de la Sierra Gorda de Querétaro.....	63
Cuadro 11.	Vegetación del sitio 1.....	66
Cuadro 12.	Vegetación del sitio 2.....	67
Cuadro 13.	Vegetación del sitio 3.....	68
Cuadro 14.	Vegetación del sitio 4.....	68

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.	División estatal y la Reserva Sierra Gorda de Querétaro (Abad, 2006).....	36
Figura 2.	Municipios de La Reserva Sierra Gorda de Querétaro (Abad, 2006).	36
Figura 3.	Edafología de la Reserva de la Biosfera Sierra Gorda (Abad, 2006).	39
Figura 4.	Ríos principales de la Reserva Sierra Gorda sobre las cuencas de los ríos Tamuín y Moctezuma (Abad, 2006).....	41
Figura 5.	División del sitio permanente de muestreo.....	47
Figura 6.	División de la parcela de 16 m ² para medir producción de forraje.	50
Figura 7.	Captura de carbono por componente y total en cada sitio de Bosque Tropical caducifolio en la Sierra Gorda de Querétaro	58

ABREVIATURAS USADAS

ANAVA	Análisis de varianza
ANOVA	Analysis Of Variance
BLM	Bureau of Land Management
BTC	Bosque tropical caducifolio
C	Carbono
CC	Capacidad de carga
DB	Diámetro basal
DAP	Diámetro a la altura del pecho
GPS	Global Positioning System
MS	Materia seca
Pg	Picogramo
PPM	Parcelas permanentes de muestreo
SPM	Sitio permanente de muestreo
SSP	Sistema silvopastoril
UPM	Unidad de punto de muestreo

1 INTRODUCCIÓN

La Reserva de la Biosfera Sierra Gorda es uno de los lugares más ricos en cuanto a su ecodiversidad y uno de los más biodiversos de México, esto es debido a la posición biogeográfica en la que se encuentra ya que está entre las bioregiones Neotropical, Neártica y región Mesoamericana de Montaña.

Es una de las áreas protegidas con mayor biodiversidad en especies de flora, fauna, y macromicetos en el país. Por su diversidad de microclimas y su particular orografía se encuentran especies endémicas convirtiéndola en un sitio vital de conservación.

Sus ecosistemas varían de matorrales xerófilos a bosques templados, pasando por bosques de niebla, por lo que el polígono de la Reserva de la Biosfera Sierra Gorda está incluido en la Región Terrestre Prioritaria #101, Sierra Gorda-Río Moctezuma y en la Región Hidrológica Prioritaria #75, Confluencia de las Huastecas, de acuerdo a la Comisión Nacional para el Uso y Conocimiento de la Biodiversidad, debido a su valor para la conservación y productividad hidrológica (INE *et al.*, 1999).

La conservación de estos ecosistemas es esencial ya que aquí residen un gran número de vida silvestre en categoría de riesgo de acuerdo a la NOM-059-SEMARNAT-2010. Además de servir como refugio para varias especies migratorias (INE *et al.*, 1999).

Los macizos boscosos de la Reserva de la Biosfera Sierra Gorda destacan en el centro del país por su extensión y estado de conservación que, a su vez, permiten una importante derrama por servicios ambientales que benefician a un gran número de habitantes.

La Sierra Gorda Queretana contribuye significativamente a la captura y almacenaje de carbono y a pesar de que existen extensiones forestales considerables en la Reserva con un relativo buen estado de conservación que permiten la prestación de importantes servicios ambientales, estos macizos se encuentran de forma discontinua por la pérdida de superficie debida a ciertas actividades humanas entre las que se encuentran la agricultura y ganadería en una zona de vocación netamente forestal, las cuales al realizarlas de manera inadecuada han ocasionado la pérdida de importantes superficies de bosques, selvas y matorrales. Esto sin duda provoca la pérdida de vegetación y la erosión del suelo, lo que es imprescindible atender a través de tecnologías que permitan el desarrollo agrícola sin comprometer la permanencia de la biodiversidad.

Asimismo, es necesario lograr un ordenamiento de la actividad ganadera que permita obtener más beneficios económicos sin afectar la conservación de los recursos naturales, ya que con ello deviene el cambio de uso de suelo de terrenos forestales a terrenos con fines pecuarios lo que ha causado una pérdida de recurso forestal y consecuentemente pérdida del suelo.

Se sabe que las regiones tropicales del país han sido severamente afectadas por la deforestación que ha tenido lugar en los últimos años provocada fundamentalmente por la expansión de la agricultura y la ganadería bovina. Por ello se han desarrollado tecnologías para el mejoramiento de los sistemas de producción animal, de tal manera que la utilización de árboles y arbustos forrajeros ha sido una importante estrategia para el mejoramiento de la producción y al mismo tiempo la conservación de recursos en las áreas pastoreadas ya que las tierras en pasturas se encuentran en estados avanzados de degradación. Por esta razón los árboles de uso múltiple pueden jugar un rol importante en la restauración ecológica de estas, mientras contribuyen con la sostenibilidad económica de los sistemas de producción ganadera (Ibrahim *et al.*, 1999).

En la actualidad se han identificado una gran cantidad de especies forrajeras para su uso en la alimentación animal. Aunado a ello, se ha investigado sobre el cultivo de especies leñosas en bloques compactos y a alta densidad (bancos de proteína), con el fin de maximizar la producción de fitomasa para suplementación animal en diferentes sistemas de producción (Ibrahim *et al.*, 1999).

La combinación de actividades agrícolas, forestales y ganaderas en el mismo espacio se ha practicado desde hace tiempo, especialmente en regiones tropicales y subtropicales y en menor intensidad en algunas zonas templadas y semiáridas, lo cual conocemos actualmente como Sistemas Agroforestales (Torres, 1999).

Esta definición incluye los Sistemas Silvopastoriles (SSP) en los cuales un componente arbóreo se asocia a un componente forrajero herbáceo. Estas combinaciones que bien pueden ser simultáneas o secuenciales, en un mismo sitio, tienen como objetivo optimizar la producción del sistema y procurar un rendimiento sostenido (Russo y Botero, 2005).

Dentro de los SSP se tienen las fincas ganaderas que se caracterizan por la presencia de árboles dispersos en potreros para proveer sombra y alimentos para los animales y generar ingresos a través de la venta de madera y frutales (Ibrahim *et al.*, 1999).

En México los llamados agostaderos o pastizales, son una forma de SSP. Los agostaderos son comunidades vegetales nativas con abundancia de especies leñosas y herbáceas, entre las que se encuentran especies forrajeras, pero que por limitaciones del medio físico no son apropiadas para el cultivo como el bosque natural xerófilo y el bosque tropical caducifolio.

En la búsqueda de herramientas para conseguir el manejo sostenible del territorio y evitar el cambio de uso de suelo de forestal a pecuario, se han implementado los Servicios Ambientales, los cuales han resultado innovadores y representan una nueva opción para el aprovechamiento sustentable de los recursos naturales (Mendoza, 2008).

Los principales servicios que otorga la vegetación arbórea sobre el territorio son: captura de carbono, control de la erosión por medio de la retención del suelo, captación y filtración de agua, mitigación de los efectos del cambio

climático, generación de oxígeno y asimilación de diversos contaminantes, protección de la biodiversidad, entre otros (Reyes y Gutiérrez, 2010).

2 REVISIÓN DE LITERATURA

2.1 Cambio climático

En los últimos años ha iniciado una alarmante preocupación alrededor del mundo debido al cambio climático y el calentamiento global. Estos temas han tomado un considerable auge en el debate público porque se han podido apreciar sus consecuencias. Tales, directa o indirectamente han modificado algunas variables del sistema atmosférico, lo cual ha afectado de diversas maneras a la población.

Asimismo, el efecto invernadero, que es la principal consecuencia del cambio climático, forma parte de esta inminente ola de inquietud, y por ello se han establecido distintas alternativas para mitigar su efecto, esto es principalmente por medio de la disminución de los gases de efecto invernadero, para que estos se mantengan en el ambiente pero en cantidades adecuadas.

Se sabe que entre los responsables del aumento de la temperatura global está el CO₂ atmosférico, cuya concentración ha aumentado considerablemente a partir de la era industrial debido al frecuente uso de los combustibles fósiles. Por otro lado, el cambio de uso de suelo por la tala de terrenos forestales para convertirlos en terrenos de cultivo ha contribuido con el incremento de este gas hacia la atmosfera (Acosta *et al.*, 2001a).

Es importante resaltar que México se encuentra dentro de los 15 países con mayor emisión de gases de efecto invernadero a nivel mundial. Según las estadísticas actuales, las emisiones netas totales anuales de CO₂ alcanzaron 444 millones de toneladas, lo que representa aproximadamente el 2 % de las emisiones mundiales y el 96 % de las emisiones nacionales. De esta cantidad, cerca del 70 % corresponden a diversos procesos de combustión de los sectores energético, industrial, de transporte y otros servicios, y el 30 % restante se origina del proceso del cambio del uso del suelo relacionado principalmente con la agricultura y ganadería convencional (Casanova *et al.*, 2010).

Se tiene entonces que el dióxido de carbono es el responsable del 71.5% del efecto invernadero. Por esta razón, se necesita centrar la atención en este gas en cuanto a su captura y almacenaje (Ordoñez, 1999).

2.2 Captura de carbono

La captación y almacenamiento de dióxido de carbono constituyen un proceso consistente en la separación del CO₂ emitido por fuentes relacionadas con la energía, su transporte a un lugar de almacenamiento y su aislamiento de la atmósfera a largo plazo. Este proceso ocurre principalmente por medio de la vegetación, la cual tiene la capacidad de asimilar el carbono atmosférico e incorporarlo a su estructura física a través de la fotosíntesis, por lo que el almacenamiento de carbono constituye una opción de la cartera de medidas de

mitigación para la estabilización de las concentraciones atmosféricas de gases de efecto invernadero (Metz *et al.*, 2005).

Existe una relación inseparable entre el cambio del clima, el cambio de uso del suelo y los bosques del mundo. Los bosques desempeñan un papel importante en el ciclo natural del carbono a nivel mundial dado que han absorbido casi la tercera parte de las recientes emisiones antropogénicas de dióxido de carbono (CO₂) a la atmósfera, mediante la fotosíntesis convirtiendo la energía en biomasa forestal y emitiendo el carbono otra vez a la atmósfera durante la respiración y descomposición de plantas (Percy *et al.*, 2003).

Ordoñez (1999), menciona que combinando estrategias de conservación forestal con proyectos de reforestación en todo el mundo, los bosques podrían resultar en un sumidero neto de carbono durante los próximos cien años, permitiendo reducir de 20 a 50% de las emisiones netas de dióxido de carbono a la atmósfera.

Toda esta situación del cambio climático y calentamiento global requiere de actividades que mitiguen el cambio climático, así como de la implementación de un mecanismo de evaluación y monitoreo que permita conocer su eficacia en momentos específicos. Por ello, actualmente, se desarrollan diversos estudios enfocados en contabilizar la captura de CO₂ principalmente en bosques y selvas. Entre las técnicas más utilizadas se encuentran los métodos indirectos basados en el uso de datos existentes de volumen generados a partir de inventarios forestales, los métodos basados en ecuaciones alométricas, los

métodos que buscan relacionar variables del bosque con las reflectancias o índices espectrales de vegetación estimados a partir de imágenes de satélite e incluso la modelación geoespacial mediante variables geográficas. En otros países se han utilizado métodos geoestadísticos que incluyen el empleo de variogramas, los cuales por su naturaleza se caracterizan por los altos costos del muestreo (Vázquez, 2011).

La captura de carbono a través del uso del suelo y la forestación comprende tres áreas principales:

- Los cambios en la biomasa en bosques y plantaciones
- La conversión de bosques y praderas, y el abandono de tierras cultivadas
- Los cambios en el contenido de carbono por uso del suelo

Existen bastantes trabajos de investigación acerca de la captura de carbono en diferentes condiciones de vegetación y de uso de suelo. Por ejemplo, Percy *et al.* (2003) en su trabajo de investigación estimaron que los árboles y suelos forestales evaluados contenían 1146 Gt de C. Su principal variable a evaluar fue la latitud con lo que obtuvieron que el 37% aproximadamente del C está capturado en bosques de baja latitud; el 14% se halla en bosques de latitud media; y el 49% restante se encuentra en zonas de alta latitud. La mayor densidad del carbono (masa de C por unidad de área forestal) se encuentra en los bosques en latitudes altas debido a las grandes reservas de carbono en el

suelo. La más baja densidad del carbono se encuentra en bosques de media latitud.

De igual forma, el mismo autor presentó el siguiente cuadro donde informa la densidad de carbono vegetación y en suelo en diferentes países que presentan distinta latitud.

Cuadro 1. Densidades estimadas de C según peso por superficie.

	Latitud	Densidad de carbono (10^6 por hectárea)	
		vegetación	suelo
Alta	Rusia	83	281
	Canadá	28	484
	Alaska	39	212
Media	EEUU continentales	62	108
	Europa	32	90
	China	114	136
	Australia	45	83
Baja	Asia	132-174	139
	África	99	120
	Américas	130	120

Fuente: Percy *et al.*, 2003

Por otro lado, Casanova *et al.*, (2010) presentaron la información del Cuadro 2 donde muestran la superficie forestal de cada cobertura vegetal y su reservorio de carbono en el año 1990. Aquí podemos observar que el reservorio de carbono depende de la superficie forestal y del uso del suelo. Por ejemplo, el reservorio más grande de carbono son los bosques semiáridos siendo que ocupan la mayor superficie entre todos los usos de suelo. Cabe mencionar que la Agroforestería ocupaba solamente 900 mil hectáreas en ese año al igual que las selvas tropicales siempre verdes manejadas: sin embargo Agroforestería tenía un reservorio de 0.1 Gt C, mientras la selva tropical un 0.28 Gt C.

Cuadro 2. Patrón nacional de uso de suelo y sus reservorios de carbono en 1990.

	Cobertura vegetal	Superficie	Reservorio
Bosques naturales	Boques de coníferas	9985	2.5
	Bosques latifoliados templados	8409	1.9
	Selvas tropicales siempre verdes	5717	1.7
	Selvas tropicales subcaducifolias	15338	2.3
	Bosques semiáridos	62840	5
	Bosques degradados	21484	2.6
Plantaciones	Con rotación prolongada	3	0.0006
	Plantaciones de restauración	147	0.0265
Bosques manejados	Coníferas	6444	1.5
	Selvas tropicales siempre verdes	900	0.28
Áreas protegidas	Templado	672	0.16
	Tropical siempre verde	1765	0.54
	Tropical caducifolio	106	0.02
	Áreas pantanosas	303	0.09
	Bosques semiáridos	3170	0.3
Otros usos	Agricultura	25939	2.3
	Pastizales	24893	2.4
	Agroforestería	900	0.1
			23.7

*Miles de hectáreas; **Gt C

Fuente: Casanova *et al.*, 2010

De igual manera Ordoñez (1999) indica a través de diversos escenarios el potencial de captura de carbono en México para el año 2030 el cual se muestra a continuación.

Cuadro 3. Captura de carbono acumulado, para diferentes opciones en los bosques mexicanos.

Opción/Escenario	Área (millones de ha)		Carbono Total acumulado (Gt C)	
	2030 (Políticas de apoyo adecuadas)	2030 (Potencial técnico)	2030 (Políticas de apoyo adecuadas)	2030 (Potencial Técnico)
Conservación				
Áreas naturales protegidas	3.8	6	0.37-0.57	0.42-0.65
Manejo Forestal (Comercial)	13.2	18.7	1.36-1.81	3.13-2.80
Estufas mejoradas de leña	2	2	0.05	0.08
Reforestación				
Plantaciones de reforestación	0.8	4.2	0.19-0.20	0.31-0.33
Plantaciones para pulpa y papel	0.2	2.4	0.13-0.14	0.20-0.21
Plantaciones energéticas	0.8	4.2	0.17	0.94
Sistemas agroforestales	1.5	1.9	0.08	0.1
Total	22.3	39.4	2.35-3.02	4.18-5.11

Fuente: Ordoñez, 1999.

2.3 Componentes de almacenamiento de carbono

Los principales componentes de almacenamiento de carbono en el uso de la tierra son el carbono orgánico del suelo y en la biomasa arriba del suelo. Se ha estimado que el carbono en la biomasa de los bosques primarios y secundarios varía entre 60 y 230 y entre 25 y 190 t ha⁻¹, respectivamente y que el C en el suelo puede variar entre 60 y 115 t ha⁻¹ (Ibrahim *et al.*, 2007).

Sin embargo, hay pocos estudios de estimación de C en la parte subterránea (raíces y suelo), mantillo y árboles muertos debido a la complejidad de los sistemas (Roncal *et al.*, 2008).

2.3.1 Carbono en el suelo

Es el carbono contenido en las capas que conforman el suelo forestal. Se origina por la fragmentación de la roca madre meteorizada por el establecimiento de un organismo vegetal que con el tiempo forma capas por depositación de materiales. Al irse acumulando éstas y compactando, almacenan una cierta cantidad de carbono, misma que aumentará por la continuidad del proceso de formación del suelo (Ordoñez, 1999).

Las metodologías para estudiar los almacenes de carbono en el suelo y, en particular, en condiciones de agricultura y forestería de laderas, son escasas. Además un problema que cada vez es más aparente en el ámbito científico son las dificultades que se tienen para comparar resultados de captura de carbono en el suelo e integrar bases de datos confiables, debido a las diferencias en la forma en cómo se hacen las mediciones (Acosta *et al.*, 2001b).

Acosta *et al.* (2001b) encontraron también una relación entre la profundidad del suelo y la cantidad de carbono que se puede acumular, siendo que a mayor profundidad se encontraron los contenidos de carbono más altos.

2.3.2 Carbono en biomasa aérea

La biomasa aérea comprende el tronco, las hojas, las ramas y el follaje de los árboles o arbustos. En un estudio realizado en Honduras por Alberto y Elvir (2008), acerca de la fijación de carbono en biomasa aérea de una especie de Pino, encontraron que el 71% del total de la biomasa aérea se encontró en el fuste y 21% en las ramas.

2.3.3 Carbono en raíces

Acosta *et al.* (2001b) encontraron en su investigación que las raíces son un componente subterráneo que almacena menor cantidad de carbono, siendo el suelo el gran almacén de los sistemas de vegetación. De igual manera, la mayor cantidad de carbono en las raíces se encontró en la profundidad de 0 a 30 cm del perfil.

2.3.4 Carbono en biomasa seca

Es el contenido en la materia orgánica que se encuentra en proceso de descomposición; es originada cuando las estructuras vegetales como las hojas, las ramas o el tronco son depositadas en el suelo (Ordoñez, 1999).

2.4 Sistemas Agroforestales

Ante la situación del cambio climático, es necesario encontrar estrategias productivas, ecológicas y económicamente sustentables para el manejo de los sistemas. Una alternativa a los problemas de degradación de los recursos naturales por cambios de uso de suelo es la implementación de sistemas agroforestales, que son formas de uso de la tierra, donde los árboles o arbustos interactúan biológica y económicamente en una misma superficie con cultivos y/o animales, asociados de forma simultánea o secuencial (Nair, 1993). El propósito fundamental es diversificar y optimizar la producción para un manejo sostenible.

Lo cual constituye una estrategia viable para detener el avance de la deforestación por cambio de uso de suelo de forestal a agrícola, siendo ésta

una de las principales causas que han provocado emisiones de CO₂ y por lo tanto influyen directamente el calentamiento global (Jadán *et al.*, 2012).

Los sistemas agroforestales juegan un papel preponderante en los procesos biogeoquímicos y por lo tanto en el ciclo global del carbono. Desafortunadamente a nivel mundial muchos de los ecosistemas de este tipo han sido alterados o destruidos a través del tiempo.

Esta situación se puede revertir convirtiendo a las áreas agroforestales en importantes sumideros de carbono para reducir la cantidad de CO₂ presente en la atmosfera. Por ello es importante determinar la cantidad de carbono que pueden aportar diferentes sistemas, por lo que es necesario recurrir a técnicas de muestreo eficientes para poder determinar la cantidad de carbono presente en determinado elemento (Acosta *et al.*, 2001a).

Ibrahim *et al.* (2007), reportaron que el potencial de los sistemas agroforestales (suelos y biomasa) para almacenar carbono puede variar entre 20 y 204 t ha⁻¹, estando la mayoría de este carbono almacenado en los suelos, pudiendo incluso tener incrementos de C anual que pueden variar entre 1,8 y 5,2 t ha⁻¹.

A pesar de lo anterior la información que se posee acerca de los sistemas agroforestales es relativamente poca comparada con bosques y selvas y a pesar de la cantidad de investigación realizada en Agroforestería en cualquiera de sus modalidades, aún falta conocer mejor el potencial de estos sistemas para generar servicios ambientales (Casanova *et al.*, 2010).

2.5 Sistemas silvopastoriles

Los sistemas silvopastoriles son sistemas del uso de la tierra en que los árboles o arbustos son combinados con ganado y producción de pastura en la misma unidad de tierra. Dentro de esta amplia categoría, varios tipos de sistemas y prácticas se pueden identificar dependiendo del papel del componente. Existe un considerable campo y potencial para mejorar la productividad de los árboles y arbustos forrajeros y el diseño de apropiados sistemas silvopastoriles. Partiendo de esto, los sistemas silvopastoriles representan importantes alternativas económicamente atractivas al productor, que además de funcionar como proveedor de forraje ofrecen servicios ambientales, en particular captura de carbono y recuperación de áreas degradadas (Amézquita, 2008). Sabiendo también que la cantidad de carbono fijado en sistemas silvopastoriles depende de múltiples interacciones entre los componentes árbol, pasto, suelo y animal (Anguiano *et al.*, 2013).

A pesar de que se conoce la capacidad que tienen los bosques y algunos sistemas silvopastoriles para almacenar carbono, aún falta información acerca del potencial de secuestro de carbono en suelo y en la biomasa arbórea en los sistemas de uso de la tierra predominantes en paisajes dominados por la ganadería (Ibrahim *et al.*, 2007).

Amézquita, (2008) evaluó un amplio rango de sistemas mejorados de pasturas y silvopastoriles comparándolos con el bosque nativo (referencia positiva) y áreas degradadas (referencia negativa) en términos de su capacidad de acumulación de C en suelo y biomasa. Los resultados que obtuvo fueron que en

todos los ecosistemas estudiados, el bosque nativo muestra los mayores niveles de acumulación de carbono total en el sistema completo (suelo + biomasa); sin embargo, en los ecosistemas de baja altitud, cálidos y húmedos, como el Bosque Tropical Húmedo de la Amazonia y de la Costa Atlántica de Costa Rica, los niveles de acumulación de C en el suelo para algunos sistemas de pasturas y silvopastoriles fueron mayores que los correspondientes al bosque nativo. En todos los ecosistemas estudiados los sistemas mejorados de pasturas y silvopastoriles muestran mayores niveles de acumulación de carbono que el área degradada. En sistemas de pasturas y silvopastoriles, el suelo acumula más del 90 por ciento del C total del sistema. Por lo tanto, aún pequeños incrementos de acumulación de C en el suelo en estos sistemas contribuye significativamente a la captura de C. La misma autora concluyó que los resultados muestran que los sistemas mejorados y bien manejados de pasturas y silvopastoriles representan soluciones para la recuperación de áreas degradadas y ofrecen altas tasas de captura de C, que en ciertos ecosistemas son comparables a las del bosque nativo.

2.6 Metodología para determinar carbono almacenado

Para conocer el carbono almacenado de cualquier uso de suelo es necesario realizar un monitoreo o inventario de carbono ya que esta metodología debería permitir la comparación entre sitios, sistemas y períodos. La gran variabilidad espacial de los sistemas silvopastoriles hace que los muestreos estratificados sean los más convenientes. El sistema total debe ser dividido en estratos o unidades de paisaje (vegetación, suelo o topografía), los cuales se pueden

definir empleando imágenes satelitales, fotografías aéreas, y mapas de vegetación, suelos o topografía (Andrade e Ibrahim, 2003).

En el monitoreo del secuestro de carbono en ecosistemas forestales, las parcelas permanentes de muestreo (PPM) o sitios permanentes de muestreo (SPM) son una herramienta estadística importante para evaluar los cambios temporales, principalmente porque proveen datos más reales y fácilmente verificables del crecimiento de la vegetación (Andrade e Ibrahim, 2003).

Locatelli y Leonard (2001), mencionan que todas las especies comerciales o no, deben incluirse en el inventario, así como todos los árboles cuyo diámetro a la altura del pecho esté por encima de un diámetro dado. El tamaño de los rangos de diámetro no debe superar los 10 cm. Los diámetros grandes no deben ser incluidos dentro de un rango único: deben ser medidos individualmente. Sobre la base del inventario forestal, que apunta a medir las dimensiones de los árboles de una parcela, se utilizarán correlaciones entre las dimensiones y la biomasa. Para los suelos, los desechos, la hojarasca y el estrato inferior, existen métodos desarrollados para investigaciones sobre uno u otro sector independientemente del sistema.

2.7 Unidades de paisaje

México cuenta con una gran variedad de paisajes, lo cual no garantiza una riqueza similar de recursos naturales, su análisis se realiza mediante imágenes satelitales y técnicas de percepción remota, identificando los elementos y componentes que pueden estructurar unidades de paisaje, los cuales pueden

ser utilizados para la ordenación del territorio y el desarrollo sustentable (López y Cervantes, 2002).

La unidad de paisaje es la mínima unidad cartografiable que permite representar espacialmente los principales componentes de un ecosistema (estructural y espacialmente). Se reconoce que la unidad del paisaje así considerado está conformado por dos grandes componentes. Uno físico, que describe la secuencia sobre el territorio del conjunto roca-relieve-suelo, cuya tasa de cambio en el tiempo es baja o muy baja. Por el contrario, el otro, que describe el dominio bioclimático y de uso del suelo, se caracteriza por un gran dinamismo a varias escalas temporales. Ambos componentes pueden manipularse por separado en bases de datos geográficas automatizadas (en el marco de un sistema de información geográfica), y combinarse sistemáticamente sin perder su individualidad cuando sea necesario (Priego *et al.*, 2008).

Por otro lado López y Cervantes (2002) mencionan que lo más común es identificar el paisaje como una superficie geográfica heterogénea, constituida por un grupo de ecosistemas que presentan imagen o apariencia semejante. Esta concepción ha proporcionado un entendimiento del paisaje como síntesis de interacción de los diversos componentes. De tal manera que se tiene que el paisaje podría ser una unidad espacial y temporal con un grado suficiente de homogeneidad para reconocerla como una particularidad. Los autores mencionados indican que para la obtención de las unidades del paisaje, se deben considerar los criterios ecológicos y geomorfológicos; éstas son

porciones de la superficie terrestre provistas de límites naturales, donde los componentes abióticos y bióticos forman un conjunto de interrelación e interdependencia con una relativa homogeneidad en sus características ecológicas y culturales que, jerárquicamente, se pueden referenciar o asociar en distintas escalas de observación.

2.8 Ubicación de los sitios de muestreo.

Las características de los SPM (forma, tamaño y número) constituyen un aspecto clave del monitoreo. La forma de las parcelas depende enteramente de la distribución espacial de los árboles. La densidad arbórea determina el tamaño de los SPM, de tal manera que, en sistemas muy densos, es posible trabajar con parcelas pequeñas, mientras que en sistemas de baja densidad es indispensable emplear parcelas grandes (Andrade e Ibrahim, 2003).

Una vez definido el método de muestreo y delimitada el área de estudio en la cartografía o fotografías aéreas disponibles, se procede a la selección de los sitios de muestreo en forma aleatoria, mediante el trazo de transectos en los cuales de manera aleatoria se ubican los sitios a muestrear o bien mediante el uso de una malla de puntos o cuadrícula en la que cada intersección es un sitio de muestreo, los cuales de la misma manera se seleccionan en forma aleatoria; para esto se sugiere las tablas de números aleatorios o bien el uso de las calculadoras. La ubicación de los transectos puede estar en función a la forma geométrica del área de estudio, si ésta es más alargada que ancha, los

transectos pueden ser paralelos a la longitud del rodal; de lo contrario se pueden trazar en forma perpendicular (Meza, 2002).

2.9 Sitios permanentes de muestreo

Los sitios o parcelas permanentes son uno de los pilares principales en manejo e investigación forestal. Las predicciones de crecimiento y producción, basadas en datos de parcelas permanentes, tienen implicaciones directas para la toma de decisiones de los inversionistas en manejo de bosque o plantaciones forestales. Las parcelas permanentes permiten a los forestales e investigadores forestales, observar diversas variables económicas y ecológicas relevantes y coleccionar evidencia objetiva en términos de información base. Dicha información es por lo general usada para construir, mejorar o actualizar modelos o procesos estadísticos, los cuales son empleados para entender mejor y predecir el desarrollo del bosque o rodal. Los resultados también son útiles en la identificación de indicadores para el manejo sostenible del bosque (Kleinn y Morales, s/a)

Delgadillo y Sotero (2006) mencionan que los SPM se utilizan para mediciones de mediano y largo plazo, ya sea para analizar cambios en la regeneración natural, monitoreo de diversidad, determinación de cobertura y densidad, así como la frecuencia de especies, entre otros aspectos. Al momento de seleccionar el sitio de muestreo, este debe quedar identificado para que pueda ser ubicado con facilidad en posteriores mediciones, de tal manera que pueden tomarse las coordenadas de la parcela y sus referencias de ubicación con un

geo-posicionador satelital (GPS). Si se trata de una parcela rectangular o cuadrada se marcan los vértices y si es circular los cuatro puntos cardinales. Se marca el sitio usando estacas permanentes para que posteriormente pueda ser reubicado el sitio de muestreo.

De acuerdo a la forma y tamaño del sitio, estos pueden ser rectangulares los cuales se usan para conocer la diversidad de especies y como está compuesto verticalmente un bosque. El más utilizado es el llamado transecto que es una parcela rectangular donde podemos tomar los datos caminando en línea recta. Podemos encontrar transectos de 5, 10, 15 y hasta 20 m de ancho y 20, 50 y hasta 100 m de largo. Por otro lado están los sitios cuadrados los cuales se usan para describir especies, crecimiento de árboles y estudiar biodiversidad. Las hay desde 100 m² (10x10 m), 400 m² (20x20 m), 625 m² (25x25 m) hasta de 1 ha y 25 ha (Delgadillo y Sotero, 2006).

Gasparro y Mangui (2004), usaron dos esquemas básicos. En uno de ellos, utilizado en Selva Misionera, Selva Tucumano Boliviana y Bosque Andino Patagónico (Argentina), cada Unidad de punto de muestreo (UPM) estuvo compuesta por 5 parcelas rectangulares de 10 m de ancho por 100 m de largo, dispuestas sobre un transecto. El área cubierta por cada UPM fue de 5000 m². En el otro esquema, utilizado en el Parque Chaqueño, cada UPM estuvo compuesta por 8 parcelas rectangulares de 10 m de ancho por 100 m de largo, cubriendo un área de 8000 m². Las UPM de la región de la Selva Misionera presentaron un espaciamiento entre sí de 100 m, que no se utilizó en las demás regiones.

2.10 Atributos de Vegetación

A continuación se describen los atributos de vegetación que se pueden medir y analizar en una comunidad vegetal según se requiera.

2.10.1 Densidad

La densidad se ha utilizado para describir las características de las poblaciones y comunidades vegetales. Sin embargo, las comparaciones sólo pueden basarse en formas de vida y tamaño semejante. Esta es la razón por la cual la densidad se utiliza raramente como una medición por sí misma al describir las comunidades vegetales. La densidad es, básicamente, el número de individuos por unidad de área. El término se refiere a la proximidad de las plantas individuales entre sí. (BLM, 1996). Montani y Busso (2004) mencionan que la densidad es una estimación de la cantidad de individuos presentes en una unidad de muestreo y se usa cuando se quiere obtener suficiente información en poco tiempo.

Se considera útil para el monitoreo de especies en estatus y para medir la tendencia, ya que indica si el número de individuos de una especie va en aumento o en decremento (Meza, 2002).

2.10.2 Cobertura

La cobertura es una importante característica hidrológica y vegetal. Se puede utilizar en diversas formas para determinar la contribución de cada especie a una comunidad vegetal (BLM, 1996). Generalmente se refiere al porcentaje de la superficie del suelo que está cubierta por la vegetación; se puede expresar

en términos absolutos ($\text{m}^2 \text{ha}^{-1}$) o bien en porcentaje y puede ser aérea o basal. Su importancia radica en la protección que la vegetación da al suelo para la estabilidad y funcionamiento de las cuencas hidrológicas; además de crear hábitat para la fauna silvestre. Se puede estimar midiendo el diámetro mayor de la cobertura aérea (o del tallo) y otro perpendicular a éste para calcular el área. (Meza, 2002; BLM, 1996).

En algunos casos se determina la proyección vertical del follaje de las plantas sobre el terreno. En comunidades complejas los valores de cobertura de las especies de cada estrato se consideran por separado, en otros casos se determina el área basal, pero principalmente se realiza por estimación visual (Montani y Busso, 2004).

2.10.3 Producción

La producción neta es la cantidad de biomasa acumulada por unidad de superficie y por unidad de tiempo (Montani y Busso, 2004).

Se cree que la producción relativa de diferentes especies en una comunidad de plantas es la mejor medida de las funciones de estas especies en el ecosistema. La terminología asociada a la biomasa vegetal es normalmente relacionado con la producción (BLM, 1996).

En trabajos de inventario generalmente lo que se mide es la fitomasa aérea en pie, que es la cantidad total de material vegetal (incluyendo partes muertas unidas a la planta) sobre la superficie del suelo en un área en un tiempo dado; o bien el rendimiento que es la cantidad de un producto en un espacio y tiempo

dados, o sea la porción cosechada de un producto. La producción puede ser evaluada a través de métodos directos o de cosecha o bien mediante su estimación a través de métodos indirectos; cuya información nos indica el potencial de un sitio, así como las tasas de aprovechamiento y productos a utilizar en las áreas de explotación (Meza, 2002).

2.10.4 Estructura

La estructura de la vegetación examina principalmente cómo la vegetación está dispuesta en un espacio tridimensional. El uso principal de las mediciones de la estructura es para ayudar a evaluar el valor de una comunidad vegetal en la provisión de hábitat para especies de fauna asociadas. La vegetación se puede medir en capas sobre planos verticales. Las mediciones generalmente se ven en la distribución vertical por cualquiera de la estimación de la cubierta de cada capa o mediante la medición de la altura de la vegetación (BLM, 1996). Por otro lado se le atribuye el estar relacionada con aspectos productivos en la formación de fitomasa aérea (Meza, 2002).

2.10.5 Composición florística

Es la proporción de varias especies de plantas en relación al total de un área dada y se expresa en términos relativos. Se ha utilizado ampliamente para describir los sitios ecológicos y para evaluar la condición de la vegetación (Meza, 2002).

La composición es un atributo calculado por medio de uno que se colectó directamente en el campo. Puede expresarse en términos de cobertura relativa,

densidad relativa, el peso relativo, etc. Para calcular la composición, el valor individual (peso, densidad, porcentaje de cobertura) para una especie o grupo de especies se divide por el valor total de toda la población.

2.11 Medición de atributos de vegetación

Para la estimación de algunos atributos de la vegetación como la producción, densidad, cobertura y frecuencia. se han utilizado diferentes métodos dependiendo del atributo a evaluar, entre ellos se encuentran los métodos de parcela y métodos sin parcela que fueron utilizados en este estudio, los cuales se describen a continuación.

2.11.1 Métodos de Muestreo en Parcelas

Los métodos de muestreo de parcela han sido los más utilizados en el muestreo de la vegetación, las parcelas pueden ser de diferentes formas y tamaños. De las formas geométricas, las que más se han utilizado son el cuadrado, rectángulo y el círculo y de éstas, las dos últimas son las de uso más frecuente; no se recomienda el uso de parcelas cuadradas o rectangulares muy anchas, así como tampoco las de formas irregulares o de figuras geométricas difíciles de delimitar en el terreno. En cuanto al tamaño de las parcelas es conveniente mencionar que se debe tomar en cuenta la precisión que se desea, los costos y tiempo de trabajo. La delimitación de las parcelas pequeñas será más precisa y fácil con respecto a las parcelas grandes; sin embargo, se incrementará su número y por lo tanto será necesario acudir a más lugares para obtener la muestra, repercutiendo en el costo del inventario. Además, es necesario

considerar el estrato de la vegetación a muestrear y su distribución espacial, por lo que se considera que un tamaño adecuado puede estar en función de 1 a 2 veces el área cubierta por las plantas promedio (Meza, 2002).

2.12 Tipos de muestreo de vegetación

2.12.1 Transectos

Un transecto es un rectángulo situado en un lugar para medir ciertos parámetros de un determinado tipo de vegetación. El tamaño de los transectos puede ser variable y depende del grupo de plantas a medirse. Se han utilizado los transectos de 2x50 m para medir árboles y bejucos con DAP (diámetro a la altura del pecho) mayor a 2.5 cm. Dentro de los transectos, se pueden evaluar el número de individuos presentes, tomando nota de la altura y diámetro de cada planta. Sin embargo, este tamaño de transecto no sería adecuado para evaluar la vegetación del sotobosque de un bosque húmedo; en este caso, será necesario reducir el tamaño del transecto (por ejemplo a 2x4 m). Al contrario, si se quiere evaluar la vegetación arbórea con DAP mayor a 20 cm, en un transecto de 2x50 m el número de árboles de esta categoría sería poco representativo, lo que indica que el tamaño del transecto debe aumentarse por ejemplo 10x50 m o 10x100 m (BOLFOR, 2000).

2.12.2 Transectos variables

Este método tiene como base muestrear un número estándar de individuos en vez de una superficie estándar y no requiere tomar medidas precisas de los datos. El método consiste en muestrear un número determinado de individuos a

lo largo de un transecto con un ancho determinado y el largo definido por el número estándar de individuos a muestrearse. Con este método, se pueden muestrear todas las plantas o clases de plantas, separadas por formas de vida, familias, o individuos de una sola especie. También, se puede hacer agrupaciones por estratos. Para considerar el número de plantas a muestrear, se debe tomar en cuenta que usualmente es mejor hacer muchos muestreos pequeños que pocos muestreos grandes. El ancho del transecto es variable y depende de la clase de plantas y la densidad de individuos. Por ejemplo, si se quiere muestrear árboles, en bosques densos el ancho del transecto será menor, mientras que en áreas quemadas o pastoreadas tendrá que aumentarse (BOLFOR, 2000).

2.12.3 Cuadrantes

Los cuadrantes hacen muestreos más homogéneos y tienen menos impacto de borde en comparación a los transectos. El método consiste en colocar un cuadrado sobre la vegetación, para determinar la densidad, cobertura y frecuencia de las plantas. Por su facilidad de determinar la cobertura de especies, los cuadrantes eran muy utilizados para muestrear la vegetación de sabanas y vegetación herbácea. Hoy en día, los cuadrantes pueden ser utilizados para muestrear cualquier clase de plantas. El tamaño del cuadrante está inversamente relacionado con la facilidad y velocidad de muestreo. El tamaño del cuadrante, también, depende de la forma de vida y de la densidad de los individuos. Para muestrear vegetación herbácea, el tamaño del cuadrante puede ser de 1 m²; el mismo tamaño se utiliza para muestrear las

plántulas de especies arbóreas. Para arbustos, el tamaño puede ser de 4 m² o 16 m². Para árboles, los cuadrantes pueden ser de 25 m² o 100 m². El tamaño de los cuadrantes depende de la densidad de las plantas a medirse; para refinar el tamaño adecuado, es necesario realizar pre-muestreos, ya que de no ser así, habrán muchas parcelas con ausencia de individuos o, al contrario, se tendrán cuadrantes en los que se utilizará mucho tiempo (BOLFOR, 2000).

3 JUSTIFICACIÓN

La modernización de la ganadería tradicional, en su intento por obtener mayor producción en el corto plazo, ha llevado a la sustitución de grandes extensiones de vegetación nativa por praderas monófitas de gramíneas introducidas. Con esto se obtiene un incremento en la capacidad de carga a corto plazo, pero también se destruye la estructura del ecosistema, requiriendo entonces un manejo especial para mantener la productividad de las praderas (Galindo *et al.*, 2009). Este manejo requiere de insumos generalmente costosos que no siempre los ganaderos están en condiciones de adquirir, por lo que las praderas se deterioran, propiciando entonces, la reducción de la productividad ganadera y la erosión de los suelos, entre otras.

La sustitución de vegetación nativa por praderas monófitas además destruye la estructura del ecosistema, reduciendo la eficiencia del mismo para realizar algunas funciones conocidas como servicios ambientales, como hábitat para fauna silvestre, servicios ambientales hidrológicos y captura de carbono. De allí que algunos investigadores propongan alternativas de aprovechamiento de la vegetación nativa, incluyendo además de los recursos forrajeros los servicios ambientales que estas comunidades pueden ofrecer.

Los sistemas ganaderos actuales se caracterizan por tener baja rentabilidad y efectos ambientales negativos. Por esta razón se plantea que en lugar de desaparecer vegetación nativa para implementar pastizales, ésta se conserve y de ahí se obtenga biomasa para la alimentación animal (Solorio *et al.*, 2009).

De esta manera se tiene que la ganadería amenaza la conservación y mantenimiento de los ecosistemas. Esta realidad presenta el agotamiento de la vía extensiva de la ganadería, la cual responde a la lógica económica. En este sentido, para contribuir a reducir la deficiencia de la producción animal basada en las pasturas, frecuentemente los ganaderos recurren a la compra de elevadas cantidades de granos y cereales para la elaboración de raciones, convirtiendo a la ganadería en una actividad altamente dependiente y poco competitiva. (Solorio *et al.*, 2009).

De ahí que se vea a los sistemas silvopastoriles como una herramienta capaz y una opción viable para incrementar la competitividad ganadera dado que utiliza de forma eficiente los recursos locales reduciendo la dependencia de insumos externos (Murgueitio *et al.*, 2009). Por esta vía, se busca principalmente diversificar la producción agrícola y pecuaria optimizando el uso del suelo y del agua, procurando la conservación de los recursos naturales a través de un manejo adecuado de los recursos forrajeros locales y de los animales (Nair, 1993).

Al mismo tiempo reduce los impactos negativos de la ganadería, destacando entre estos la pérdida de vegetación natural y en efecto la biodiversidad con la que cuenta el lugar convirtiendo el terreno en monocultivo (Solorio *et al.*, 2009).

El silvopastoreo es un sistema de producción pecuaria, en donde las leñosas perennes interactúan con los componentes forrajeros herbáceos bajo un sistema de manejo integral que ha sido planteado con base en resultados de

investigación, como una opción de producción sostenible que permite reducir el impacto ambiental de los sistemas tradicionales de producción (Nair, 1993).

Otro problema ambiental que ocasiona el crecimiento de las tierras agrícolas y ganaderas al desplazar a los bosques, es que en muchos casos, las tierras convertidas no son aptas ni para la agricultura ni para la ganadería. El resultado es una baja productividad a muy alto costo debido a la pérdida de ecosistemas. Aunado a esto, un alto número de las áreas convertidas a pasturas se encuentran en estado de degradación provocando un incremento de la emisión de gases que contribuyen al calentamiento global, especialmente CO₂ (Solorio *et al.*, 2009).

La deforestación envía a la atmosfera 2000 millones de toneladas de carbono al año, reflejándose en los cambios bruscos de temperatura. Los gases de invernadero podrían reducirse a través de dos procesos: reducción de emisiones antropogénicas de CO₂ o creación y/o mejoramiento de los sumideros de carbono en la biosfera (Andrade e Ibrahim, 2003).

Por otro lado, los bosques del mundo sirven como reservorios de carbono ya que almacenan más de 283 giga toneladas de carbono solo en su biomasa, mientras que el total de este gas almacenado en la biomasa, la madera muerta, los desechos forestales y el suelo de los bosques en conjunto es aproximadamente un 50% superior que la cantidad presente en la atmosfera (Solorio *et al.*, 2009).

De igual manera, los sistemas agroforestales podrían remover cantidades significativas de carbono de la atmósfera, ya que las especies arbóreas pueden retener carbono por un tiempo prolongado, principalmente en su madera. Se tienen datos de que estos sistemas podrían acumular entre 1,1 y 2,2 Pg³ en los próximos 50 años en todo el mundo. Sin embargo, existe poca investigación en Agroforestería en comparación con la de otros usos de la tierra, como bosques y plantaciones forestales, y aún falta conocer mejor el potencial de estos sistemas para secuestrar carbono (Andrade e Ibrahim, 2003).

Lo anterior, nos conduce a cuestionar, si la relación beneficio-costos de la práctica de eliminar vegetación nativa y sustituirla por especies forrajeras introducidas se justifica totalmente o bien si debemos cuantificar los beneficios que ofrece la vegetación nativa antes de sustituirla.

Así mismo es conveniente contar con datos de servicios ambientales y capacidad de carga animal de las diferentes unidades de paisaje del Bosque tropical caducifolio para apoyar las decisiones que se tomen en relación al uso actual o al posible cambio de uso de suelo.

4 OBJETIVOS

4.1 Objetivo General

- Evaluar el potencial para la fijación de carbono y determinar la capacidad de carga animal de un Sistema Silvopastoril del Bosque Tropical Caducifolio en la Reserva de la Biosfera Sierra Gorda.

4.2 Objetivos específicos

- Generar una ecuación que pueda predecir la producción de fitomasa (g/árbol) utilizando como variables independientes el diámetro basal (cm), la altura del árbol (m), el diámetro a la altura del pecho (cm) y el número de ramas. Por medio de técnicas de medición directa, para conocer su contribución en la fijación de carbono.
- Estimar la producción de forraje de especies leñosas y herbáceas por medio de corte directo para estimar la capacidad de carga animal.
- Estimar el potencial de captura de carbono de las especies en estudio.

5 HIPÓTESIS

- Las diversas asociaciones de especies en los sitios del bosque tropical caducifolio afectan la cantidad de carbono fijado ($t\ ha^{-1}$) en los diferentes componentes (arbóreo, hojarasca, suelo, y total), así como la producción de forraje de herbáceas y arbustivas forrajeras y no forrajeras.

- Utilizando como variables independientes el diámetro basal (DB) (cm), la altura del árbol (m), el diámetro a la altura del pecho (DAP) (cm) y el número de ramas, es posible predecir la fitomasa aérea (kg/árbol) con un nivel de confiabilidad aceptable.

6 MATERIALES Y MÉTODOS

6.1 Descripción del área de estudio

La información que a continuación se presenta, referente a la descripción de la Sierra Gorda de Querétaro, fue obtenida del Plan de Manejo de esta área natural protegida (INE *et al.*, 1999).

6.1.1 Localización

El trabajo se llevó a cabo en la Reserva de la Biosfera Sierra Gorda la cual forma parte de la provincia del Carso Huasteco dentro de la provincia fisiográfica de la Sierra Madre Oriental. En el polígono de la misma pueden identificarse diferentes áreas geográficas; los suaves lomeríos de la cuenca del río Extóraz, limitada al este por la sierra de Pinal de Amoles, ubicada en el municipio del mismo nombre y la Sierra de La Florida en el de Arroyo Seco.

Siguiendo en dirección este, se encuentran los valles intermontanos de Purísima de Arista dedicado a actividades agropecuarias y concentrando ahí una de las principales poblaciones de la reserva y por ende un importante número de habitantes circundados por sierras y lomeríos de menor elevación.

Adentrándose más a la sierra se encuentra el Quirino, un pequeño poblado que principalmente se dedica a actividades pecuarias principalmente en un lugar llamado “El Pemoche”, en donde se realizó el trabajo.

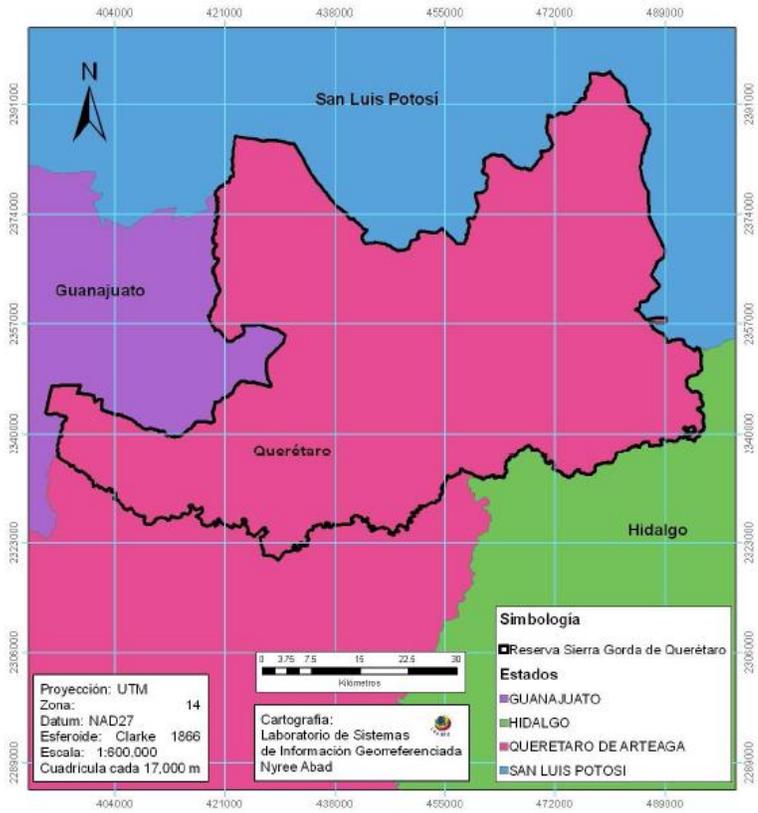


Figura 1. División estatal y la Reserva Sierra Gorda de Querétaro (Abad, 2006).

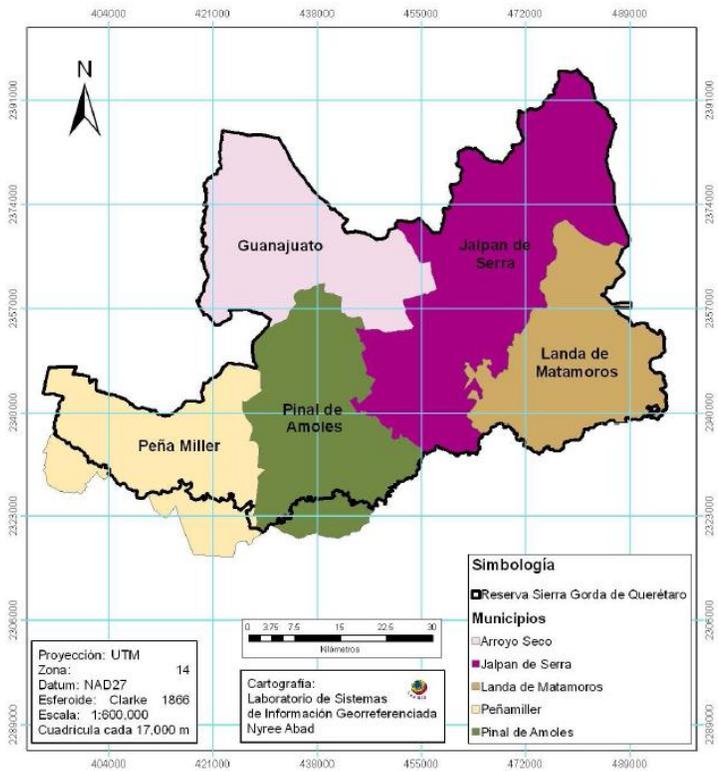


Figura 2. Municipios de La Reserva Sierra Gorda de Querétaro (Abad, 2006).

6.1.2 Geología

Esta región está conformada por diferentes eventos sedimentarios que reflejan aspectos interesantes, ya que en sus contactos geológicos quedan delimitados ambientes de formación de plataforma y de cuenca que han sufrido movimientos tectónicos, causando plegamientos y fallas geológicas tanto normales como inversas.

La dinámica actual del relieve determinada por las características estructurales, litológicas, topográficas y climáticas define los procesos exógenos de intemperismo, erosión y remoción en masa que modelan al relieve. El análisis de la dinámica actual del relieve no debe limitarse a la actividad externa relacionada con el clima, sino que debe abarcar a las fuerzas endógenas dado que, según algunas investigaciones, la Sierra Madre Oriental se encuentra en proceso de levantamiento, lo que acelera el efecto de los agentes modeladores del relieve. Debido a la naturaleza calcárea de la región, así como a la influencia de otros factores de tipo geológico, climático y geográfico, las rocas presentan procesos de disolución, determinando la presencia de distintas formas de relieve cárstico como son dolinas, simas, y cavernas, entre otros.

6.1.3 Fisiografía

Las características estructurales, litológicas y geomorfológicas presentes en el área evidencian los diferentes eventos geológicos que modelaron a través del tiempo el paisaje característico de la Sierra Gorda.

El proceso geológico más evidente es el de la orogenia, causado por esfuerzos tectónicos que dieron lugar a la formación de la denominada provincia fisiográfica Sierra Madre Oriental.

La topografía de la Sierra Gorda Queretana es abrupta, de 300 a 3,100 msnm, con una altitud media predominante entre los 1,300 y los 2,400 msnm, caracterizada por elevaciones como los cerros de Jasso y el de La Media Luna (2,420 msnm), ubicado este último al suroeste de la Reserva; al oeste el cerro de la Tembladera (1,880 msnm); y al este el cerro de Otates (1,450 msnm), cerro del Pelón (1,400 msnm), La Tinaja, San Pedro y Piletas.

6.1.4 Edafología

De acuerdo a la clasificación de FAO-UNESCO, adecuada por INEGI, 1986, los suelos presentes en el área de estudio son:

Litsoles. El suelo predominante en la Reserva es el litosol de color negro o gris muy oscuro, con altos contenidos de nutrientes y que presenta desde 10 cm de profundidad en laderas y pendientes abruptas con alto riesgo de erosión, hasta 50 cm en los valles.

Regosoles. Al sur de la comunidad de Jalpan de Serra se encuentran regosoles (Carrizal de los Sánchez), que son suelos jóvenes con capa superficial de color grisáceo oscuro; su textura es de migajón arcilloso cuando están asociados con fluvisol éutrico de textura fina (al sur del cañón del río Jalpan); son generalmente delgados y cuando son profundos presentan pedregosidad superficial con cantidades altas de calcio, potasio y magnesio. También se

asocian con luvisoles, litosoles y rendzinas; con profundidades menores a los 50 cm.

Vertisoles pélicos. Existen también los vertisoles pélicos (comunidades de Conca, municipio de Arroyo Seco, La Reforma y Otates, municipio de Landa de Matamoros), distribuidos en pequeñas zonas de forma irregular; son de color negro y textura arcillosa, y cuentan con capacidad de retener nutrientes; son generalmente poco profundos (menos de 10 cm).

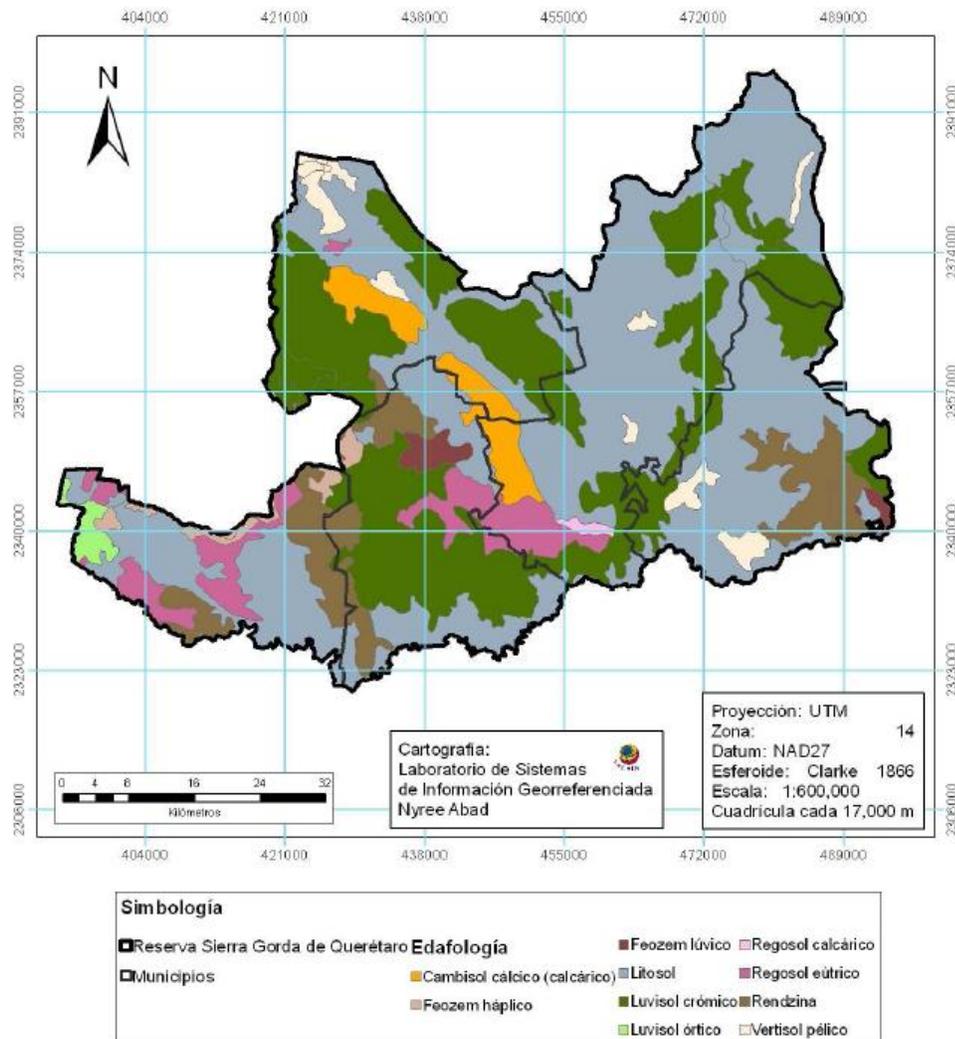


Figura 3. Edafología de la Reserva de la Biosfera Sierra Gorda (Abad, 2006).

6.1.5 Hidrología

La Reserva pertenece a la Región Hidrológica del río Pánuco (RH-26). El área se divide en dos cuencas: la del río Tampón o Tamuín, y la del río Moctezuma. La primera ocupa una extensión de 2,038 km², siendo sus principales afluentes los ríos Ayutla, Santa María y Jalpan. La segunda, abarca 1,532 km² de la Reserva, siendo su principal afluente el río Extóraz. De los 66 ríos y arroyos registrados en la entidad, 25 se localizan en el área natural protegida, y que debido a la naturaleza cárstica de la región, se presentan bajos escurrimientos y corrientes superficiales.

Se tienen registrados 663 manantiales y afloramientos los cuales en su mayor parte son la fuente de abasto para los pobladores, para satisfacer sus necesidades básicas, por lo que dan un uso activo a los afloramientos.

Cabe mencionar que dadas las características geológicas del área, eminentemente cárstica, la producción de agua superficial que es conducida por las corrientes fluviales es sólo una pequeña fracción del agua que es captada en el territorio de la reserva, por lo que sin duda la derrama hidrológica es mayor y en una escala no cuantificada.

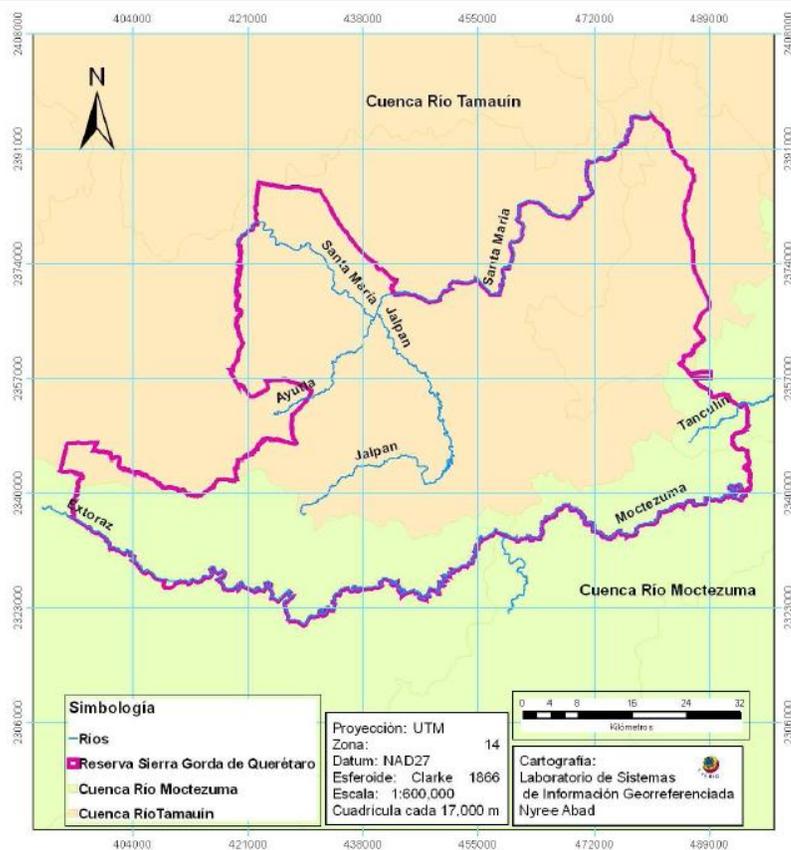


Figura 4. Ríos principales de la Reserva Sierra Gorda sobre las cuencas de los ríos Tamauín y Moctezuma (Abad, 2006).

6.1.6 Climatología

La Reserva presenta diversos climas, en la parte central el clima que predomina es el semicálido subhúmedo, abarca parte de los municipios de Arroyo Seco, Jalpan de Serra, Pinal de Amoles y Landa de Matamoros.

La intensidad de lluvias promedio para Jalpan de Serra es de 48.9 mm/ 24 hrs. y el número de días con lluvia es 61.3, mientras que los días nublados son 79.6 respectivamente.

Las temperaturas mínimas se dan en los meses de diciembre y enero, las máximas en abril y mayo, y el promedio anual varía de 13°C, en las zonas altas de Pinal de Amoles, a 24°C en las regiones más bajas como Jalpan.

6.1.7 Características Biológicas

6.1.7.1 Unidades de vegetación

La Sierra Gorda es una de las regiones mejor conservadas del centro del país, lo cual lo hace un sitio privilegiado por su estado de conservación donde se albergan gran cantidad de especies vegetales. Esta condición es de suma importancia ya que representa la base en donde prosperan otras especies de los diferentes reinos, por tal motivo el recuento o actualización de este estrato es motivo de una especial atención.

El listado más reciente abarca alrededor de 2308 plantas vasculares, destacando en forma importante 29 especies de encinos (*Quercus* spp), que en buena parte dominan su paisaje y montes.

Esta tesis se realizó en una parte del Bosque Tropical Caducifolio, el cual se describe a continuación:

Bosque Tropical Caducifolio, se agrupan dentro de esta denominación comunidades vegetales dominadas por árboles de baja estatura (de 4 a 12 m), con troncos que con frecuencia se ramifican por debajo de la mitad de la altura de la planta y cuyas copas son tan anchas o más que la altura del árbol. Muestran un muy aparente cambio estacional, pues durante la parte seca del año (6 a 7 meses) la gran mayoría de los árboles no tiene follaje y el bosque da una apariencia gris ceniza, que contrasta con el verdor intenso de la época lluviosa. Es común la presencia de árboles cuyos troncos tienen cortezas exfoliantes y de colores vivos. Al igual que en otras regiones de México, las

familias *Leguminosae* y *Burseraceae* están bien representadas en el estrato arbóreo. Este bosque prospera sobre laderas con suelos someros, pedregosos y con buen drenaje, derivados de rocas sedimentarias y algunas rocas ígneas, entre los 300 y 2,200 m de altitud. Típicamente se presenta en condiciones climáticas cálido-subhúmedas, que son libres de heladas. Sin embargo, en algunas partes de Querétaro y en la propia Sierra Gorda, se le encuentra también en lugares más secos y frescos, cuyos climas se clasifican como semicálido-subhúmedo o semisecos cálidos o semicálidos. La precipitación media anual varía entre 500 y 1,100 mm y la mayor parte (alrededor del 90%) de las lluvias se concentra en un periodo de 5 a 6 meses, de mayo a octubre. Es en la Sierra Gorda donde se encuentran las mayores áreas cubiertas por estos bosques en el estado de Querétaro, principalmente en el municipio de Jalpan, y en áreas contiguas de Arroyo Seco, Landa y Pinal de Amoles, sobre lomeríos y laderas bajas de serranías de rocas sedimentarias, principalmente calizas-lutitas, en altitudes desde 300 m hasta 1,400 m. Se les encuentra sobre suelos de diversas condiciones, pero comúnmente someros y pedregosos.

6.1.7.2 Fauna

Existe una gran diversidad faunística debido a la mezcla y encuentro de especies de las bioregiones Neártica y Neotropical. Se tiene un total de 600 especies de vertebrados reportados en la región.

Mamíferos: La Reserva destaca por ser un área natural protegida rica en especies de mamíferos con 110, de las que al menos 22 se pueden considerar como de importancia global.

Uno de los grupos mejor representados es el de los roedores con 38 especies entre los que destacan ratones, ardillas, tepezcuintle y el puercoespín.

Otro grupo importante es el de los murciélagos con 39 especies, la mayoría de ellos insectívoros, de los polinívoros hay cinco especies, ocho frugívoros y dos hematófagos. También hay coyote, zorra, zorrillos, mapache, tejón, cacomixtle y comadreja.

Reptiles: Se tienen reportadas 97 especies comprendidas en 3 órdenes, 19 familias y 53 géneros. Existen 40 especies con estatus de protección y 32 especies endémicas.

Aves: De aves se cuenta con total de 333 especies pertenecientes a 19 órdenes, 53 familias y 220 géneros que reflejan la ecodiversidad.

De acuerdo a la NOM-059-SEMARNAT-2010, 41 especies cuentan con estatus de protección; 4 especies en peligro de extinción, 21 amenazadas, 8 con protección especial y 8 raras. Se encuentran 27 especies endémicas a México sólo en el territorio de la Reserva y 93 especies corresponden a migratorias neotropicales.

Otras especies: En cuanto a invertebrados, el único grupo explorado es el de las mariposas diurnas, de las cuáles se tiene registrado un total de 650 especies, lo que coloca a la Reserva de la Biosfera Sierra Gorda en segundo lugar a nivel nacional por su riqueza en especies de mariposas.

6.1.8 Problemática socio-ambiental de la Reserva de la Biosfera Sierra Gorda.

La conservación de los ecosistemas y recursos naturales que se encuentran en el polígono de la reserva, representan una invaluable riqueza biótica, de materias primas y por los servicios ambientales que prestan y que permiten la permanencia y bienestar de un considerable número de personas, quienes cubren sus necesidades básicas y la realización de importantes actividades productivas que sustentan parcialmente la economía regional. Sin embargo su conservación reviste una compleja problemática por la presencia de casi 100,000 personas que realizan una variedad de actividades, sociales, económicas y que demandan infraestructura para su bienestar y desarrollo, lo que también conlleva importantes impactos ambientales.

Las características ecológicas, geológicas fisiográficas y biológicas, hacen que los ecosistemas, flora y fauna que albergan y los recursos naturales que se encuentran en la reserva sean particularmente sensibles a cambios o afectaciones en los mismos derivados de la realización de actividades productivas o de infraestructura por la población o por eventos ambientales extremos.

Las facetas de la problemática ambiental, se pueden englobar en los siguientes rubros; las que afectan recursos renovables, a través de la cacería, plagas e incendios forestales, plagas forestales, saqueo y captura de ejemplares de flora y fauna silvestre, cambios de uso del suelo, y daños por la fauna silvestre entre otras. Así como la problemática que afecta recursos no renovables, derivada de

acciones como la proliferación de basureros a cielo abierto, la contaminación de fuentes de agua y la creciente escasez de la misma, el desarrollo de obras de infraestructura pública sin ningún criterio ambiental y la falta de observancia y aplicación de la normatividad ambiental que regula la administración y protección de la reserva.

6.2 Elección de unidades de paisaje representativas de “El Pemoche” dentro de la Sierra Gorda.

Para la obtención de datos, inicialmente se estratificó la población vegetal en unidades de paisaje, de acuerdo con la definición de López y Cervantes (2002), enseguida se eligieron las unidades de paisaje representativas del bosque tropical caducifolio que por la presencia de actividad ganadera y su extensión sean típicas de este tipo de vegetación. Con lo anterior se obtuvieron cuatro unidades de paisaje representadas por las siguientes asociaciones de especies:

- 1.- Vidrioso-palo de arco (*Crotton niveus*–*Lysiloma microphylla*).
- 2.- Quiebramachete-palo de arco-vidrioso (*Mimosa leucanoides* – *Lysiloma microphylla*-*Crotton niveus*).
- 3.- Sabal- y otras (*Sabal sp*).
- 4.- Sabal-quiebramachete (*Sabal sp*–*Mimosa leucanoides*).

6.3 Ubicación de sitios permanentes de muestreo dentro de las unidades de paisaje

Una vez determinadas las Unidades de paisaje por estudiar se ubicaron tres SPM por cada unidad de paisaje, siendo un total de 12 SPM.

Un sitio permanente de muestreo está representado por una parcela de forma cuadrada de 400 m² de superficie (20x20), dentro de la cual se ubicaron dos transectos perpendiculares de 20 metros de largo cada uno que se cruzan en el centro del SPM, de tal forma que se forman cuatro cuadrantes de 100 m² dentro del SPM y se enumeraron de acuerdo al movimiento de las manecillas de un reloj, tal y como lo muestra la Figura 5. En cada subparcela se realizaron diferentes mediciones de atributos. Cada parcela se delimitó con estacas de madera, colocándolas también en el centro de la parcela y en las cuatro esquinas donde se unían a la parcela los transectos perpendiculares.

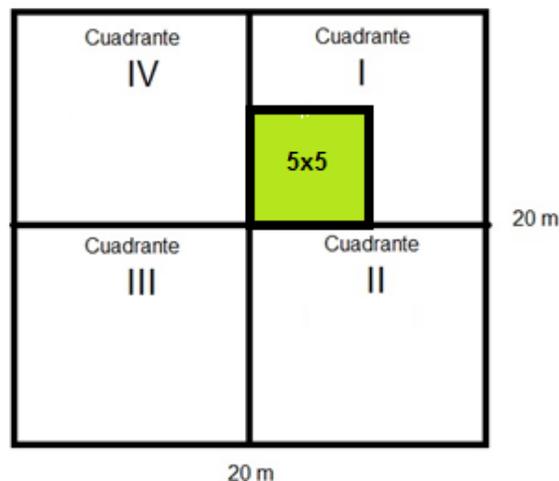


Figura 5. División del sitio permanente de muestreo.

Dentro del cuadrante I se ubicó otro cuadrante o subparcela con una superficie de 25 m² (5 m x 5 m) partiendo del centro del SPM. Una vez dividido el SPM en los cuatro cuadrantes de 100 m² y en uno pequeño de 25 m² se procedió a la toma de datos según las siguientes especificaciones: En todos los cuadrantes se midieron los árboles con DAP igual o mayor a 10 cm, anotando el nombre común, la altura del mismo (m), el DAP de cada rama (cm) y DB de todas las ramas (cm); en el cuadrante 1 y 3 de cada parcela se realizó el mismo procedimiento anterior para los árboles y arbustos con diámetro mayor o igual a 5 cm y menor a 10 cm. En el cuadrante de 5 m por lado se realizó la medición de los árboles y arbustos que cumplieran la condición de DAP mayor a 0 cm y menor a 5 cm y que además la altura fuera mayor a 1.5 m. Cabe mencionar que con una rama cuyo diámetro cayera dentro de alguna de las categorías diamétricas, se le consideró dentro de la misma.

La información de campo de cada parcela se clasificó en cinco categorías (vidrioso, palo de arco, sabal sp , quiebramachete y otras); dentro de cada categoría se clasificó la información en 4 grupos (DAP \geq 10 cm, DAP \geq 5 y < 10 cm, DAP < 5 cm y altura mayor a 1.5 m, y plantas menores a 1.5 m de altura. Además, se calculó el total y el promedio por ha, parcela y categoría de las variables altura (m), DB (cm), DAP (cm), número de ramas, y número de árboles.

6.4 Producción de forraje

La producción de forraje se midió por medio de la técnica de corte directo por parcela para vegetación herbácea, utilizando parcelas de 1 m² (BLM, 1996). Para lo cual se hicieron tres parcelas dentro de dos unidades de vegetación con dimensiones de 16 m² dentro de la cual se colectó todo el follaje de las especies arbustivas forrajeras y por separado el follaje de las especies no forrajeras.

Dentro de la parcela de 16 m² se ubicaron siete parcelas de 1 m² de partes estratégicas de la parcela (Figura 6). En cada metro cuadrado se cosechó toda vegetación herbácea simulando el pacer de los animales.

El follaje de las arbustivas se cosechó por individuo de cada especie presente en la parcela de 16 m² obteniendo la producción de forraje promedio sumando la producción de las parcelas de 16 m².

El follaje de especies arbustivas forrajeras y no forrajeras y de las herbáceas se colocó inmediatamente después de ser colectadas, en bolsas de plástico y se registró en campo su peso fresco. Una vez en laboratorio, se colocaron cada una de las muestras en bolsas de papel para ser llevadas a la estufa para su secado a 60°C por 48 hrs o hasta obtener peso constante, y después fueron pesadas nuevamente para obtener el peso seco y por diferencia, el contenido de humedad.

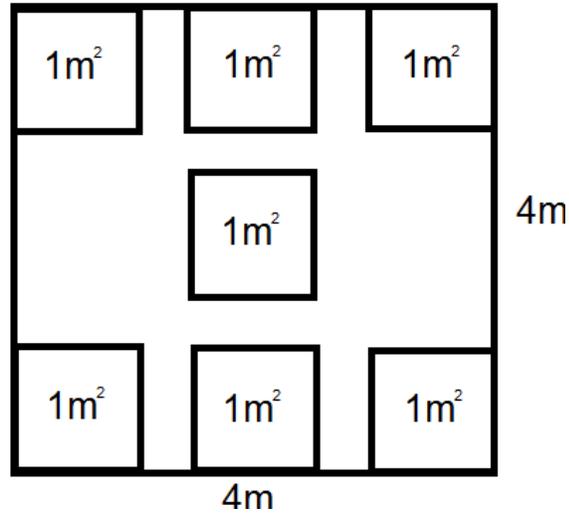


Figura 6. División de la parcela de 16 m² para medir producción de forraje.

La biomasa que se colectó en los dos sitios, corresponde al crecimiento de forraje en un mes, puesto que un mes antes se habían sacado de ese potrero los animales para pastorear en otro.

Los atributos de vegetación que se evaluaron para determinar capacidad de carga animal, así como las técnicas para medir cada atributo, se basan en las propuestas metodológicas de Piper (1978) y BLM (1996) y se describen a continuación:

La producción de forraje de especies arbustivas se llevó a cabo por medio de la técnica de corte directo por individuo obteniéndose la producción promedio de forraje por individuo, multiplicándose por la densidad de la especie por hectárea.

6.5 Evaluación de Captura de carbono

La obtención de muestras para evaluar captura de carbono se llevó a cabo en las parcelas permanentes de muestreo de acuerdo con la metodología propuesta por Andrade e Ibrahim (2003) para evaluar secuestro de carbono en sistemas silvopastoriles, se siguió el procedimiento siguiente: inicialmente se seleccionan los reservorios de carbono por evaluar, en este caso se evaluaron tres reservorios:

- a) biomasa aérea.
- d) Hojarasca.
- e) Materia orgánica del suelo.

6.5.1 Biomasa aérea

Para determinar la fitomasa aérea de palo de arco se generó una ecuación alométrica. Para esto se utilizó la información de 5 árboles representativos seleccionados al azar, mediante una modificación del método destructivo. Se anotó el DB de cada rama (cm), el DAP (cm), la altura del árbol (m) y el número de ramas. Posteriormente se seleccionaron fracciones del árbol, y se pesaron para conocer el peso de la madera fresca, así mismo se le determinó a cada una el diámetro promedio y la altura para determinar el volumen (cm^3), luego se determinó la densidad de la madera verde por desplazamiento de agua en un cilindro de dimensiones conocidas. Con esta información se estimó el peso de la madera fresca de las ramas que no fueron podadas. Para determinar el contenido de materia seca se llevó una muestra representativa de cada árbol de las fracciones de madera y hoja al laboratorio para el secado en la estufa. Por

último se determinó la materia seca por árbol (kg). Para desarrollar la ecuación alométrica que mejor predijera el contenido de biomasa arbórea por árbol (kg MS) se realizaron regresiones lineales simples, lineales múltiples, cuadráticas, cúbicas y logarítmicas, en donde la variable dependiente fue el contenido de biomasa de cada árbol (kg MS), y las variables independientes fueron la altura (m), el DB (cm), el DAP (cm) y el número de ramas. Se seleccionó la ecuación con mayor r^2 y menor coeficiente de variación (%).

Para determinar la fitomasa aérea del sabal se utilizó la ecuación $Y=24.56+4.92h+1.02h^2$, (Rügnitz *et al.*, 2009) en donde Y es el contenido de biomasa por planta (kg MS) y h es la altura (m).

Para el caso de la ecuación alométrica del quiebramachete se utilizó la ecuación sugerida por Luna (2012), quien determinó que la ecuación que mejor estima el contenido de biomasa es de la forma $Y=bX$, en donde Y, es el contenido de biomasa (kg MS), X es el DB (cm) y $b=2.46662$, con una $r^2= 0.96$ y un coeficiente de variación de 21.12%. Para determinar la biomasa aérea del vidrioso y de las otras especies se utilizó la ecuación mencionada por el mismo autor quien determina que la ecuación es la misma aplicada a la especie quiebramachete solo que se le considera un factor equivalente a 0.78960874.

6.5.2 Carbono en hojarasca

Se realizó mediante la obtención de estos materiales en parcelas o cuadrantes de 0.25 m². Se realizaron 4 muestras en cada sitio, muestreando en total 1 m² recogiendo todo el material presente sobre el suelo, se pesó la hojarasca

encontrada dentro las muestras, posterior a esto se mezclaron todas las muestras de cada parcela y se seleccionó una muestra compuesta. Obteniendo una muestra por cada sitio las cuales fueron puestas en bolsas de papel para determinar contenido de humedad en la estufa a 60°C hasta alcanzar peso constante.

6.5.3 Estimación de carbono en suelo

Se obtuvo por medio de dos muestras por cada sitio tomadas con la técnica del barreno o cilindro de dimensiones conocidas separando las raíces, las cuales no fueron consideradas en este estudio. Se pesaron las muestras de suelo en campo enseguida se mezclaron y se seleccionó solo una muestra compuesta de cada repetición.

Todas las muestras se secaron en una estufa de circulación a 60°C durante 48 horas y se registró el peso seco de cada componente. Posteriormente las muestras fueron molidas para separar por medio de tamizado las raíces y los residuos orgánicos presentes y se llevaron a laboratorio para determinar el contenido de materia orgánica y así conocer el contenido de carbono.

Se elaboró una base de datos en el programa Excel en la cual se introdujeron las variables de entrada, para el cálculo de la biomasa seca por árbol, encontrado en la parcela, luego se realizó la sumatoria de los totales por parcela, posteriormente se estimó el contenido de carbono en toneladas por hectárea.

7 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Para el análisis de los datos de carbono se utilizó el Sistema de Análisis Estadístico SAS analizando primero el efecto de las variables independientes (DAP, DB, altura y número de ramas a la altura del pecho) sobre el contenido de materia seca del árbol de la especie palo de arco; posteriormente se realizó el análisis de varianza y la prueba de comparación de medias Tukey, para poder conocer las ecuaciones alométricas para dicha especie.

Con los datos de los cinco árboles muestreados de palo de arco para la obtención de la biomasa aérea se procedió a encontrar la ecuación alométrica que mejor describa el comportamiento del almacenamiento de carbono, adquiriendo los datos presentados en el siguiente cuadro:

Cuadro 4. Ecuaciones alométricas que mejor predicen la producción de materia seca para palo de arco (*Lysiloma microphylla*).

Tipo de análisis	Ecuación	Valores	Variable independiente	Error estándar	CV %	r ²	Pr> t
Regresión lineal simple sin ordenada al origen	Y=bX	b=13.03765	X=altura	3.138	51.72	0.811	0.0142
		b=82.20038	X=ramas a la altura del pecho	8.699	24.69	0.957	0.0007
		b=2.02379	X=diámetro a la altura del pecho	0.244	27.95	0.945	0.0012
		b=1.87322	X=diámetro basal	0.232	28.72	0.942	0.0013
Regresión polinomial cuadrática	Y=a+bx+cx ²	a=482.2786976	X=diámetro a la altura del pecho	63.722	7.2	0.984	0.017
		b=-20.1886307		2.912			0.0202
		c=0.2330828		0.030601			0.0168

La ecuación que se utilizó para calcular el contenido de biomasa del arbusto palo de arco fue la tercera de la regresión lineal simple sin ordenada al origen con forma $Y=bX$ con valor de $b=2.02379$ y X =diámetro a la altura del pecho, se escogió ésta de entre las otras puesto que se observó que además de tener un alto valor de r^2 (0.9451) y de tener un coeficiente de variación de 27.95%, predice mejor el comportamiento de biomasa aérea utilizando como variable independiente el DAP.

Para conocer la producción total de fitomasa se utilizaron las siguientes ecuaciones para cada una de las especies en estudio tal y como se presentan en el siguiente cuadro:

Cuadro 5. Ecuaciones utilizadas para determinar la producción de materia seca para cada especie.

Especie	Ecuación	Variable independiente
Palo de arco	$Y=2.02379X$	X =Diámetro a la altura del pecho.
Vidrioso	$Y=2.46662X*0.78960874$	X =Diámetro basal
Sabal	$Y=24.56+4.92X+1.02X^2$	X =Altura
Quebramachete	$Y=2.46662X$	X =Diámetro basal
Otras	$Y=2.46662X*0.78960874$	X =Diámetro basal

Para determinar el contenido de carbono orgánico en el suelo a 0-10 cm de profundidad, se utilizó 0.2 g de cada una de las muestras compuestas de cada parcela y se determinó en el laboratorio de suelos de la Universidad Autónoma Chapingo, mediante el método de combustión húmeda, desarrollado por Walkley& Black (Lull *et al.*, 2009) y utilizando la siguiente fórmula:

$$\% \text{ de materia orgánica en la muestra} = 10(1-M/T)*0.67/\text{g de muestra}$$

Donde:

M=Volumen de sulfato ferroso gastado para valorar el testigo (ml);

T= Volumen de sulfato ferroso gastado para valorar la muestra (ml); y

g de muestra=peso de la muestra empleada (g).

El porcentaje de carbono se obtuvo aplicándole al porcentaje de materia orgánica el factor de 1.724 ya que % de mo=%de C org.x1.724, el cual resulta de la suposición que la materia orgánica contiene un 58% de carbono ($1/0.58=1.724$).

Para estimar el carbono de cada componente sobre el suelo (aéreo y hojarasca) se multiplica la fitomasa ($t\ ha^{-1}$) por 0.5 (Rügnitz *et al.*, 2009). Para estimar el carbono total ($t\ ha^{-1}$) se suma el contenido en cada componente, de tal manera que se obtienen los siguientes datos presentados en el Cuadro 6. Para el caso de carbono aéreo se le aumentó el 3% de carbono por especie considerando así el carbono del follaje.

Para conocer la relación entre los sitios con la fijación de carbono de los diferentes componentes se realizó el análisis estadístico considerando un diseño completamente al azar con cuatro tratamientos, los cuales corresponden a los 4 sitios muestreados: 1. Vidrioso-palo de arco, 2. Quiebramachete-palo de arco-vidrioso, 3. Sabal y otras 4. Sabal-quiebramachete y tres repeticiones (cada parcela muestreada se consideró una repetición). Se realizó el análisis de varianza y la prueba de comparación de medias Tukey para cada componente estudiado: carbono aéreo, carbono en hojarasca, carbono en suelo: 0-10 cm de profundidad y carbono total (Cuadro 7).

Cuadro 6. Contenido de carbono por componente y total en cuatro sitios de Bosque tropical caducifolio de la Sierra Gorda de Querétaro.

Sitio	Parcela	Biomasa aérea, t ha ⁻¹	Carbono aéreo, t ha ⁻¹	Carbono en hojarasca, t ha ⁻¹	Carbono en suelo, t ha ⁻¹	Total de carbono, t ha ⁻¹
Vidrioso-palo de arco	1	33.793	16.897	2.645	95.853	115.395
	2	31.792	15.896	3.183	65.645	84.724
	3	20.352	10.176	2.557	106.397	119.130
Quebramachete-palo de arco	1	51.279	25.639	3.517	72.066	101.222
	2	48.637	24.318	3.45	61.052	88.820
	3	54.941	27.471	4.285	113.977	145.733
Sabal y otras	1	31.81	15.905	7.299	71.787	94.991
	2	25.224	12.612	9.962	64.68	87.254
	3	39.746	19.873	8.642	59.394	87.909
Sabal-Quebramachete	1	34.043	17.021	4.019	60.666	81.706
	2	13.735	6.867	7.809	72.267	86.943
	3	27.161	13.580	6.489	101.443	121.512

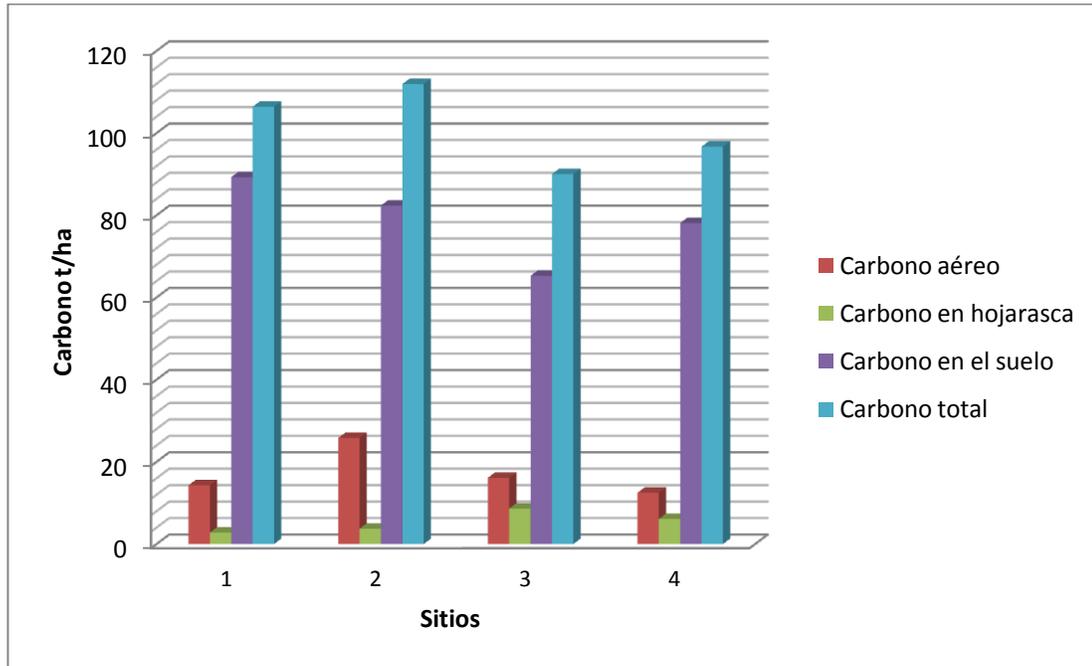
Cuadro 7. Efecto de sitio en la cantidad de carbono almacenado en cada componente y total en Bosque tropical caducifolio

Sitio	Carbono aéreo t ha ⁻¹	Carbono en hojarasca t ha ⁻¹	Carbono en el suelo t ha ⁻¹	Carbono total t ha ⁻¹
Vidrioso-palo de arco	14.323b	2.7950c	89.30a	106.42a
Quebramachete-palo de arco-vidrioso	25.809a	3.7507bc	82.37a	111.93a
Sabal y otras	16.130ab	8.6343a	65.29a	90.05a
Sabal-quebramachete	12.489b	6.1057ab	78.13a	96.72a
CV %	21.67	22.63	26.22	20.58

Medias con diferente letra son diferentes estadísticamente ($P \leq 0.05$)

De los cuatro sitios estudiados con relación a la biomasa aérea, se encontró un rango de fijación de carbono de 12.489 t ha⁻¹ (sitio 4) a 25.809 t ha⁻¹ (sitio 2), encontrándose el mayor valor en el sitio de quebramachete-palo de arco-vidrioso, el cual además resultó diferente ($p \leq 0.05$) a los demás. Esto puede explicarse debido a que las especies en este sitio presentaron varias ramas a la

altura del pecho comparadas con los demás sitios. A su vez en el sitio 4 predomina la especie sabal lo que nos arrojó un dato bajo comparado con los demás sitios.



1-vidrioso-palo de arco, 2- quiebramachete-palo de arco-vidrioso, 3- sabal y 4- sabal-quiebramachete

Figura 7. Captura de carbono por componente y total en cada sitio de Bosque Tropical caducifolio en la Sierra Gorda de Querétaro

Mientras tanto; el sitio que obtuvo mayor fijación de carbono en el componente hojarasca fue el sitio 3 (Sabal y otras) con un valor de 8.6343 t ha^{-1} el cual también se diferenció ($p < 0.05$) de los demás sitios. Por el contrario el sitio 1 (vidrioso-palo de arco) tuvo el menor valor, representado por 2.7950 t ha^{-1} . El carbono almacenado en el componente hojarasca del sitio 3 pudo haber incrementado debido a la gran cantidad de hojas de sabal que forman parte del mantillo en estas parcelas, por lo cual existió diferencia de entre los demás sitios.

Para el caso del componente suelo, el sitio 1 (vidrioso-palo de arco) obtuvo un alto valor de carbono fijado (89.30 t ha^{-1}) comparado con los demás sitios y fue por ese valor alto que en carbono total superó a los demás sitios. Por otro lado, el valor del sitio 3 (Sabal y otras) de 69.9 t ha^{-1} en cuanto a carbono almacenado en el suelo, resultó ser el más bajo de los cuatro, aun así, entre los cuatro sitios no existieron diferencias ($p \leq 0.05$).

Se puede apreciar que mientras el sitio 1 tiene un alto valor de almacenamiento de carbono en el suelo y un valor bajo en el carbono almacenado en hojarasca; el sitio 3 tiene un bajo valor en carbono almacenado en suelo y un valor alto en el carbono fijado en hojarasca, esto se puede explicar debido al retorno anual de materia orgánica y bioelementos al suelo, ya que la hojarasca juega un papel fundamental en el reciclaje de nutrientes y este reciclado depende de la cantidad de la materia orgánica que se incorpora al suelo por unidad de tiempo y de la velocidad de descomposición y mineralización de la materia orgánica del suelo. Pudiendo ser que ambos sitios se encuentren en diferentes etapas de biodegradación puesto que como resultado de la descomposición se liberan nutrientes minerales al suelo, aunque si la relación C:N de los restos orgánicos es relativamente alta hay una retención temporaria de nutrientes minerales en la biomasa microbiana. El resto de la materia orgánica fresca incorporada al suelo es sometida a complejas reacciones bioquímicas y químicas, dando lugar a la formación del humus, el cual constituye la materia orgánica estable del suelo, la cual se descompone y mineraliza muy lentamente (Moretto *et al.*, 2005).

En general en los totales de carbono, no se encontraron diferencias ($p \leq 0.05$), por lo que los 4 sitios pueden fijar carbono de igual manera, a pesar de que en cada uno de los componentes: biomasa aérea y hojarasca si hayan existido diferencias en la fijación y almacenamiento de carbono.

La producción de forraje se determinó por medio de los datos de dos sitios que fueron el 1 (vidrioso-palo de arco) y el 3 (sabal y otras). Se calculó la materia seca de forraje de herbáceas ($t \text{ ha}^{-1}$), de arbustivas forrajeras ($t \text{ ha}^{-1}$) y de arbustivas no forrajeras.

El muestreo para determinar producción de forraje se realizó después que la vegetación tuvo un mes de descanso (sin ganado). Es decir, el forraje cosechado corresponde a un mes de crecimiento de las especies muestreadas, durante la temporada de lluvias.

Cuadro 8. Producción de forraje por parcela y por sitio de muestreo en Bosque tropical caducifolio de la Sierra Gorda de Querétaro.

Sitio	Parcela	Herbáceas $t \text{ ha}^{-1}$	Arbustivas forrajeras $t \text{ ha}^{-1}$	Producción total de forraje por parcela $t \text{ ha}^{-1}$	Arbustivas no forrajeras $t \text{ ha}^{-1}$	Producción total de forraje por sitio $t \text{ ha}^{-1}$
Vidrioso-palo de arco	1	0.2114	0.1939	0.4053	0.2775	0.5786
	2	0.29	0.2875	0.5775	0.2443	
	3	0.3914	0.3643	0.7557	0.1181	
Sabal y otras	1	0.2735	0.119	0.3925	0.0992	0.3167
	2	0.2491	0.0566	0.3057	0.1091	
	3	0.1814	0.0706	0.252	0.085	

Los datos de producción por componente herbáceo y arbustivo se analizaron mediante una comparación de medias entre sitios encontrándose solamente diferencia significativa en la producción de forraje de arbustivas (Cuadro 9).

Cuadro 9. Efecto de sitio en la producción de forraje y captura de carbono de herbáceas.

Sitio	Herbáceas t ha ⁻¹	Arbustivas forrajeras t ha ⁻¹	Arbustivas no forrajeras t ha ⁻¹	Carbono de herbáceas t ha ⁻¹
Vidrioso-palo de arco	0.29733a	0.28133a	0.21300a	0.14833a
Sabal y otras	0.23433a	0.08167b	0.09767a	0.11667a
CV%	27.14	35.76	38.58	27.22

Medias con diferente letra son diferentes estadísticamente ($P \leq 0.05$)

Para la producción de especies herbáceas y arbustivas no forrajeras no hubo diferencias ($p \leq 0.05$) entre sitios. Lo contrario sucedió en la producción de especies arbustivas forrajeras por sitio, dónde si hubo diferencias ($p \leq 0.05$) siendo el sitio 1 (vidrioso-palo de arco) el que produjo mayor forraje para el ganado en el lapso de tiempo de un mes. Esto puede deberse a que el sitio de sabal y otras presenta menos especies forrajeras como tal.

La producción de forraje en el año 2012 considerando una temporada de lluvia de cuatro meses (junio-octubre) es en promedio 578.66 kg/ha/mes es decir, la producción anual es de 2314.64 kg ha⁻¹ en el sitio de vidrioso-palo de arco mientras que la producción promedio mensual en el sitio sabal y otras es de 316.7 kg/ha/mes y de 1264 kg/ha/año.

El porcentaje de utilización del forraje de acuerdo con las estimaciones in situ, después de cada periodo de pastoreo es menor de julio a septiembre, ya que la tasa de crecimiento de forraje es elevada, en promedio se determinó un 50% de utilización en esos meses. A partir del mes de octubre la tasa de crecimiento del

forraje es menor por lo cual en el mismo periodo de ocupación del potrero (1 mes) el porcentaje de utilización es mayor llegando al 70%.

Para estimar la capacidad de carga animal se consideró un porcentaje de utilización promedio del 60% por lo que la cantidad de forraje utilizable por hectárea es de 1388.78 kg en el sitio vidrioso-palo de arco y de 758.4 kg en el sitio sabal y otras.

Considerando el consumo voluntario de forraje de 3% del peso vivo, tenemos que una unidad animal (450 kg de peso vivo) consume al año 4927.5 kg de materia seca de forraje de tal manera que al relacionar la demanda anual de forraje por unidad animal con la oferta de forraje de cada sitio en el año 2012, resulta una capacidad de carga animal de 0.29 UA/ha/año en el sitio vidrioso-palo de arco y de 0.15 UA/ha/año en el sitio sabal y otras. La capacidad de carga animal promedio en el Bosque Tropical caducifolio es de 0.22 UA/ha/año.

En el sitio vidrioso-palo de arco se necesitan 3.44 ha/UA/año mientras que en el sitio sabal y otras se requieren 6.66 ha/UA/año. Lo anterior muestra claramente que el potencial para la ganadería es mejor en el sitio vidrioso-palo de arco como consecuencia de la mayor producción de forraje del componente arbustivo.

Estos datos solo ofrecen la posibilidad de elegir que sitio por su menor producción de forraje y capacidad de carga se sustituiría por praderas de gramíneas introducidas, sin embargo tendría que considerarse la reducción en captura de carbono que ésta práctica implica.

Cuadro 10. Carga animal y Coeficiente de agostadero de dos sitios del bosque tropical caducifolio de la Sierra Gorda de Querétaro.

Sitio	Producción Total de forraje por sitio ton ha	Producción anual de forraje (4 meses) ton ha	Forraje 60% utilización	Carga animal UA ha	Coeficiente de agostadero ha UA
Vidrioso-Palo de arco	0.5786	2.3146	1.388	0.29	3.44
Sabal	0.3167	1.264	0.758	0.15	6.66

Así mismo deberán considerarse otros factores para decidir el cambio de la vegetación nativa por praderas introducidas, como: costo de la eliminación de la vegetación de BTC, costo de establecimiento de praderas introducidas, costo de mantenimiento de las mismas, el período de vida útil de estas praderas (persistencia) y en el caso de sabal, que tiene otro uso para los pobladores debido a que cortan las hojas del palmito para elaborar artesanías lo que les genera ingresos.

Los datos de capacidad de carga y persistencia de praderas introducidas de pasto Insurgente (*Brachiaria brizantha*) y pasto Guinea (*Panicum maximum*) proporcionados por ganaderos de la región de estudio, en vista de no contar con otro tipo de información son: capacidad de carga de 0.5-0.75 UA /ha/año y persistencia de 4 años.

8 CONCLUSIONES

El diámetro a la altura del pecho es la variable independiente que mejor describe el comportamiento de las especies para producir biomasa aérea y por lo tanto para predecir el almacenamiento de carbono de la especie palo de arco (*Lysiloma microphylla*).

El carbono almacenado en cada componente puede variar en cada sitio dependiendo de la asociación de especies, de su diámetro, altura y ramas a la altura del pecho, de la intensidad de pastoreo, del aprovechamiento de árboles y arbustos, de la etapa de descomposición de la materia orgánica en el suelo y de las herbáceas presentes. Sin embargo, los cuatro sitios muestreados no son diferentes estadísticamente en cuanto a fijación y almacenamiento de carbono, por lo que se concluye que todos son excelentes reservorios de carbono dentro del bosque tropical caducifolio.

Los datos obtenidos en este estudio en cuanto a producción de forraje y capacidad de carga animal nos muestran que la diferencia entre sitios es resultado de la mayor producción de forraje del componente arbustivo en el sitio vidrioso-palo de arco.

La capacidad de carga de los sitios vidrioso-palo de arco y sabal y otras son aceptables considerando que no se requieren inversiones adicionales para su aprovechamiento comparado con las grandes inversiones adicionales para establecer pradera, ni se tienen costos de mantenimiento por control de

malezas y plagas ni por fertilización, como las que se requieren en las praderas introducidas.

El Bosque tropical caducifolio de la Sierra Gorda de Querétaro tiene capacidad de carga animal aceptable sin dejar de prestar servicios ambientales como el almacenamiento de carbono.

9 ANEXOS

Cuadro 11. Vegetación del sitio 1.

Sitio 1 Vidrioso-Palo de arco			
	Especie	Individuos por sitio (1200 m ²)	Densidad (árboles ha ⁻¹)
Vidrioso	<i>Crotton niveus</i>	32	266.7
Palo de arco	<i>Lysiloma microphylla</i>	30	250
Sabal	<i>Sabal sp.</i>	10	83.3
Granadillo	<i>Ceanothus buxifolius</i>	6	50
Chicharrillo	<i>Harpalyce arborescens</i>	6	50
Crucillo	<i>Condalia lycioides</i>	6	50
San pedro	<i>Tecoma stan</i>	6	50
Sihuapatle	<i>Montanoa tomentosa</i>	9	75
Nopal	<i>Opuntia sp.</i>	4	33.3
Chonhua	<i>Rhus schiedeana</i>	4	33.3
Chirimoya	<i>Annona globiflora</i>	3	25
Guayabillo	<i>Psidium sartorianum</i>	3	25
	<i>Eysenhardtia</i>		
Palo dulce	<i>polystachya</i>	3	25
Palo blanco	<i>Albizia occidentalis</i>	2	16.7
Trompillo	<i>Cordia boissieri</i>	1	8.3
Bejuquillo		1	8.3
Lechocillo		1	8.3
Zapotillo	<i>Casimiroa pubescens</i>	1	8.3
Campanero		1	8.3
Tepehuaje	<i>Lysiloma acapulcensis</i>	1	8.3
Total		130	1083.3

Cuadro 12. Vegetación del sitio 2.

Sitio 2 Queiebramachete-Palo de arco-Vidrioso			
	Especie	Individuos por sitio (1200 m ²)	Densidad (árboles ha ⁻¹)
Queiebramachete	<i>Mimosa leucanoides</i>	56	466.7
Vidrioso	<i>Crotton niveus</i>	51	425
	<i>Eysenhardtia</i>		
Palo dulce	<i>polystachya</i>	30	250
Palo de arco	<i>Lysiloma microphylla</i>	25	208.3
Sabal	<i>Sabal sp.</i>	9	75
Chonhua	<i>Rhus schiedeana</i>	8	66.7
Sihuapatle	<i>Montanoa tomentosa</i>	6	50
San Pedro	<i>Tecoma stan</i>	6	50
Hierba del toro	<i>Blechum brownei</i>	6	50
Bejuquillo		5	41.7
Nopal	<i>Opuntia sp.</i>	3	25
Trompillo	<i>Cordia boissieri</i>	3	25
Capulincillo	<i>Krugiodendron ferreum</i>	2	16.7
Chaka	<i>Bursera simaruba</i>	1	8.3
Lantrisco	<i>Rhus pachyrrhachis</i>	1	8.3
Capulin	<i>Prunus serotina</i>	1	8.3
Chichote		1	8.3
Salvia	<i>Salvia sp.</i>	1	8.3
Pasilla	<i>Vibunum elatum</i>	1	8.3
Granadillo	<i>Ceanothus buxifolius</i>	1	8.3
Crucillo	<i>Condalia lycioides</i>	1	8.3
Algodoncillo		1	8.3
Total		219	1825

Cuadro 13. Vegetación del sitio 3.

Sitio 3 Sabal y otras			
	Especie	Individuos por sitio (1200 m ²)	Densidad (árboles ha ⁻¹)
Sabal	<i>Sabal sp.</i>	120	1000
Chonhua	<i>Rhus schiedeana</i>	25	208.3
Palo de arco	<i>Lysiloma microphylla</i>	18	150
Quebramachete	<i>Mimosa leucanoides</i>	15	125
Vidrioso	<i>Crotton niveus</i>	12	100
Chicharrillo	<i>Harpalyce arborescens</i>	11	91.7
Campanero		10	83.3
Granadillo	<i>Ceanothus buxifolius</i>	4	33.3
Crucillo	<i>Condalia lycioides</i>	2	16.7
Algodoncillo		1	8.3
Chirimoya	<i>Annona globiflora</i>	1	8.3
Capulincillo	<i>Krugiodendron ferreum</i>	1	8.3
Árbol seda		1	8.3
Aguacatillo	<i>Buddleia parviflora</i>	1	8.3
Laurel	<i>Phoebe tampicensis</i>	1	8.3
Total		223	1858.3

Cuadro 14. Vegetación del sitio 4.

Sitio 4 Sabal-Quebramachete			
	Especie	Individuos por sitio (1200 m ²)	Densidad (árboles ha ⁻¹)
Sabal	<i>Sabal sp.</i>	218	1816.7
Quebramachete	<i>Mimosa leucanoides</i>	49	408.3
Chicharrillo	<i>Harpalyce arborescens</i>	10	83.3
Chonhua	<i>Rhus schiedeana</i>	4	33.3
Granadillo	<i>Ceanothus buxifolius</i>	3	25
Palo de arco	<i>Lysiloma microphylla</i>	3	25
Timbre		2	16.7
Crucillo	<i>Condalia lycioides</i>	1	8.3
Santo Domingo		1	8.3
Trompillo	<i>Cordia boissieri</i>	1	8.3
Vidrioso	<i>Crotton niveus</i>	1	8.3
Total		293	2441.7

10 LITERATURA CITADA

Abad, C. N. G. 2006. Modelación hidrológica de las cuencas El Chuveje y Arroyo Real como herramienta en la implementación de pago por servicios ecológicos en la Reserva de La Biosfera Sierra Gorda, Querétaro, México. Tesis de Maestría. Instituto Tecnológico de Estudios Superiores de Monterrey. Monterrey, N. L. 288 pp.

Acosta, M., Quednow, K., Etchevers, J. y Monreal, C. 2001a. Un método para la medición del carbono almacenado en la parte aérea de sistemas con vegetación natural e inducida en terrenos con ladera en México. INIFAP. Colegio de Postgraduados, México. 11 pp.

Acosta, M., Etchevers, J., Monreal, C., Quednow, K. y Hidalgo, C. 2001b. 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 pp.

Alberto, D. M. y Elvir, J. A. 2008. Acumulación y fijación de carbono en biomasa aérea de *Pinus oocarpa* en bosques naturales en Honduras. Investigación agraria: Sistemas y recursos forestales 17(1), 67-68.

Amézquita, M. C. 2008. Captura de carbono en sistemas de pasturas y silvopastoriles en cuatro ecosistemas de América Tropical vulnerables al cambio climático. Foro Nacional Ambiental. Documento de políticas públicas. Colombia, Bogotá. 12 pp.

- Andrade, H. J. e Ibrahim, M. 2003. ¿Cómo monitorear el secuestro de carbono en los sistemas silvopastoriles? *Agroforestería en las Américas* Vol. 10 N° 39-40. 8 pp.
- Anguiano, J. M., Aguirre, J. y Palma, J. M. 2013. Secuestro de carbono en la biomasa aérea de un sistema agrosilvopastoril de *Cocos nucifera*, *Leucaena leucocephala* Var. Cunningham y *Pennisetum purpureum* Cuba CT-115. *Avances en investigación Agropecuaria* 17(1): 149-160.
- BOLFOR. Mostacedo, B y Fredericksen, T. S. 2000. Manual de métodos básicos de muestreo y análisis en ecología vegetal. Santa Cruz, Bolivia. 92 pp.
- Bureau of Land Management. 1996. Sampling vegetation attributes. Interagency Technical Reference. National Applied resource Sciences Center. Denver, Colorado. U.S.A.
- Casanova, L. F., Petit, A. J. y Solorio, S. J. 2010. Los sistemas Agroforestales como alternativa a la captura de carbono en el trópico mexicano. *Revista Chapingo. Serie Ciencias Forestales y del ambiente*. 11 pp.
- Delgadillo, R. M. y Sotero, Q. M. 2006. Manual de monitoreo de carbono en sistemas agroforestales. CONAFOR. 43 pp.
- Galindo, S. W. F., Zuluaga, S. A. F., Soto, B. R., Valencia, C. L. M. y Uribe, T. F. 2009. Avances Pioneros de los Sistemas Silvopastoriles en Panamá. II Congreso sobre Sistemas Silvopastoriles Intensivos. Morelia, Michoacán, México. p 39.

- Gasparro, I. y Mangui, E. 2004. Estimación de volumen, biomasa y contenido de carbono de las regiones forestales argentinas. Secretaria de medio ambiente y desarrollo sustentable. Dirección de bosques. 26 pp.
- Ibrahim, M., Camero, A., Camargo, J. C. y Andrade, H. J. 1999. Sistemas Silvopastoriles en América Central: Experiencias de CATIE. In Congreso Latinoamericano sobre Sistemas Agroforestales para la Producción Agrícola. 28 al 30 de octubre 99. Cali, Colombia. Fundación CIPAV. p 73.
- Ibrahim, M., Chacón, M., Cuartas, C., Naranjo, J., Ponce, G., Vega, P., Casasola, F. y Rojas, J. 2007. Almacenamiento de carbono en el suelo y la biomasa arbórea en sistemas de uso de la tierra en paisajes ganaderos de Colombia, Costa Rica y Nicaragua. *Agroforestería en las Américas* N. 45. 10 pp.
- INE *et al.* 1999. Programa de Manejo de la Reserva Sierra Gorda. 1ª Ed. Unidad de Participación Social, Enlace y Comunicación, INE, México D.F. Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas, 173 pp.
<http://www2.ine.gob.mx/publicaciones/download/175.pdf>
- Jadán, O., Torres, B. y Günter Sven. 2012. Influencia del uso de la tierra sobre almacenamiento de carbono en sistemas productivos y bosque primario en Napo, Reserva de la biosfera Sumaco, Ecuador. *Revista Amazónica: Ciencia y Tecnología* 1 (3): 173-186. CATIE, Costa Rica.
- Kleinn, C. y Morales, D. s/a. Consideraciones metodológicas al establecer parcelas permanentes de observación en bosque natural o plantaciones forestales. *Revista Forestal Centroamericana*. Pág. 6-12.

- Locatelli, B. y Leonard, S. 2001. Un método para medir el carbono almacenado en los bosques de Malleco (chile). Bois et Forest des Tropiques. N° 267 (1).
- López, B. R. y Cervantes B. J. 2002. Unidades de paisaje para el desarrollo sustentable y manejo de los recursos naturales. Revista de información y análisis num.20. pág. 43-49.
- Lull, N., Lidón, A., Oliver, J., Llinares, J., Lado, L. y Bautista, M. 2009. Determinación de materia orgánica de un suelo. Escuela politécnica superior de Gandia.
- Luna, P. J. L. 2012. Fijación de carbono y producción y germinación de semilla de *Mimosa leucanoides* medidos con técnicas directas. Tesis Maestría. Agroforestería para el desarrollo sostenible. UACH. Chapingo, México. 86 pp.
- Mendoza, P. R L. 2008. Valoración del potencial de servicios ambientales hidrológicos en vegetaciones contrastantes de la Sierra Gorda de Querétaro. Tesis de maestría. Universidad Autónoma de Querétaro.
- Metz, B., Davidson, O., De Coninck, H., Loos, M. y Meyer, L. 2005. La captación y almacenamiento de dióxido de carbono.
- Meza, S. R. 2002. Metodología para evaluar las poblaciones de mezquite (*Prosopis* spp). Folleto Técnico Núm. 6. INIFAP. 49 pp.
- Montani, T. y Busso, C. 2004. Métodos de estudio de la vegetación U.N.S. Departamento de Agronomía 68 pp.

- Moretto, A., Lázzari, A. y Fernández, O. 2005. Calidad y cantidad de nutrientes de la hojarasca y su posterior mineralización en bosques primarios y bajo manejo con distintos sistemas de regeneración. PIARFON BAP. Módulo Lengua-Subproyecto 5. 17 pág.
- Murgueitio, R. E., Naranjo, J. F., Cuartas, C. A., Molina, C. H. y Lalinde, F. 2009. Los sistemas silvopastoriles intensivos (SSPi) una herramienta de desarrollo rural sustentable con adaptación al cambio climático en regiones tropicales de América. II Congreso sobre Sistemas Silvopastoriles intensivos. Michoacán, México. p 9.
- Nair, P. K. R. 1993. An introduction to Agroforestry. Department of forestry, university of Florida. Florida, U.S.A. Kluwer academic Publishers in cooperation with ICRAF. Agroforestería. Edición y revisión en español: L Krishnamurthy y Juan Antonio Leos Rodríguez. Centro de Agroforestería para el desarrollo sostenible A.C. Universidad Autónoma Chapingo.
- Ordoñez, J. A. 1999. Captura de carbono en un bosque templado: el caso de San Juan Nuevo, Michoacán. SEMARNAP 74 pp.
- Percy, K. E., Jandl, R., Hall, J. P. y Lavigne, M. 2003. El papel de los bosques en ciclo, la captura y el almacenamiento de carbono. Agencia Federal y Centro de Investigación Forestal. Viena, Austria. Boletín 1. Sitio Web: <http://iufro.boku.ac.at/taskforce/hptfcs.htm>.
- Pieper, R. D. 1978. Measurement Techniques herbaceous and shrubby vegetation: New Mexico. State University. Las Cruces, N.M. U.S.A

- Priego, A., Bocco, G., Mendoza, M. y Garrido, A. 2008. Propuesta para la generación semiautomatizada de unidades de paisajes. Fundamentos y métodos. SEMARNAT. 98 pp.
- Reyes, A. I. y Gutiérrez, C. J.J. 2010. Los servicios ambientales de la arborización urbana: retos y aportes para la sustentabilidad de la ciudad de Toluca. Redalyc 12:1. Universidad Autónoma del Estado de México. México. pág. 96-102.
- Roncal, G. S., Soto, P. L., Castellanos, A. J., Ramírez, M. N. y De Jong, B. 2008. Sistemas agroforestales y almacenamiento de carbono en comunidades indígenas de Chiapas, México. Interciencia Vol. 33 N° 3.
- Rügnitz, M. T.; Chacón, M. L.; Porro R. 2009 Guía para la Determinación de carbono en Pequeñas Propiedades Rurales. 1. ed. Centro Mundial Agroforestal (ICRAF) / Consórcio Iniciativa Amazônica (IA). Lima, Perú. 79 p
- Russo, R. O. y Botero B. R. 2005. El componente arbóreo como Recurso forrajero en los Sistemas Silvopastoriles. Escuela de Agricultura de la Región Tropical Húmeda, EARTH, San José, Costa Rica. 9 pp.
- Solorio, S. F.J., Bacab, P. H., Castillo, C. J.B., Ramírez, A. L. y Casanova, L F. 2009. Potencial de los Sistemas Silvopastoriles en México. II Congreso sobre Sistemas Silvopastoriles Intensivos. Universidad Autónoma de Yucatán. Mérida Yucatán, México. 10 pp.

Torres, R. JA. 1999. Agroecosistemas de árboles-pasto-ganado. Algunas ventajas y desventajas. I Reunión Nacional Sobre Sistemas Agro y Silvopastoriles. 9 al 11 de Junio 99. Huatusco, Veracruz. 10 pp.

Vázquez, I. A. 2011. Aplicabilidad del modelo de contabilidad de carbono CBM-CFS3 en bosques templados de los ejidos “La Mojonera” y “Atopixco”, Zacualtipán de Ángeles, Hidalgo, México. Tesis de Maestría. Colegio de Posgraduados, Montecillo, Texcoco, México. 120 pp.