



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA CHAPINGO
DEPARTAMENTO DE ENSEÑANZA E INVESTIGACIÓN EN SUELOS
MAESTRIA EN CIENCIAS EN AGROFORESTERIA PARA EL
DESARROLLO SOSTENIBLE

FIJACIÓN DE CARBONO, PRODUCCIÓN Y GERMINACIÓN DE
SEMILLA DE *Mimosa leucaenoides* MEDIDOS CON TÉCNICAS
DIRECTAS

TESIS

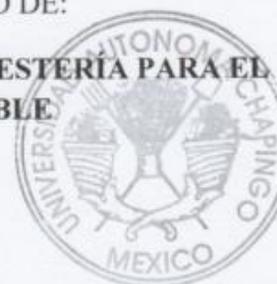
QUE COMO REQUISITO PARCIAL

PARA OBTENER EL GRADO DE:

MAESTRO EN CIENCIAS EN AGROFORESTERÍA PARA EL
DESARROLLO SOSTENIBLE

PRESENTA:

JOSÉ LUIS LUNA PALACIOS



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

Chapingo, Edo. de México, 2012



FIJACIÓN DE CARBONO, PRODUCCIÓN Y GERMINACIÓN DE SEMILLA DE *Mimosa leucaenoides* MEDIDOS CON TÉCNICAS DIRECTAS

Tesis realizada por **JOSÉ LUIS LUNA PALACIOS** bajo la dirección del Comité Asesor indicado, aprobada por el mismo y aceptada como requisito parcial para obtener el grado de:

MAESTRO EN CIENCIAS EN: AGROFORESTERÍA PARA EL DESARROLLO SOSTENIBLE

DIRECTOR: _____

M. C. JORGE LUIS CASTRELLÓN MONTELONGO

ASESOR: _____

DR. HUGO RAMÍREZ MALDONADO

ASESOR: _____

DR. MARTÍN ALEJANDRO BOLAÑOS GONZÁLEZ

DEDICATORIA

Dedico este trabajo a mis padres,mi esposa y mis hijos, por su apoyo moral incondicional y por esperar pacientemente mi regreso a casa.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco en primer lugar a Dios, por darme la oportunidad de compartir este trabajo con ustedes.

Agradezco al CONACYT por el apoyo financiero recibido.

Agradezco a la Universidad Autónoma Chapingo, con toda su gente por ser mi casa de estudios desde la prepa y por todos los servicios que me ha brindado.

Agradezco al Departamento de Suelos de la Universidad Autónoma Chapingo.

Agradezco al Programa de Agroforestería para el Desarrollo Sostenible por darme la oportunidad de ser su alumno durante el transcurso de esta maestría.

Agradezco a mi director de tesis y su apreciable familia, que desde el inicio apoyaron de manera incondicional este proyecto.

Agradezco a los integrantes del comité asesor por apoyar siempre el desarrollo del trabajo.

Agradezco a todos los profesores y compañeros alumnos del programa, por los momentos que compartimos en clases y fuera del salón de clases.

Y a todos los que voluntaria o involuntariamente, ayudaron al término de esta bonita experiencia. A todos.

GRACIAS

DATOS BIOGRÁFICOS

Nacido el once de junio de 1973 en Arroyo Seco, Querétaro, México. El décimo tercero de quince hijos. La madre Ángela Palacios González y el padre Abelardo Luna Palacios, los dos de origen campesino, originarios del mismo lugar.

Los estudios de primaria los realizó en la Escuela Emiliano Zapata de San Juan Buenaventura, la educación media básica en la Escuela Secundaria Técnica 28 de Purísima de Arista; ambas, del municipio de Arroyo Seco, Querétaro.

En 1988 ingresa a la Preparatoria Agrícola de la Universidad Autónoma Chapingo, en donde posteriormente estudia su licenciatura, graduándose en 1995 como Ingeniero Agrónomo Especialista en Zootecnia. Su examen de grado lo presentó en enero de 1996 con la tesis “Parámetros productivos en cabras estabuladas”.

Su servicio Social lo realizó con el tema “Caracterización de arbustivas con potencial forrajero en la Sierra Gorda de Querétaro, en junio de 1995.

Integrante del equipo Internacional de “Conocimientos en manejo de pastizales”, representativo de la Universidad Autónoma Chapingo de junio de 1994 a febrero de 1995. Y participante en el concurso Internacional de conocimientos en manejo de pastizales, celebrado el 15 de enero de 1995 en Phoenix, Arizona, USA.

Se ha desempeñado como Consultor en la Formulación y evaluación de proyectos productivos y Prestador de Servicios de Capacitación y Asistencia técnica en diferentes proyectos principalmente ganaderos en la Sierra Gorda del Estado de Querétaro (1996-2012); promovidos por instituciones como FONAES, FIRA, SAGARPA, Presidencias Municipales y Gobierno del Estado.

En 2010 ingresa a la Maestría en Ciencias en Agroforestería para el Desarrollo Sostenible de donde, con el presente trabajo de tesis, se gradúa en julio de 2012.

FIJACIÓN DE CARBONO, PRODUCCIÓN Y GERMINACIÓN DE SEMILLA DE *Mimosa leucaenoides* MEDIDOS CON TÉCNICAS DIRECTAS
CARBON FIXATION, PRODUCTION AND GERMINATION OF *Mimosaleucaenoides* SEED MEASURED WITH DIRECT TECHNIQUES

José Luis **Luna Palacios**¹, Jorge Luis **Castrellón Montelongo**²

RESUMEN

Para evaluar fijación de carbono, producción y germinación de semilla de *Mimosa leucaenoides*; en Querétaro se estudiaron dos sitios dominados por esta especie (perturbado y no perturbado); dos orientaciones (norte y oeste) y el efecto en germinación del remojo en agua, utilizando diseños aleatorios. Se realizaron ANAVA y prueba Tukey, generándose ecuaciones para predecir producción de semilla y fitomasa aérea. Los resultados encontrados muestran significancia estadística ($p \leq 0.05$) para fijación de carbono, producción de semilla y porcentaje de germinación. Los valores más altos se obtuvieron en el sitio no perturbado (143a vs 68b ton C ha⁻¹), la orientación Norte (690.5a vs 370.17b g árbol⁻¹) y el remojo 5 min en agua hirviendo (34.44a % germinación). Las mejores predicciones de producción de semilla (g árbol⁻¹) son: $Y=61.2798*(\text{diámetro basal, cm})$, $Y=18.84318*(\text{volumen, m}^3)$ en la orientación Oeste y $Y=72.83312*(\text{diámetro basal, cm})$ en la Norte ($R^2=0.9330, 0.9485$ y 0.9962 ; CV=30.00, 28.80 y 6.90 % respectivamente); para fitomasa aérea (kg árbol⁻¹): $Y=2.46662*(\text{diámetro basal, cm})$, $R^2= 0.96$, CV=21.12%. Se concluye que el diámetro basal predice mejor la producción de semilla y fitomasa aérea, la orientación norte produce más semilla, el sitio no perturbado fija más carbono y el remojo en agua hirviendo por 5 min mejora la germinación.

Palabras clave: *Mimosa leucaenoides*, fijación de carbono, producción de semilla, germinación.

¹Tesista²Director

ABSTRACT

To evaluate carbon fixation, production and germination of *Mimosaleucaenoides* seed, in Querétaro two dominated places by this species were studied (disturbed and undisturbed); two orientations (north and west) and the effect of germination bysoaking in water using random designs. The tests used were ANAVA and Tukey. They generated equations to predict productions of seed and aerial vegetation. The results showed statistical significance ($p \leq 0.05$) for the carbon fixation, seed production and germination percentage. The highest values were found in the undisturbed place (143a vs. 68b ton C ha⁻¹), the north orientation (690.5a vs. 370.17b g árbol⁻¹) and soaking in boiling water for five minutes (34.44a % germination). The better predictions of seed production (g tree⁻¹) are $Y=61.2798*(\text{basal diameter, cm})$, $Y=18.84318*(\text{volume, m}^3)$ in the west orientation and $Y=72.83312*(\text{basal diameter, cm})$ in the north ($R^2=0.9330, 0.9485$ y 0.9962 ; CV=30.00, 28.80 y 6.90 % respectively); for aerial vegetation production (kg tree⁻¹): $Y=2.46662*(\text{basal diameter, cm})$, $R^2= 0.96$, CV=21.12%. Therefore, the conclusions are: the undisturbed place fixes more carbon, the basal diameter is the better predictor of seed production and aerial vegetation production, the north orientation produces more seed; and the soaking in boiling water for five minutes increases the germination percentage.

Key words: *Mimosa leucanoides*, carbon fixation, seed production, germination.

INDICE GENERAL

1.	INTRODUCCIÓN	1
2.	OBJETIVO GENERAL	3
2.1.	Objetivos Específicos	3
3.	REVISIÓN DE LITERATURA	5
3.1.	ANTECEDENTES.....	5
3.1.1.	El Cambio climático	5
3.1.2.	Ciclo del Carbono.....	7
3.1.3.	Protocolo de Kioto.....	8
3.1.4.	Servicios ambientales	10
3.2.	Los bosques como sumideros de carbono.....	10
3.3.	Selva baja caducifolia.....	11
3.4.	Vegetación secundaria.....	11
3.5.	Sistemas agroforestales	12
3.6.	Sistemas silvopastoriles.....	13
3.7.	Componentes de almacenamiento de carbono en los sistemas forestales	15
3.8.	Monitoreo de carbono	15
3.9.	Metodología para determinar carbono almacenado	16
3.10.	Parcelas de muestreo	17
3.10.1.	Forma de las parcelas	17
3.10.2.	Tamaño de las parcelas.....	18
3.10.3.	Número de parcelas	18
3.11.	Carbono sobre el suelo	18
3.11.1.	Carbono aéreo	18
3.11.2.	Hojasca.....	23
3.11.3.	Madera muerta.....	23
3.12.	Carbono bajo el suelo	24
3.12.1.	Carbono en raíces	24
3.12.2.	Carbono en suelo	25
3.13.	Producción de semillas en arbustivas forrajeras	26
3.13.1.	Indicadores de calidad de las semillas	26
3.13.2.	Recolección de semillas en arbustivas forrajeras	28

3.13.3.	Metodología para la estimar producción de semilla en árboles y arbustos.....	28
3.13.4.	Rendimientos de semilla en leguminosas arbustivas	29
3.13.5.	Semillas por kilogramo en arbustivas forrajeras	29
3.13.6.	Variación anual en la producción de semillas.....	30
3.14.	GERMINACIÓN	32
3.14.1.	Letargo en semillas.....	32
3.14.2.	Tiempo de germinación	32
3.14.3.	Efecto de la luz.....	33
3.14.4.	Efecto de la temperatura.....	34
3.14.5.	Estudios realizados	35
3.14.6.	Proceso de germinación.....	36
3.14.7.	Análisis estadísticos de los resultados de las pruebas de germinación.	37
3.14.8.	Métodos de escarificación.	38
3.14.9.	Almacenamiento.....	39
3.14.10.	Escarificación húmeda.....	40
3.14.11.	Efecto del agua caliente en la germinación.....	41
3.14.12.	Escarificación química	42
3.14.13.	Escarificación física.....	43
3.14.14.	Tratamientos pregerminativos en otras Leguminosas	44
4.	MATERIALES Y MÉTODOS.....	45
4.1.	Localización y clima	45
4.2.	Suelo.	47
4.3.	Fijación de carbono	47
4.4.	Producción de semilla	52
4.5.	Efecto del remojo en agua en la germinación	54
5.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	56
5.1.	Contenido de carbono.....	56
5.1.1.	Generación de ecuación alométrica para estimar fitomasa aérea en <i>M. leucaenoides</i>	56
5.1.2.	Estimación de fitomasa y contenido de carbono en cada componente	56
5.1.3.	Análisis estadístico	57
5.1.4.	Resultados y discusión.....	57

5.2.	Producción de semilla en <i>M. leucaenoides</i>	59
5.2.1.	Análisis estadístico	59
5.2.2.	Resultados y discusión	59
5.3.	Efecto del remojo en agua sobre la germinación de semilla de <i>M. leucaenoides</i>	61
5.3.1.	Análisis estadístico	61
5.3.2.	Resultados y discusión	62
6.	CONCLUSIONES	65
7.	LITERATURA CITADA.....	67

INDICE DE CUADROS

Cuadro 1. Ubicación geográfica de las parcelas establecidas en cada sitio (perturbado y no perturbado) dominado por <i>M. leucaenoides</i> para la determinación de la fijación de carbono en la Sierra Gorda de Querétaro.....	48
Cuadro 2. Ubicación geográfica de los sitios seleccionados para determinar producción de semilla de <i>M. leucaenoides</i> en la Sierra Gorda de Querétaro.	52
Cuadro 3. Densidad y repoblación de <i>M. leucaenoides</i> en los sitios estudiados.	57
Cuadro 4. Contenido de carbono (ton ha ⁻¹) en cada componente y total en dos sitios dominados por <i>M. leucaenoides</i> en la Sierra Gorda de Qro., medias comparadas según Tukey.....	58
Cuadro 5. Ecuaciones que mejor predicen la producción de semilla en <i>M. leucaenoides</i> (Y=g árbol ⁻¹) en la Sierra Gorda de Querétaro, (P≤0.05).	60

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Precipitación anual en mm, periodo 2005-2011	45
Figura 2. Promedio de precipitación mensual, periodo 2005-2011	46
Figura 3. Temperaturas máximas y mínimas, 2005-2011	46
Figura 4. Promedios mensuales de temperaturas máximas y mínimas, 2005-2011	47
Figura 5. Diagrama ilustrado del levantamiento de información en campo para la determinación del contenido de Carbono en <i>M. leucaenoides</i> en la Sierra Gorda de Querétaro.	52
Figura 6. Diagrama ilustrado del levantamiento de la información en campo para la determinación de producción de semilla en <i>M. leucaenoides</i> en la Sierra Gorda de Querétaro.	54
Figura 7. Diagrama ilustrado del desarrollo de la prueba de germinación en <i>M. leucaenoides</i> para evaluar el efecto del remojo en agua sobre el % de germinación en la Sierra Gorda de Querétaro.	55
Figura 8. Temperaturas máximas y mínimas durante la duración de la prueba de germinación ..	56
Figura 9. Efecto del remojo en agua sobre la germinación de <i>M. leucaenoides</i> en la Sierra Gorda de Querétaro.	65

1. INTRODUCCIÓN

El escudo formado sobre la tierra por el dióxido de carbono, el metano, el óxido nitroso, los clorofluorocarbonos y el ozono, se va engrosando debido al incremento en la concentración de estos gases, principalmente el primero. Esto bloquea el escape de las radiaciones solares, lo que hace que las temperaturas globales aumenten en un proceso conocido como efecto invernadero. Este incremento puede alterar el clima global y afectar al bienestar de la humanidad (Raisman y González, 2008).

El dióxido de carbono es utilizado por las plantas en el proceso de la fotosíntesis, transformándolo a compuestos orgánicos que conforman la biomasa de árboles, arbustos, hierbas, gramíneas y la materia orgánica de los suelos (Murgueitio, 2001). En el trópico, los Sistemas Agroforestales pueden tener gran potencial para contribuir a la mitigación del problema del calentamiento global, dado que la combinación de especies vegetales en estos sistemas de producción actúan como un sumidero de Carbono. En este sentido, los Sistemas Silvopastoriles (SSA) deben ser evaluados para cuantificar y determinar su contribución con el ambiente (Abarca, 2002).

La cantidad de biomasa en los SSA se puede estimar de diferentes maneras: cosecha, estimaciones visuales, alturas o volúmenes de las plantas, radiometría, fotografías y el índice de vegetación de diferencias normalizadas, entre otros métodos.

La restricción en la disponibilidad y calidad de forraje es el factor que más limita la producción ganadera bovina. Este problema se acentúa en los trópicos donde la producción de las gramíneas, principalmente durante la época seca, resulta insuficiente para cubrir los requerimientos alimenticios de los animales. La utilización de especies arbóreas y arbustivas leguminosas en sistemas silvopastoriles es una actividad común en América latina (Flores *et al.* 1998)

El sistema de producción convencional de ganadería bovina extensiva en la sierra gorda de Querétaro que comprende los municipios de Arroyo Seco, Jalpan de Serra, Landa de Matamoros y Pinal de Amoles, cuenta con pocas alternativas para afrontar las épocas críticas en donde escasea el forraje principalmente. Una alternativa es el uso de especies forrajeras nativas, entre las que se encuentra la *Mimosa lecaenoides*, arbusto forrajero de amplia distribución regional que no ha sido evaluado dentro de un sistema de producción ganadera alternativo, pero que se cree cuenta con un amplio potencial como forraje y como prestador de servicios ambientales como la fijación de dióxido de carbono.

2. OBJETIVO GENERAL

Determinar la fijación de carbono en un sistema silvopastoril dominado por *M. leucaenoides* en la Sierra Gorda del Estado de Querétaro, además de evaluar su potencial de producción de semilla y el efecto del remojo en agua sobre el porcentaje de germinación, mediante técnicas directas; con el fin de conocer su contribución con el ambiente, pero también contar con información para proponer su aprovechamiento en los sistemas silvopastoriles de la región.

2.1. Objetivos Específicos

1. Evaluar el potencial para la fijación de carbono de *M. leucaenoides*, por medio de la comparación de un sitio no perturbado con uno perturbado; ambos dominados por esta especie. Además, generar una ecuación que pueda predecir la producción de fitomasa (g árbol^{-1}) 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 con el ambiente.
2. Evaluar el potencial de producción de semilla de *M. leucaenoides* por medio de la comparación de 2 sitios con orientaciones diferentes (Norte y Oeste); y la generación de una ecuación que pueda predecir la producción de semilla (g árbol^{-1}) utilizando como variables independientes el diámetro basal (cm), el diámetro a la altura del pecho (cm), la altura del árbol (m), el volumen (m^3), el ancho de copa (m) y el número de ramas. Utilizando técnicas de medición directa; con el fin de proponer su uso en sistemas ganaderos de la región.
3. Evaluar el efecto del remojo en agua sobre el porcentaje de germinación de *M. leucaenoides*, utilizando como tratamientos el remojo con agua a temperatura

ambiente y a diferentes tiempos de hervir; con el fin de recomendar el mejor tratamiento y proponer la propagación de la especie en los sistemas ganaderos de la región.

Hipótesis

1. El grado de perturbación de los sitios dominados por *M. leucaenoides* afectan la cantidad de carbono fijado (ton ha^{-1}) en los diferentes componentes (arbóreo, hojarasca, troncos caídos, rama verde, 0-20 cm del suelo, y total).
2. 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, es posible predecir la fitomasa aérea (kg árbol^{-1}) con un nivel de confiabilidad aceptable.
3. La orientación Norte y Oeste de los sitios dominados por *M. leucaenoides* afecta la producción de semilla (g árbol^{-1}) de manera significativa.
4. Utilizando como variables independientes el diámetro basal (cm), el diámetro a la altura del pecho (cm), la altura del árbol (m), el volumen (m^3), el ancho de copa (m) y el número de ramas, es posible predecir la producción de semilla (g árbol^{-1}) con un nivel de confiabilidad aceptable.
5. El remojo en agua a temperatura ambiente por 20 h, el remojo en agua hirviendo 3 min más remojo en agua a temperatura ambiente 20 h, el remojo en agua hirviendo por 5 min, el remojo en agua a los 5, 10, 15, 20, 25 y 30 min de hervir por 5 min; afectan de manera significativa el porcentaje de germinación de semilla de *M. leucaenoides*.

3. REVISIÓN DE LITERATURA

3.1.ANTECEDENTES

3.1.1. El Cambio climático

La atmósfera de nuestro planeta se constituye por oxígeno, nitrógeno y argón; y en más bajas concentraciones de dióxido de carbono (CO₂), ozono (O₃), metano (CH₄) y óxido nitroso (N₂O), perfluorocarbonatos (PFCs), hidrofluorocarbonos (HFC) y el hexafluoruro de azufre (SF₆), conocidos como gases de efecto invernadero (GEI) Pineda *et al.* (2005), Rüginitzet *al.* (2009); los cuales, en concentraciones normales mantienen a la tierra con una temperatura promedio arriba del punto de congelación permitiendo la vida, Ruíz (2002). Sin embargo, las actividades humanas, han provocado un aumento en la concentración de estos gases, especialmente el dióxido de carbono (CO₂), ocasionando el calentamiento global (IPCC, 2000), el cual es el aumento en el tiempo de la temperatura media de la atmósfera terrestre y de los océanos, ya que parte de la radianza saliente de onda larga emitida por la tierra al espacio (radiación infrarroja), es re-emitada a la superficie de la tierra, aumentando la temperatura y provocando un cambio en el clima a nivel global, Garduño (2004), Andrade y Ibrahim (2003). Lo anterior, es uno de los problemas ambientales más importantes que enfrenta la humanidad en el siglo XXI, pues amenaza de manera preocupante el medio ambiente, la salud humana, la seguridad alimentaria, la economía mundial y los recursos naturales, además, la vida media de una molécula de CO₂ en la atmósfera es de aproximadamente 250 años (Andrade y Ibrahim 2003, Pineda *et al.* 2005).

Andrade y Ibrahim (2003) y Concha *et al.* (2007) mencionan que el CO₂ incrementó su concentración de 280 ppm en 1750 a 375 ppm en el 2000, y continúa aumentando a una tasa promedio superior a 1.5 ppm por año, aunque Sandoval *et al.* (2003), mencionan una tasa de alrededor de 0,8 mg kg⁻¹ por año. Ibrahim *et al.* (2007) mencionan que estos incrementos son principalmente por dos actividades humanas: el cambio de uso de la tierra y la combustión de fósiles. Se estima que el cambio de uso de la tierra emite $1,6 \pm 1,0$ Gt (1 Gt = 1×10^9 t) de carbono al año y que la combustión de fósiles emite $5,5 \pm 0,5$ Gt de carbono al año. El uso de combustibles fósiles por parte de la industria y el transporte genera en la actualidad del 80 al 85% del CO₂ emitido, alcanzando 6.5 Pg año⁻¹, FAO (2002).

La FAO (2002) estima que las emisiones correspondientes al cambio de uso de la tierra - deforestación para ganadería y agricultura- fueron cerca de 140 Pg entre 1850 y 1990 (de 0,4 en 1850 a 1,7 Pg año⁻¹ en 1990), con una liberación neta hacia la atmósfera de 25 Pg de carbono. De acuerdo con IPCC (2000), en el último medio siglo, la pérdida de carbono en los suelos agrícolas fue de 50 Pg, lo cual representa un tercio de la pérdida total del suelo y la vegetación. Ibrahim *et al.* (2007) mencionan que el incremento de las áreas de pasturas hace que sea urgente tomar medidas a escalas tanto locales como regionales para buscar estrategias de mitigación de los niveles de CO₂ en la atmósfera por parte de los sistemas ganaderos.

La FAO (2002) menciona que en los suelos, la erosión hídrica y eólica componen, cuantitativamente, los procesos de degradación más importantes. La erosión (hídrica, eólica, química y física) fue de 277×10^6 ha en el continente Americano para 1991, siendo las principales causas la deforestación, el sobrepastoreo y el mal manejo de los suelos.

1Pg = 10^{15} g = Gt = 10^9 toneladas métricas

Pineda *et al.* (2005) mencionan que a nivel global las cantidades CO₂ emitido, es de 7.1 Gtonaño⁻¹ versus los sumideros (atmósfera, océanos, bosques), que es de 5.7 Gtonaño⁻¹; por lo que déficit resultante es de 1.4 Gtonaño⁻¹ que sería el desequilibrio existente. La deforestación de muchas áreas tropicales emite 1,5 Pgaño⁻¹, mientras que la acumulación en los ecosistemas terrestres es de 1,8 a 2 Pgaño⁻¹.

3.1.2. Ciclo del Carbono

Sandoval *et al.* (2003) menciona que existen cuatro reservorios de carbono: el océano, la atmósfera, el sistema terrestre y el geológico, con 38,000, 750, 2,850-3,050, y 65.5X10⁶Pg respectivamente. En el sistema terrestre, la vegetación contiene 550 y el suelo de 2,300 a 2,500 Pg, de los cuales 1,550 están en forma orgánica y de 750 a 950 Pg en forma inorgánica; 4,000 Pg del reservorio geológico es combustible fósil. Rügnetz *et al.* (2009) mencionan que cualquier actividad que modifique la cantidad de biomasa en la vegetación y en el suelo, altera la cantidad de carbono almacenado y emitido hacia la atmósfera, lo que influencia directamente en el ciclo del carbono.

La FAO (2002) menciona que el carbono permanece en los diferentes reservorios desde 1 a más de 1000 años, dependiendo de la composición química –por ejemplo, la lignina es más estable que la celulosa-. La fracción estable se debe a protección física o química: la primera significa un encapsulado de la materia orgánica por las partículas de arcilla o los agregados del suelo, Balesdent *et al.* (2000); la protección química se refiere a uniones de la materia orgánica con otros constituyentes del suelo -coloides o arcillas-. Sin embargo, el término *captura de carbono* toma en cuenta estas distinciones y equivale al término *almacenamiento* de cualquier forma de carbono.

El carbono orgánico del suelo proporciona los nutrientes para el desarrollo de las plantas (Ortíz y Riascos, 2006; Concha *et al.*, 2007.; Rügnetz *et al.*, 2009). El intercambio de

carbono entre el reservorio terrestre y el atmosférico es el resultado de procesos naturales de la fotosíntesis y respiración, y de la emisión de gases causada por la acción humana. Rügñitzet *al.* (2009) proponen que el carbono presente en el suelo está ampliamente relacionado al proceso de descomposición de la biomasa por las actividades bacterianas, parte de este regresa a la atmósfera a través del proceso de mineralización del carbono orgánico. De forma natural, otra parte del carbono orgánico es llevado por los ríos hasta llegar a los océanos, donde se deposita en forma de carbonatos (CO_3). El cambio de carbono entre el reservorio oceánico y el atmosférico ocurre por medio de procesos químicos que establecen un equilibrio entre las capas superficiales de los océanos y las concentraciones en el aire sobre la superficie. La cantidad de CO_2 que el océano absorbe depende de la temperatura del mismo y de la concentración ya presente, de tal manera que temperaturas más altas del agua pueden causar la emisión de CO_2 .

Ortíz y Riascos (2006); Rügñitzet *al.* (2009) manifiestan que la captura de carbono por medio de la fotosíntesis ocurre cuando las plantas absorben energía solar y CO_2 de la atmósfera, produciendo oxígeno e hidratos de carbono que sirven de base para su crecimiento. Rügñitzet *al.* (2009) mencionan que el proceso inverso ocurre con la emisión de carbono por medio de la respiración de las plantas, animales y por la descomposición orgánica (forma de respiración de las bacterias y hongos), sumado a la deforestación, incendios, gases industriales y quema de combustibles: acciones antropogénicas que contribuyen con el desequilibrio del ciclo de carbono.

3.1.3. Protocolo de Kioto

El Protocolo de Kioto (PK) fue suscrito en 1992 ante la *Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático* (UNFCCC por sus siglas en inglés) y

aprobado en 1997 durante la III *Conferencia de las Partes* (COP-3). Entró en vigor en 2005 después de la ratificación de Rusia en septiembre de 2004, con un total de 127 países que suman el 61.6% de la emisión global (Ortíz y Riascos, 2006). El PK es el instrumento legal a través del cual los países industrializados (considerados partes constituyentes del Anexo I, responsables de más del 36% de las emisiones totales de CO₂ se comprometen a reducir sus emisiones de GEI en al menos un 5.2% con respecto al nivel de emisiones de 1990 y a evaluar resultados durante el período 2008-2012, despertándose un gran interés sobre el potencial de los sistemas agroforestales (SAF) en la fijación y almacenamiento de Carbono (Ortíz y Riascos,2006;Rügnitzet *al.*,2009).

Tres mecanismos auxilian a los países del Anexo I a cumplir sus metas de reducción previstas en el Protocolo: Implementación Conjunta (IC), Comercio de Emisiones (CE) y Mecanismo de Desarrollo Limpio (MDL). Tal mecanismo permite que países parte del Anexo I puedan financiar o desarrollar proyectos de reducción de GEI (eficiencia energética o secuestro de carbono) fuera de su territorio. Las reducciones de emisiones resultantes de la actividad del proyecto son contabilizadas en la forma de Certificados de Reducción de Emisiones (CREs) y negociadas en mercados internacionales. Para esto, las reducciones de emisiones deben ser adicionales a las que ocurrirían en la ausencia de la actividad certificada del proyecto, y traer beneficios reales, medibles y de largo plazo, relacionados con la mitigación del cambio del clima. Además de reducir las emisiones de GEI, el MDL pretende promover la sostenibilidad en general, principalmente en los países en desarrollo (Rügnitzet *al.*,2009).

La adopción del Protocolo de Kioto está obligando a la comunidad científica a trabajar en la estimación de las cantidades de CO₂ que los sistemas forestales son capaces de

incorporar y de emitir a la atmósfera, mediante estudios en los que se valoran las posibilidades de aumentar y mantener la fijación de C de los ecosistemas forestales (Pérez *et al.*,2007).

3.1.4. Servicios ambientales

Los bonos de carbono son un instrumento de gestión ambiental y surgen a partir de proyectos relacionados con el Mecanismo de Desarrollo Limpio con un doble propósito. Por un lado, permitir a los países industrializados cumplir con sus obligaciones de mitigación de GEI, y por otro lado, implementar proyectos en los países en vías de desarrollo que favorezcan su desarrollo sustentable, como vía para la certificación de la reducción de emisiones de los países industrializados (Pineda *et al.*,2005)

3.2.Los bosques como sumideros de carbono

La FAO (2002)menciona que los ecosistemas forestales cubren el 29 % de las tierras. Almacenan una importante cantidad de carbono (283 Gt, Pérez *et al.*, 2007), tanto a nivel de la vegetación como a nivel de los suelos, jugando así un papel importante en el intercambio de CO₂ entre la biósfera y la atmósfera (Pineda *et al.*, 2005). Jaramillo (2004), Rosa *et al.* (2004); FAO (2002) proponen que contienen más carbono por unidad de superficie que cualquier otro tipo de uso de la tierra; FAO (2002)menciona que puede llegar de 8 o 9 kgC^{-m²} en los bosques de zona templada y a 5 o 6 9 kg C ^{-m²}en los bosques tropicales. El carbono almacenado en los suelos forestales representa el 36 % del total del carbono del suelo a 1 m de profundidad (1 500 Pg).

Pineda *et al.* (2005) mencionan que el avance de la frontera agrícola y ganadera, incendios, deforestación y degradación de los bosques, entre otros, Magaña (2004); rompen con el equilibrio del carbono en los ecosistemas naturales, dando lugar a una

considerable emisión de CO² a la atmósfera (FAO, 2002), la cual es de 1.1 Gt Caño⁻¹, (FAO,2006).

Las forrajeras arbustivas poseen un potencial para fijar CO₂. Esto se debe principalmente a los tallos leñosos donde se acumulan carbohidratos de reserva; el CO₂ atmosférico es incorporado a los procesos metabólicos de las arbustivas (Andrade y Ibrahim, 2003).

3.3.Selva baja caducifolia

Los bosques tropicales desempeñan un papel vital en el ciclo global del carbono; al cubrir un área extensa (2,000 millones de hectáreas, la mayor parte de las cuales se encuentran en países en desarrollo, (Lapeyreet *et al.*, 2004; Concha *et al.*, 2007; FAO, 2002). Sin embargo, su progresiva destrucción y degradación amenazan el éxito de los esfuerzos para lograr un desarrollo sostenible y combatir de manera eficaz la pobreza (Concha *et al.*, 2007).

Ibrahim *et al.* (2007)mencionan que el contenido de carbono en la biomasa de bosques reportados en este estudio (entre 23,0 y 158,7 t C ha⁻¹) se asemejan a los reportes existentes para biomasa de bosques tropicales (Orrego y Del Valle, 2003). En bosques húmedos en Centroamérica, se han reportado valores de carbono de entre 111,4 a 137,8 t C ha⁻¹ en Costa Rica (Segura, 1999); 145,6 y 183,2 t C ha⁻¹ en Nicaragua (Lagos y Venegas, 2003) y 104,80 t C ha⁻¹ en Guatemala (Arreaga, 2002). En el trópico seco, el carbono orgánico del suelo a 0.3 m y 1.0 m de profundidad es de 30 y 58 Pg con una densidad media de 4.55 y 8.65 kgm² respectivamente (FAO, 2002).

3.4.Vegetación secundaria

Los bosques remanentes, áreas de vegetación secundaria en regeneración, pasturas arboladas y otros usos de la tierra dedicados a labores agrícolas pueden fungir como sumideros de carbono atmosférico (Ruíz, 2002; Ibrahim *et al.*, 2007).

En bosques secundarios jóvenes en Nicaragua, se han determinado valores de 17,6 t C ha⁻¹ (Ruíz, 2002). Ibrahim *et al.* (2007) mencionan que bosques secundarios de Costa Rica almacenan 297.83 ton C ha⁻¹; en Nicaragua 182.17 tonha⁻¹. En pastura degradadas 26.48 y 72.5 ton C ha⁻¹ respectivamente, y en vegetación secundaria joven 115.52 tonha⁻¹ en Nicaragua. Ibrahim *et al.* (2007) mencionan que el Carbono en suelo de Bosque secundario en Colombia, Costa Rica y Nicaragua fue de 52.34, 116.07 y 139.17 tonha⁻¹ respectivamente. El Carbono la biomasa aérea de Bosque secundario en Costa Rica y Nicaragua fue de 90.78 y 23.01 tonha⁻¹ respectivamente; en pastura natural con alta densidad de árboles fue de 7.09 en Costa Rica.

Ruíz (2002) en Nicaragua, se encontró en vegetación secundaria de 89, 29, 50 y 168 tonha⁻¹ para 0 a 0.2, 0.2 a 0.4, 0.4 a 0.8 m y total respectivamente. También encontró en vegetación secundaria 15.6, 17.55, 168 y 201.1 ton C ha⁻¹ para carbono en pasto y mantillo, árboles en el suelo y total respectivamente en Nicaragua. Ruíz (2002) además, encontró 40.7, 45.6 y 86.3 tonha⁻¹ para biomasa en árboles, hojarasca y aérea respectivamente. Lapeyre *et al.* (2004) en Perú encontraron en bosque primario, bosque secundario de 50 años, bosque secundario de 20 años, sistemas agroforestales y sistemas agrícolas de 485, 234, 62, 19-47 y 5 ton Cha⁻¹, mientras que Ruíz (2002) encontró carbono total de 201.1 ton Cha⁻¹ para vegetación secundaria. Ibrahim *et al.* (2007) encontraron entre 25 y 190 t ha⁻¹, para bosques primarios y secundarios respectivamente, y entre 60 y 115 t ha⁻¹ de carbono en suelo para los mismos sistemas.

3.5. Sistemas agroforestales

Andrade y Ibrahim (2003) mencionan que los sistemas agroforestales remueven cantidades significativas de carbono de la atmósfera, ya que las especies arbóreas pueden retener carbono por un tiempo prolongado, principalmente en su madera, el

almacén de carbono varía de 20 a 204 tha^{-1} , la mayoría almacenado en los suelos, (Ibrahim *et al.*, 2007), con un incremento anual de 1.8 a 5.2 tha^{-1} (Ibrahim *et al.*, 2005). Algunos autores consideran que estos sistemas podrían acumular entre 1,1 y 2,2 Pg en los próximos 50 años en todo el mundo (Albrecht y Kandji, 2003).

Pineda *et al.* (2005); Ortiz-Ceballos (2004) encontraron en sistemas agroforestales de café en Veracruz en café asociado al bosque mesófilo de montaña 73.3 tonha^{-1} , café asociado a huizaches, 38.5 tonha^{-1} . Avila *et al.* (2001) en Costa Rica, se encontraron valores que van desde 84 tonha^{-1} en pastos sin árboles hasta 195 tonha^{-1} en sistemas agroforestales de café asociado con pastos o con eucalipto. Con densidades de árboles que van desde 156 hasta 370 ha se encontraron tasas de fijación desde 0.4 hasta 2.2 $\text{ton Cha}^{-1}\text{año}^{-1}$ en sistemas agroforestales de café, eucalipto, *Erithrinapoepigiana*, *Acacia mangium*. Por su parte Armas *et al.* (2007) encontraron 36.36, 33.28 y 31.6 ton ha^{-1} de biomasa para *Pouroumacecropiifolia*, *Caryodendroorinocense* y *Theobroma bicolor* respectivamente.

3.6. Sistemas silvopastoriles

Avila *et al.* (2001) mencionan que existe gran potencial para recuperar áreas degradadas por sobrepastoreo, mediante sistemas silvopastoriles. El pago de servicios ambientales por fijación y almacenamiento de C representa una alternativa para dar valor agregado a la producción, que podría tener un gran potencial e importancia para los productores. (Ibrahim *et al.*, 2007) por otro lado, mencionan que las pasturas degradadas no están aportando significativamente al secuestro de carbono e incluso podrían estar emitiendo carbono a la atmósfera, mientras que las pasturas mejoradas con árboles son usos de la tierra con mayor potencial para el secuestro de carbono que las pasturas degradadas.

Miranda *et al.* (2007) muestran los resultados comparativos de un pastizal natural con un sistema silvopastoril con 11 años de explotación encontrando que el sistema silvopastoril secuestró 126 t de carbono, a diferencia del sistema de pasto natural que solo alcanzó 32 tha^{-1} . Por su parte, Giraldo *et al.* (2006) mencionan que la cantidad de carbono existente en los árboles, las pasturas y el suelo ascendió a 65,80 y 70,59 t de Cha^{-1} para la alta (169 árboles de *Acacia mangiumha*⁻¹) y baja densidad (100 árboles de *Acacia mangiumha*⁻¹), respectivamente en un sistema silvopastoril.

La FAO (2002) menciona que las tierras de pastoreo ocupan 3 200 millones de hectáreas y almacenan entre 200 y 420 Pg en el ecosistema total, una gran parte del mismo debajo de la superficie y, por lo tanto, en un estado relativamente estable. El carbono del suelo en las tierras de pastoreo es estimado en 70 t ha^{-1} , cifra similar a las cantidades almacenadas en los suelos forestales.

Miranda *et al.* (2007) encontraron, en tres sistemas estudiados (un potrero sin árboles y dos sistemas silvopastoriles) en Colombia, valores entre 15 y 25 t de Cha^{-1} en la profundidad de 5-15 cm, y de 13,2 t como promedio en los primeros 10 cm. Giraldo *et al.* (2006). Ruíz (2002) menciona pasto natural sin árboles y pasto natural con árboles valores de 150 y 155 tonha^{-1} respectivamente; pasto mejorado sin árboles y pasto mejorado con árboles es de 155 y 168 tonha^{-1} respectivamente a 0.8 m de profundidad. Encontró también, en pasto natural sin árboles y pasto natural con árboles 84 y 73 tonha^{-1} respectivamente; para pasto mejorado sin árboles y pasto mejorado con árboles de 83 y 83 tonha^{-1} respectivamente a 0.2 m de profundidad. Para pasto natural sin árboles y pasto natural con árboles 34 y 34 tonha^{-1} respectivamente; pasto mejorado sin árboles y pasto mejorado con árboles es de 34 y 35 tonha^{-1} respectivamente a 0.2 a 0.4 m de profundidad. Para pasto natural sin árboles y pasto natural con árboles es de 31 y 48

tonha⁻¹ respectivamente; pasto mejorado sin árboles y pasto mejorado con árboles es de 39 y 35 tonha⁻¹ respectivamente a 0.4 a 0.8 m de profundidad.

Carbono almacenado en pasto y mantillo: Pasto natural monocultivo, pasto natural con árboles, pasto mejorado monocultivo, pasto mejorado con árboles 1.37, 0.96, 1.6 y 2.5 tonha⁻¹ respectivamente; 0, 8.18, 0, 12.54 respectivamente para carbono almacenado en árboles, 150, 155.2, 157.7 y 155.1 para carbono en suelo, y de 151.4, 164.4, 159.4 y 170.2 como carbono total (Ruíz, 2002).

3.7. Componentes de almacenamiento de carbono en los sistemas forestales

Los sistemas forestales y agroforestales acumulan carbono en cuatro componentes: biomasa sobre el suelo, hojarasca, sistemas radiculares y carbono orgánico del suelo. En general, todos los componentes grandes y que cambian sustancialmente durante la vida del proyecto deberían ser medidos; sin embargo, es necesario enfatizar en aquellos que almacenan el carbono con mayor permanencia, como la biomasa leñosa (Andrade y Ibrahim, 2003; Andrade *et al.*, 2008).

3.8. Monitoreo de carbono

Andrade y Ibrahim (2003) mencionan que el monitoreo de carbono permite la comparación entre sitios, sistemas y períodos. Esta relación considera los ingresos generados por los créditos de carbono y los costos del monitoreo. Existen tres niveles: (1) básico: de menor costo y exactitud (30% de error), donde las mediciones se hacen solo al inicio y al final del proyecto; (2) moderado: provee una exactitud mayor (20% de error) y es monitoreado cada dos o tres años y al final, y (3) alto: produce estimados más precisos (10-15% de error), y se mide anualmente (MacDiken, 1997). El diseño del monitoreo también depende de las tasas de fijación de carbono. En sistemas con tasas

bajas es aconsejable reducir la frecuencia de monitoreo, ya que el error podría ser igual o mayor a dichas tasas, reduciendo la confiabilidad de los estimados.

Andrade y Ibrahim (2003) mencionan que en el monitoreo del secuestro de carbono en ecosistemas forestales, las parcelas permanentes de muestro (PPM) son una herramienta estadística importante para evaluar los cambios temporales, principalmente porque proveen datos más reales y fácilmente verificables del crecimiento de la vegetación, MacDicken (1997). Los cambios temporales de almacenamiento de carbono en las PPM pueden ser considerados como flujos de carbono.

Andrade y Ibrahim (2003) proponen que la periodicidad de la medición de las PPM dependerá del componente de carbono por evaluar, ya que los componentes del sistema tienen diferentes tasas de cambio (flujo). Se recomienda hacer monitoreos anuales en componentes con tasa alta, tales como la biomasa aérea. En suelos, el monitoreo puede hacerse menos frecuentemente, ya que es muy costoso y en áreas no perturbadas la cantidad de carbono no cambia dramáticamente con el tiempo, por otro lado, el efecto de la estacionalidad puede controlarse realizando todos los inventarios en la misma época, preferiblemente en el mismo mes, MacDiken (1997).

3.9. Metodología para determinar carbono almacenado

Ortíz y Riascos (2006) definen Carbono almacenado como la cantidad de carbono que se encuentra en un ecosistema vegetal, en un determinado momento. Se expresa en ton Cha^{-1} . Es sinónimo de stock de carbono (Ruíz, 2002) o inventario de carbono (Andrade y Ibrahim, 2003). Andrade y Ibrahim (2003) mencionan que los inventarios de carbono son una fotografía del estado actual de cada componente de carbono (biomasa, hojarasca, suelos, raíces) en términos de cantidad. Ortíz y Riascos (2006); Ruíz (2002)

definen Carbono fijado como el flujo de carbono dentro de una unidad de área cubierta con vegetación en un lapso de tiempo dado. Se expresa en $\text{ton C ha}^{-1}\text{año}^{-1}$.

Andrade y Ibrahim (2003) definen lo que se determina como inventario de carbono, almacenamiento de carbono o stock de carbono, evaluando cada componente de los sistemas: biomasa herbácea, biomasa leñosa, suelo y hojarasca. Ortiz y Riascos (2006), Avila *et al.* (2001) mencionan que entre los métodos empleados para determinar la cantidad de CO_2 presente en la biomasa total, se encuentra el *método del factor de conversión*, que consiste en multiplicar los datos de biomasa en los diferentes componentes por un factor de conversión o *fracción de Carbono* que involucra la relación entre el peso de la molécula de CO_2 y el peso del átomo de Carbono (C). Este factor generalmente, asume un valor de 0.5g de C con respecto a un gramo de biomasa por lo que primero se determina la biomasa de cada componente y luego se multiplica por este factor (Rügnitz *et al.*, 2009).

Ruíz (2002) menciona que en sistemas silvopastoriles se ha utilizado un diseño factorial completamente al azar, el factor A fue la pendiente, con dos niveles (menor a 20 % y mayor a 20 %), el factor B fueron los sistemas (pasto nativo sin árboles, pasto mejorado con árboles, pasto mejorado con árboles y vegetación secundaria).

3.10. Parcelas de muestreo

3.10.1. Forma de las parcelas

La forma de las parcelas de muestreo depende de la distribución espacial de los árboles. En plantaciones lineales, se debería usar parcelas con la misma forma; mientras que si los árboles se distribuyen al azar (dispersos), la forma más aconsejable es la circular o bien, realizar un censo, ya que cuando hay pocos árboles esta acción puede reducir el

error de muestreo. En sistemas con árboles de distribución sistemática, se recomiendan las parcelas rectangulares. Con esta selección de formas se asegura que la densidad arbórea de la parcela sea igual a la densidad encontrada en el sistema por evaluar (Andrade y Ibrahim,2003)

3.10.2.Tamaño de las parcelas

La densidad arbórea determina el tamaño de las parcelas, 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 y Ibrahim, 2003). En una vegetación leñosa muy esparcida con menos de 100 árboles ha^{-1} se recomiendan parcelas de 1000 m^2 ; con una densidad de 100 a 140 árboles ha^{-1} , 670 m^2 ; 140 a 250 árboles ha^{-1} , 500 m^2 ; 250 a 670 árboles ha^{-1} (vegetación leñosa moderadamente densa), 250 m^2 ; mayor de 700 árboles ha^{-1} (vegetación muy densa), 100 m^2 (Adaptado de McDicken, 1997). Ruíz (2002) en vegetación secundaria recomienda parcelas de 400 m^2 .

3.10.3.Número de parcelas

Jara *et al.* (2001) recomiendan de 25 a 70 ha, 1 parcela; de 71 a 200 ha, 2 parcelas; de 201 a 500 ha, 3 parcelas; de 501 a 1500, 4 parcelas; más de 1500 ha, 5 parcelas; además mencionan que se puede levantar la siguiente información: Especies dominantes, No. De especies por parcela, No. Individuos por ha, altura total, diámetro medio a 1.3 m, diámetro de copa, área basal, volumen total, número de ramas y diámetro basal.

3.11. Carbono sobre el suelo

3.11.1. Carbono aéreo

Ortíz y Riascos (2006); Segura y Kanninen (2002) proponen que para estimar la biomasa sobre el suelo o aérea se pueden emplear dos métodos: 1) *los directos* o destructivos, y

2) *los indirectos*. Los métodos destructivos incluyen mediciones en campo, cosecha y toma de muestras de la totalidad de la vegetación. Aunque este método es más costoso y requiere de mayor tiempo, arroja resultados de alta confiabilidad, en comparación con el segundo método. Entre los métodos indirectos se encuentra el uso de modelos alométricos, los cuales se recomienda que hayan sido construidos bajo condiciones similares a las del lugar donde se quieran aplicar, principalmente en términos de tamaño de árboles y densidad arbórea (Andrade e Ibrahim, 2003), también se pueden usar factores de expansión (Colegio de Postgraduados, 2008).

Ecuaciones alométricas (métodos indirectos)

López et al. (2002); Ortíz y Riascos (2006) mencionan que los modelos biométricos o alométricos son modelos matemáticos que relacionan la biomasa del árbol con sus dimensiones en pie; obtenidos al correlacionar las mediciones destructivas de peso seco de los árboles como variables dependientes con las mediciones de parámetros biométricos como variables independientes (diámetro, altura, área basal, volumen). Una vez desarrolladas tales regresiones estas permiten estimar la biomasa total aérea en forma rápida y no destructiva midiendo solamente los parámetros biométricos establecidos como variables independientes. El procedimiento más recomendado en bosques tropicales, consiste en relacionar estas variables en una regresión lineal bajo las escalas logarítmicas, lo cual simplifica los cálculos e incrementa la validación estadística al homogeneizar la varianza sobre el rango de los datos (Ortíz y Riascos, 2006).

Existen algunos modelos que estiman la biomasa y carbono a partir del DAP, altura y biomasa del fuste. Para seleccionar el mejor modelo se toman en cuenta los siguientes criterios: Coeficiente de determinación (R^2), Coeficiente de determinación ajustado (R^2 -ajustado), Coeficiente de Variación (CV%), Prueba de F (análisis de varianza) y una

prueba de sesgo a partir de los residuales la cual entre más cercana a cero es menos el sesgo (Ruíz, 2002). Moret y Ruíz (1998) citados por Ortiz y Riascos (2006) recomiendan el coeficiente de determinación (R^2), error estándar de estimación o raíz del cuadrado medio del error y la suma de cuadrados del error, así como la lógica biológica del modelo. Además, se puede realizar una prueba de comparación de medias (prueba de T) entre los valores predichos y los reales (Segura, 1999). Ruíz (2002) encontró en otro estudio, que los modelos que mejor ajustaron la biomasa total de los árboles fueron los de transformaciones logarítmicas y cuadráticas en función del DAP, los que consideran además la altura presentaron mayor sesgo.

Colegio de Postgraduados (2008) propone que el procedimiento para la generación de las ecuaciones alométricas es el siguiente: **Paso 1:** Selección de entre 5 a 12 árboles por especie dominante, de diversas tallas de DAP (>2.5 cm), **Paso 2:** Medición de las variables independientes: DAP, H y cobertura de copa, en arbustos se puede utilizar el diámetro a la altura del pecho, altura, diámetro de copa, diámetro basal, número de ramas, entre otros. Derribo del árbol. El tronco, la copa y las ramas se trozan en secciones, midiendo el diámetro de cada punta (Ruíz, 2002), y las ramas de diámetros menores a 5 cm se cortan en trozos pequeños (Ruíz, 2002) y se pesan en fresco en el campo, **Paso 3.** Se toma una muestra de las secciones, se determina el porcentaje de humedad y su correspondiente peso seco (en horno a 75-80°C x 48 h), **Paso 4:** Se calcula la biomasa total del árbol mediante la suma del peso seco de todas las secciones, **Paso 5:** se relaciona el peso seco total del árbol con su DAP, altura y cobertura de copa y se ajusta un modelo de crecimiento alométrico.

Colegio de Postgraduados (2008) menciona que las ecuaciones alométricas proporcionan valores de biomasa o de carbono capturado por especies o grupos de especies y a veces varían de acuerdo a cada sitio o región, los datos básicos que se requieren son las variables independientes como puede ser DAP, altura y la densidad de la madera.

El Colegio de Postgraduados (2008) recomienda elaborar ecuaciones alométricas analizando por el método destructivo 50 árboles o 10 árboles por tipo de vegetación, Ruíz (2002) utilizó 3 árboles en *Cassiagrandis*, 9 en *Platymisciumpleiostachyu*, 6 en *Pithecellobium sama*, 17 en *Guazumaulmifolia*, 3 en *Eterolobiumcyclocarpu*, 10 en *Cordiaalliodora* y 3 en *Tabebuia rosea*.

Factores de expansión de la biomasa a partir de volumen

Miranda (2007) menciona que el factor de expansión es la Relación entre biomasa total y biomasa de fuste. Se obtiene dividiendo la biomasa total de cada árbol entre la biomasa del fuste, luego la biomasa aérea se obtiene: $BA = V * D * F_{exp}$; donde BA es biomasa aérea ($t\ ms\ ha^{-1}$), V es el volumen comercial de todos los árboles ($m^3 ha^{-1}$), D es la densidad de la madera ($t\ msm^3$), F_{exp} es el factor de expansión (sin dimensión).

Muestreos:

Arbustos con Dap menor a 2.5 cm y herbáceas

En Arbustos con Dap menor a 2.5 cm y herbáceas, se colectan en 2-6 subparcelas por sitio (e.g. 2 cuadros $1\ m^2$; 4 círculos de $0.25\ m^2$), se pesan en fresco, se secan en horno ($80^{\circ}C$ hasta peso constante) y se calcula el contenido de humedad, por último se calcula la Biomasa aérea (g): peso total húmedo - (peso total húmedo (g) * contenido de humedad (%)) (Colegio de Postgraduados, 2008).

Herbáceas

La influencia de la vegetación herbácea en el almacenamiento y fijación de Carbono es muy baja, por lo que puede omitirse dentro de un estudio de Carbono. Se pueden medir en parcelas de 0.25 m² ubicadas en los cuadrantes II, III y IV de la parcela grande (1000m²) (Ruíz,2002).

Leñosas

Leñosas con DAP menor a 2 cm y la hojarasca se midieron con un marco de 1 m² en cada cuadrante. Leñosas con DAP entre 2 y 5 cm se midieron en una parcela de 25 m², ubicada en el primer cuadrante partiendo del norte girando en el sentido de las manecillas del reloj, midiendo el DAP y altura de los árboles. Los árboles con DAP entre 5 y 15 cm se midieron en el primer cuadrante de 250 m², los árboles con DAP mayor a 15 se midieron en toda la parcela (1000 m²) (Ruíz, 2002).

La biomasa arriba del suelo de fustales (dap \geq 10 cm) se puede estimar en parcelas circulares de 1000 m², o rectangulares de 500 m². Los latizales (dap < 10 cm y altura total >1,5 m) se pueden medir en parcelas circulares de 50,3 m². En árboles de cacao se utilizaron mediante parcelas circulares de 154 m² (Andrade *et al.*, 2002).

Para los árboles afectados por una plaga que no están muertos se recomienda también asignarles un coeficiente que aminore la biomasa (Avila *et al.*, 2001).

Para la cuantificación del carbono contenido en dos sistemas agroforestales, cuyas edades oscilaron entre 5 años, 12 años y 20 años, considerándose al cacao (*Theobroma cacao L.*) como cultivo principal, se establecieron aleatoriamente cinco cuadrantes de 100 m² en cada sistema, en diferentes direcciones, se tomaron los diámetros y alturas de todos los árboles en pie (vivos o muertos) y árboles caídos muertos (Concha *et al.*, (2007). La vegetación herbácea y hojarasca se determinaron en cuadrante de 1 m². No se

tomaron las palmeras y plátanos por el aporte insignificante de biomasa (Arévalo *et al.*, 2003).

Vegetación natural: árboles de 0.3 a 1.3 m de altura: subparcela de muestreo de 5 m por lado, árboles con altura mayor a 1.3 m y DAP menor a 10 cm: subparcela de muestreo de 10 m por lado, árboles con DAP mayor a 10 cm: subparcela de muestreo de 10*50 m (Jara *et al.*, 2001).

3.11.2. Hojarasca

Se refiere a hojarasca, ramas, corteza y leños que se encuentran en proceso de descomposición. Colegio de Postgraduados (2008) menciona que la cantidad de árboles es directamente proporcional a la cantidad de hojarasca. Las muestras se toman en una superficie de 5m² ubicada en el primer cuadrante de la parcela de inventario de carbono, se colecta toda la materia muerta encontrada en el suelo (hojarasca acumulada, ramas, etc.), se pesa y luego se toman tres muestras de 100 gramos cada una para los análisis de materia seca (Armas *et al.*, 2007).

3.11.3. Madera muerta

La madera muerta considera dos aspectos, los árboles muertos en pie que usan ecuaciones alométricas o por relaciones con la biomasa arriba del suelo (aproximadamente un 70% de la biomasa del árbol cuando está vivo queda en el árbol como biomasa muerta). En tanto que para los árboles o ramas caídas, se puede usar el conocido como método de intersección de línea (Colegio de Postgraduados, 2008), el cual se puede explicar en 4 pasos: Paso 1. Medición de trozas de madera (mayor 5 cm D) sobre transectos (ej. Líneas perpendiculares de 50 m), Paso 2. Clasificación de las trozas por nivel de descomposición, Paso 3. Uso de la ecuación $V: \pi^2((D1^2 + D2^2 + \dots + DN^2)/8L)$; Donde V: Volumen (m³ha⁻¹), D: Diámetro de las trozas (cm),

L:Longitud de la línea (m), Paso 4. Cálculo de la Biomasa ($t\ ha^{-1}$): Biomasa: Volúmen * densidad (Avila *et al.*, 2001).

Gravedad específica. Es el peso de un bloque de madera secado al horno dividido por el peso de una cantidad igual de volumen de agua y es expresado en decimales. Las muestras de madera se llevan a dimensiones de 5*5*15 cm y se utiliza el método de Buoyancy o inmersión en agua destilada (Ruíz, 2002). La gravedad específica en cada especie es diferente, por ejemplo, *Cassia grandis* 0.67, *Platymiscium pleiostachyum*: 0.59, *Tabebuia rosea*:0.51, *Guazuma ulmifolia*:0.66, *Cordia alliodora*: 0.47, *Pithecellobium saman*: 0.48 (Ruíz, 2002).

3.12. Carbono bajo el suelo

3.12.1. Carbono en raíces

Ortíz y Riascos (2006) mencionan que dentro de los estudios de biomasa, la medición de raíces representa un trabajo más amplio y tedioso con niveles bajos de precisión. Por esta razón, se pueden utilizar tres opciones para su estimación: (Andrade *et al.* (2008), uso de ecuaciones alométricas como Biomasa de raíces ($kg\ árbol^{-1}$) = $e^{(-1.06 + 0.88*\ln(B))}$, donde B es biomasa arriba del suelo, recomendada por el IPCC (2003) para bosque húmedo tropical; $\exp(-1.0587 + 0.8836 \ln(B_{ss}))$). También se puede determinar como una fracción de la biomasa sobre el suelo (11 a 54 % con un promedio del 18% (5), o de 10 a 40% ,MacDicken (1997). O como un cociente de biomasa raíz:biomasa aérea, Mokany *et al.* (2006) reportado por IPCC (2006): Trópico seco (Biomasa menor a 20 ton $msha^{-1}$) = 0.56 (0.28-0.68), Trópico seco (Biomasa mayor a 20 ton $msha^{-1}$) = 0.28 (0.27-0.28), Subtropical húmedo (menor a 125 ton $msha^{-1}$) = 0.20 (0.09-0.25), Subtropical húmedo (menor a 125 ton $msha^{-1}$) = 0.24 (0.22-0.33). Jara *et al.* (2001) mencionan que

esta relación también puede ser por especie: *Pinus radiata* de 0.16, *Eucaliptus sp.* De 0.15 y *Cupressus macrocarpa* de 0.16. Las raíces < 2mm suelen excluirse por no diferenciarse de hojas o de MO del suelo (IPCC, 2003).

3.12.2. Carbono en suelo

La FAO (2002) menciona que la materia orgánica que está sobre la superficie del suelo no es tomada en consideración en la evaluación de las existencias de carbono del suelo. Ruíz (2002) por su parte, menciona que las muestras de suelo se toman en el centro de la parcela grande (1000 m²) en orificios de 50*50 cm de ancho y 1 m de profundidad. Miranda *et al.* (2007) proponen seleccionar dos diagonales del área y en cada una tomar una muestra homogénea en cinco puntos, a una profundidad de 0-20 cm. Jara (2001) realizó el muestreo tomando 5 muestras: 3 de 0 a 10 cm, una de 10 a 25 cm y una de 25 a 50 cm, luego se toman muestras de 500 g para el laboratorio.

Amézquita *et al.* (2004) propone establecer en cada uso de la tierra nueve puntos de muestreo en un recorrido lineal de longitud variable y en dirección de la pendiente. Los nueve puntos de muestreo consisten en tres calicatas principales (1 x 1 x 1 m), distribuidas según la longitud del terreno y seis minicalicatas (0,4 x 0,4 x 0,4 m), ubicadas dos a cada lado de las principales. Dejando una distancia de entre 30 y 50 m entre las calicatas principales y de entre 15 y 30 m entre minicalicatas. Cada uno de los puntos de muestreo se ubica a una distancia no menor de 15 m del borde del uso de la tierra evaluado, para evitar posibles influencias por la proximidad de otros sistemas de uso de la tierra.

El Carbono almacenado en el suelo (CAS, t C ha⁻¹) se estima partiendo del área en términos de hectáreas A (ha)), porcentaje de C orgánico en el suelo (%CS), la densidad aparente (DA) y la profundidad de muestreo (P) del mismo: CAS= %CS x DA x P x

100(Avila *et al.*, 2001; Armas *et al.*, 2007; Miranda *et al.*, 2007). El % de carbono orgánico puede determinarse utilizando la metodología de Walkley-Black (1934). El principio de este método es la oxidación del carbono orgánico por medio del ácido crómico caliente. El ácido crómico no utilizado en la oxidación del carbono orgánico se determina mediante titulación con sulfato ferroso de amonio (Avila *et al.* 2001; Ruíz, 2002). Al final porcentaje de carbono orgánico = materia orgánica (%) dividida entre 1.724 (Miranda *et al.*, 2007). El factor 1.724 resulta de dividir $1/0.58$ partiendo del hecho que la materia orgánica contiene 58% de carbono orgánico.

La Densidad Aparente (g cm^3) se puede determinar mediante el método del “cilindro de volumen conocido” descrito por MacDicken (1997), mediante la fórmula $DA = \text{peso seco de muestra de suelo (g)} / \text{volumen del cilindro (cm}^3\text{)}$. Para estimar el resultado de carbono en ton por la DA se transforma a ton m^3 y la profundidad de muestreo en m (Armas, 2007)

3.13. Producción de semillas en arbustivas forrajeras

Las leguminosas forrajeras arbustivas tienen gran potencial para mejorar los sistemas de producción de rumiantes, particularmente en zonas del trópico con más de 4 meses de sequía (Pizarro, 2005). La capacidad para producción de semilla de las leguminosas forrajeras de interés en México ha sido poco estudiada. En el caso de *M. leucaenoides* no se encuentran reportes de estudios relacionados con su potencial para producción de semilla.

3.13.1. Indicadores de calidad de las semillas

Borrajó (2006) menciona que el aspecto de calidad de la semilla lo conforma la pureza, germinación, viabilidad, humedad y peso de 1000 semillas. La Pureza se refiere al porcentaje en peso, de la semilla de la especie deseada respecto al total de la muestra. La

muestra se subdivide en semilla pura (semilla de la especie deseada), semillas extrañas y material inerte (paja, glumas, tierra, restos vegetales, animales piedras, etc).

Porcentaje de germinación, es el porcentaje de semillas que germinó y desarrolla una plántula normal cuando se coloca en condiciones ambientales óptimas para su crecimiento.

Energía germinativa o Vigor representa la velocidad de germinación y la rapidez de la semilla para desarrollar una plántula normal.

Viabilidad. Expresa en porcentaje la cantidad de semillas que está viva respecto al total de semillas de la muestra. Este concepto se utiliza para algunas semillas que presentan períodos de dormancia o latencia, o sea que a pesar de estar vivas, poseen un período de letargo que les impide germinar hasta que condiciones medioambientales (horas de frío, luz, oscuridad, ...) determinen la finalización de ese estado. La Viabilidad por tetrazolio consiste en poner las semillas en determinadas condiciones con ese compuesto químico, que colorea de rosado los tejidos que respiran.

Humedad. Es la cantidad de agua que posee la muestra de semilla, expresada como porcentaje en peso. Es importante tener en cuenta la humedad de la semilla especialmente cuando deseamos almacenarla, debido a que valores altos de humedad facilitan el “ardido” de la misma. En general, la semilla recién cosechada tiene un gran porcentaje de humedad que deberá ser removido por medio de secado natural (al aire y removiendo periódicamente) o en estufa (con aire caliente). La humedad de la semilla que permite su almacenaje ronda entre los 11 y 14%.

Peso de 1000 semillas. Es el peso que poseen 1000 semillas, expresado en gramos. El peso de mil semillas varía según la especie e incluso el cultivar. Nos sirve para estimar el número de semillas por kg y la densidad de siembra. Se recomienda tomar ocho muestras de 100 semillas cada una para confirmar su validez (González, 1990). En soja se tienen de 130 –

180 g por 1000 semillas, en arroz de 20 a 25, en sorgo de 20 a 35, en trigo de 25 a 60, maíz de 250 a 400 (Borrajo, 2006).

3.13.2. Recolección de semillas en arbustivas forrajeras

González (1990) recomienda de manera general que semillas se pueden recoger directamente del suelo, donde caen al madurar. Sin embargo, cuando la semilla es dispersada por el viento, necesariamente debe recolectarse del árbol. Como mínimo se recomienda recolectar la semilla de 3 árboles, pero preferiblemente de 10. Semillas de árboles que pueden ser dispersadas por el viento: *Cedrela odorata* (32000 semillaskg⁻¹), *Jacaranda copaia* (100000 semillaskg⁻¹). Semillas pequeñas que deben recolectarse con manta son por ejemplo de *Pithecellobium macrodenium* (9500 semillaskg⁻¹), *Hyeronima achordeides* (26400 semillashg⁻¹). Existe otro grupo de árboles cuya semilla se puede recolectar directamente del suelo: *Brosimum lactescens* (2000 semillaskg⁻¹), *Dendronapax arboreus* (10000 semillaskg⁻¹), *Simarouba amara* (2600 semillaskg⁻¹).

3.13.3. Metodología para la estimar producción de semilla en árboles y arbustos

Murúa y González (1985) recomiendan instalar cajas de madera con piso de malla (25 cm x 50 cm x 15 cm) de 0,125 m² de superficie, ubicadas a una distancia de 5 m entre ellas en grupos de 25 cajas en tres sectores del área de estudio. Para la obtención del peso de las semillas se llevan a estufa por 24 horas a 105°C y para la obtención del peso cenizas, se colocan en una mufla a 450°C por 4 horas.

En su estudio, Murúa y González (1985) encontraron una alternación de años de alta producción de semillas (1981-1983) con años de baja producción (1980-1982). Influye decisivamente en este hecho, la producción de *Gevuina avellana* y *Aextoxicon punctatum* que son las especies de mayor producción, con ritmos de dos años.

Nothofagusobliqua, *Podocarpussalignus*, *Laureliaphilippiana* presentan picos de abundancia cada tres años. Las otras especies (*Drimyswinteri*, *Myrceugnellaapiculata*, *Eucryphiacordifoliay Lomatiadentata*) muestran una baja producción, sin la presencia de ciclos multianuales definidos. Se observaron fluctuaciones estacionales en la mayoría de las especies estudiadas con una concentración de la producción en verano y otoño.

3.13.4. Rendimientos de semilla en leguminosas arbustivas

En *Cratiliaargentea* para plantas de 3 años de edad cortadas a 30 cm de altura y fertilizadas con fósforo rinden de 50 a 70 kg de semilla pura por planta (entre 600 y 800 kg ha^{-1} para una población de 10000 plantas), en condiciones diferentes (2500 mmpp y 1050 msnm) se encontraron 200 gplanta $^{-1}$; aunque también se reportan de 25 hasta 650 kg de semilla ha^{-1} Argel *et al.*, 2002; Pizarro, 2005). Rodríguez (2009) reporta rendimientos estimados alrededor de 500 kilogramos ha^{-1} , para densidades de siembra de 10000 plantash a^{-1} . En *Leucaenaleucocephala* se reportan rendimientos desde 160 hasta 1390 kg de semilla ha^{-1} dependiendo de la variedad (Torres *et al.*, 2002). En la misma especie reporta rendimientos de 456.9 gplanta $^{-1}$ en la época seca y de 637.6 gplanta $^{-1}$ en la época de lluvias para distancia de siembra de 2 m y de 195.7 a 265.5 g planta $^{-1}$ para la época seca y de lluvias respectivamente en distancia de siembra de 1 m. (Torres *et al.*, 2002).

3.13.5. Semillas por kilogramo en arbustivas forrajeras

García (2003) reporta para *Pithecellobiumsamanque* el número de semillas por kilogramo es de 4,440 a 6,500, en *Guazumaulmifoliade* 190,000- 260,000 presentando un porcentaje de germinación de 70-80%, en *Eyihtrinapoepigianahay* entre 2,000 y 2,500 semillas por kilogramo, en *Leucaenaleucocephala* de 17,000 a 18,500 y con un porcentaje de germinación de 70 a 90%, en *Gliricidiasepiumel* número de semillas por kilogramo es de 8,400-9,900 con porcentaje de germinación, entre 90-100%, sin necesidad de tratamiento

pregerminativo; en *Moringa oleifera* el número de semillas por kilogramo varía de 4,000 a 4,800 con un tiempo de germinación en semillero oscila entre cinco y siete días después de sembrada, la semilla no requiere tratamientos pregerminativos y presenta porcentajes altos de germinación, mayores a 90%, aun cuando se hayan empleado semillas de hasta dos años de edad. En *Brosimum malicastrum* la germinación se da a 10 y 15 días de sembrada, la viabilidad es del 85%, con 1,320 semillas por kilogramo.

3.13.6. Variación anual en la producción de semillas

Rosas *et al.* (2004) mencionan que diversas poblaciones vegetales muestran una marcada variación interanual en la producción de semillas, fenómeno reproductivo conocido en inglés como “mastseeding” (Kelly *et al.* 2001). Esta situación tiene relación con la coacción de variables fisiológicas y morfológicas dentro de la planta, debido a que el proceso de almacenaje de nutrientes se produce durante algunos años previos al florecimiento y semillación, principalmente por causa de variaciones climáticas (humedad y temperatura), adaptaciones frente a predadores y optimización de la eficiencia en la polinización (Kelly *et al.* 2001,). La hipótesis de depredación postula que una alta variación interanual permite la supervivencia de muchas semillas en los años de alta producción, debido a la saciedad de las poblaciones de predadores. Estas, limitadas por la poca disponibilidad de alimento en los años de baja producción, serían incapaces de aumentar su población para aprovechar el incremento repentino en la producción de semilla (Kelly *et al.* 2001; Hoshizaki y Hulme 2002; Schnurr *et al.* 2002). La hipótesis de eficiencia en la polinización establece que las variaciones en la producción de semillas serían consecuencia de una sincronización en el florecimiento de las especies a través de los años. Esto condicionaría que la variación interanual en la

producción de semillas se desarrolle debido al aumento en el éxito en la fertilización que ocurre en los años cuando una mayor cantidad de polen está disponible.

Murúa y González (1985) encontraron que los años de alta precipitación presentan una elevada producción tanto en otoño como en verano; en cambio en los años de baja precipitación predomina la abundancia en una u otra estación. La alternación observada obedece al hecho de que las semillas más abundantes presentan un ritmo bianual. En cambio otros árboles presentan ritmos en que el máximo ocurre al cabo de tres años.

Finalmente otras especies arbóreas mantienen una baja producción de semillas (2-4 kg al año) a lo largo de los años estudiados, sin observar la presencia de ritmos

Murúa y González (1985) mencionan que La producción anual de semillas sigue un claro patrón estacional caracterizado por un máximo de producción en las estaciones de verano y otoño. Se pueden observar algunas diferencias entre las especies en cuanto a la variación estacional en años distintos. Es así como las especies más importantes *A. punctatum* y *G. avellana* presentan sus máximos cada dos años, pero en 1981 los picos de abundancia están desfasados observándose en verano para *A. punctatum* y en otoño para *G. avellana*. En el año 1983, ambas especies presentan su máxima abundancia en la estación de otoño. Cuando se analiza estacionalmente la producción de semillas no aparece claro el ciclo bianual, debido a que durante 1980, año de baja producción de semillas, la totalidad producida se concentra en el otoño para ambas especies.

Dentro del grupo de especies que muestran picos de abundancia cada tres años, *N. obliqua* presenta un ritmo estacional, con máximos en verano, con excepción de 1980. Además su producción declina anualmente a partir de 1980 recuperando su abundancia en 1983. En cambio *L. philippianay* *L. sempervirens* tienen sus máximos siempre en otoño, tanto en años de alta o baja producción de semillas, con la excepción de

L.sempervirens en 1982 en que el máximo ocurre en verano. En *P. salignusse* presentan los máximos desfasados, en 1980 en otoño y en 1983 en verano. Aparte del tercer grupo de semillas estudiadas, que se presentan con baja producción; además escasamente representadas se encontraron semillas de las especies *Amomyrtus luma* que presentó producción solamente en el verano de 1981 ($1,397 \text{ kg ha}^{-1}$) y en 1982 ($4,266 \text{ kg ha}^{-1}$) y *Persea lingue* que sólo apareció en las muestras durante 1981 en otoño ($2,285 \text{ kg ha}^{-1}$) e invierno ($0,761 \text{ kg ha}^{-1}$) no encontrándose en los otros años estudiados.

Murúa y González (1985) mencionan que las condiciones climáticas de primavera y verano estarían dando cuenta de las fluctuaciones en la producción de semillas en las especies arbóreas que presentan ritmos multianuales.

3.14. GERMINACIÓN

3.14.1. Letargo en semillas

Un gran número de semillas de especies forestales no germinan debido a que la testa dura que las cubre impide la entrada de agua, oxígeno y luz para que el embrión entre en crecimiento (latencia física, dormición física o letargo) de tal manera que algunas semillas no germinan si no tienen un tratamiento de escarificación (Razz y Clavero, 2003; Orozco *et al.*, 2006). La mayoría de las semillas de las leguminosas arbóreas que constituyen una fuente de producción forrajera en las zonas secas del país, se caracterizan por poseer dormancia física o fisiológica, presentando bajos porcentajes de germinación (D'Aubeterreet *al.*, 2002; Razz y Clavero, 2003)

3.14.2. Tiempo de germinación

Funes *et al.* (2009) proponen que el criterio para considerar a una semilla como germinada es la emergencia en 2 mm de la radícula, D'Aubeterreet *al.* (2002) considera que esto ocurre con la presencia de las dos hojas cotiledonares, Rodríguez (2008) por su

parte, la consideró con la aparición de la radícula. Esto puede suceder a diferentes tiempos de iniciadas las condiciones de germinación dependiendo de la especie, por ejemplo Razz y Clavero (2003) encontraron que la germinación se inició cinco días después de la siembra en *Pithecellobium dulce*. Por otro lado la temperatura influye también sobre los días de inicio de la germinación, por ejemplo Rodríguez (2008) encontró que la germinación de las semillas de *C. spinosa* se inicia a los quince días en la temperatura de 10°C y a partir del cuarto día en las temperaturas de 20°C y 30°C.

3.14.3. Efecto de la luz

Las semillas que requieren de luz para germinar se llaman fotoblásticas positivas, por lo tanto, controladas por el fitocromo; por el contrario, las que requieren de oscuridad se dice que son fotoblásticas negativas (Vadillo et al., 2004; Funes et al., 2009). Ejemplos de las primeras son: *G. quehlianum*, *S. pampeanus* y *E. horridum*; de las cuales *G. quehlianum* fue la única que muestra una dependencia total de la luz para germinar. Vadillo et al. (2004) encontraron que *P. raimondii* tiene el mismo comportamiento.

Funes et al. (2009) estudió 25 especies de angiospermas que abarcan un espectro amplio de formas de vida; se encontró que en general las semillas de las diferentes especies fueron indiferentes a la luz. Vadillo et al. (2004) por su parte, en *Puya raimondii* obtuvo diferencias altamente significativas ($P \leq 0.05$) al comparar los tratamientos de luz y oscuridad, donde los tratamientos de oscuridad presentan los menores valores de porcentaje de germinación ($\%G < 6\%$) y de índice de velocidad de germinación ($IVG < 0,02$) tanto en condiciones naturales y condiciones controladas. En comparación, los dos tratamientos de luz los superan ($\%G > 24\%$ y $IVG > 1,3$).

3.14.4. Efecto de la temperatura

Rodríguez (2008) considera que los factores más importantes que influyen en la germinación son el agua, oxígeno, luz y temperatura, siendo ésta última el factor ambiental de mayor importancia que regula la germinación. Por ejemplo, Vadillo *et al.* (2004) en *Puya raimondii* encontró que con temperaturas superiores a 21°C disminuyen el porcentaje de germinación e IVG.

Rodríguez (2008) menciona que condiciones naturales, los requerimientos de temperatura determinan la época del año en que se efectúa la germinación y es factor principal en la distribución de las especies. Por ellos las plantas silvestres germinan en las épocas más favorables para su establecimiento y posterior desarrollo, ello es consecuencia de un complejo fenómeno de evolución. Muchas especies de árboles tienen diferentes rangos de temperatura bajo las cuales sus semillas pueden germinar siempre que no estén en estado de latencia. La germinación es muy lenta con temperaturas bajo 10°C, el óptimo fluctúa entre 15°C y 30°C. A temperaturas mayores de 35°C y 38°C, la germinación se hace muy rápida pero gran cantidad de semillas mueren debido a la destrucción de enzimas y tejidos. Por ejemplo, Rodríguez (2008) encontró que las temperaturas de 10°C y 20°C influyen aumentando positivamente los porcentajes de germinación de las semillas de *C. spinosa* de diferentes procedencias: 1) 92%, 88%), 2) 91%, 94% y 3) 87%, 99%, respectivamente; y la temperatura de 30°C influye disminuyendo la germinación: 1) 46%, 2) 63%, 3) 67% y 4) 87%.

Funes *et al.* (2009) estudiaron 25 especies encontrando que la temperatura fue el principal factor regulador del proceso de germinación. Los patrones observados apoyan la idea de que la germinación se asocia con las temperaturas del momento del año en el que se concentran las precipitaciones. Este patrón ha sido interpretado como un

comportamiento de valor adaptativo por parte de las especies al clima regional, de modo que la germinación se produzca en el momento del año en el cual las probabilidades de supervivencia de las plántulas son mayores.

Rodríguez (2008) al comparar el efecto de la temperatura en semillas de *Caesalpiniaspinosa* sobre los porcentajes promedio de germinación, encontró que las temperaturas de 10°C y 20°C no tienen diferencias significativas, sin embargo la temperatura de 30°C, reporta porcentajes de germinación inferiores que difieren significativamente de los demás.

3.14.5. Estudios realizados

Se han realizado diferentes investigaciones para evaluar el efecto de distintos factores sobre el porcentaje de germinación tratando de romper la latencia de las semillas por lo que se han evaluado una serie de métodos de escarificación bajo distintos diseños experimentales. Por ejemplo, Vadillo *et al.* (2004) estudiaron diferentes tratamientos con luz natural, oscuridad y 9 horas de luz en condiciones naturales y condiciones de germinación respectivamente. González y Mendoza (2008) emplearon un diseño de completamente al azar y cuatro repeticiones para estudiar los tratamientos de semilla tratada con agua a 80°C por dos minutos aplicada antes de iniciar la prueba de germinación. En la mayoría de los estudios se utiliza un diseño factorial completamente al azar bajo distintas modalidades, por ejemplo Toral y González (1998) en un diseño totalmente aleatorizado con arreglo factorial y diez réplicas estudiaron el efecto del agua caliente sobre la germinación de las semillas de 10 especies arbóreas. Rodríguez (2008) utilizaron en *Caesalpiniaspinosa* el diseño experimental de estímulo creciente contra tres repeticiones sometido a 10°C, 20°C, y 30°C. Los datos obtenidos se analizaron estadísticamente, mediante Análisis de Varianza y la prueba de Tukey. Razz y Clavero (2003) en

Pithecellobium dulce evaluaron 5 métodos de escarificación (control, lija N° 80 durante 5 min, y agua caliente a 60°C imbibidas durante 5, 10 y 15 min) y 6 tiempos de almacenamiento (0, 1, 2, 3, 4 y 5 meses), utilizándose un diseño experimental totalmente al azar con arreglo factorial 5 x 6 y 3 repeticiones.

El número de semillas por repetición utilizado en los distintos estudios es variable, pero en la mayoría no pasa de 50, por ejemplo: Razz y Clavero (2003) 40 semillas por repetición en *Pithecellobium*, López *et al.* (2002) 25 semillas en *Ziziphus mistol*. Navarro y Deméneghi (2007) 20 semillas, Rodríguez (2008) 50 semillas, Orozco *et al.* (2010) *Hymenaeacourbaril* 10 semillas.

La duración de la prueba de germinación por lo general es de menos de 1 mes, por ejemplo: Razz y Clavero (2003) evaluaron semillas hasta por 21 días. Funes *et al.* (2009) 15 días. D'Aubeterre *et al.* (2002) realizaron tres conteos a los 7, 14 y 21 días respectivamente

3.14.6. Proceso de germinación

Godínez y Flores (1999) almacenaron temporalmente en recipientes de plástico a temperatura ambiente hasta el inicio de los experimentos (máximo dos meses). Funes *et al.* (2009) recolectaron y almacenaron en bolsas de papel a temperatura ambiente, y mantenidas en oscuridad por 8-20 días hasta el comienzo de los experimentos.

Uno de los problemas que se pueden tener durante la prueba de germinación es el ataque de hongos, para evitar esto, Godínez y Flores (1999) proponen colocar previamente las semillas en hipoclorito de sodio al 5% durante 5 minutos. Navarro y Deméneghi (2007) en *Mammillaria pectinifera* propone lavar las semillas con cloro al 70% por 3 min y enjuagarlas con agua destilada durante 1 min, Vadillo *et al.* (2004) en *Puya raimondii* se desinfectó con hipoclorito de sodio al 2,6% por 30 minutos y se enjuagó 6 veces con

agua destilada estéril. Orozco *et al.* (2010) en semillas de algarrobo (*Hymenaeacourbaril L.*) las lavó con agua destilada. Navarro y Deméneghi (2007) sumergieron las semillas en fungicida (1 g de Captan en 20 ml de agua destilada) por 1 min.

Para iniciar la prueba de germinación también se usan distintas modalidades, por ejemplo Razz y Clavero (2003) usaron bandejas germinativas de plástico de 200 celdas de 2,4 x 2,54 x 6,35 cm cada una, llenadas con un sustrato preparado a partir de una turba inerte y fibra de coco cernida a razón de 1:2 p/p, el cual le proporciona una adecuada retención de humedad. Funes *et al.* (2009) colocaron las semillas en cápsulas de petri de 9 cm de diámetro sobre papel filtro, regadas con agua destilada y luego colocadas en cámaras de germinación bajo condiciones controladas de temperatura y luz. Por su parte, Navarro y Deméneghi (2007), utilizaron charolas de plástico esterilizadas de 28 x 17 cm donde se colocaron las semillas, a las charolas se les colocó un plástico transparente para permitir la creación de un microambiente húmedo. D'Aubeter *et al.* (2002) por su parte realizaron la siembra en bandejas, las cuales se prepararon con arena cernida y se le agregó agua caliente a 85°C.

3.14.7. Análisis estadísticos de los resultados de las pruebas de germinación.

Con los datos obtenidos se calcula el porcentaje de germinación (%G) y el Índice de velocidad de germinación (IVG), donde: $IVG = \sum(n_i/t_i)$; n_i = Número de semillas germinadas en el i-ésimo día; t_i = Tiempo en días, para la germinación en el i-ésimo día (Vadillo *et al.*, 2004).

Los datos de porcentaje de germinación fueron transformados a $\sqrt{\text{arco-seno}}$ con el fin de corregir la falta de homogeneidad de varianza, y hacer una aproximación a una curva normal (Vadillo *et al.*, 2004; González y Mendoza, 2008; Funes *et al.*, 2009)

Cuando el diseño estadístico utilizado es por ejemplo, completamente al azar, arreglo, factorial o parcelas divididas, se realiza el análisis de varianza normal, realizando pruebas de comparación de medias, generalmente con niveles de significancia de 5%. Araoz y Del Longo (2006) realizaron análisis de la varianza y una estimación de diferencia entre medias mediante la prueba de Fisher a un nivel de 5% de significancia. Godínez y Flores (1999) recomiendan cuando en los datos se utiliza la proporción de semillas germinadas realizar un análisis de desviación para determinar si existen diferencias significativas entre los tratamientos para cada una de las especies. Este análisis se realiza utilizando una función de ligamiento logit que considera una distribución del error tipo binomial. Este análisis es análogo al análisis de varianza pero adecuado para datos acotados entre 0 y 1 (e.g., proporción de semillas germinadas).

3.14.8. **Métodos de escarificación.**

Existen numerosos métodos de escarificación aplicados a las semillas de leguminosas con la finalidad de romper la latencia e incrementar la germinación; entre ellos se mencionan los métodos físicos, químicos y mecánicos, cuyos resultados dependerán de la especie (Orozco *et al.*, 2010)

Uno de los más recomendados es la escarificación química con ácido sulfúrico, sin embargo por su alto costo se ha visto restringido, lo que ha motivado a buscar nuevas alternativas más económicas, estando entre ellas el uso de agua caliente y/o la imbibición de las semillas (Alexander y Sánchez, 2002). No todas las especies responden a los tratamientos pregerminativos, por ejemplo Navarro y Deméneghi (2007) en *Mammillariapectinifera* encontraron que el mayor porcentaje de germinación (95%) se registró en las semillas que no fueron sometidas a escarificación. Orozco *et al.* (2010) encontraron que la escarificación química registró los mayores porcentajes de

germinación (90%) en las semillas de *H. courbaril*, mientras que el método menos eficaz fue el mecánico.

3.14.9. Almacenamiento

El almacenamiento puede resultar una práctica eficiente para romper la latencia y el tiempo que dure la semilla en almacenamiento sin deteriorar la habilidad germinativa, depende en parte del manejo y del ambiente que se les provea (Razz y Clavero, 2003).

González y Mendoza (2008) en semillas de *Leucaena leucocephala* cv. Perú almacenadas al frío y al ambiente, durante siete años se encontraron la presencia de dormancia moderada, con un porcentaje de germinación de 67,3% en la semilla recién cosechada.

En condiciones controladas y al ambiente la germinación presentó diferencias altamente significativas para los meses de almacenamiento ($P < 0,001$) y los valores superiores sin aplicar tratamiento pregerminativo se lograron a los 12, 42 y 48 meses (77,6; 71,8 y 75,7%) y a los 18 meses (81,8%), respectivamente, concluyendo que las semillas de *L. leucocephala* cv. Perú recién cosechadas presentan alrededor de 30% de dormancia

Razz y Clavero (2003) en *Pithecellobium dulce* obtuvieron los mayores valores de germinación a los 2 meses de almacenamiento, registrándose una reducción significativa de la germinación a partir del tercer mes de almacenamiento.

González y Mendoza (2008) en *L. leucocephala* cv. Perú observaron un incremento de la germinación cuando no se aplicó tratamiento, sobre todo en el almacenamiento al ambiente, motivado por el aumento de la permeabilidad de las cubiertas seminales, que estuvo favorecido por las condiciones ambientales (mayor temperatura y humedad). Los resultados en *Teramnus labialis* durante 36 meses, así como los trabajos realizados con otras leguminosas tropicales, como *Stylosanthes guianensis*, demostraron un incremento de la permeabilidad de las cubiertas seminales durante el almacenamiento (Pérez *et al.*, 2006). Por el

contrario, González y Mendoza (2008) en *Leucaena* evidenciaron el deterioro de las semillas durante el almacenamiento, debido a los bajos valores de germinación a los 85 meses.

González y Mendoza (2008) en semillas recién cosechadas de *L. leucocephala* cv. Perú, mostraron alrededor de 30% de latencia, motivado por su cubierta dura, y aún a los 85 meses presentaban entre 14 y 25% de dureza en condiciones ambientales y controladas, respectivamente.

3.14.10. Escarificación húmeda

Se ha observado una disminución en la germinación de semillas cuando se someten a hidratación por tiempos prolongados. Una posible causa de la muerte de las semillas es debido a que la imbibición impide la aireación y la semilla muere por asfixia o bien por la exosmosis (difusión u osmosis del interior hacia afuera a través de las paredes) de enzimas y nutrientes (Orozco *et al.*, 2010).

Los remojos permiten acelerar los procesos de hidrólisis (descomposición de los procesos químicos por acción del agua) de las reservas del embrión y por lo tanto se acelera la germinación de la semilla., lo cual se confirma bajo el tratamiento de imbibición por 24 horas (Orozco *et al.*, 2010). Por otra parte, Alexander y Sánchez (2002) encontraron que el proceso de imbibición mejora el porcentaje de germinación en aquellas semillas sometidas a escarificación con agua a altas temperaturas. El periodo de germinación se ve afectada cuando las semillas son tratadas con agua caliente e imbibidas a su vez, mostrando ser una relación indirectamente proporcional, es decir al emplear temperaturas más altas (80 – 100 °C) y duración de remojo más prolongada (48 horas), los días de germinación se reducen de manera importante. D'Aubeterre *et al.* (2002) en otro estudio encontraron como el mejor tratamiento de escarificación de semillas el agua a temperatura ambiente por 48h.

3.14.11. Efecto del agua caliente en la germinación

Orozco *et al.* (2010) señalan que con temperaturas elevadas se incrementa la tasa metabólica y se destruyen algunas enzimas, lo cual causa el deterioro de la semilla. El mismo autor señala que tiempos de inmersión prolongados en agua caliente ocasionan, por lo general, daños irreversibles en las semillas, con efectos drásticos en la germinación. Sin embargo, tiempos no tan prolongados, y cuando la cubierta de la semilla no es tan dura, sirven para ablandar la testa y permitir la entrada de oxígeno y agua para germinar.

Alexander y Sánchez (2002) en un estudio en *L. leucocephala* emplearon tres temperaturas en el agua caliente (60, 80 y 100°C), sometidas a cuatro tiempos de exposición en la escarificación (15; 30; 45; 60 segundos). Después se les sometió a dos lapsos de imbibición (0, 24 y 48 horas). Se evidencia un aumento significativo en el % de germinación y una disminución del tiempo de germinación con el incremento en la temperatura de escarificación y el tiempo de imbibición de la semilla. Toral y González (1998) en otro estudio concluyen que el tratamiento a las semillas recién cosechadas con agua a 80°C durante 2 minutos resultó efectivo para las especies *Leucaena leucocephala* cv. *Cunningham* (27.3 vs 94.6%) *Bauhinia acuminata* (25.8 vs 79.3%), *Cassia arcoiris* (11.2 vs 59.4%), *Albizia saman* (22.9 vs 65.4%), *Erythrina poeppigiana* (41.1 vs 74.2%) y *Albizia lebeck* (65.5 vs 79.4%). En otras especies, el efecto no es el mismo, por ejemplo Toral y González (1998) observaron que con agua a 80°C en *Bauhinia purpurea* tratada mostró la menor germinación (0 %), lo que demuestra que hubo una afectación completa de sus embriones al emplear el agua a 80°C durante 2 minutos. Orozco *et al.* (2010) encontraron tasas de germinación cercanas a cero con tratamiento con agua a 80°C. Toral y González (1998) con agua a 80°C también hubo una

afectación severa en *Erythrina indica* (47.2 vs 15.4%), *Cassia grandis* (90.8 vs 77.1%) y *Guazima ulmifolia* (34.6 vs 27.3%), las cuales presentaron una disminución en la germinación al sumergirlas en agua a 80°C (-31,8; -13,7 y -7,3 %, respectivamente); ello demuestra que el grado de latencia varió entre las especies, debido a las diferencias en la permeabilidad de las membranas seminales.

Razz y Clavero (2003) en *Pithecellobium dulce* recomiendan escarificarlas con agua caliente durante 5 min para obtener buen porcentaje de germinación. D'Aubeterre et al. (2002) en otro estudio observaron diferencias significativas con los tratamientos aplicados con agua caliente para el *P. juliflora*, mientras que para el *P. tamarugo* los tratamientos más efectivos fueron agua a temperatura ambiente por 24 y 48h.

3.14.12. Escarificación química

La escarificación química, incluye pruebas con ácido sulfúrico, ácido nítrico y ácido fosfórico, NaCl e NaOH, giberelina, entre otros (D'Aubeterre et al., 2002; Orozco et al., 2010). Godínez y Flores (1999) encontraron que la respuesta germinativa de las semillas inmersas en ácido sulfúrico fue variable pero siempre inferior al 30%. Orozco et al. (2010) por su parte encontraron que el ácido sulfúrico es el más eficaz para aumentar el porcentaje de germinación de semillas de algarrobo (*Hymenaea courbaril*). Rodríguez (2008) sometieron al proceso de escarificación con ácido sulfúrico, utilizando por cada procedencia 500 semillas por espacio de 20 minutos, transcurriendo dicho tiempo se lavaron por sucesivas veces hasta eliminar todo el ácido. (Camacho, 1994). D'Aubeterre et al. (2002) reportan como mejor método de escarificación en *Clitoria ternatea* el H₂SO₄ por 5 y 8 min, obteniendo valores de germinación de 59 y 53% respectivamente. D'Aubeterre et al. (2002) por su parte en *Prosopis* utilizaron como tratamientos H₂SO₄, NaCl e NaOH por 5 y 10 min respectivamente; mientras que no observaron diferencias

significativas en *P. juliflora*. Además, para *P. tamarugo* los tratamientos más efectivos fueron NaCl por 5 y 10 min y H₂SO₄ por 10 min., observándose para el *P. laevigata* mayor efectividad con el H₂SO₄ e NaOH por 5 y 10 min respectivamente.

Navarro y Deméneghi (2007) utilizaron como tratamientos: 1) ácido sulfúrico/1 min, 2) agua destilada a 50°C/10 min, 3) Tween al 5% /1 min y 4) giberelina (0.243 gr de “activol” en 250 ml de agua destilada). Los porcentajes de germinación para las semillas de *M. pectinifera* variaron entre los diferentes tratamientos, el mayor porcentaje (95%) se presentó en el Testigo, los tratamientos de giberelina y ácido sulfúrico registraron valores semejantes 85 y 80% respectivamente; mientras que el valor más bajo (50%) se obtuvo para las semillas sumergidas en tween (Navarro y Deméneghi, 2007).

3.14.13. Escarificación física

Los tratamientos físicos que se han evaluado para las semillas con testa gruesa son por ejemplo: 1) frotar las semillas con lija hasta observar un adelgazamiento o fractura de la testa, 2) cortar una pequeña porción de la testa con una navaja, 3) perforar la testa con aguja; este último tratamiento sólo fue aplicado a *Dactyloctenium aegyptium* (Poaceae) (Godínez y Flores, 1999).

En *Ziziphus mistol*, Araoz y Del Hongo (2006) encontraron que la remoción completa del endocarpo y el desgaste manual de la zona basal, son métodos adecuados para romper la dormición, incrementando tanto el porcentaje como la velocidad de germinación. A los 12 días de la siembra en el tratamientos sin remoción de endocarpo se tiene 0% de germinación y de 77% en el tratamiento con remoción completa del endocarpo.

La escarificación mecánica con lija se ha empleado con éxito en semillas de *Prosopis cineraria*, *Leucaena leucocephala* y *Acacia nilotica* (Yepes y Arboledas, 2009; Orozco et

al., 2010); las semillas con testa dañada (para este caso deterioradas por lijado) son más susceptibles a la fuga de cantidades sustanciales de solutos (azúcares y ácidos orgánicos). La fuga se suspende después de un corto periodo, en pocos minutos o una cuantas horas como máximo en semillas vivas y saludables, probablemente debido a la reparación de membranas dañadas.

Godínez y Flores (1999) encontraron que los mejores tratamientos para promover la germinación fueron la escarificación con lija y navaja con los que se obtuvieron porcentajes mayores al 70-80%, aunque las velocidades de germinación fueron similares.

Razz y Clavero (2003) en semillas de *Pithecellobium dulce* encontraron que poseen un alto poder germinativo y no requieren de tratamientos especiales para su germinación. La respuesta obtenida difiere de otras especies tales como *Leucaenaleucocephala* y *Teramnuslabialis*, a cuyas semillas hay que escarificar previo a la siembra.

3.14.14. Tratamientos pregerminativos en otras Leguminosas

En el caso de las leguminosas, los mejores tratamientos fueron la escarificación mecánica y química. Estos resultados sugieren que las semillas de todas las especies de esta familia presentan latencia impuesta debida a la presencia de testas duras que impiden la entrada de agua y el intercambio de gases (Godínez y Flores, 1999). Otros trabajos realizados con diferentes especies de leguminosas han encontrado resultados similares a los obtenidos. Así, para diferentes especies de *Acacia* se ha encontrado que la escarificación con ácido y lija permite incrementar la proporción de semillas germinadas. De la misma manera, la escarificación mecánica incrementa la germinación de *Bahuiaracemosa* obteniendo porcentajes mayores al 98%. La escarificación con ácido sulfúrico por 20 minutos interrumpe la latencia y favorece la germinación de las semillas de *Sesbaniaaemerus*. En el caso de las especies del género *Senna*, los

tratamientos aplicados no incrementaron sustancialmente la germinación obteniendo siempre porcentajes inferiores al 60%. Este resultado es contrario a lo reportado en otros trabajos en donde la escarificación mecánica y con ácido sulfúrico incrementa la germinación (>95%) de diferentes especies de este género (Baskinet *al.*, 1998).

Funes *et al.* (2009) encontraron que la germinación de las semillas de 25 especies de leguminosa fue afectada de manera significativa por la temperatura ($P < 0.0001$) y la luz ($P < 0.05$), sin observar interacción temperatura x luz ($P = 0.86$). Al considerar el total de especies estudiadas, el porcentaje de germinación a 15/5°C fue significativamente menor que a 25/15°C y que a 35/20°C, tanto en luz como en oscuridad permanente.

4. MATERIALES Y MÉTODOS

4.1. Localización y clima

Los estudios se efectuaron en el municipio de Arroyo Seco, en los límites con Jalpan de Serra, Querétaro. A una altitud de 1097 m. El sitio presenta un clima del tipo Aw, libre de heladas. Aunque en promedio cada 10 años se presentan (Zamudio *et al.*, 1992). El clima se define como cálido seco, con lluvias en verano, con una precipitación media anual de 981 mm (Figura 1).

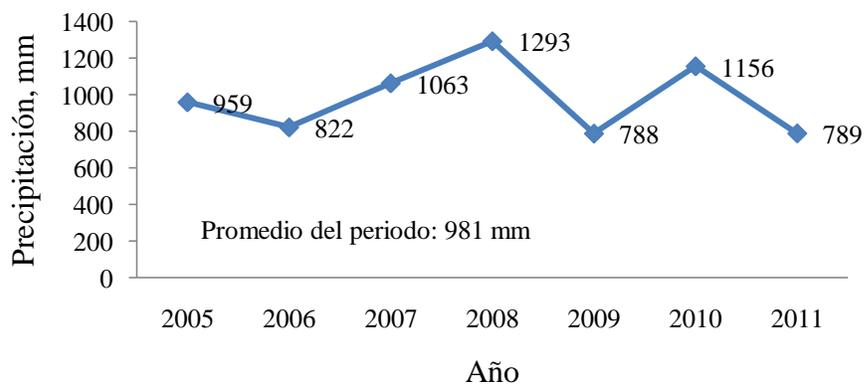


Figura 1 Precipitación anual en mm, periodo 2005-2011

En la Figura 2 se presenta la precipitación promedio mensual, el periodo de lluvias es de junio a octubre, con algunas lluvias en diciembre; el periodo de sequía es de enero a mayo o hasta junio o julio.

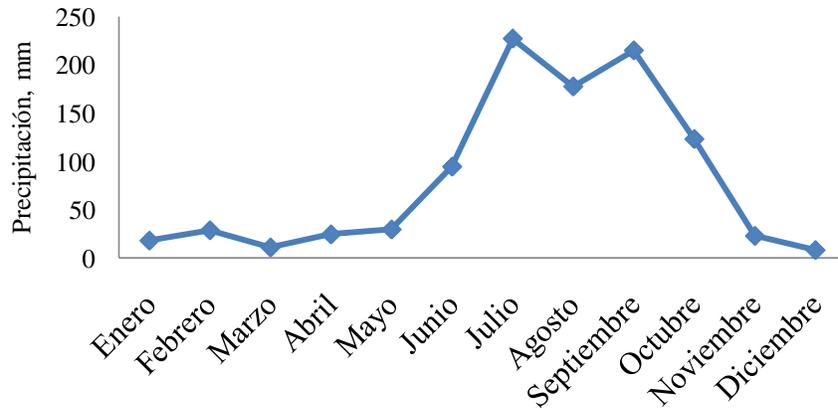


Figura 2. Promedio de precipitación mensual, periodo 2005-2011

En la Figura 3 se muestran el promedio de temperaturas máximas y mínimas anuales para el periodo 2005 al 2011, se puede observar que no hay variación importante a través de los años. Se tiene una temperatura máxima promedio de 31°C y mínima de 16°C.

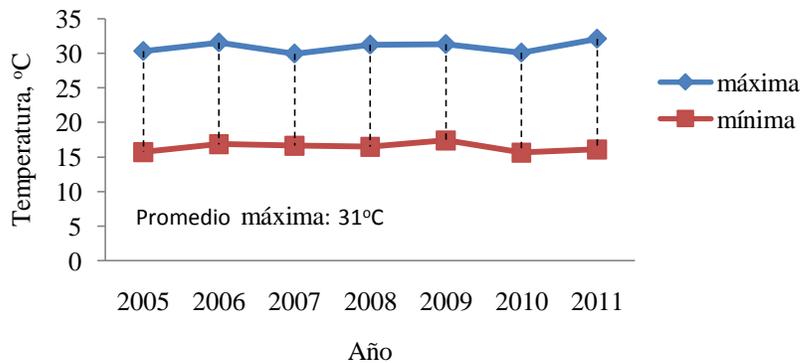


Figura 3. Temperaturas máximas y mínimas, 2005-2011

En la figura 4 se muestra la temperatura máxima y mínima mensual, obtenida con información del periodo 2005-2011, en donde se puede observar que los meses más calientes son abril, mayo y junio.

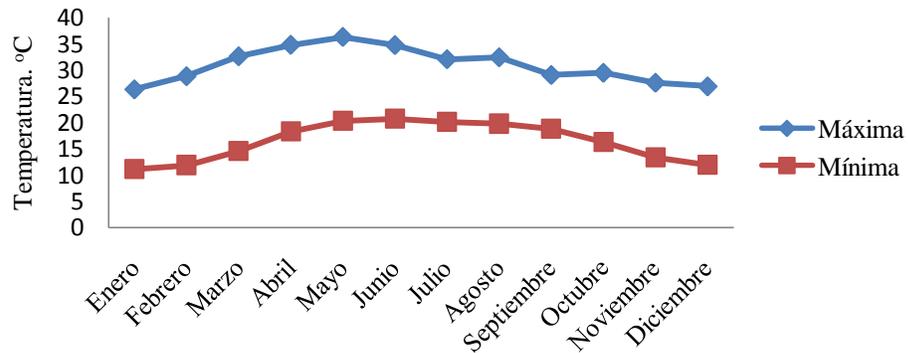


Figura 4. Promedios mensuales de temperaturas máximas y mínimas, 2005-2011

4.2.Suelo.

En general los suelos son someros y pedregosos, derivados de rocas calizas (Zamudio *et al.*, 1992). El sitio perturbado presenta un 33.8% de pedregosidad, en tanto que el sitio no perturbado es de 15.8%.

4.3.Fijación de carbono

La metodología de evaluación que se utilizó fue desarrollada por el ICRAF siguiendo los procedimientos del Manual de determinación de las reservas totales de carbono en los diferentes sistemas de uso de la tierra (Arévalo *et al.*, 2003).

Se establecieron 6 parcelas cuadradas de 20 m por lado; 3 en un sitio no perturbado por actividades humanas y 3 en un sitio que fue incorporado a la agricultura de temporal y que fue dejado de cultivar hace aproximadamente 30 años. La cobertura promedio en el sitio no perturbado fue de 90 % y en el sitio perturbado fue de 85 % en el otro sitio. Las

esquinas de cada parcela se delimitaron con una estaca de madera y se dividió en 4 cuadrantes de 10 m por lado cada uno delimitándose de la misma forma, en el centro se colocó otra estaca. En el primer cuadrante se estableció una subparcela de 5 m por lado para medir la vegetación más pequeña.

Cuadro 1. Ubicación geográfica de las parcelas establecidas en cada sitio (perturbado y no perturbado) dominado por *M. leucaenoides* para la determinación de la fijación de carbono en la Sierra Gorda de Querétaro.

Sitio	Longitud Oeste	Latitud Norte	UTM X	UTM Y	Zona	Hemisferio
No perturbado	-99° -25' -0.3864"	21° 21' 40.88214"	456790	2362198	14	Norte
No perturbado	-99° -25' -27.225"	21° 21' 40.13187"	456017	2362177	14	Norte
No perturbado	-99° -25' -26.705"	21° 21' 40.5235"	456032	2362189	14	Norte
Perturbado	-99° -25' -3.2773"	21° 21' 44.03"	456707	2362295	14	Norte
Perturbado	-99° -25' -3.3037"	21° 21' 41.10257"	456706	2362205	14	Norte
Perturbado	-99° -25' -3.3433"	21° 21' 42.79384"	456705	2362257	14	Norte

En todos los cuadrantes se midieron los árboles con al menos una rama de diámetro a la altura del pecho igual o mayor a 10 cm, anotando el nombre común, la altura del mismo (m), el diámetro a la altura del pecho de cada rama (cm) y diámetro basal de todas las ramas (cm); así como anotar si está seco o en el caso de la *M. leucaenoides* si está plagado. 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 diámetros a la altura del pecho mayor a 0 cm y menor a 5 cm y que además la altura fuera mayor a 1.5 m. Por último, las especies de árboles y arbustos con altura menor a 1.5 se contaron dentro de la subparcela de 5m por lado.

La información de campo de cada parcela se clasificó en 3 categorías (*M. leucaenoides*, monte caliente y *Sabal sp*); dentro de cada categoría se clasificó la información en 4 grupos (diámetro a la altura del pecho ≥ 10 cm, diámetro a la altura del pecho ≥ 5 y 10

cm, diámetro a la altura del pecho ≥ 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), diámetro basal (cm), diámetro a la altura del pecho (cm), número de ramas, y número de árboles.

Para determinar la **fitomasa aérea de *M. leucaenoides*** 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 diámetro basal de cada rama (cm), el diámetro a la altura del pecho (cm), la altura del árbol (m) y el número de ramas. Posteriormente se podó cada árbol a una altura de 2 m, se pesó la madera fresca y la hoja podadas, las partes de las ramas que no se podaron se le determinó a cada una el diámetro promedio y la altura para determinar el volumen (cm³), 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 prediga 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 diámetro basal (cm), el diámetro a la altura del pecho (cm) y el número de ramas. Se seleccionó la ecuación con mayor R² y menor coeficiente de variación (%).

Para determinar la **fitomasa aérea del sabal** se utilizó la ecuación $Y=24.56+4.92h+1.02h^2$ (IPCC, 2003), en donde Y es el contenido de biomasa por planta (kg MS) y h es la altura (m).

Para determinar la **fitomasa aérea en la categoría de monte** caliente se utilizó la ecuación alométrica generada para *M. leucaenoides* aplicando un factor de corrección el cual fue obtenido promediando las densidades de categoría alta en cada especie de monte caliente, este factor fue 0.78960874.

Para determinar la **fitomasa de troncos caídos** se estableció un transecto de 2 m de ancho, formando una diagonal desde la esquina del cuadrante 1 a la esquina del cuadrante 3 y se tomaron 2 o 3 diámetros representativos de cada tronco caído, el largo, y la densidad del mismo, estableciendo las categorías de baja, media y alta densidad.

Para determinar la densidad de cada una de las tres categorías se pesó una muestra y se introdujo en un tubo con agua para determinar el volumen, posteriormente se determinó en laboratorio el contenido de humedad de cada categoría para determinar la densidad (g cm^3).

Para determinar la **fitomasa de la vegetación herbácea y hojarasca** se construyó un marco de madera de 0.5*0.5 m y se lanzó al azar dentro de los cuadrantes 1 al 3 de cada parcela, se pesó la rama verde y la hojarasca encontradas dentro las tres muestras y se levantó una muestra compuesta en bolsas de papel para determinar contenido de humedad en la estufa 60°C hasta alcanzar peso constante. Una vez retirada la rama verde y la hojarasca en cada muestreo, se realizó una excavación circular anotando el diámetro y la profundidad, se separó y pesó la piedra y el suelo; de éste último se tomó una muestra compuesta para determinar contenido de humedad en la estufa 60°C hasta alcanzar peso constante.

Para determinar el **contenido de carbono orgánico en el suelo a 0-20 cm de profundidad**, se utilizó 0.5 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 (Jackson, 1964).

El % C orgánico en la muestra = $(B-T/g) \cdot N \cdot 0.39$, en donde B = Volumen de sulfato ferroso gastado para valorar el testigo (ml), T = Volumen de sulfato ferroso gastado para valorar la muestra (ml), g = peso de la muestra empleada (g).

El % de Materia Orgánica = % C Orgánico * 1.724. El factor 1.724 se conoce como factor de Van Bemmelen, el cual resulta de la suposición que la materia orgánica contiene un 58% de carbono ($1/0.58=1.724$).

Para determinar el porcentaje de pedregosidad se utilizó una cubeta en forma de un trapecioide con dimensiones conocidas, dentro de la cual se colocó agua, determinando el volumen de piedra en cada muestra por diferencia de volumen de agua dentro de la cubeta antes y después de colocar las piedras. El porcentaje de pedregosidad en cada muestra se determinó sacando la proporción del volumen de piedra y el volumen de cada excavación circular realizada.

La masa de suelo se obtiene con el peso de la muestra de suelo seca en horno a $110 \pm 1^\circ\text{C}$ durante 72 horas, luego, con el peso de la muestra en campo y el % de pedregosidad se calcula el peso de suelo seco expresado en ton ha^{-1} a 0-20 cm de profundidad. Por último se multiplica por el % de carbono orgánico para estimar el carbono en ton ha^{-1} .

Para estimar el **carbono de cada componente sobre el suelo** (aéreo, hojarasca, troncos caídos y rama verde) se multiplica la fitomasa (ton ha^{-1}) por 0.5 (Rügnitz, *et al* 2009).

Para estimar el **carbono total** (ton ha^{-1}) se suma el contenido en cada componente.

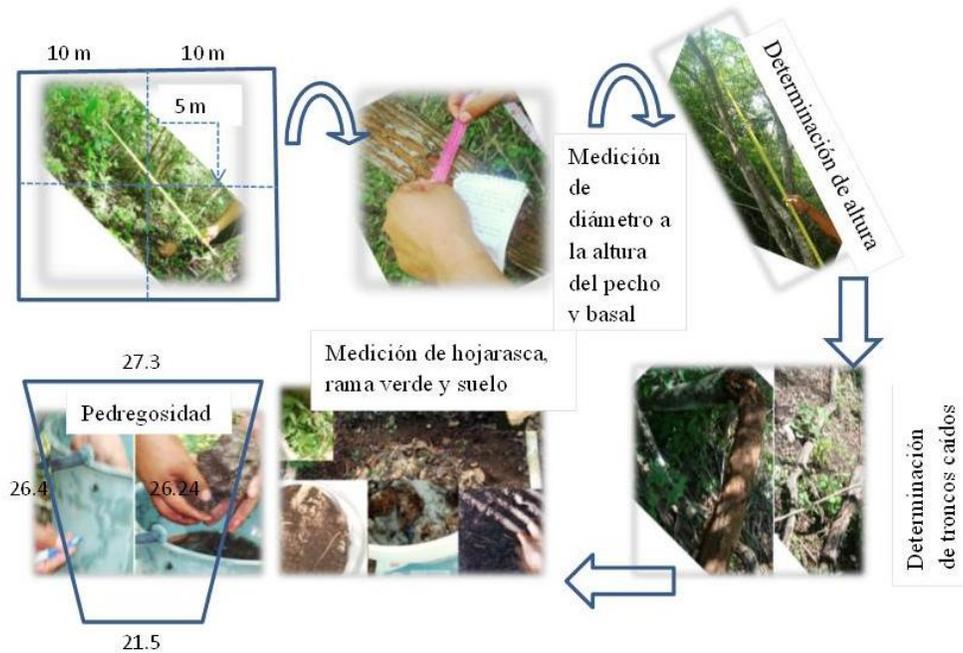


Figura 5. Diagrama ilustrado del levantamiento de información en campo para la determinación del contenido de Carbono en *M. leucaenoides* en la Sierra Gorda de Querétaro.

4.4. Producción de semilla

Se evaluó la producción de semilla en 8 árboles con orientación Oeste y 6 árboles con orientación norte.

Cuadro 2. Ubicación geográfica de los sitios seleccionados para determinar producción de semilla de *M. leucaenoides* en la Sierra Gorda de Querétaro.

Orientación	Longitud Oeste	Latitud Norte	UTM X	UTM Y	Zona	Hemisferio
Norte	-99° -25' -26.605"	21° 21' 41.85733"	456035	2362230	14	Norte
Oeste	-99° -24' -52.087"	21° 21' 40.67499"	457029	2362191	14	Norte

El sitio con orientación Oeste actualmente tiene aproximadamente 30 años que dejó de cultivarse maíz y frijol de temporal, la profundidad del suelo es 22 cm, el suelo es pedregoso y calcáreo, la pendiente es de 40 %.

El sitio con orientación Norte actualmente tiene aproximadamente 30 años que dejó de cultivarse maíz y frijol de temporal, la profundidad del suelo es 44 cm, el suelo es pedregoso y calcáreo, la pendiente es del 30 %.

En el mes de diciembre se realizó el corte de la semilla, para lo cual se observó que estuviera seca, se evaluaron árboles a los cuales no se les hubiera caído semilla por acción principalmente del viento; primero se tomaron las dimensiones de cada árbol, que consistieron en ancho de copa (m), altura (m), número de ramas y diámetro basal de cada rama (cm); la semilla se cosechó introduciendo las ramas en costales de plástico y cerniendo la rama dentro del costal, enseguida, se trasladó al lugar en donde se realizó el secado durante 2 días en el sol ya que tenía una importante proporción de hoja verde. Por último se realizó el cribado en dos etapas para retirar lo más posible de restos de hojas y brácteas; la primera etapa fue utilizando una criba de 1 cm y en la segunda se utilizó una criba de 0.5 cm.



Figura 6. Diagrama ilustrado del levantamiento de la información en campo para la determinación de producción de semilla en *M. leucaenoides* en la Sierra Gorda de Querétaro.

4.5. Efecto del remojo en agua en la germinación

Se utilizó un diseño experimental completamente al azar con 10 tratamientos y 3 repeticiones. Los tratamientos fueron: remojo en agua a temperatura ambiente 20 h, remojo en agua hirviendo 3 min + remojo en agua al tiempo 20 h, remojo en agua hirviendo 5 min, remojo en agua a los 5 min de hervir (5 min), remojo en agua a los 10 min de hervir (5 min), remojo en agua a los 15 min de hervir (5 min), remojo en agua a los 20 min de hervir (5 min), remojo en agua a los 25 min de hervir (5 min), remojo en agua a los 30 min de hervir (5 min) y Testigo. En cada tratamiento y repetición se utilizaron 30 semillas seleccionadas previamente para evitar que fueran semillas plagadas. Para colocar los tratamientos con sus respectivas repeticiones se utilizaron

platos de unicel cubiertos en el fondo con esponja, colocados dentro de una caja de plástico, la cual se cubrió con plástico transparente, como si fuera un pequeño invernadero. El experimento se inició el 30 de agosto del 2011, el número de semillas germinadas por tratamiento y repetición se anotó diariamente comenzando una vez que empezó la germinación, lo cual ocurrió a los 3 días de iniciado el experimento, terminando el día 27 de septiembre. La esponja se mantuvo saturada de humedad durante el tiempo que duró la prueba. Al final, se contaron también las semillas que fueron atacadas por hongos en cada tratamiento y repetición para analizarse como covariable.

Para el análisis de los resultados se utilizó el Sistema de Análisis Estadístico SAS analizando primero el efecto de la covariable ataque por hongo sobre el porcentaje de germinación; posteriormente se realizó el análisis de varianza y la prueba de comparación de medias Tukey. Estos análisis se realizaron para el porcentaje de germinación para todos los días de duración de la prueba.



Figura 7. Diagrama ilustrado del desarrollo de la prueba de germinación en *M. leucaenoides* para evaluar el efecto del remojo en agua sobre el % de germinación en la Sierra Gorda de Querétaro.

En la figura 8 se muestran las temperaturas máximas y mínimas para los días que duró la prueba de germinación.

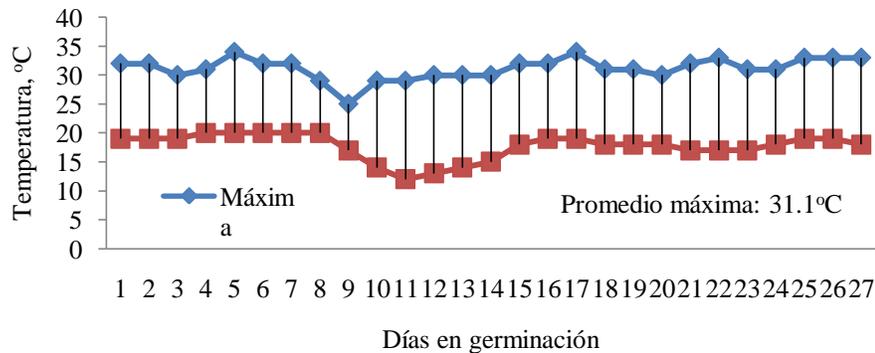


Figura 8. Temperaturas máximas y mínimas durante la duración de la prueba de germinación

5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

5.1. Contenido de carbono

5.1.1. Generación de ecuación alométrica para estimar fitomasa aérea en *M.*

leucaenoides

Se encontró 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 diámetro basal (cm) y $b=2.46662$, con una $R^2= 0.96$ y un coeficiente de variación de 21.12%.

5.1.2. Estimación de fitomasa y contenido de carbono en cada componente

En el Cuadro 3. Se muestra la densidad de *M. leucaenoides* y total para cada sitio estudiado, en donde se puede observar primero que la densidad de *M. leucaenoides* es alta en el sitio no perturbado, la población representa el 50% del total de árboles encontrados, además de que la repoblación de esta especie es muy importante ya que se encuentran $12,000 \text{ plantash}^{-1}$ con altura menor a 1.5 m. Por otro lado, la población de

sabalsp es de cerca de 1000 ejemplaresha⁻¹, mientras que en el sitio perturbado se encontró *sabal sp*. En el segundo sitio, la población de *M. leucaenoides* es mucho menor (617ha⁻¹) sin encontrar repoblación natural.

Cuadro 3. Densidad y repoblación de *M. leucaenoides* en los sitios estudiados.

Sitio	Densidad de árboles >1.5 m de <i>M. leucaenoides</i> , árbolesha ⁻¹	Densidad de plantas nuevas de <i>M. leucaenoides</i> (altura < 1.5 m), plantasha ⁻¹	Total de plantas nuevas por ha (altura < 1.5 m)	Población de sabal, árboles ha ⁻¹	Densidad total, altura > 1.5 m, árboles ha ⁻¹
No perturbado	6,117	12,000	25,867	950	12,808
Perturbado	617	0	8,400	0	3,633

5.1.3. Análisis estadístico

Una vez teniendo el contenido de carbono en cada parcela, expresado en ton ha⁻¹, se realizó el análisis estadístico considerando un diseño completamente al azar con dos tratamientos (vegetación natural y vegetación secundaria) 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 troncos caídos, carbono en hojarasca, carbono en rama verde, carbono en suelo: 0-20 cm de profundidad y carbono total).

5.1.4. Resultados y discusión

En el Cuadro 4 se muestran los resultados encontrados, se tienen diferencias significativas para carbono aéreo, carbono en troncos caídos, carbono en hojarasca y carbono total, siendo mejor el sitio no perturbado en todos los casos ($P \leq 0.05$).

Como podemos apreciar en el Cuadro 4. No existe diferencia significativa en cuanto al contenido de rama verde, lo cual puede explicarse por el hecho de que en este agostadero hay ganado bovino y el sitio no está excluido. Por otra parte, la cantidad de

rama verde encontrada es mayor en el sitio perturbado aunque la diferencia no es significativa lo cual puede deberse a que este sitio tiene una menor cobertura total como consecuencia de una menor densidad de árboles lo que permite más entrada de luz generando mayor crecimiento de la vegetación herbácea.

Tampoco se encontró diferencia significativa en cuanto a contenido de carbono en suelo, lo cual puede explicarse debido a que el sitio perturbado tiene alrededor de 30 años que no se cultiva lo que ha permitido la recuperación de la vegetación original y de las propiedades del suelo, además de que las formas de carbono en suelo son más estables.

Cuadro 4. Contenido de carbono (tonha⁻¹) en cada componente y total en dos sitios dominados por *M. leucaenoides* en la Sierra Gorda de Qro., medias comparadas según Tukey.

Sitio	Carbono aéreo, tonha ⁻¹	Carbono en troncos caídos, tonha ⁻¹	Carbono en hojarasca, ton ha ⁻¹	Carbono en rama verde, tonha ⁻¹	Carbono en suelo, 0-20 cm, tonha ⁻¹	Carbono total, tonha ⁻¹
Sitio no perturbado	71.885a	1.062a	37.281a	0.358a	32.948a	143.534 ^a
Sitio perturbado	20.703b	0.423b	14.743b	0.487a	32.036a	68.392b
Coefficiente de variación,%	13.93	15.48	29.31	23.98	14.63	14.17

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

Ruíz (2002) reporta contenido de carbono en 0-20 cm de profundidad en sistemas agroforestales de 70 a 89 ton ha⁻¹ y de 30 a 35 ton ha⁻¹ para la profundidad de 20-40 cm.

El mayor contenido de carbono en el sitio no perturbado se debe fundamentalmente al mayor contenido en el componente aéreo y hojarasca; lo cual a su vez se explica por tener una mayor densidad, tanto de *M. leucaenoides*, como de sabal y “monte caliente”, lo cual tiene una relación directa con el contenido de carbono en los tallos, hojas y con una mayor tasa de producción de hojarasca.

Avila et al. (2001) reportan hasta 195 ton C ha⁻¹ para sistemas agroforestales en Costa Rica; en selvas bajas en Nicaragua 145,6 y 183,2 t C ha⁻¹ (Lagos y Venegas, 2003),

Orrego y Del Valle (2003) reportan entre 23,0 y 158,7 t C ha⁻¹ para bosques tropicales los cuales coinciden con los encontrados en este trabajo. Si estimamos el carbono en kg m⁻² tenemos 6.8 para el sitio perturbado, lo cual es similar a lo reportado por la FAO (2002) para bosques tropicales (5 o 6 kgCm⁻²); en tanto que para el sitio no perturbado tenemos 14.3 kg C m⁻².

En el trópico seco, el carbono orgánico del suelo a 0.3 m presenta una densidad media de 4.55 kgm⁻² respectivamente (FAO, 2002); datos similares a los encontrados en este trabajo (3.3 y 3.2 kg m⁻² en el sitio no perturbado y perturbado respectivamente) si consideramos que son a 0.2 m de profundidad.

5.2. Producción de semilla en *M. leucaenoides*.

5.2.1. Análisis estadístico

Usando SAS, se generaron ecuaciones de tipo lineal (simple y múltiple), exponencial, potencial, polinomial (hasta de segundo orden) y logarítmica, utilizando como variable dependiente a la producción de semilla por árbol (g), y como variables independientes a la altura del árbol (m), ancho de copa (m), volumen de copa (m³), número de ramas y diámetro basal (cm); se analizó cada orientación por separado (norte y oeste) y después considerando todos los datos (independiente de la orientación).

5.2.2. Resultados y discusión

En el Cuadro 5 se presentan las ecuaciones que fueron significativas ($P \leq 0.05$) y con un coeficiente de variación menor al 30 %. Se selecciona para cada orientación la ecuación con mayor R² y menor Coeficiente de variación, teniendo como resultado que para el caso de la orientación Oeste el volumen (m³) es la variable independiente que mejor explica la producción de semilla (g árbol⁻¹) mediante la ecuación lineal sin ordenada al

origen: $Y=18.84318X$, con un $R^2=0.9485$ y un CV de 28.80%. En el caso de la orientación Norte tenemos una ecuación del mismo tipo, pero como variable independiente el diámetro basal (cm): $Y=72.83312X$, con $R^2=0.9962$ y CV=6.9%. Por último, para todos los datos (independientemente de la orientación), también tenemos como mejor ecuación una del tipo lineal sin ordenada al origen: $Y=61.2798X$, con $R^2=0.9330$ y CV=30% en donde la variable independiente también es el diámetro basal.

Cuadro 5. Ecuaciones que mejor predicen la producción de semilla en *M. leucaenoides* ($Y=\text{gárbol}^{-1}$) en la Sierra Gorda de Querétaro, ($P\leq 0.05$).

Orientación	Ecuación	R^2	CV, %	X, Z= Variables independientes
Oeste (n=6)	$Y=18.84318X$	0.9485	28.80	$X=\text{Volúmen (m}^3\text{)}$
Norte (n=6) y Oeste (n=8)	$Y=61.2798X$	0.9330	30.00	$X=\text{Diámetro basal, cm}$
	$Y=44.54021961X+5.10055771Z$	0.9534	26.74	$X= \text{Diámetro basal, } Z= \text{Volúmen, m}^3$
	$Y=72.83312X$	0.9962	6.90	$X=\text{Diámetro basal, cm}$
	$Y=183.03346X$	0.9329	28.98	$X=\text{Altura, m}$
	$Y=215.47954X$	0.9599	22.41	$X=\text{Ancho de copa, m}$
Norte (n=6)	$Y=132.0284654X+33.8071082Z$	0.9448	15.38	$X= \text{Diámetro basal (cm), } Z= \text{Número de ramas}$
	$Y=166.2138683X+26.855163Z$	0.9882	13.56	$X= \text{Ancho de copa (m), } Z= \text{Número de ramas}$
	$Y=9.41353921X+49.52693419Z$	0.9760	19.37	$X= \text{Volúmen (m}^3\text{), } Z= \text{Número de ramas}$

Para comparar la producción de semilla en las dos orientaciones estudiadas se realizó un análisis de varianza utilizando un diseño completamente al azar con diferente número de repeticiones, considerando a cada orientación como un tratamiento (norte, n=6 y oeste, n=8), encontrando diferencias estadísticamente significativas entre los tratamientos ($P\leq 0.05$). Posteriormente se realizó una prueba de comparación de medias según Tukey, encontrando que el mejor tratamiento es la orientación norte ($P\leq 0.05$) (690.5avvs370.17b gramos de semilla por árbol respectivamente), con un coeficiente de variación de 30%.

La mayor producción encontrada en la orientación norte puede explicarse debido a que los vientos dominantes y húmedos proceden en esa dirección, en tanto que en el caso de

la orientación Oeste, presenta mayor incidencia de los rayos solares después del medio día. Esto puede provocar una mayor evapotranspiración de las plantas, lo cual aunado a una menor disponibilidad de humedad puede ocasionar una menor tasa de floración y en consecuencia menos producción de semilla.

Pizarro (2005) reporta rendimientos de 200 g árbol⁻¹ en *Cratylia argéntea*; en *Leucaenaleucocephala* se reportan rendimientos de semilla de 456.9 g árbol⁻¹ en la época seca y de 637.6 g/planta en la época de lluvias respectivamente (Torres *et al.*, 2002), los cuales son similares a los encontrados en este trabajo en *M. leucaenoides*.

5.3. Efecto del remojo en agua sobre la germinación de semilla de *M. leucaenoides*.

5.3.1. Análisis estadístico

Usando el programa SAS, se realizó primero un análisis de covarianza desde el día 3 hasta el día 27 de duración de la prueba, utilizando como covariable la variable hongo, que fueron las semillas que se pudrieron por efecto de hongos. Este análisis se realizó utilizando los datos en porcentaje de germinación, en proporción y con la transformación arcoseno. No se encontró efecto significativo de la covariable para ninguno de los días de duración de la prueba ($P \leq 0.05$) por lo que se procedió a realizar el análisis de varianza sin considerar las semillas afectadas. No se encontraron variaciones en los resultados obtenidos utilizando los datos en proporción, porcentaje y con la transformación arcoseno por lo que el posterior análisis estadístico realizado se hizo utilizando los datos en porcentaje de germinación.

Se realizó el análisis de varianza y la prueba de comparación de medias según Tukey para cada día, desde el día 3 hasta el día 27, utilizando el programa SAS versión 9.0.

5.3.2. Resultados y discusión

En el Cuadro 6 se presentan los resultados. Hasta el día 11 de la prueba de germinación no se encontraron diferencias significativas entre los diferentes tratamientos aplicados ($P \leq 0.05$). Sin embargo, el tratamiento 2 (remojo en agua hirviendo 3 min más remojo en agua a temperatura ambiente 20 horas) y el 3 (remojo en agua hirviendo 5 min) se manifiestan como los mejores. A partir del día 12 se empezaron a manifestar diferencias significativas entre los mismos ($P \leq 0.05$), pero también diferencias significativas con el resto de los tratamientos. El tratamiento 3 (remojo en agua hirviendo 5 min) se ubica como el más apropiado para estimular la germinación de *M. leucaenoides* desde el día 12 de la prueba y hasta el día 27 (término de la prueba) presentando diferencias significativas sobre los demás tratamientos ($P \leq 0.05$), llegando a alcanzar a partir del día 24 un 34.44% de germinación.

Cuadro 6. Efecto del remojo en agua sobre el % de germinación de semillas de *M. leucaenoides* en la Sierra Gorda de Querétaro, medias comparadas según Tukey ($P \leq 0.05$).

Tratamientos: Remojo en agua a temperatura ambiente y a diferentes tiempos de hervir	Días de la prueba						
	día 3	día 12	día 16	día 24	día 25	día 26	día 27
T1: A temperatura ambiente tiempo 20 h	0a	3.333ab	8.887bc	12.223c	12.223c	12.223c	12.223c
T2: Hirviendo 3 min + Remojo en agua a temperatura ambiente tiempo 20 h	2.223a	13.337ab	21.11ab	27.78ab	27.78ab	27.78ab	28.89ab
T3: Hirviendo 5 min	1.11a	15.557a	26.667a	34.443a	34.443a	34.443a	34.443a
T4: A los 5 min de hervir (5 min)	0a	8.89ab	13.333abc	16.667bc	16.667bc	16.667bc	16.667bc
T5: A los 10 min de hervir (5 min)	1.11a	10.00ab	11.113abc	16.667bc	16.667bc	18.89bc	20.00bc
T6: A los 15 min de hervir (5 min)	0a	6.667ab	8.89bc	11.113c	11.113c	11.113c	11.113c
T7: A los 20 min de hervir (5 min)	0a	4.443ab	6.667bc	13.333bc	14.443bc	14.443bc	15.557bc
T8: A los 25 min de hervir (5 min)	0a	5.557ab	11.11abc	15.557bc	16.667bc	16.667bc	17.777bc
T9: A los 30 min de hervir (5 min)	0a	1.11b	3.333c	11.11c	11.11c	12.223c	13.337c
Testigo (TOR1)	0a	3.333ab	5.557bc	11.113c	11.113c	11.113c	12.223c
Diferencia mínima significativa	4.3101	13.855	15.835	15.037	14.407	14.83	13.745

Inicio de la prueba: 29 de agosto del 2011, fin de la prueba: 27 de septiembre del 2011

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

A partir del día 12 y hasta el día 27, el tratamiento 2 (remojo en agua hirviendo 3 min más remojo en agua a temperatura ambiente tiempo 20 horas) se mantiene como el segundo mejor en estimular la germinación de *M. leucaenoides* llegando a alcanzar un 28.89% de germinación el día 27 de la prueba.

A partir del día 24, y hasta el día 27 los tratamientos 4 (remojo en agua a los 5 minutos de hervir), 5 (remojo en agua a los 10 minutos de hervir), 7 (remojo en agua a los 20 minutos de hervir) y 8 (remojo en agua a los 25 minutos de hervir) se mantienen en tercer lugar en importancia, es decir, en el tercer bloque del agrupamiento con la prueba de comparación de medias Tukey ($P \leq 0.05$), llegando a alcanzar el día 27 un 16.667, 20.00, 15.557, y 17.777 % de germinación.

El tratamiento 1 (remojo en agua a temperatura ambiente 20 horas), 9 (remojo en agua a los 30 min de hervir) y testigo (sin remojo) se mantienen en el último grupo de la prueba de tukey ($P \leq 0.05$), llegando a alcanzar 12.223, 13.337 y 12.223 % de germinación para el día 27. De aquí se puede inferir que el remojo en agua por 20 horas y el remojo en agua a los 30 min de hervir no tienen ningún efecto en estimular la germinación de *M. leucaenoides*. El hecho de que el remojo en agua a los 30 minutos de hervir no influya sobre la germinación puede deberse a que a este tiempo el agua prácticamente ya está a temperatura ambiente.

En la Figura 9 se puede observar cómo los tratamientos 2 y 3 sobresalen del resto a través de una línea creciente desde el día 12 hasta el día 27, con diferencias significativas entre ellos pero también con respecto al resto de los tratamientos aplicados ($P \leq 0.05$). También se puede observar cómo desde los primeros 12 días de la prueba, estos mismos tratamientos sobresalen de los demás. Además, desde el día 12 se forman 2 bloques, el primero formado por los tratamientos 2 y 3, y el otro conformado por el

resto de los tratamientos, de donde se puede deducir que el remojo en agua hirviendo por 3 a 5 minutos debilita la pared de la semilla de *M.leucaenoides* incrementando las posibilidades de germinación, siendo mejor el remojo por 5 minutos.

Alexander y Sánchez (2002) encontraron que el proceso de imbibición mejora el porcentaje de germinación en aquellas semillas sometidas a escarificación con agua a altas temperaturas, lo cual es similar a lo encontrado en este trabajo para el tratamiento 2 (remojo en agua hirviendo 3 min más remojo en agua al tiempo 20 horas).

Con respecto al remojo en agua hirviendo por 5 min, que fue el mejor tratamiento en este estudio, no se han encontrado tratamientos similares en semillas de leguminosas, sin embargo, se reporta como el mejor tratamiento pregerminativo el agua a 80 °C por dos minutos para *Leucaena. leucocephala* cv. *Cunningham*, *Bauhiniaacuminata*, *Cassia arcoíris*, *Albiziasaman*, *Erythrina poeppigiana* y *Albizialebeck* (Toral y González, 1998). Por su parte, Alexander y Sánchez (2002) sí obtuvieron buenos resultados en *L. leucocephala* con agua a 100°C pero solamente por 1 min de inmersión.

Orozco *et al.* (2010) señala que con temperaturas elevadas por tiempos prolongados se incrementa la tasa metabólica y se destruyen algunas enzimas, lo cual causa el deterioro de la semilla, por lo general, daños irreversibles en las semillas, con efectos drásticos en la germinación. Esto no parece ocurrir en este estudio ya que si ese fuera el caso, el porcentaje de germinación se hubiera incrementado conforme se incrementó el tiempo transcurrido después de la ebullición (5, 10, 15, 20, 25, y 30 min).

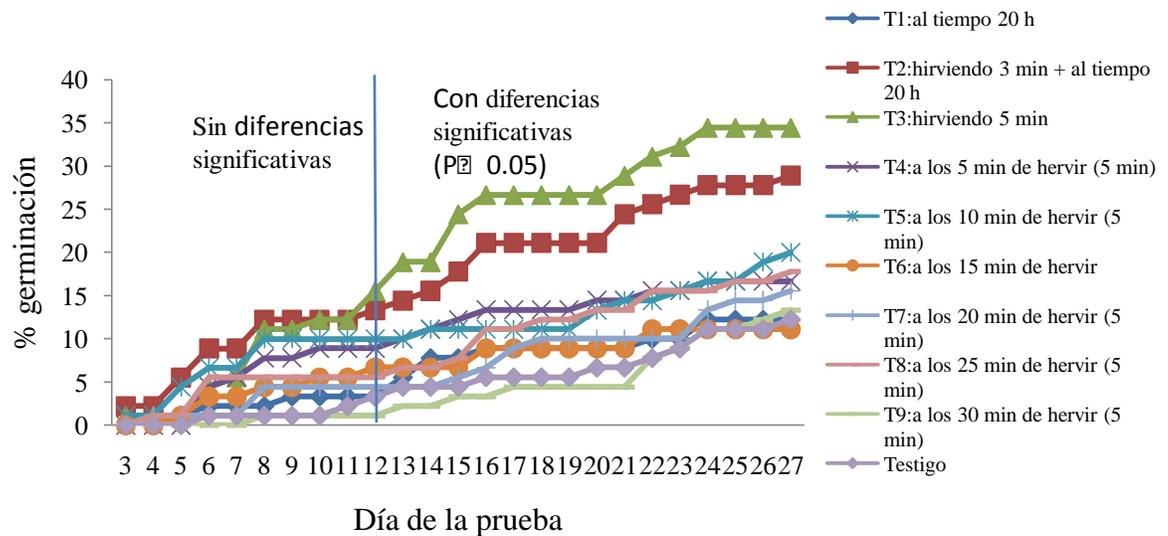


Figura 9. Efecto del remojo en agua sobre la germinación de *M. leucaenoides* en la Sierra Gorda de Querétaro.

6. CONCLUSIONES

Se concluye que el sitio no perturbado, dominado por *Mimosa leucaenoides* presenta mayor potencial para fijar carbono que el sitio perturbado ya que tenemos 143.534 vs 68.392 ton C ha⁻¹ respectivamente.

El diámetro basal es la variable independiente que está más relacionada con la fitomasa aérea y con la producción de semilla de *Mimosa leucaenoides* ya que tenemos una R² de 0.99 en el caso de producción de semilla cuando se analizaron todos los datos sin considerar la orientación. En el caso de la ecuación para predecir la fitomasa arbórea, se tuvo una R² de 0.96.

La orientación Norte produjo el doble de semilla de *M. leucaenoides* que la orientación Oeste (690.5avs 370.17b gramos de semilla por árbol respectivamente).

El tratamiento con agua hirviendo durante 3 ó 5 minutos incrementa de manera significativa el porcentaje de germinación de la semilla de *Mimosa leucaenoides*.

7. LITERATURA CITADA

- Abarca, S. 2002. Los Sistemas Silvopastoriles y el calentamiento global: un balance de emisiones (1). Agronomía Costarricense. Costa Rica. P:14.
- Albrecht A. y Kandji S.T. 2003. Carbon sequestration in tropical agroforestry systems. Agriculture, Ecosystems and Environment 99:15-27p.
- Alexander J., Sánchez G. 2002. Efecto del tratamiento con agua caliente e imbibición sobre la germinación de semillas de *L. Leucocephala*. Revista Científica XII: 3 pp.
- Andrade H., J., M. Segura, E. Somarriba y M. Villalobos. 2008. Valoración biofísica y financiera de la fijación de carbono por uso del suelo en fincas cacaoteras indígenas de Talamanca, Costa Rica. Agroforestería en las Américas 46: 6.
- Andrade H., J. y M. Ibrahim. 2003. ¿Cómo monitorear el secuestro de carbono en los sistemas silvopastoriles? Agroforestería en las Américas; 10: 8.
- Araoz S., D y O. T. Del Longo. 2006. Tratamientos pregerminativos para romper la dormición física impuesta por el endocarpo en *Ziziphus mistol*. Quebracho 13: 56-65.
- Argel J. P., Giraldo G., Peters M. y Lascano C. E. 2002. Producción artesanal de semillas de *Cratylia argentea*. Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT). Edición Alberto Ramírez P. Impreso en Colombia. Proyecto de Forrajes Tropicales. Cali, Colombia. 17 pp.
- Armas C., V. I., A. Gonzales C. y J. E. Bardales M. 2007. Estudio biométrico de tres especies de frutales nativos en parcelas establecidas y el efecto de fijación de

- carbono en el Centro de Investigaciones Allpahuayo – Iquitos. *Agroenfoque* 43:11.
- Arévalo, L., Alegre J., Palm, Ch. 2003. Manual de las Reservas Totales de Carbono en los Diferentes Sistemas de Uso de la Tierra en Perú. Publicación de STC - CGIAR Ministerio de agricultura. Pucallpa, Perú. 24p.
- Arreaga W., E. 2002. Almacenamiento de carbono en bosques con manejo forestal sostenible en la Reserva de Biosfera Maya, Petén, Guatemala. Tesis de Maestría. Turrialba, Costa Rica, CATIE. 73 pp.
- Avila, G., F. Jiménez, J. Beer, M. Gómez y M. Ibrahim. 2001. Almacenamiento, fijación de carbono y valoración de servicios ambientales en sistemas agroforestales en Costa Rica I. *Agroforestería en las Américas* 8:4.
- Balesdent, J., Arrouays, D., Gaillard J. 2000. MORGANE : un modèle de simulation des réserves organiques des sols et de la dynamique du carbone des sols. *Submitted to Agronomie*.
- Balesdent, J., Chenu, C., Balabane, M. 2000. Relationship of soil organic matter dynamics to physical protection and tillage. *Soil and Tillage Research* 53: 215-220.
- Borrajo, C. 2006. Importancia de la calidad de semillas. In curso internacional en ganadería bovina subtropical. Reconquista, 6 de Noviembre. INTA. Argentina 8pp.
- Colegio de Postgraduados. 2008. Taller de metodologías para la medición de carbono en ecosistemas terrestres. Montecillo, Edo de Mex. 27 – 28 de noviembre. 91pp.
- Concha J. Y., Julio C. Alegre y V. Pocomucha. 2007. Determinación de las reservas de carbono en la biomasa aérea de sistemas agroforestales de *Theobroma cacao* L. en el Departamento de San Martín, Perú. *Ecología Aplicada* 6:8.

- D'Aubeterre R., J. Principal y J. García. 2002. Efecto de diferentes métodos de escarificación sobre la germinación de tres especies del género *Prosopis*. Revista Científica XII: 3pp.*
- Eguren L. 2004. El mercado de Carbono en América Latina y el caribe: balance y perspectivas. CEPAL Santiago de Chile. 83 pp.
- FAO. 2002. Captura de carbono en los suelos para un mejor manejo de la tierra. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación. Roma. 83pp.
- Flores O. I., D. Bolivar, Botero J. A. and Ibrahim M. A. 1998. Parámetros nutricionales de algunas arbóreas leguminosas y no leguminosas con potencial forrajero para la suplementación de ruminantes en el trópico. **LivestockResearchfor Rural Development** Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza (CATIE). Turrialba, Costa Rica. 10 (1).
- Funes G., S. Díaz y P. Vernier. 2009. La temperatura como principal determinante de la germinación en especies del Chaco seco de Argentina. *Ecología Austral* 19:129-138.
- GARCIA R., M. 2003. Producción de semillas forestales de especies forrajeras enfatizados en sistemas silvopastoriles. Dirección de Fomento Forestal / INAFOR, Nicaragua. 37 pp.
- Giraldo L. A., Zapata M. y Montoya E. 2006. Estimación de la captura de carbono en silvopastoreo de *Acacia mangium* asociada con *Brachiaria distachya* en Colombia. *Pastos y Forrajes*. 29:42.

- Godínez H., Á. y A. Flores M. 1999. Germinación de semillas de 32 especies de plantas de la costa de Guerrero: su utilidad para la restauración ecológica. *Polibotánica* 11:1-19.
- González J. E. 1990. Recolección y germinación de semillas de 26 especies arbóreas del bosque húmedo tropical. Organización para Estudios Tropicales. San Pedro Costa Rica. 4pp.
- González Y. y F. Mendoza. 2008. Efecto del agua caliente en la germinación de las semillas de *Leucaena leucocephala* cv. Perú. *Pastos y Forrajes* 31:6.
- Hoshizaki K. y P.E. Hulme. 2002. Mast seeding and predator-mediated indirect interactions in a forest community: evidence from post-dispersal fate of rodent-generated caches. In: *Seed dispersal and frugivory: ecology, evolution and conservation* (Eds. D.J., Levey, W.R. Silva & M. Galleti), pp. 227-239. CAB International, New York.
- Ibrahim M., M. Chacón, C. Cuartas, J. Naranjo, G. Ponce, P. Vega, F. Casasola y J. Rojas. 2007. Almacenamiento de carbono en el suelo y la biomasa arbórea en sistemas de usos de la tierra en paisajes ganaderos de Colombia, Costa Rica y Nicaragua. *Agroforestería en las Américas* 45:10.
- IPCC.2000. Land use, land-use change, and forestry special report. *Cambridge University Press*. 377pp.
- Jara L. F., F. Gutiérrez, A., Paspuel, G. Ordóñez y P. Asimbaya. 2001. Monitoreo de plantaciones forestales para fijación de carbono en El Ecuador. In *Simposio Internacional de medición y monitoreo de la captura de carbono en ecosistemas forestales*. PROFAFOR S.A. (comp.). Quito, Ecuador 18 al 20 de octubre del 2001. 21 pp.

- Kelly D., D.E. Hart y R.B. Allen. 2001. Evaluating the wind pollination benefits of mast seeding. *Ecology* 138: 117-126.
- Lagos O. y Venegas S. 2003. Impacto del aprovechamiento forestal en la biomasa y carbono de bosques naturales de Nueva Quesada, Río San Juan. Tesis Profesional. Universidad Centroamericana, Managua, Nicaragua. 121 pp.
- Lapeyre T., J. Alegre y L. Arévalo. 2004. Determinación de las reservas de carbono de la biomasa aérea, en diferentes sistemas de uso de la tierra en San Martín, Perú. *Ecología Aplicada* 3:11.
- López M., Koning F., H. Paredes y P. Benítez. 2002. Estimación de carbono en biomasa de bosques secundarios y plantaciones forestales en el Noroccidente de Ecuador. Proyecto CO₂-GTZ. Quito, Ecuador. 42 pp.
- Macdiken K.G. 1997 A guide to monitoring carbon storage in forestry and agroforestry projects. Forest Carbon Monitoring Program. S.L.: Winrock International Institute for Agricultural Development. 84 p.
- Mercadet, A. y Álvarez J. 2005. Informe final de proyecto “Cambio climático y el sector forestal cubano: segunda aproximación”. Instituto Forestal Nacional. La Habana, Cuba. 50 pp.
- Miranda, T., R. Machado, H. Machado y P. Duquesne. 2007. Carbono secuestrado en ecosistemas agropecuarios cubanos y su valoración económica. Estudio de caso. *Pastos y Forrajes* 30:10.
- Murgueitio E. 2001. Contribución de los sistemas ganaderos tropicales al secuestro de carbono. *In*. II Conferencia electrónica sobre agroforestería para la producción animal en América Latina (Agrofor2). Manuel D. Sánchez y Mauricio Rosales (Eds.). Dirección de Producción y Sanidad Animal, FAO. Roma, Italia. p.8.

- Murúa R. y González L.,A. 1985. Producción de semillas de especies arbóreas en la pluviselvaValdiviada. Bosque 6:9pp.
- Navarro M. del C., A. P. Deméneghi. 2007. Germinación de semillas y efecto de las hormonas en el crecimiento de *Mammillariapectinifer*. Zonas Áridas 11:7.
- Orozco C., F. A., N. Franco H., L. A. Taborda B. 2010. Evaluación de tres métodos de escarificación en semillas de algarrobo (*Hymenaeacourbaril* L.). Revista Investigación Universidad Quindío, Armenia, Colombia (20): 36 - 41.
- Orrego S. A., Del Valle J.I. 2003. Existencias y tasas de incremento neto de la biomasa y del carbono en bosques primarios intervenidos y secundarios. In Orrego, SA; Del Valle, JI; Moreno, FH. ed. Medición de la captura de carbono en ecosistemas forestales tropicales de Colombia, contribuciones para la mitigación del cambio climático. Bogotá, CO, Universidad Nacional de Colombia-Centro Andino para la Economía del Medio Ambiente (CAEMA). p 215-241.
- Ortiz M., G. y L. D. Riascos Ch. 2006. Almacenamiento y fijación de carbono del sistema agroforestal cacao *Theobroma cacao* L y laurel *Cordiaalliodora* en la reserva indígena de Talamanca, Costa Rica. Tesis Profesional. Universidad de Nariño. San Juan de Pasto, Costa Rica. 111 pp.
- Pérez A., Matías C., González Y. y Alonso O. 2006. Producción de semillas de gramíneas y leguminosas tropicales. In: Recursos forrajeros herbáceos y arbóreos. (Ed. Milagros Milera). Universidad de San Carlos de Guatemala, Guatemala- EEPF “Indio Hatuey”, Matanzas, Cuba. p. 138.
- Pérez P., S. R. Jandl y A. Rubio S. 2007. Modelización del secuestro de carbono en sistemas forestales: efecto de la elección de especie. *Ecología* 21:341-352.

- Pineda L., M. R., G. Ortiz C. y L. R. Sánchez V. 2005. Los cafetales y su papel en la captura de carbono: un servicio ambiental aún no valorado en Veracruz. *Madera y Bosques* 11:3-14.
- Pizarro A. 2005. Especies arbustivas, gramíneas y leguminosas para el trópico americano. In IX Seminario de Pastos y Forrajes. Universidad Federal de Paraná. Brasil. 20 pp.
- Raisman J. S. y A. González M. 2008. Hipertextos del área de la Biología. Universidad Nacional del Nordeste. República de Argentina. p. 7.<http://www.biologia.edu.ar> 19-febrero-2010.
- Razz R., G. y T. Clavero C. 2003. Efecto de la escarificación, remojo y tiempos de almacenamiento sobre la germinación de *Pithecellobium dulce*. *Rev. Fac. Agron* 20: 180-187.
- Rodríguez E, M. R. 2008. Influencia de la temperatura en la germinación de semillas de *Caesalpiniaspinosa*(Molina) Kuntze «taya» de cuatro localidades del Departamento La Libertad, Perú. *Arnaldoa* 15(1): 87 – 100.
- Rodríguez G., I. y D. Alvarado. 2009. Producción de semilla de leguminosas forrajeras en el estado Anzoátegui. *Sistemas de producción* 8:3. INIA, Venezuela.
- Rosas M., M. Espinosa, E. Acuña y K. Sáez. 2004. Variación interanual en producción de semillas en algunas especies arbóreas en la cordillera pelada, centrosur de Chile. *Gayana. Bot.* 61(1): 32-41. 10pp.
- Rügnitz T., M., M. Chacón L. y Porro R. 2009. Guía para la Determinación de Carbono en Pequeñas Propiedades Rurales. Centro Mundial Agroforestal (ICRAF) / Consórcio Iniciativa Amazônica (IA). Lima, Perú. 79 pp.

- Ruíz G., A. 2002. Fijación y almacenamiento de carbono en sistemas silvopastoriles y competitividad económica en Matiguás Nicaragua. Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza (CATIE). Turrialba, Costa Rica. 119 pp.
- Sánchez, J.A.; Reino, J.; Muñoz, Bárbara; González, Yolanda; Montejo, Laura & Machado, R. 2005. Efecto de los tratamientos de hidratación-deshidratación en la germinación, la emergencia y el vigor de plántulas de *Leucaenaleucocephalacv.* Cunningham. *Pastos y Forrajes*. 28:209.
- Sandoval M., E., N. Stolpe L., E. Zagal V., M. Mardones F. y J. Junod M. 2003. El secuestro de carbono en la agricultura y su importancia con el calentamiento global. *Theoria* 12: 65-71.
- Schnurr J. A., J. Shockey M., G. De Boer J. and J. Browse A. 2002. Fatty acid export from the chloroplast molecular characterization of a major plastidial acyl-coenzyme A synthetase from *Arabidopsis*. *Plant Physiology* 129: 1700- 1709.
- Segura M. 1999. Valoración del servicio de fijación y almacenamiento de Carbono en bosques privados en el área de conservación cordillera volcánica central, Costa Rica. Tesis de Maestría. Turrialba, CATIE. 119pp.
- Segura M. y Kanninen M. 2002. Inventarios para estimar Carbono en ecosistemas forestales tropicales. In. Orozco, L. y Brumer, C. Inventarios forestales para bosques latifoliados en América Central. Turrialba: CATIE. p. 202-22.
- SUÁREZ P., D. A. 2002. Cuantificación y valoración económica del servicio ambiental almacenamiento de carbono en sistemas agroforestales de café de la Comarca Yassica Sur, Matagalpa Nicaragua. Tesis de Maestría. CATIE, Costa Rica. 117 pp.

- Toral O. y Y. González. 1998. Efecto del agua caliente en la germinación de diez especies arbóreas. Estación Experimental de Pastos y Forrajes "Indio Hatuey". Matanzas Cuba. 3 pp.
- Torres R., A., Alvarado A., Chacón E., Zérpa A. y Romero R. 2002. Producción de semilla de *Leucaenaleucocephala* en Venezuela. In Memorias XI Congreso Venezolano de Producción e Industria Animal ULA-Trujillo. Valera 22 al 26 Oct. Venezuela. 7 pp.
- Vadillo G., M. Suni1 y A. Cano. 2004. Viabilidad y germinación de semillas de *Puya raimondii* Harms (Bromeliaceae). Rev. Peru. biol. 11: 71- 78.
- Walkley y Black. 1934. An examination of the Degtjareff method for determining soil organic and modification of the chromic acid titration method. Soil Sci. 34:29-38.
- Yepes F. y Arboleda M. 2009. Promoción de la emergencia de urape (*Bauhinia monandra* Kurs) y retama (*Thevetia peruviana* (Pers) Schum). Bioagro 21: 15-22.
- Zamudio S. R., Rzedowski J., Carranza E. G. y Calderón G. 1992. La vegetación en el Estado de Querétaro. Instituto de Ecología Centro Regional del Bajío y Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología del Estado de Querétaro. ISBN. Querétaro, México. P 92.