



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA CHAPINGO

UNIDAD REGIONAL UNIVERSITARIA DE ZONAS ÁRIDAS



**ESTIMACIÓN DE LA CAPTURA DE CARBONO EN POBLACIONES DE
LECHUGUILLA (*Agave lechuguilla* Torr., 1859) MEDIANTE MODELOS
ALOMÉTRICOS.**

TESIS

COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL GRADO DE

**MAESTRO EN CIENCIAS EN RECURSOS NATURALES
Y MEDIO AMBIENTE EN ZONAS ÁRIDAS**

PRESENTA:

RICARDO ROBERTO GONZALEZ QUIÑONES

DIRECTOR DE TESIS

DR. RICARDO TREJO CALZADA



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

Bermejillo, Durango, México, Junio 2016



El presente trabajo de tesis titulado **Estimación de la captura de carbono en poblaciones de Lechuguilla (*Agave lechuguilla* Torr., 1859) mediante modelos alométricos**, fue realizado por el C. Ricardo Roberto Gonzalez Quiñones, bajo la dirección del Dr. Ricardo Trejo Calzada, la codirección del Dr. Aurelio Pedroza Sandoval y la asesoría del Dr. Jesús Guadalupe Arreola Avila, ha sido revisado y aprobado por el Comité Asesor como requisito parcial para obtener el grado de:

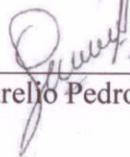
**MAESTRO EN CIENCIAS EN RECURSOS NATURALES
Y MEDIO AMBIENTE EN ZONAS ÁRIDAS**

Director



Dr. Ricardo Trejo Calzada

Codirector



Dr. Aurelio Pedroza Sandoval

Asesor



Dr. Jesús Guadalupe Arreola Avila

Bermejillo, Durango, México, Junio de 2016

AGRADECIMIENTOS

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) y a la Universidad Autónoma Chapingo - Unidad Regional Universitaria de Zonas Áridas por todo el apoyo otorgado durante mis estudios de maestría en el periodo 2014 - 2015. Por mostrarme la hermandad que se vive dentro de las instalaciones entre alumnos y profesores y sobre todo hacerme participe de ello.

Al Dr. Ricardo Trejo Calzada, Por brindarme el apoyo en todo momento que lo necesite y por permitirme ver su completa dedicación hacia la docencia gracias. Al Dr. Aurelio Pedroza por la pasión y esfuerzo que dedico a cada una de las clases que me impartió. Al Dr. Jesús Arreola por el apoyo mostrado en estos dos años que curse la maestría.

A mis compañeros de maestría que formaron parte de esta experiencia, sobre todo aquellos que me mostraron la esencia de chapingo, que solo un egresado de chapingo puede mostrar, mi compañero Santos Martínez, gracias.

A mi esposa que es el ser humano más maravilloso que he tenido la dicha de conocer y a mi hijo que cuento los días para conocerlo y tenerlo a mi lado. A mis padres Roberto y Carmen por inculcarme el camino de la educación a mis hermanos Juan y Rafael a mi familia gracias.

A todas las personas que han sido participe en mi vida solo puedo decir ¡Gracias Totales!

DATOS BIOGRÁFICOS

Ricardo Roberto González Quiñones, es Biólogo egresado de la carrera de Biología de la Facultad de ciencias Biológicas, de la Universidad Juárez del estado de Durango (FCB-UJED) de la generación 2003-2008.

En el periodo de 2010-2011 se dedicó a los controles ambientales en empresa consorcio ambiental Mexicali B.C. donde colaboro en asesorías ambientales a empresas que requirieran trámites ante SEMARNAT, PROFEPA, STPSS Y SMA.

En el periodo de 2011-2013 Colaboro en una consultoría ambiental Atlas Consultores en la Ciudad de Lerdo Dgo. En donde desarrollo diversos proyectos para múltiples empresas como Estudios de Impacto Ambiental, Estudios Técnicos Justificativos y Programas de Manejos de Residuos, así como cursos de Primeros Auxilios, Rutas de Evacuación y Manejo de incendios.

Durante los años 2014 - 2015, realizó sus estudios de posgrado en el programa de Maestría en Recursos Naturales y Medio Ambiente en Zonas Áridas en la URUZA - UACH. Su tema de tesis denominado: estimación de la captura de carbono en poblaciones de lechuguilla (*Agave lechuguilla* Torr., 1859) mediante modelos alométricos.

Estimación de la captura de carbono en poblaciones de Lechuguilla (*Agave lechuguilla* Torr., 1859) mediante modelos alométricos.

Estimating carbon sequestration in populations of Lechuguilla (*Agave lechuguilla* Torr., 1859) using allometric models.

González-Quiñones Ricardo¹, Trejo-Calzada Ricardo²

Resumen

El cambio climático global, es uno de los problemas ambientales más severos en el presente siglo debido al aumento de los gases de efecto invernadero (GEI). El dióxido de carbono (CO₂) es uno de los GEI que contribuye en mayor medida al calentamiento global. Las plantas a través de la fotosíntesis pueden secuestrar el CO₂ y contribuir a disminuir los efectos de su acumulación. El secuestro de carbono se puede estimar mediante ecuaciones alométricas (EA). Sin embargo, los ecosistemas semiáridos han sido poco estudiados en cuanto a su contribución al secuestro de carbono. El objetivo de este estudio fue desarrollar ecuaciones alométricas para determinar el contenido de carbono en la biomasa aérea de *Agave lechuguilla*. Se llevó a cabo un muestreo en áreas con cobertura baja, media y alta de *Agave lechuguilla*. En tres sitios de cada una de las coberturas se midió frecuencia, dominancia, cobertura, altura, diámetro menor, diámetro mayor, peso seco de raíz y peso seco en un total de 257 individuos de *A. lechuguilla*. Los datos obtenidos fueron empleados para generar ecuaciones mediante regresión lineal simple y múltiple. Las variables altura, diámetro menor y diámetro mayor tuvieron una correlación altamente significativa con el contenido de carbono. El secuestro de carbono en *A. lechuguilla* de ecosistemas áridos puede ser estimado con ecuaciones alométricas generadas en este estudio. La ecuación alométrica que mejor se ajustó es: $Y = 0.00012Cob - 0.00335DM + 0.00235Dm + 0.00376 A$.

Palabras clave: Cambio climático, ecuaciones alométricas, captura de CO₂, Cobertura vegetal, *Agave lechuguilla*.

Abstract

Global climate change is one of the most severe environmental problems of this century due to the increase in greenhouse gases (GHG). CO₂ is one of the GHG that has the greatest effect on global warming. Plants capture CO₂ through photosynthesis and help reduce its accumulation effects. Carbon sequestration can be estimated by allometric equations. However, few studies related to carbon sequestration in arid and semi-arid ecosystems have been carried out. The aim of this study was to develop allometric equations to determine the carbon content in the aboveground biomass of *Agave lechuguilla*. Sampling was conducted in areas with low, medium and high *Agave lechuguilla* cover. In three sites of each of the covers, frequency, dominance, coverage, height, dry weight, smaller and larger diameter, root dry weight and total dry weight were measured in 257 *A. lechuguilla* plants. Multiple and simple regression analysis was carried out. Variables height, smaller diameter and larger diameter showed highly significant correlation with carbon content of plants. Carbon sequestration of *A. lechuguilla* in arid ecosystems may be estimated with allometric equations obtained in this study.

The allometric equation that best fits is: $Y = 0.00012Cob - 0.00335DM + 0.00235Dm + 0.00376 A$.

Keywords: Climate change, allometric equations, CO₂ capture, Vegetation cover, *Agave lechuguilla*.

¹Tesista
²Director

ÍNDICE

Título	Pag.
RESUMEN	v
ABSTRACT.....	v
I. INTRODUCCIÓN	1
II. OBJETIVOS.....	4
III. HIPÓTESIS.....	4
IV. REVISIÓN DE LITERATURA.....	5
4.1. Cambio climático	5
4.2. Efecto Invernadero.....	6
4.3. Ciclo del carbono	7
4.4. Captura de carbono	8
4.5. Dinámica del carbono en matorrales.....	9
V. MATERIALES Y MÉTODOS	11
5.1. Ubicación del área de estudio.	11
5.2. Topografía.....	11
5.3. Muestreo y toma de datos en campo.....	12
5.4. Tamaño de muestra	13
5.5. Variables medidas.....	14
5.6. Índice de área Foliar.....	16
5.7. Evaluación de biomasa	16
5.8. Cuantificación de Biomasa.	17
5.9. Análisis estadísticos	17
VI. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	19
6.1. Caracterización de la vegetación.....	19
6.2. Caracterización de las poblaciones de <i>A. lechuguilla</i>	24
6.3. Análisis Coeficiente de correlación de Pearson.....	26
6.4. Generación de ecuación	27
6.5. Efecto de la densidad en el secuestro de carbono	28
VII. CONCLUSIONES	31
VIII. LITERATURA CITADA	32

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 2. Muestra los tres diferentes tipos de densidad de cobertura vegetal y el tamaño mínimo de muestra para cada una de las áreas.....	13
Cuadro 3. Análisis de abundancia, frecuencia, dominancia e índice de valor de importancia en los sitios de densidad de cobertura vegetal cerrada.	20
Cuadro 4. Muestra las especies importantes en los tres sitios con la misma densidad de cobertura vegetal semiabierta, basado con el análisis del índice de valor de importancia.....	21
Cuadro 5. Muestra las especies importantes en los tres sitios con la misma densidad de cobertura vegetal abierta, basado en el análisis del índice de valor de importancia.	22
Cuadro 6. Muestra la importancia de agave lechuguilla en los tres tipos de densidad de cobertura vegetal, así como la importancia de las otras especies presentes en estos sitios.....	23
Cuadro 7. Coeficiente de Correlación de Pearson de los contenidos de carbono y las características morfológicas de la planta <i>Agave lechuguilla</i>	26
Cuadro 8. Modelos de predicción en captura de carbono	27
Cuadro 9. Modelos de estimación de carbono en roseta, raíz y carbono total	28
Cuadro 10. Varianza de contenido de carbono en los tejidos en las tres densidades de cobertura vegetal.....	28
Cuadro 11. Promedio de carbono en roseta \pm error estándar (EE) por densidad de sitio.....	29

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Localización del área del proyecto.	12
Figura 2. Diferencia en altura (m) de la planta <i>Agave lechuguilla</i> bajo los tres tipos de densidad de cobertura vegetal.	25
Figura 3. Diferencia entre el diámetro mayor y diámetro menor en las tres diferentes densidades de cobertura vegetal.....	26
Figura 4. Estimación de carbono (Kg) <i>Agave lechuguilla</i> en Roseta, Raíz así como en planta total, bajo los tres diferentes tipos de densidad de cobertura vegetal.....	¡Error!

Marcador no definido.

I. INTRODUCCIÓN

El cambio climático global, es uno de los problemas ambientales más severos que se enfrentan en el presente siglo debido al aumento de los gases de efecto invernadero (GEI). El dióxido de carbono (CO₂) es uno de los principales gases que contribuye al calentamiento global (Solomon *et al.*, 2007). Al respecto, durante el 2014 Las concentraciones promedio de dióxido de carbono (CO₂) en la atmósfera son de 398 partes por millón (ppm), lo que representa un incremento del 20 % con respecto al 2005 (Nasa, 2014).

Ante tal escenario, una forma de mitigar el Cambio Climático Global es mantener y aumentar los reservorios de carbono en los ecosistemas forestales. A si mismo diversos estudios indican que México presenta un gran potencial en contenido y captura de carbono (Masera *et al.*, 2001). La capacidad de fijar carbono por los ecosistemas ha sido investigada con gran interés como una medida de mitigación (Schulze *et al.*, 2000) Subrayando que dicha capacidad de fijar y almacenar carbono está en función de la composición, densidad y edad vegetal impulsando con ello la importancia de los estudios locales y regionales (Conti *et al.*, 2003; Chave *et al.*, 2003; Navar, 2010).

Cabe mencionar que se han desarrollado varios métodos para la determinación de la biomasa aérea y el contenido de vegetación. Algunos de esos métodos incluyen muestreos destructivos o la aplicación de ecuaciones alométricas (Kettererings *et al.*, 2001). Sin embargo, el conocer los modelos específicos de las especies dominantes en los ecosistemas facilita el estudio para proyectos de investigación ecológicos, como inventarios detallados de biomasa y carbono almacenado en los árboles, así como para

establecer la relación de la acumulación de la biomasa y su relación con las condiciones del medio (Rapp *et al.*, 1999; Wang, 2006).

Cabe destacar que la mayoría de las investigaciones sobre contenido y captura de carbono se han enfocado en la vegetación con una masa forestal importante, es decir, bosques, selvas y plantaciones forestales. Sin embargo, las zonas áridas y semiáridas de México que cubren casi el 40% del territorio nacional, han sido poco estudiadas (IFN, 2000). De aquí, la necesidad de realizar estudios locales para conocer los montos y variabilidad del contenido de Carbono.

México presenta una gran diversidad de plantas, ya que de acuerdo con el instituto nacional de estadística y geografía e informática (INEGI), ocupa el cuarto lugar en diversidad de plantas con 25000 especies registradas. Aun en zonas áridas existe una diversidad de especies vegetales que tienen un uso actual y potencial enorme.

Agave lechuguilla es una de las especies que se encuentran especialmente adaptadas a ambientes áridos, con baja precipitación anual, predomina en más de la mitad del territorio nacional y caracteriza al matorral desértico rosetófilo, (Romo-Morrone, 2012). Crece generalmente en suelos coluviales someros y pedregosos; Feozem, Leptosol, Xerosol, Yermosol, Rendzina, Leptosol, Feozem, Vertisol, Castañozem; textura franco-arenosa, franco-arcillosa; en sierras y lomeríos de origen calizo, ligeramente alcalino. En regiones cuya precipitación oscila entre 200 a 500 mm y una altitud entre 200 a 2400 msnm (Hernández *et al.*, 2005).

Esta especie constituye un valioso recurso ecológico que tiene varias funciones importantes, que además de la formación, conservación y retención del suelo, tiene un papel muy eficaz contra el impacto de los procesos erosivos (Blando- Baca, 2001).

Agave lechuguilla es una planta con vástagos presentes, roseta de 45 a 95 cm de alto; hojas lineares lanceoladas, de 30 a 90 cm de largo x 2.8 a 5 cm de ancho, ascendentes a erectas, en ocasiones falcadas, con la cara interior cóncava, la exterior convexa, carnosocoriáceas, rígidas, de color verde claro, verde amarillento o verde azulado, espina terminal fuerte, cónica a tubulada, de (1.5) 2 a 5 cm de largo x 3 a 8 mm de ancho, en ocasiones ligeramente flexuosa, algo comprimida, aguda o acuminada, la cara interior surcada, la exterior aquillada, café rojiza a grisácea, márgenes continuos, rectos, coriáceos, café rojizos a grisáceos, desprendiéndose con facilidad en hojas secas, provistos de dientes retosos, frágiles, de (0.3) 1.5 a 9 mm de largo, vainas carnosofibrosas, de 3 a 8 cm de longitud por 4 a 11 cm de ancho; inflorescencia en forma de panícula espiciforme de 2 a 3 (4.5) m de largo, pedúnculo de color verde-glaucos.

Se encuentra distribuida en Escobedo, Juárez, Múzquiz y Saltillo, Coahuila; Nazas, Durango; Ahualulco, Matehuala, Cedral, Valle de Guadalupe, Real de Catorce y San Luis Potosí (CONAFOR, 2007).

A pesar de la abundancia de *Agave lechuguilla* en algunos de los tipos de vegetación de zonas áridas, no se han realizado suficientes estudios sobre su contribución al secuestro de carbono en esos ecosistemas.

II. OBJETIVOS

Construir una ecuación alométrica para la determinación de carbono en la especie (*Agave lechuguilla* Torr., 1859).

Estimar el contenido de carbono (CC) secuestrado en (*Agave lechuguilla* Torr., 1859) en tres densidades de coberturas vegetales.

Contribuir al conocimiento sobre la captura de carbono en la especie vegetal *Agave lechuguilla*.

III. HIPÓTESIS

El contenido de carbono en la especie *Agave lechuguilla* Torr., 1859 está relacionado con las variables morfométricas de las plantas.

El contenido de carbono en la especie *Agave lechuguilla* Torr., 1859 es diferente de acuerdo a los tipos de densidades de cobertura vegetal.

El índice de área foliar en la especie *Agave lechuguilla* Torr., 1859 está relacionado con el contenido de carbono.

IV. REVISIÓN DE LITERATURA

4.1. Cambio climático

El clima es un fenómeno que depende de un gran número de factores que interactúan de manera compleja. Cuando un parámetro meteorológico como la precipitación o la temperatura sale de su valor medio de muchos años, se habla de una anomalía climática o cambio climático, ocasionada por forzamientos internos como inestabilidades en la atmósfera y el océano (Magaña, 2004). Mogas (2004) menciona que el cambio climático debido al calentamiento global es una de las principales preocupaciones ambientales surgidas en los últimos años. El aumento de la temperatura de la tierra se relaciona con las crecientes emisiones de dióxido de carbono a la atmósfera debido a la actividad humana. Esta creciente preocupación por el posible cambio climático ha generado una discusión internacional sobre cómo reducir las emisiones de dióxido de carbono y disminuir su stock en la atmósfera mediante la fijación de carbono.

La preocupación sobre las consecuencias del cambio climático global, generado por un eventual aumento de la temperatura del planeta y su relación con el incremento en los niveles de gases de efecto invernadero (GEI) en la atmósfera, en particular de CO₂, ha motivado múltiples estudios en las últimas décadas. Estudios científicos han establecido que desde 1885 la concentración de CO₂ en la atmósfera ha aumentado en un 25 %, producto de la combustión de fósiles para la generación de energía y la deforestación a escala mundial (Yerena-Yamallel *et al.*, 2011).

La emisión de C funciona básicamente a través de la fotosíntesis, la respiración, las emisiones por quema de combustibles fósiles y erupciones volcánicas (Martínez-Vera *et al.*, 2010). Las plantas absorben el CO₂ atmosférico y por difusión a través de

pequeñísimos poros de las hojas llamado estomas, y es transportado a los sitios donde se lleva a cabo la fotosíntesis. Cierta cantidad de CO₂ regresa a la atmosfera, pero hay una cantidad que se fija y se convierte en carbohidratos durante la fotosíntesis (Jaramillo, 2004). La captura de Carbono (C) Consiste en el almacenamiento de carbono en suelos y bosques y otros tipos de vegetación (Nájera, 1999).

El IPCC (2008), estima que la agricultura es responsable de cerca del 14% de las emisiones globales de gases de efecto invernadero (GEI), un volumen similar al originado por el sector del transporte.

El Mecanismo de Desarrollo Limpio establece este mecanismo, mediante el cual los países industrializados pueden financiar proyectos de reducción de emisiones en países en desarrollo y recibir créditos por ello. Existen numerosas vías y esfuerzos en marcha para reducir las emisiones de carbono y promover actividades que ayuden a almacenar y eliminar carbono (FAO, 2010).

4.2. Efecto Invernadero

Zamora (2003), comenta que el efecto invernadero se debe a que ciertos gases en la atmósfera permiten que la mayor parte de la radiación solar incidente penetre hasta la superficie del planeta, mientras que absorben y reemiten parte de la radiación infrarroja que el planeta emite de regreso al espacio exterior. De esta manera, al aumentar la concentración de gases de invernadero, se incrementa la cantidad de calor atrapado en la atmósfera, dando origen a que se eleve la temperatura superficial del planeta. Los gases de efecto invernadero presentes en la atmósfera de manera natural son un elemento clave para conservar la temperatura de la tierra al retener parte de la energía proveniente del sol,

ya que, la presencia y concentración de estos gases se mantuvo estable por mucho tiempo, a partir de dicha fecha, las actividades humanas han generado gases de efecto invernadero lo que está provocando un aumento en sus concentraciones en la atmósfera (INE, 2006). El problema actual se ha generado por la exagerada presencia de estos gases, ocasionando el aumento de la temperatura del aire y de la superficie terrestre más allá de los niveles normales.

4.3. Ciclo del carbono

El carbono (C) es un elemento fundamental de los compuestos orgánicos, en los que se combina con nitrógeno, fósforo, azufre, oxígeno e hidrógeno para constituir las moléculas más importantes para la vida. Circula entre la materia orgánica y el ambiente físico-químico de manera constante. El movimiento del C ocurre a diferentes escalas, espacio-temporal, que va desde el nivel molecular pasando por el organismo hasta el global. En su unión molecular con el oxígeno, constituye el bióxido de carbono (CO₂), gas resultante de procesos tanto geoquímicos como biológicos y cuya presencia en la atmósfera es fundamental en la regulación de la temperatura del planeta debido a sus propiedades como gas de invernadero (Jaramillo, 2004).

Oliva y García-Oliva (1998), describen que, la incorporación de C al suelo en los ecosistemas naturales se lleva a cabo por dos vías principales: por el mantillo (capa superficial de materia vegetal) y por la biomasa radicular. La velocidad de la descomposición de este material depende de las poblaciones microbianas existente en el suelo y de las características del material vegetal, cuando el material llega al suelo, primero se descomponen las formas más sencillas (carbohidratos) aumentando la actividad microbiana y que después serán degradados los compuestos más complejos con

una menor velocidad y actividad microbiana. Esto sugiere que la entrada de C nuevo al mantillo y al suelo es muy importante para mantener activas a las poblaciones microbianas. La incorporación de C nuevo es por medio de la vegetación, por lo que la producción y la fenología son otros mecanismos que controlan el flujo de C atmósfera - planta – suelo. El carbono excedente de la fotosíntesis ha sido acumulado durante millones de años en forma de petróleo, gas natural y carbón, los cuales han sido llamados “combustibles fósiles” (Amézqita *et al.*, 2005).

Martínez *et al.* (2008) mencionan que el suelo es un importante compartimiento dentro del ciclo global del C. Además, el suelo puede actuar como fuente o reservorio de C hacia la atmósfera, dependiendo del uso que se le asigne. El manejo agrícola convencional de suelos, con uso intensivo del arado, promueve la liberación de C hacia la atmósfera, mientras que el uso conservacionista favorece la acumulación de C en formas orgánicas dentro del suelo.

4.4. Captura de carbono

Consiste en el almacenamiento de carbono en suelos y bosques y otros tipos de vegetación (Nájera, 1999). Los suelos contienen el mayor reservorio de C terrestre y por medio de la respiración microbiana del suelo, contribuye a un flujo anual de CO₂ hacia la atmósfera que es 10 veces mayor que el proveniente de combustibles fósiles. Por ello el cultivar en suelos vírgenes o convertir ecosistemas naturales en agrícolas, ocasiona el agotamiento del almacén de C en el suelo, el cual se ha calculado que la pérdida de 1 Pg. de C terrestre es equivalente a un enriquecimiento de C atmosférico de 0.47 ppmv (partes por millón volumen de gas) (Muñoz, 2006). De acuerdo con FAO (2000), la reserva global de C en el suelo asciende a 2, 500 Gt (gigatonelada) y se divide en las formas de Carbono

Inorgánico del Suelo (CIS) y Carbono Orgánico del Suelo (COS). Martínez-Vera (2010), señala que el COS es importante en el ciclo global del C, ya que constituye el reservorio terrestre más grande de este elemento.

Según Paz (2010), el secuestro de C en los suelos puede lograrse principalmente por incremento en las tasas de entrada de materia orgánica (MO), incremento en las tasas de descomposición de la MO, reducción de las tasas de pérdida de C por respiración del suelo, colocación de MO a mayor profundidad y mejora de la protección física o química de los suelos. Para poder conservar el suelo es condición necesaria que la cobertura de la vegetación no se reduzca (deforestación de vegetación o degradación de cobertura), de tal manera que el carbono orgánico de los suelos (COS) no se pierda en forma irreversible.

4.5. Dinámica del carbono en matorrales

Los matorrales son comunidades vegetales por lo general arbustivas, aunque las hay también arbóreas, e incluyen elementos tanto caducifolios como subcaducifolios, inermes, subinermes o espinosos, cuya predominancia relativa varía de una comunidad a otra (INEGI, 1990). Estas comunidades son propias de las zonas áridas y semiáridas del país, y ocupan aproximadamente el 40 % de la superficie, por lo que es el tipo de vegetación que mayor cobertura tiene sobre el territorio.

El matorral sarcocaula en México ocupa 5.21 millones de hectáreas representando el 2.65 % de la superficie del país (Challenger y Soberón, 2008) conformado por arbustos de tallos carnosos o jugosos, algunos con corteza papirácea como *Bursera* spp. (Raymundo *et al.*, 2013).

Becerril (2007), menciona que en México se han desarrollado varios trabajos sobre estimaciones de contenido de carbono, pero ninguno en matorral, vegetación característica de las zonas semiáridas que cubren la mayor parte de la superficie del territorio nacional, desconociéndose así su potencial.

V. MATERIALES Y MÉTODOS

5.1. Ubicación del área de estudio.

El estudio se llevó a cabo en una sección de la Sierra el Sarnoso. La sierra abarca un área de 61.594 km², y se localiza a lado noreste del municipio de Lerdo, Durango, colindando al lado oeste con la localidad denominada como Dinamita, perteneciente al municipio de Gómez palacio, Durango (Figura 1) (INEGI, 2012).

5.2. Topografía.

La mayor parte del área denominada sierra del sarnoso está conformada por un macizo montañoso integrado por dos sierras: Sierra Mapimí y Sierra el Sarnoso. Este macizo montañoso se encuentra dividido en el centro por un derrumbamiento, al parecer por la emergencia de una burbuja de magma durante el terciario medio, llamado por los especialistas “El Sarnoso Stock” que tiene una edad entre 22 a 25 millones de años (García-Padilla y Armenta-Roman, 2008) citado por (Czaja, 2009). Este evento geológico formo un circulo de granito y a su alrededor vetas de mármol y travertinos. Desde una vista superior la formación se asemeja a un cráter y el contorno de ese cráter son los límites de la zona núcleo o valle de piedras encimadas.

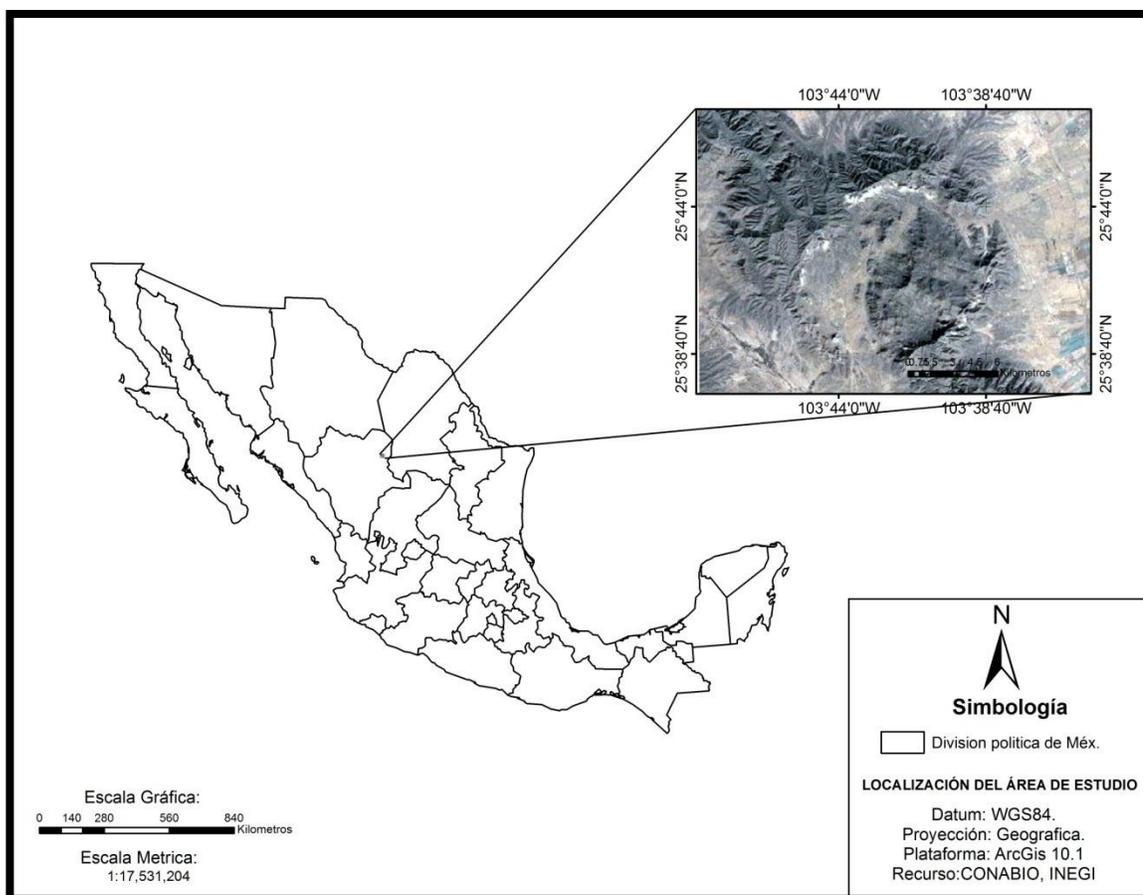


Figura 1. Localización del área del proyecto.

5.3. Muestreo y toma de datos en campo.

Se realizó un muestreo aleatorio estratificado y sub-muestreo simple al azar (Mostacedo-Fredericksen, 2000; Martella *et al.*, 2012), en primera instancia, se hicieron recorridos en campo para ubicar los sitios de muestreos. Se identificaron visualmente nueve sitios, los cuales fueron de tres diferentes densidades de cobertura vegetal: tres son de tipo abierta, tres de semi-abierta y tres de tipo cerrada. Para cada tipo de cobertura se implementaron transectos de 100 m² (2 X 50 m) (Becerril *et al.*, 2014). La posición geográfica de los transectos se muestra en el Cuadro 1.

5.4. Tamaño de muestra

El tamaño mínimo de muestra, se determinó mediante el uso de las siguientes ecuaciones:

$$n = Z^2 * \frac{(p) * (1-p)}{d^2}$$

Donde:

n: tamaño mínimo de muestra

z: nivel de confianza: mide la confiabilidad de los resultados. El cual es al 95% (1.96).

p: probabilidad de ocurrencia: probabilidad de que ocurra el evento. Lo usual es utilizar una probabilidad de ocurrencia del 50%.

d: error absoluto esperado, expresado en decimal

$$n \text{ corregida} = \frac{n}{1 + \frac{n-1}{Tp}}$$

Donde:

n: tamaño mínimo de muestra

Tp: tamaño poblacional conocido (Hernández, 2006).

Los tres tipos diferentes en densidad de cobertura vegetal, el número de sitio y la cantidad de individuos por cada uno de los tres sitios se muestran en el cuadro 2.

Cuadro 1. Tamaño de muestra en número de individuos en diferentes sitios de muestreo.

Densidad	Sitio	Número de Individuos
Cerrada	1	37
Cerrada	7	44

Cerrada	8	45
Semi abierta	2	21
Semi abierta	4	25
Semi abierta	6	24
Abierta	3	20
Abierta	5	21
Abierta	9	20

Una vez determinado el tamaño de la muestra para los sitios se procedió a etiquetar todos los individuos de *Agave lechuguilla*, mediante la numeración consecutiva en cada sitio, esto para poder seleccionar los individuos de la muestra de manera aleatoria, aplicando muestreo aleatorio simple mediante números aleatorios con una calculadora, para que todos tuvieran la misma probabilidad de ser escogidos.

5.5. Variables medidas

A los individuos seleccionados para la muestra, se les tomaron las medidas morfológicas de altura y diámetro de la copa (diámetro mayor y diámetro menor). Los datos se anotaron en la libreta de campo, para posteriormente obtener la cobertura vegetal.

La cobertura vegetal en especies que tiene la forma de la copa cilíndrica, como es el caso de la especie *Agave lechuguilla*, se utiliza la siguiente fórmula:

$$\text{Cobertura vegetal} = \pi \left[\frac{\text{Diámetro mayor} + \text{Diámetro menor}}{4} \right]^2, \text{ (Ramírez G. A., 2006).}$$

En los sitios establecidos se calculó frecuencia, dominancia y densidad, estos datos nos ayudaron a construir el índice de valor de importancia (IVI).

La densidad es un parámetro que permite conocer la abundancia de una especie o una clase de plantas. La densidad (D) es el número de individuos (N) en un área (A) determinada y fue estimada con la siguiente ecuación:

$$D = N/A$$

La frecuencia se define como la probabilidad de encontrar un atributo (por ejemplo una especie) en una unidad muestral y se mide en porcentaje. En otras palabras, este porcentaje se refiere a la proporción de veces que se mide en las unidades muestrales en relación a la cantidad total de unidades muestrales.

En el método de transectos o cuadrantes, la frecuencia relativa sería la relación de los registros absolutos de la presencia de una especie en los sub-transectos o sub-cuadrantes, en relación al número total de registros para todas las especies.

La fórmula general de la frecuencia relativa es: $FR = (a_i/A) * 100$, donde: a es igual al número de apariciones de una determinada especie, y A es igual al número de apariciones de todas las especies.

El índice de valor de importancia es un parámetro que mide el valor de las especies, típicamente con base en tres parámetros principales: dominancia, densidad y frecuencia. El índice de valor de importancia (I.V.I.) es la suma de estos tres parámetros. Este valor revela la importancia ecológica relativa de cada especie en una comunidad vegetal.

El I.V.I. es un mejor descriptor que cualquiera de los parámetros utilizados individualmente. Para obtener el I.V.I., es necesario transformar los datos de abundancia, densidad y frecuencia en valores relativos. La suma total de los valores relativos de cada parámetro debe ser igual a 100. Por lo tanto, la suma total de los valores del I.V.I. debe ser igual a 300.

5.6. Índice de área Foliar

El índice de área foliar (IAF) se determinó con un medidor de Índice de área foliar (LAI) LICOR 2000. En la medición para determinar el índice foliar de la especie vegetal se tomó a cada 45° una lectura para obtener un mejor promedio de área foliar.

En primer lugar se efectuó la calibración del medidor LAI y se colocó el ojo de 90° en el lector, posteriormente se tomaron a cada 45° las 4 lecturas totales correspondientes de la especie vegetal para su respectivo análisis de índice de área foliar. El mismo procedimiento se llevó a cabo para los 9 sitios muestreados.

5.7. Evaluación de biomasa

La evaluación de biomasa se realizó de acuerdo a los muestreos destructivos, estos son difíciles y caros, especialmente en este tipo de ecosistemas dado su condición de fragilidad y el alto costo que implica la destrucción de componentes tan importantes en la formación de islas de fertilidad (Geesing *et al.*, 2000). Ante tal situación, el tamaño de muestra ayudo a extraer solo los individuos requeridos en la especie *Agave lechuguilla*.

La extracción de los individuos se realizó al azar dentro de cada sitio de muestreo. Cada una de las plantas muestreadas se dividieron en raíz y roseta. A cada una de las muestras (raíz y roseta) se pesó y colocó una etiqueta colgante de cartón con los datos: número de sitio, numeración del individuo y el peso fresco.

Una vez etiquetadas las muestras se trasladaron a un invernadero de cristal ubicado al interior de las instalaciones de la Universidad Autónoma de Chapingo-URUZA Unidad Bermejillo ahí se mantuvieron hasta que las muestras tuvieran el peso constante (peso

seco) y así obtener el contenido de carbono orgánico. Este procedimiento se aplicó en cada uno de los nueve sitios.

5.8. Cuantificación de Biomasa.

Para determinar la biomasa, en primer lugar se determinó el peso seco, el valor de biomasa en kilogramos fue dividido entre 1,000 para obtener toneladas. Las toneladas son multiplicadas por 0.5 para obtener carbono. La razón por la que se multiplica por 0.5 para obtener carbono se debe a que la literatura indica que en promedio la materia vegetal contiene un 50% de carbono, una vez se ha removido el agua (MacDicken, 1997).

Las variables obtenidas como: Índice de área foliar, altura y diámetro de la copa (diámetro mayor y diámetro menor) así como el carbono en raíz, carbono en roseta y carbono total en planta fueron la base para obtener un modelo sencillo para estimar carbono.

Estos datos ayudaron para cotejar los datos obtenidos con el muestreo no destructivo y poder así desarrollar modelos alométricos que permitan realizar estimaciones de contenido de carbono de manera confiable y rápida para la especie *Agave lechuguilla*.

5.9. Análisis estadísticos

Se llevó a cabo un análisis de regresión. Un requisito básico para el análisis de regresión es que los datos a utilizar provengan de una población con distribución normal (Sokal y Rohlf, 1973).

Se realizaron los análisis estadísticos con el paquete estadístico SAS 9.3, donde se efectuó la prueba de normalidad con la prueba de Shapiro-Wilk.

En virtud de que los datos no cumplían con las características de la distribución normal, se realizó la transformación de las variables con logaritmo natural. Una vez obtenidos los datos transformados, se desarrollaron las pruebas de medias con la prueba de Tukey y ANOVA.

Además se llevó a cabo la prueba de Pearson para la correlación entre las variables y finalmente la construcción de una ecuación mediante el modelo de Backward Stepwise Regression. Los criterios para la selección del mejor modelo fueron los mayores valores de R^2 y el menor valor del cuadrado medio del error.

VI. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La cuantificación de la captura de carbono en la especie vegetal *Agave lechuguilla* mediante la implementación de una ecuación alométrica basada en parámetros morfométricos como son altura, largo y ancho de la planta, es una de las formas en que se puede estimar de manera más precisa que con métodos indirectos.

Para la definición de las ecuaciones alométricas en este estudio, se extrajeron totalmente algunos individuos de la especie. Sin embargo, esta acción nos permitió obtener una ecuación alométrica para determinar la captura de carbono. Una de las ventajas que tendría este método es que ya una vez obtenida la ecuación se puede aplicar en cualquier ambiente natural en que se encuentre esta especie vegetal, además de que será relativamente sencilla y fácil de aplicar.

6.1. Caracterización de la vegetación.

El índice de valor de importancia es indicativo de la importancia ecológica relativa de cada especie en una comunidad vegetal. Los resultados de este estudio permitieron identificar que las especies clave para el sistema son: *Agave lechuguilla*, *Jatropha dioica*, *Agave aspérrima* y *Larrea tridentata* (Cuadro 3). Por lo tanto, si estas especies se extraen del sistema la estructura, cobertura y función se vería seriamente afectada ya que son poblaciones dominantes en zonas áridas de México y con una gran cobertura, que no solo funcionan como especies anuales, ya que aun cuando estas se secan, permanecen en el suelo, evitando así la erosión hídrica.

En los sitios de cobertura vegetal cerrada la densidad de *A. lechuguilla* fue de 4.74 individuos/m², seguida de *J. dioica* con una densidad de 0.76 individuos/m². El análisis

de abundancia muestra que *Agave lechuguilla* ocupa el 73% del territorio del sitio muestreado (Cuadro 3). Se identificaron hasta 1421 individuos en los sitios de densidad cerrada, lo cual es importante para el sistema debido al papel ecológico que juega esta especie Eguiarte y Souza 2007, documentan que las poblaciones naturales, son indicadores de los polinizadores nocturnos y diurnos, tales como murciélagos, colibríes y las abejas principalmente, la cual se refleja directamente en la fecundidad de las plantas y son los que se encargan de asegurar la producción de frutos y semillas.

Bautista y Martínez (2012) mencionan que *A. lechuguilla* constituye un valioso recurso ecológico, ya que tiene varias funciones importantes, pues además de la formación, conservación y retención del suelo, tiene un papel muy eficaz contra el impacto de los procesos erosivos.

Cuadro 2. Análisis de abundancia, frecuencia, dominancia e índice de valor de importancia en los sitios de densidad de cobertura vegetal cerrada.

Especie	Ab	Ab. R. %	Frec.	Frec. R. %	D(#/m ²)	D. Rel. %	IVI
<i>Agave Lechuguilla</i>	1421	73.0591	3	7.1429	4.737	73.0591	51.0870
<i>Jatropha dioica</i>	228	11.7224	3	7.1429	0.760	11.7224	10.1959
<i>Opuntia rastrera</i>	13	0.6684	2	4.7619	0.043	0.6684	2.0329
<i>Fouquieria splendens</i>	20	1.0283	2	4.7619	0.067	1.0283	2.2728
<i>C. leptocaulis</i>	11	0.5656	2	4.7619	0.037	0.5656	1.9643
<i>E. stramineus</i>	24	1.2339	1	2.3810	0.080	1.2339	1.6163
<i>E. fasciculatus</i>	47	2.4165	1	2.3810	0.157	2.4165	2.4046
<i>Lippia graveolens</i>	2	0.1028	1	2.3810	0.007	0.1028	0.8622
<i>Tecoma stans</i>	3	0.1542	2	4.7619	0.010	0.1542	1.6901
<i>Acacia farneciana</i>	10	0.5141	2	4.7619	0.033	0.5141	1.9301
<i>Larrea tridentata</i>	32	1.6452	3	7.1429	0.107	1.6452	3.4778
<i>Agave asperrima</i>	35	1.7995	3	7.1429	0.117	1.7995	3.5806
<i>Yucca filifera</i>	4	0.2057	2	4.7619	0.013	0.2057	1.7244
<i>Prosopis glandulosa</i>	2	0.1028	1	2.3810	0.007	0.1028	0.8622
<i>E. antisiphilitica</i>	33	1.6967	1	2.3810	0.110	1.6967	1.9248
<i>L. frutescens</i>	21	1.0797	2	4.7619	0.070	1.0797	2.3071
<i>C. imbricata</i>	3	0.1542	2	4.7619	0.010	0.1542	1.6901

Ab= Abundancia, Ab. R.= Abundancia Relativa, Frec.= Frecuencia, Frec. R.= Frecuencia Relativa, D=Densidad, D. Rel.= Densidad relativa, IVI = índice de valor de importancia.

El índice de valor de importancia estimado en los sitios de cobertura semiabierto indica que las especies clave para este sistema son: *Agave lechuguilla*, con una presencia del 38 % seguida por *Jatropha dioica* con un 16% y *L. graveolens* con un 8% respectivamente, la abundancia de *Agave lechuguilla* en este sitio fue de 139 individuos en 0.03 Ha con una densidad de individuos por metro cuadrado de 0.463 como se muestra en el Cuadro 4. Las especies menos abundantes con solo 2 individuos o 1 en el sitio de densidad de cobertura vegetal semiabierto son: *F. splendens*, *L. tridentata*, *A. aspérrima*. Estas especies menos representadas en la comunidad pueden ser más sensibles a perturbaciones ambientales, en este sitio por ejemplo la dominancia que mostraron sus competidores como *Agave lechuguilla* y *J. dioica*.

Cuadro 3. Muestra las especies importantes en los tres sitios con la misma densidad de cobertura vegetal semiabierto, basado con el análisis del índice de valor de importancia.

Especie	Ab.	Ab. R. %	Frec.	Frec. R. %	D(#/m ²)	D. Rel. %	IVI
<i>A. Lechuguilla</i>	139	51.8657	3	12	0.463	51.8657	38.5771
<i>Jatropha dioica</i>	57	21.2687	2	8	0.190	21.2687	16.8458
<i>Acacia greggii</i>	5	1.8657	2	8	0.017	1.8657	3.9104
<i>L. graveolens</i>	17	6.3433	3	12	0.057	6.3433	8.2289
<i>C. imbricata</i>	6	2.2388	2	8	0.020	2.2388	4.1592
<i>Agave aspérrima</i>	2	0.7463	1	4	0.007	0.7463	1.8308
<i>Tecoma stans</i>	3	1.1194	2	8	0.010	1.1194	3.4129
<i>Larrea tridentata</i>	2	0.7463	1	4	0.007	0.7463	1.8308
<i>A. farneciana</i>	6	2.2388	1	4	0.020	2.2388	2.8259
<i>Opuntia rastrera</i>	2	0.7463	1	4	0.007	0.7463	1.8308
<i>F. splendens</i>	1	0.3731	1	4	0.003	0.3731	1.5821
<i>Jacaranda sp</i>	3	1.1194	1	4	0.010	1.1194	2.0796
<i>C. leptocaulis</i>	5	1.8657	1	4	0.017	1.8657	2.5771
<i>Yucca filifera</i>	6	2.2388	1	4	0.020	2.2388	2.8259

Ab= Abundancia, Ab. R.= Abundancia Relativa, Frec.= Frecuencia, Frec. R.= Frecuencia Relativa, D=Densidad, D. Rel.= Densidad relativa, IVI = Índice de valor de importancia.

El índice de valor de importancia en los sitios de cobertura abierta indico que las especies clave para este sistema son: *Agave lechuguilla*, *Larrea tridentata*, *Jatropha dioica* y *Acacia farneciana*, como se muestra en el (Cuadro 5). El análisis de abundancia mostró 108, 34 y 29 individuos de *A. lechuguilla*, *J. dioica* y *L. tridentata*, respectivamente.

Cuadro 4. Muestra las especies importantes en los tres sitios con la misma densidad de cobertura vegetal abierta, basado en el análisis del índice de valor de importancia.

Especie	Ab.	Ab.R.%	Frec.	Frec.R.%	D(#/m ²)	D. Rel.%	IVI
<i>Agave lechuguilla</i>	108	47.5771	3	13.6364	0.36	47.5771	36.2635
<i>Larrea tridentata</i>	29	12.7753	3	13.6364	0.097	12.7753	13.0623
<i>Acacia farneciana</i>	10	4.4053	3	13.6364	0.033	4.4053	7.4823
<i>Jatropha dioica</i>	34	14.9780	2	9.0909	0.113	14.9780	13.0156
<i>Fouquieria splendens</i>	1	0.4405	1	4.5455	0.003	0.4405	1.8088
<i>Tecoma stans</i>	2	0.8811	1	4.5455	0.007	0.8811	2.1025
<i>Opuntia rastrera</i>	4	1.7621	1	4.5455	0.013	1.7621	2.6899
<i>Opuntia microdasys</i>	3	1.3216	1	4.5455	0.010	1.3216	2.3962
<i>Agave aspérrima</i>	7	3.0837	1	4.5455	0.023	3.0837	3.5710
<i>E. antisiphilitica</i>	6	2.6432	2	9.0909	0.020	2.6432	4.7924
<i>Yucca filifera</i>	4	1.7621	1	4.5455	0.013	1.7621	2.6899
<i>C. leptocaulis</i>	3	1.3216	1	4.5455	0.01	1.3216	2.3962
<i>Lippia graveolens</i>	7	3.0837	1	4.5455	0.023	3.0837	3.5710
<i>E. fasciculatus</i>	9	3.9648	1	4.5455	0.030	3.9648	4.1583

Ab= Abundancia, Ab. R.= Abundancia Relativa, Frec.= Frecuencia, Frec. R.= Frecuencia Relativa, D=Densidad, D. Rel.= Densidad relativa, IVI = Índice de valor de importancia.

Los resultados obtenidos por el Índice de valor de importancia (IVI) en los tres diferentes sitios de cobertura vegetal (Cerrado, Semiabierto y Abierto) Indicaron que la especie con alto valor importante fue *Agave lechuguilla* con un 51% de importancia en área cerrada, 38% en semiabierta y 36 % en área abierta esto debido a que *Agave*

lechuguilla es una especie abundante, y posee un mayor número de individuos en poblaciones naturales.

Esto concuerda con lo mencionado por Hernández *et al.* (2004) en el sentido de que que la mayor preponderancia de las cactáceas y otras suculentas en el área estudiada se entiende por la afinidad de esta familia por las zonas áridas de México. Treviño-Carreón y Hernández-Sandoval (2000) mencionan que esto ocurre en otras regiones con presencia de matorrales rosetófilos como los de Querétaro.

Sin embargo, la especie *Jatropha dioica*, mostró un comportamiento diferente en los tres diferentes sitios, la mayor presencia se ocurrió en sitios con densidad semiabierto con un 38%, seguida por área abierta con 13% y cerrada con 10%.

Larrea tridentata mostró mayor importancia en el área abierta con 13% seguida por el área cerrada con 3% y por ultimo área semiabierto con 1%. Como se muestra en el Cuadro 6.

Cuadro 5. Índice de valor de importancia (IVI) de las especies vegetales identificadas en los tres tipos de densidad de cobertura vegetal.

Especie	IVI	IVI	IVI
<i>Agave Lechuguilla</i>	51.087	38.5771	36.2635
<i>Jatropha dioica</i>	10.1959	16.8458	13.0156
<i>Larrea tridentata</i>	3.4778	1.8308	13.0623
<i>Opuntia rastrera</i>	2.0329	1.8308	2.6899
<i>Fouquieria splendens</i>	2.2728	1.5821	1.8088
<i>Acacia farneciana</i>	1.9301	2.8259	7.4823
<i>Agave asperrima</i>	3.5806	1.8308	3.571
<i>Lippia graveolens</i>	0.8622	8.2289	3.571
<i>Yucca filifera</i>	1.7244	2.8259	2.6899
<i>Tecoma stans</i>	1.6901	3.4129	2.1025
<i>C. leptocaulis</i>	1.9643	2.5771	2.3962
<i>C. imbricata</i>	1.6901	4.1592	N/P
<i>E. fasciculatus</i>	2.4046	N/P	4.1583

Especie	IVI	IVI	IVI
<i>L. frutescens</i>	2.3071	N/P	N/P
<i>E. antisyphilitica</i>	1.9248	N/P	4.7924
<i>E. stramineus</i>	1.6163	N/P	N/P
<i>Prosopis glandulosa</i>	0.8622	N/P	N/P
<i>Acacia greggii</i>	N/P	3.9104	N/P
<i>Jacaranda sp</i>	N/P	2.0796	N/P
<i>Opuntia microdasys</i>	N/P	N/P	2.3962

El índice de valor de importancia muestra que las especies clave para el sistema son: *Agave lechuguilla*, *Jatropha dioica*, *Larrea tridentata* y *Opuntia rastrera* (Cuadro 6), es decir, si estas especies se extraen del sistema la estructura, cobertura y función se vería seriamente afectada, esto en función de que la lechuguilla, gobernadora y sangre de drago conforman áreas con microclimas formadores de islas de fertilidad, en el caso de *Agave lechuguilla* son comunidades muy dominantes, que no solo funcionan como especies anuales, ya que aun y cuando estos se secan, permanecen en el suelo, evitando así la erosión hídrica y la humedad.

6.2. Caracterización de las poblaciones de *A. lechuguilla*

Se obtuvo un total de 257 plantas, en donde, 126 fueron de la densidad de cobertura vegetal cerrada, 70 de la densidad semiabierta y 61 de la densidad abierta.

En la cobertura de densidad cerrada se observó una variación en altura de 0.50 a 0.70 m, con una media de 0.54 m, mientras que la densidad semi abierta fue de 0.50 a 0.71 m y una media de 0.57 m y en la densidad abierta de 0.50 a 0.63 con una media 0.53 m (Figura 2).

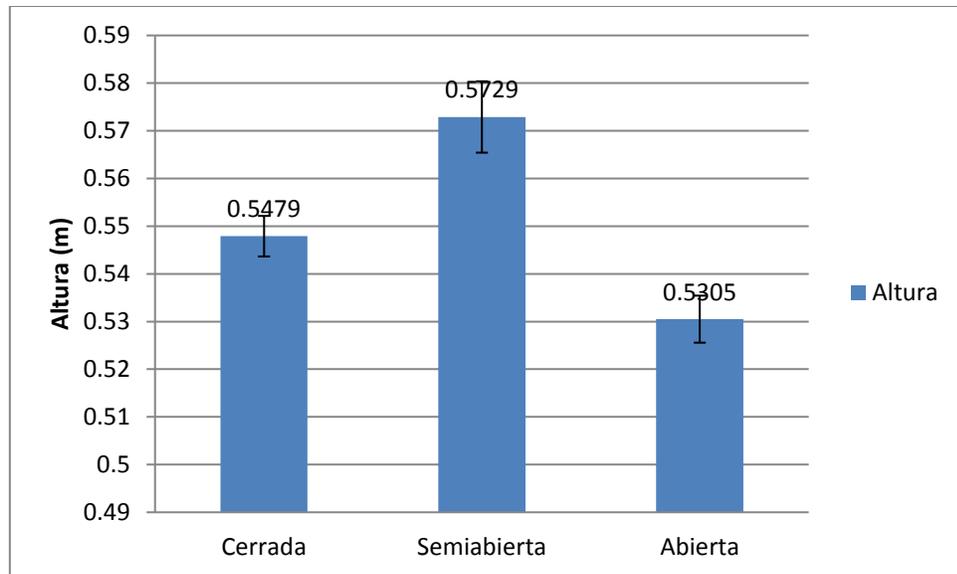


Figura 2. Diferencia en altura (m) de la planta Agave lechuguilla bajo los tres tipos de densidad de cobertura vegetal.

El diámetro mayor, para cobertura cerrada fue de 0.23 m a 0.85 m, con una media de 0.51 m, 0.28 m a 0.98 m en área semiabierta con una media de 0.64 m y 0.18 m a 0.80 m para el área de la densidad abierta con una media de 0.41 m. En los tres tipos de densidad la media fue de 0.52 m.

Para la variable diámetro menor los valores máximos y mínimos en los tres tipos de densidad se presentaron de la siguiente forma: densidad cerrada 0.12 a 0.70 m con una media de 0.40 m, en el área semi abierta 0.21 m a 0.72 m con una media de 0.45 m y por ultimo abierta 0.15 m a 0.63 m con una media de 0.33 m. Para los tres tipos de densidad de cobertura el diámetro menor promedio fue de 0.40 m (Figura 3).

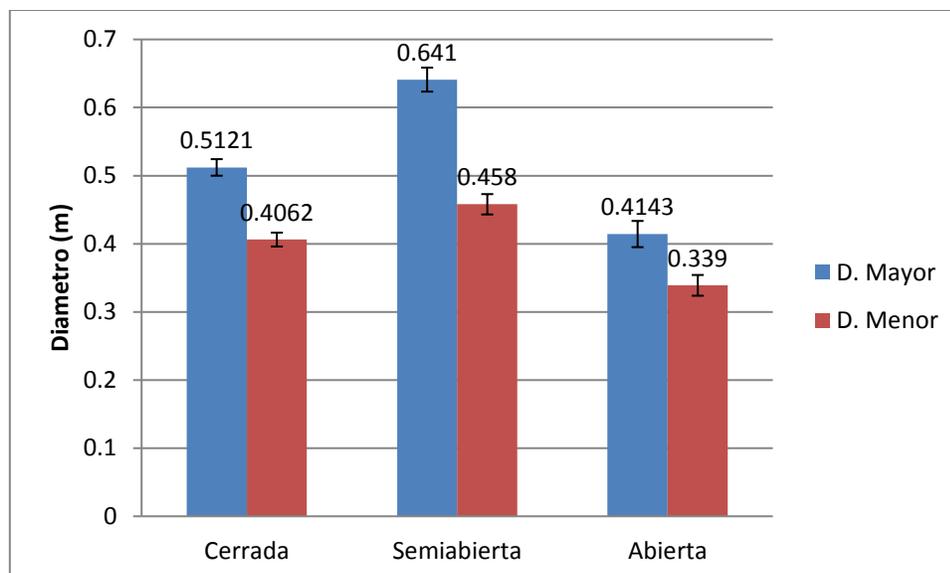


Figura 3. Diferencia entre el diámetro mayor y diámetro menor en las tres diferentes densidades de cobertura vegetal.

6.3. Análisis Coeficiente de correlación de Pearson.

Para determinar la relación de contenido de carbono que muestra la especie (*Agave lechuguilla*) con las variables: Altura, Diámetro de la copa (Diámetro mayor y Diámetro menor) y cobertura se llevaron a cabo correlaciones entre estas variables con el paquete estadístico SAS.

Cuadro 6. Coeficiente de Correlación de Pearson de los contenidos de carbono y las características morfológicas de la planta *Agave lechuguilla*.

	C. roseta	C. raíz	Ctp
Altura	0.5638	0.3239	0.5631
	0.0003	0.0505	0.0003
Diámetro Mayor	0.7039	0.5606	0.7137
	<.0001	0.0003	<.0001
Diámetro Menor	0.6985	0.6347	0.7136
	<.0001	<.0001	<.0001
LAI	0.0558	0.2347	0.0696
	0.7425	0.162	0.682

C. roseta = Carbono en roseta, C. raíz = Carbono en raíz y Ctp.
= Carbono total en planta.

La correlación de Pearson indica las variables que tienen un alto factor de correlación, como es el caso de diámetro mayor con carbono total de planta, seguida por la variable diámetro menor y altura con una significancia ($P \geq 0.05$).

6.4. Generación de ecuación

Las ecuaciones o modelos se obtuvieron mediante análisis de regresión empleando las variables de cobertura, diámetro mayor, diámetro menor, altura, peso seco y el carbono estimado.

Cuadro 7. Modelos de predicción en captura de carbono

Característica	Variable	Parámetros	R ²	CME
	Cobertura	0.00014907		
Carbono en roseta	Diámetro Mayor	-0.00406	0.8847	0.01435
	Altura	0.00455		
Carbono raíz	Diámetro menor	0.00067765	0.7305	0.0005019
	Altura	0.00014941		
Carbono total	Cobertura	0.00012064		
	Diámetro mayor	-0.00335	0.8908	0.01672
	Diámetro menor	0.00235		
	Altura	0.00376		

Al analizar las variables de la planta de *Agave lechuguilla* Torr. se lograron establecer modelos para estimación de carbono en diferentes partes de la planta y el total

(cuadro 8) los parámetros que se tomaron a consideración fueron el conjunto de variables que mostraran la mayor R^2 y un cuadrado medio del error mínimo. A continuación se presentan los modelos:

Cuadro 8. Modelos de estimación de carbono en roseta, raíz y carbono total

Modelo	R^2	CME
Carbono roseta= 0.00014907 cobertura -0.00406 D. mayor + 0.00455 altura	0.8847	0.01435
Carbono raiz= 0.00067765 D. menor + 0.00014941 Altura.	0.7305	0.005
Carbono total= 0.00012064 cobertura - 0.00335 D mayor + 0.00235 D menor + 0.00376Altura	0.8908	0.0167

El modelo que mejor se ajustó para predecir el contenido de carbono es el de carbono total con un $R^2= 0.89$

6.5. Efecto de la densidad en el secuestro de carbono

La captura de carbono medida en las diferentes partes de la planta de *Agave lechuguilla* mostro efecto significativo ($P < 0.05$) cuando la densidad de planta por sitio fue de abierta hasta cerrada (Cuadro 9).

Cuadro 9. Varianza de contenido de carbono en los tejidos en las tres densidades de cobertura vegetal.

Variable	Probabilidad
Craiz	0.4138
Croseta	0.0001

Ctotal 0.0004

Contenido de carbono (CC) secuestrado en roseta de (*Agave lechuguilla* Torr., 1859.) bajo las tres densidades de coberturas vegetales.

Cuadro 10. Promedio de carbono en raíz roseta y total \pm error estándar (EE) por densidad de sitio.

Densidad	Secuestro de carbono Kg \pm EE		
	Roseta	Raíz	total
Abierta	0.2502 ± 0.165^b	0.0412 ± 0.0038^a	0.2914 ± 0.0188^b
Semi abierta	0.3167 ± 0.0191^a	0.0327 ± 0.0016^a	0.3528 ± 0.0213^a
Cerrada	0.3382 ± 0.0150^a	0.0363 ± 0.0030^a	0.3708 ± 0.0157^a

*Efectos medios con la misma letra son iguales ($P \leq 0.05$, Tukey)

La captura de carbono en área cerrada $\bar{X} = 0.3382$ y semi abierta $\bar{X} = 0.3167$ fue similar con una tendencia mayor hacia el área cerrada. El área abierta $\bar{X} = 0.2502$ indico diferencia con respecto a las otras áreas.

Contenido de carbono Kg (CC) secuestrado en planta de (*Agave lechuguilla* Torr., 1859) bajo las tres densidades de coberturas vegetales.

La captura de carbono en área cerrada indico una $\bar{X} = 0.3708$ Kg y semi abierta $\bar{X} = 0.3528$ fue similar con una tendencia mayor hacia el área cerrada. El área abierta mostro una $\bar{X} = 0.2914$ que indico una diferencia con respecto a las áreas anteriores. Lo cual pone en manifiesto que el área cerrada se comporta de forma positiva en la captura de carbono para la especie *Agave lechuguilla*.

La captura de carbono en raíz de la planta *Agave lechuguilla* en los tres sitios de cobertura vegetal no mostró diferencia significativa, esto pudo deberse a la forma en que se llevó a cabo el muestreo de las raíces, ya que una parte de la masa de la raíz pudo no haber sido recuperada (Cuadro 11). La captura promedio en raíz arrojó los siguientes resultados:

Área abierta $\bar{X} = 0.0412$ Kg, Área semiabierta $\bar{X} = 0.0363$ Kg y Área Cerrada $\bar{X} = 0.0327$ Kg

El valor de carbono obtenido en la superficie de las parcelas de muestreo se extrapoló a para obtener el secuestro de carbono por hectárea (tC/ha) (Marquez, 2000).

El secuestro de carbono estimado se muestra en el Cuadro 14.

Cuadro 11. Contenido de carbono en las diferentes densidades de cobertura.

	Carbono secuestrado		
	Kg	g m ⁻²	ton/ha
Área cerrada	46.679	0.1555	1.555966667
Área Semiabierta	24.697	0.0823	8.23233E-09
Área Abierta	17.7525	0.0591	5.9175E-09

Se encontró una tendencia entre las densidades de cobertura siendo la densidad de cobertura cerrada la que mostró mayor secuestro de carbono 0.155 gm² seguida por el área semiabierta con 0.082 gm² y por último la cobertura con menor capacidad de secuestrar carbono en poblaciones de lechuguilla fue la abierta con 0.059 gm²

VII. CONCLUSIONES

El modelo alométrico propuesto para predecir el contenido de carbono de la especie dominante *Agave lechuguilla* en la Sierra del sarnoso, tuvo un valor alto del coeficiente de determinación ($R^2 > 0.89$) utilizando las variables cobertura diámetro mayor diámetro menor y altura.

Las variables independientes que utilizan las ecuaciones generadas para estimar captura de carbono en *Agave lechuguilla* son de fácil medición en campo por lo que el modelo es de uso práctico.

Se encontró una diferencia significativa en el contenido de carbono en la especie *Agave lechuguilla* Torr., 1859. Con respecto a los diferentes tipos de densidades de cobertura vegetal.

En las condiciones en que se llevó a cabo este estudio no se encontró una relación significativa entre el índice del área foliar y el contenido de carbono.

VIII. LITERATURA CITADA

- Amézquita, M.C., Murgueitio, E.R., Cuartas, C.A y Gómez, M.E. 2005. Almacenamiento de carbono en ecosistemas terrestres para mitigar el cambio climático global. Red de Investigación para evaluar la capacidad de captar Carbono en sistemas de pasturas Agropastoriles y agrosilvopastoriles en subecosistemas del bosque tropical de América. ISBN 958-9386-49-0. Pág. 20-26.
- Becerril, P.R. 2007. Estimación del contenido y captura de carbono en zonas semiáridas microcuenca “el Carmen”, Gto. Tesis de Maestría. Universidad Autónoma de Querétaro. Maestría en Gestión Integrada de Cuencas.
- Blando J.L., Baca M. 2001. Determinación del potencial productivo de la lechuguilla (*Agave lechuguilla* TORR) en el municipio de San Juan de Guadalupe, DGO. Revista Chapingo Serie Zonas Arias. 100-105
- Challenger, A., y J. Soberón. 2008. Los ecosistemas terrestres, en Capital natural de México, vol. I: Conocimiento actual de la biodiversidad. CONABIO, México, pp. 87-108.
- Chave J, Condit R, Lao S, Caspersen J, Foster R, Hubbell S. 2003. Spatial and temporal variations of biomass in a tropical forest: results from a large census plot in panama. Journal of Ecology 91: 240-252.
- CONAFOR. 2005. <http://www.conafor.gob.mx/> S
- Conti G, Enrico L, Casanoves F, Diaz S. 2003. Shrub biomass estimation in the semiarid Chaco forest: a contribution to the quantification of an underrated carbón stock. Annals of Forest Science 70: 515-524.

- FAO. 2010. Las posibilidades de financiación del carbono para la agricultura, la actividad forestal y otros proyectos de uso de la tierra en el contexto del pequeño agricultor. <http://www.fao.org/docrep/012/i1632s/i1632s00.htm>. ACCESO/28/2011.
- Geesing D, Felker P, Bingham R. 2000. Influence of mesquite (*Prosopis Glandulosa*) on soil nitrogen and carbon development: implications for global carbon sequestrations. *Journal of Arid Environment* 46 (2): 157-180.
- IFN. Inventario Forestal Nacional.2000. INEGI. UNAM. SEMARNAP. México.
- INE. 2006. Inventario Nacional de Emisiones de Gases de Efecto Invernadero 1990 - 2002 México Resumen Ejecutivo.
- IPCC. 2008. Cambio Climático 2007. Informe de Síntesis. http://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar4/syr/ar4_syr_sp.pdf.
- Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático. 2012. Zonas Ecológicas. [Disponible] www.inecc.gob.mx/con-eco-ch/387-hc-zonas-ecologicas
- Ketterings Q, Coe R, Noordwijk M, Ambagau Y, Palm C. 2001. Reducing uncertainty in the use of allometric biomass equations for predicting aboveground tree biomass in mixed secondary forests. *Forest Ecology and Management* 146: 199-209.
- León de la Luz, J.L., Pérez Navarro, J.J. and Breceda, A., 2000. A transitional xerophitic tropical plant community of the Cape Region, Baja California. *Journal of Vegetation Science*, 11(4): 555-564.
- Litton CM, Kauffman JB. 2008. Allometric models for predicting aboveground biomass in two widespread woody plants in Hawaii. *Biotropica* 40 (3): 313-320.

- Lu D. 2005. Aboveground biomass estimation using Landsat TM data in the Brazilian Amazon. *International Journal of Remote Sensing* 26: 2509-313-320.
- MacDicken, K. 1997. *A Guide to Monitoring Carbon Storage in Forestry and Agroforestry Projects*. Winrock Internacional Institute for Agricultural Development, Arlington.
- Martínez, H.E., Fuentes, E.J.P, Acevedo, H.E. 2008. Carbono orgánico y propiedades del suelo. *J. Soil Sc. Plant Nutr.* 8 (1) (68-96).
- Martínez-Vera D. y Quintana-Sagarnaga, S. 2010. Determinación del contenido de carbono en *Quercus microphylla* y dos unidades de suelo en el predio Las Cruces, Texcoco, estado de México. Tesis. Universidad Autónoma Chapingo. División de Ciencias Forestales.
- Martino L. D. 2000. Los sumideros de carbono en el Mecanismo de Desarrollo Limpio del Protocolo de Kyoto. Resumen de presentación realizada en el taller sobre el Protocolo de Kyoto. Uruguay.
- Márquez L. 2000. Elementos técnicos para inventarios de carbono en uso de suelo. Fundación solar. Guatemala.
- Masera, O., A. D. Cerón y A. Ordóñez. 2001. Forestry mitigation options for Mexico: Finding synergies between national sustainable development priorities and global concerns. *Mitigation and Adaptation Strategies For Global Change* 6:291-312.
- Mogas, J. 2004. El valor de la fijación de carbono en los programas de forestación. Ponencia para el II Simposio Iberoamericano de Gestión y Economía Forestal. Barcelona.

- Nájera, L.J.A. 1999. Ecuaciones para estimar Biomasa, Volumen y Crecimiento en Biomasa y Captura de Carbono en diez especies típicas del matorral Tamaulipeco del nordeste de México. Tesis de Maestría. Universidad Autónoma de Nuevo León. Facultad de Ciencias Forestales. Pp. 14-20.
- NASA. 2014. Carbon Dioxide Concentration. WWW.Climate.nasa.gov/key-indicators/#co2. Fecha de Consulta 29 de Septiembre 2014.
- Navar CJ. 2010. Carbon Fluxes resulting From land-use changes in the Tamaulipan thornscrub of northeastern Mexico. *Carbon Balance and Management* 3 (1): 1-11.
- Oliva, M. y García-Oliva, F. 1998. Un nuevo campo de acción en la química biológica: Parte I. Generalidades sobre el cambio global. Educación Química. UNAM. México
- Paz, P.F. 2010. Evaluación, importancia y perspectivas de la captura de carbono y reducción de emisiones de gases efecto invernadero en pastizales y matorrales: hacia la implementación de REDD++ Primer Congreso Internacional de Manejo de Pastizales Tuxtla Gutiérrez, Chiapas.
- Rapp, M.; Regina, I. S.; Rico, M.; Gallego, H. A. 1999. Biomass, nutrient content, litterfall and nutrient return to the soil in Mediterranean oak forest. *Forest Ecology and Management*. 119: 39-49. DOI:10.1016/S0378-1127(98)00508-8
- Raymundo, T., Valenzuela, R., Gutiérrez, A., Coronado, M.L. y Esqueda, M. 2013. Agaricomycetes xilófagos de la planicie central del desierto sonorense. *Rev. Mex. Biodiv.* 84 (2): 417-424.

- Romo A, Morrone J, J. 2012. Especies mexicanas de curculionidae (Insecta: Coleoptera) asociadas con agaves (Asparagaceae: Agavoideae). *Revista Mexicana de Biodiversidad* 83: 1025-1035. DOI:10.7550/rmb.30633
- Rzedowski, J., E, Miguel. 1987. Atlas Cultural de México. SEP-INAH-PLANETA. Mexico. 222 pp.
- Schulze DE, Wirth C, Heimann M. 2000. Climate change: managing forest after Kyoto. *Science* 289: 2058-2058.
- Solomon S, Quin D, Manning M, Chen Z, Marquis M, Averyt K. 2007. Climate Change 2007: The physical science basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, NY. USA 996 p.
- Wang, C. 2006 Biomass allometric equations for 10 co-occurring tree species in Chinese: temperate forest. *Forest Ecology and Management*. 222. 9-16.
- Yerena-Yamallel, J.I., Jiménez-Pérez J., Aguirre-Calderón, O.A. y Treviño-Garza, E.J. 2011. Concentración de carbono en la biomasa aérea del matorral espinoso Tamaulipeco. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente* 17(2) Pág. 283-291.
- Zamora, C.J.C. 2003. Estimación del contenido de carbono en biomasa aérea en el bosque de pino del ejido “La Majada” municipio de Periban de Ramos, Michoacán. Tesis. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Facultad de Agrobiología “Presidente Juárez”