



**COLEGIO DE POSTGRADUADOS**  
INSTITUCIÓN DE ENSEÑANZA E INVESTIGACIÓN EN CIENCIAS AGRÍCOLAS

**CAMPUS VERACRUZ**

POSTGRADO EN AGROECOSISTEMAS TROPICALES

**CAPTURA Y LIBERACIÓN DE CARBONO EN SUELOS DE  
DIFERENTES AGROECOSISTEMAS TROPICALES**

**MARTÍN VÁZQUEZ LÓPEZ**

TESIS  
PRESENTADA COMO REQUISITO PARCIAL  
PARA OBTENER EL GRADO DE

**MAESTRO EN CIENCIAS**

TEPETATES, MANLIO FABIO ALTAMIRANO, VERACRUZ, MÉXICO

2019

La presente tesis, titulada: **Captura y liberación de carbono en suelos de diferentes agroecosistemas tropicales**, realizada por el alumno: **Martin Vázquez López**, bajo la dirección del consejo particular indicado, ha sido aprobada por el mismo y aceptada como requisito parcial para obtener el grado de:

MAESTRO EN CIENCIAS  
AGROECOSISTEMAS TROPICALES

CONSEJO PARTICULAR

CONSEJERO:



---

DR. FELIPE GALLARDO LÓPEZ

CODIRECTOR:



---

DR. FREDY MORALES TREJO

ASESOR:



---

DR. CATALINO JORGE LÓPEZ COLLADO

ASESORA:



---

DRA. LILIANA ARANDA ALCUDIA

ASESOR:



---

DR. MARCO ANTONIO MARÍN CASTRO

Tepetates, Manlio Fabio Altamirano, Veracruz, México, 19 de junio de 2019

# CAPTURA Y LIBERACIÓN DE CARBONO EN SUELOS DE DIFERENTES AGROECOSISTEMAS TROPICALES

Martín Vázquez López, M.C.

Colegio de Postgraduados, 2019

El cambio de uso de la tierra ha contribuido con la generación de gases de efecto invernadero. Los ecosistemas transformados a agroecosistemas pierden la materia orgánica del suelo y liberan carbono en forma de bióxido de carbono. Ante esta situación, el objetivo de esta investigación fue determinar la cantidad liberada de bióxido de carbono en suelos de diferentes agroecosistemas y su relación con el contenido de materia orgánica. Se realizaron muestreos de suelo en cultivos de caña de azúcar, nopal tunero, piña y manglar. En el análisis del suelo se determinó el contenido de materia orgánica y la liberación de bióxido de carbono por incubación estática. Los resultados muestran que el contenido de materia orgánica en los agroecosistemas es de  $2.55 \pm 0.12\%$  para caña de azúcar,  $1.94 \pm 0.06\%$  para nopal tunero,  $1.45 \pm 0.42\%$  para piña, y  $1.85 \pm 0.33\%$  para manglar. La liberación de bióxido de carbono fue similar en caña de azúcar y nopal tunero (de  $23.40$  y  $23.33$  mg CO<sub>2</sub>-C g suelo<sup>-1</sup>, respectivamente), en piña fue de  $11.54$  mg CO<sub>2</sub>-C g suelo<sup>-1</sup>, y en manglar de  $30.40$  mg CO<sub>2</sub>-C g suelo<sup>-1</sup>. No se pudo comprobar una correlación lineal entre la materia orgánica del suelo y la liberación de carbono, pero si se encontró que los suelos analizados tienen contenido medio y bajo en materia orgánica.

**Palabras claves:** bióxido de carbono, piña, caña de azúcar, nopal tunero, incubación estática.

# **CARBON SEQUESTRATION AND RELEASE IN SOIL OF DIFFERENT TROPICAL AGROECOSYSTEM**

Martín Vázquez López, M.C.

Colegio de Postgraduados, 2019

The change in land use has contributed to the generation of greenhouse gases. The ecosystems transformed to agroecosystems lose the organic matter of the soil and release carbon in the form of carbon dioxide. In view of this situation, the objective of this research was to determine the amount of carbon dioxide release of different agroecosystems and their relationship with the content of organic matter. Soil samplings were carried out in sugarcane, prickly pear, pineapple crops and mangrove. In soil analysis, we determine the content of organic matter and the release of carbon dioxide through static incubation. The results show that the content of organic matter in agroecosystems is  $2.55 \pm 0.12\%$  for sugarcane,  $1.94 \pm 0.06$  for prickly pear,  $1.45 \pm 0.42\%$  for pineapple and  $1.85 \pm 0.33\%$  for mangrove. The release of carbon dioxide was similar in sugar cane and prickly pear (of 23.40 and 23.33 mg CO<sub>2</sub>-C g soil<sup>-1</sup>), in pineapple was 11.54 mg CO<sub>2</sub>-C g soil<sup>-1</sup> and in mangrove 30.40 mg CO<sub>2</sub>-C g soil<sup>-1</sup>. A correlation between soil organic matter and carbon release could not be verified, but it is shown that the analyzed soils have medium and low content in organic matter.

**Key words:** carbon dioxide, pineapple, sugarcane, prickly pear cactus, static incubation.

## DEDICATORIA

A mis padres Clara Elena y Gerardo por haberme dado las bases para llegar a este punto y aspirar a más metas.

A mis hermanos Gerardo Urbano y Karina, y a mis sobrinos Nicole, Geraldina, Xiomara y Omar que les sirva de inspiración para que lleguen más lejos.

## AGRADECIMIENTOS

Al Colegio de Postgraduados Campus Veracruz por haberme aceptado como estudiante de la Maestría en Agroecosistemas Tropicales y a todos los que conforman la familia ColPos que contribuyeron en mi formación.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por otorgarme la beca que me permitió realizar los estudios de maestría en ciencias.

A mi consejo particular, Dr. Felipe Gallardo López, Dra. Liliana Armida Alcudia, Dr. Fredy Morales Trejo, Dr. Catalino Jorge López Collado, y Dr. Marco Antonio Castro por haberme apoyado en todo este camino que significó la maestría.

A Araceli por haber apoyado en momentos de alegría, pero principalmente cuando más lo necesitaba.

Se agradece el apoyo de la Línea de Generación y/o Aplicación del Conocimiento sobre Recursos Naturales, Agroecosistemas y Cambio Climático del Colegio de Postgraduados Campus Veracruz.

Quiero agradecer a mis amigos y compañeros con los que compartí cursos, deporte y fiestas, en especial a Escarlet, Noemí, Alejandra, Iván, Osmar, Emmanuel, José y Miguel, Generación Primavera 2017, por la amistad y tiempo compartido durante cada minuto de la maestría.

.....

## CONTENIDO

	Página
<b>1. INTRODUCCIÓN</b> .....	1
<b>2. MARCO TEÓRICO CONCEPTUAL</b> .....	3
2.1. Teoría general de sistemas .....	3
2.2. Concepto de actividades antrópicas .....	3
2.3 Concepto de agroecosistema .....	3
<b>3. MARCO DE REFERENCIA</b> .....	4
3.1. Cambio climático .....	4
3.2. Calentamiento global .....	4
3.3. Efecto invernadero.....	5
3.4. Gases de efecto invernadero.....	6
3.4.1. Bióxido de carbono (CO <sub>2</sub> ) .....	6
3.4.2. Metano (CH <sub>4</sub> ) .....	6
3.4.3. Óxido nitroso (N <sub>2</sub> O).....	6
3.4.5. Vapor de agua (H <sub>2</sub> O) .....	7
3.5. Ciclo del carbono .....	7
3.6. Captura de carbono en el suelo.....	8
3.7. Carbono orgánico del suelo .....	8
3.8. Incubación estática .....	9
<b>4. HIPOTESIS</b> .....	10
<b>5. OBJETIVOS</b> .....	10
5.1. Objetivo general.....	10
5.2. Objetivos particulares .....	10

<b>6. MATERIALES Y MÉTODOS</b> .....	11
6.1. Descripción de las áreas de estudio .....	11
6.1.1. Acatzingo, Puebla .....	11
6.1.2. Alvarado, Veracruz .....	12
6.1.3. Medellín, Veracruz .....	13
6.2. Diseño experimental .....	14
6.3. Muestreo .....	15
6.4. Preparación de muestras de suelo .....	15
6.5. Análisis de muestras de suelo .....	15
6.5.1. Determinación de pH y conductividad eléctrica .....	16
6.5.2. Determinación de textura .....	16
6.5.3. Determinación de carbono y materia orgánica.....	16
6.5.4. Incubación estática para la determinación de bióxido de carbono liberado por el suelo .....	17
6.6. Análisis estadístico .....	17
<b>7. RESULTADOS Y DISCUSIÓN</b> .....	17
7.1. Propiedades químicas del suelo en los cultivos de nopal tunero.....	18
7.2. Liberación de carbono por incubación estática del suelo de los cultivos de tuna. .....	19
7.3. Propiedades químicas del suelo de los diferentes agroecosistemas.....	23
7.4. Liberación de carbono por incubación estática del suelo de los diferentes agroecosistemas.....	25
<b>8. CONTRASTACIÓN DE HIPÓTESIS</b> .....	29
<b>9. CONCLUSIONES</b> .....	29
<b>10. RECOMENDACIONES</b> .....	29

<b>11. LITERATURA CITADA.....</b>	<b>31</b>
<b>12. ANEXO .....</b>	<b>38</b>

## LISTA DE CUADROS

	Página
Cuadro 1. Propiedades químicas de los suelos del cultivo de tuna .....	18
Cuadro 2. Clases texturales de los suelos de los sitios de cultivo de nopal tunero ..	19
Cuadro 3. Liberación de bióxido de carbono (mg CO <sub>2</sub> -C g suelo <sup>-1</sup> ) de los cultivos de nopal tunero .....	20
Cuadro 4. Coeficientes de modelos de regresión lineal simple de los sitios del cultivo de tuna en relación a su liberación de bióxido de carbono. ....	22
Cuadro 5. Propiedades químicas de los suelos de los diferentes sistemas.....	24
Cuadro 6. Clases texturales de los diferentes sistemas.....	25
Cuadro 7. Liberación de bióxido de carbono (mg CO <sub>2</sub> -C g suelo <sup>-1</sup> ) de los diferentes sistemas.....	26
Cuadro 8. Coeficientes de modelos de regresión de los diferentes sistemas en relación a su liberación de bióxido de carbono.....	28

## LISTA DE FIGURAS

	Página
Figura 1. Municipio de Acatzingo, Puebla, sitio de muestreo del cultivo de nopal tunero .....	12
Figura 2. Municipio de Alvarado, Veracruz, sitio de muestreo de manglar .....	13
Figura 3. Municipio de Medellín, Veracruz, sitio de muestreo de los cultivos de piña y caña de azúcar .....	14
Figura 4. Liberación acumulada de bióxido de carbono en los sitios de cultivo de nopal tunero.....	21
Figura 5. Modelos de regresión lineal simple y datos de incubación acumulada para los cultivos de nopal tunero.....	22
Figura 6. Liberación acumulada de bióxido de carbono en los diferentes sistemas .	27
Figura 7. Modelos de regresión y datos de incubación acumulada para los diferentes sistemas.....	28

## 1. INTRODUCCIÓN

El cambio climático es una situación que cada vez se hace más evidente en todas las partes del mundo. La generación de bióxido de carbono es una de las principales preocupaciones, y principalmente porque una importante cantidad de este gas es producida por el uso de cambio de suelo, ya que muchas zonas que son ecosistemas se han deforestado para su uso como zonas de cultivo o de ganadería (agroecosistemas).

En los agroecosistemas y ecosistemas naturales, la materia orgánica es la que contienen el carbono del suelo dentro de su cuantificación, ésta es importante para el desarrollo de las plantas, pero parte de este carbono es convertido en bióxido de carbono a través de los microorganismos presentes en el suelo. Conforme los agroecosistemas se usan para el cultivo, la materia orgánica disminuye, en algunos casos se trata de recuperar la materia orgánica, con la integración de los restos de las plantas cultivadas o en la incorporación de abonos orgánicos como composta, lombricomposta o excremento de animales.

Dependiendo del contenido de materia orgánica, humedad del suelo, temperatura, microorganismos, el tipo de cultivo y su manejo, se libera en mayor o menor cantidad el bióxido de carbono. El incremento en las emisiones de gases de efecto invernadero a nivel global por fuentes antrópicas son una de las causas del cambio climático, el cual genera el aumento de temperaturas a nivel global. De los gases de efecto invernadero, el bióxido de carbono fue el que más aumento tuvo desde 1950, esto se asocia principalmente a dos actividades humanas, el consumo de combustibles fósiles y cambio de cobertura vegetal por el uso de suelo (Hernández, 2010).

Esta creciente preocupación por el posible cambio climático ha generado interés a nivel internacional, por lo cual se fundó el Panel Intergubernamental de Expertos del Cambio Climático (IPCC, por sus siglas en inglés) que ha propuesto estrategias de mitigación de los efectos de las emisiones de bióxido de carbono, tal como son los reservorios de carbono en forma de biomasa vegetal por periodos prolongados y en el suelo (Acosta-Mireles *et al.*, 2002).

El reservorio más importante de carbono es el suelo, ya que almacena tres veces más de este elemento que la biomasa vegetal. Existe un sistema entre ambos reservorios, el sistema suelo-vegetación, que tiene un papel importante en el aumento o en la reducción de las concentraciones de bióxido de carbono en la atmósfera. En los ecosistemas existe un equilibrio dinámico, pero en los agroecosistemas se pueden alterar los ingresos o egresos de carbono, dependiendo principalmente del cultivo y manejo (Segura-Castruita *et al.*, 2005; Castillo *et al.*, 2010; Caviglia *et al.*, 2016).

El carbono se almacena en el suelo en forma orgánica e inorgánica, aunque normalmente el carbono orgánico se reporta en forma de materia orgánica, y es un indicador clave de la calidad del suelo, ya que en ella ocurren procesos microbiológicos que aportan nutrientes a la planta. La agricultura con lleva una gran pérdida de materia orgánica del suelo, principalmente en los cultivos extensivos, lo cual repercute en la mayor emisión de carbono a la atmósfera (Lettens *et al.*, 2005; Hernández *et al.*, 2014).

En México se realizan investigaciones de la captura de carbono en el suelo, principalmente en áreas forestales. En el caso de los suelos agrícolas o de agostaderos se investiga principalmente su contenido de materia orgánica según el tipo de suelo, fertilidad, prácticas de conservación y cambio de uso. Pero hay un amplio campo de investigación para estimar el potencial secuestro de carbono de los suelos agrícolas, así como de sus emisiones de bióxido de carbono (Zamora-Morales *et al.*, 2019).

Por ello con el desarrollo de esta investigación se buscó aportar información sobre el contenido de materia orgánica de diferentes agroecosistemas y su relación con la emisión de bióxido de carbono a la atmósfera, por lo que se planteó el objetivo de determinar la liberación de carbono en suelo de diferentes agroecosistemas y su relación con el contenido de materia orgánica.

## **2. MARCO TEÓRICO CONCEPTUAL**

### **2.1. Teoría general de sistemas**

La Teoría General de Sistemas surge como una posibilidad de comprender los fenómenos o comportamientos inciertos que no se pueden explicar mediante una postura reduccionista y trata de mostrar lo que sucede en la realidad y hacer posible la predicción de la conducta futura de esta realidad. Von Bertalanffy (1976) establece las bases al definir al sistema como “un conjunto de elementos que interactúan” y considerar que el estudio de los sistemas no debe entenderse solo en un sentido matemático, sino comprender todos los elementos que lo forman, ya que no se pueden visualizar como entes aislados, porque existe una interacción entre todos ellos. Desde una perspectiva holística, asumió que el sistema tiene propiedades emergentes, y se halla constituido por subsistemas e interacciona con suprasistemas. A esta base se le suman conceptos de otros autores como el de Arnold y Osorio (1998), que mencionan que el sistema normalmente tiene algún tipo de objetivo, y el de Arras (2010) que sugiere que el sistema tiene una frontera identificable y está inmerso en diversos contextos con los que interactúa.

### **2.2. Concepto de actividades antrópicas**

Por actividad antrópica se entiende toda acción o intervención realizada por el ser humano en el planeta. El planeta busca un equilibrio entre sus distintos elementos que los conforman (clima, suelo, océanos, flora y fauna), pero dentro de la fauna se encuentra el hombre, que es un ser que busca satisfacer sus necesidades a través del manejo de otros elementos, se vuelve un explotador de sistemas. Las acciones humanas desencadenan cambios que afectan el planeta y se vuelven un problema que se deben enfrentar para no sucumbir como víctimas de ellas.

### **2.3 Concepto de agroecosistema**

El agroecosistema es planteado por Hernández X. (1976), como un ecosistema modificado en mayor o menor grado por el hombre, para la utilización de los recursos naturales en los procesos de producción agrícola, pecuaria o forestal. Ruiz-Rosado (2006) amplía el concepto al definirlo como la unidad física donde se desarrolla la

actividad agrícola, pecuaria, forestal, acuícola o su combinación e inciden los factores económicos, sociales y ecológicos para la obtención de alimentos y otros satisfactores que la sociedad demanda a través del tiempo. En la presente investigación se conceptualizó al agroecosistema como el ecosistema modificado por el hombre donde se desarrolla la actividad agrícola, pecuaria, forestal y donde inciden los factores económicos, ecológicos y sociales, para obtener satisfactores que la sociedad demanda a través del tiempo, y es una actividad antrópica que tiene efectos sobre el planeta.

### **3. MARCO DE REFERENCIA**

#### **3.1. Cambio climático**

El cambio climático es uno de las principales amenazas que enfrentamos, ya que se encuentra relacionado con la actividad humana, y debido a que su impacto negativo se ve reflejado a nivel global. De acuerdo con el PNUD (2007) hay cinco mecanismos claves a través de los cuales el cambio climático puede paralizar y revertir el desarrollo humano, y son: el impacto en la producción agrícola y la seguridad alimentaria; el estrés por falta de agua e inseguridad del agua; el aumento en el nivel del mar y la exposición a desastres meteorológicos; la transformación de los ecosistemas y la disminución de la biodiversidad; son los impactos en la salud humana.

El cambio climático es causado en parte por un aumento de las concentraciones de los Gases de Efecto Invernadero (GEI) en la atmósfera, que generan el calentamiento global (Smith y Smith, 2005; Ortiz *et al.*, 2008).

#### **3.2. Calentamiento global**

El calentamiento global se evidencia en el aumento de la temperatura media. Para el 2018 se estimó en  $0.99 \pm 0.13^{\circ}\text{C}$  por encima de la registrada en el periodo de 1850-1900, que se considera como la línea base para hacer las estimación del cambio climático (momento a partir del cual se incrementaron las emisiones de gases de efecto invernadero); también se observa en el derretimiento generalizado de hielo y nieve, el promedio anual de la superficie de los hielos marinos árticos se ha reducido en un 27

% cada 10 años, lo cual provoca un aumento del nivel medio del mar (IPCC, 2007; Torres *et al.*, 2011, OMM, 2019). Este panorama se torna más drástico para el futuro, ya que se espera que la temperatura media superficial a nivel mundial aumente entre 1.4 y 5.8°C al año 2100 (Vela *et al.*, 2012) y el nivel de los océanos se estima que suba entre 0.1 y 0.9 metros; se presentarán más sequías en las zonas áridas, cambios en los regímenes de precipitación (tanto en la intensidad como en su distribución temporal y espacial), olas de calor y heladas. Son tan marcados los cambios que se presentan que se considera que estamos viviendo una nueva era geológica denominada antropoceno (IPCC, 2001; Moreno *et al.*, 2002; Equihua *et al.*, 2016).

El calentamiento global se debe al aumento de las concentraciones de los GEI en la atmósfera, que retienen el calor que se irradia desde la superficie del planeta generando el efecto invernadero; cabe señalar que la atmósfera es un reservorio dinámico del ciclo del carbono (Rügnitz *et al.*, 2009; Caviglia *et al.*, 2016).

### **3.3. Efecto invernadero**

El efecto invernadero se da porque la atmósfera es un filtro radiativo que deja pasar los rayos solares, algunos de ellos son absorbidos por la superficie terrestre, que se calienta en consecuencia, y entonces se emite la radiación terrestre que es retenida por la atmósfera y las nubes. La radiación que es absorbida por las capas atmosféricas va calentándolas, por lo cual la capa superficial es cálida y se van enfriando conforme uno asciende a través de ellas. La temperatura promedio global por el efecto invernadero es de 15°C y eso es clave para que se dé la vida en la tierra (Garduño, 2004; Burbano, 2018).

La atmósfera está compuesta principalmente por nitrógeno (78%), oxígeno (21%), y pequeñas cantidades de hidrógeno, helio, argón, neón y otros gases. Algunos de estos últimos son el bióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), el metano (CH<sub>4</sub>) y el óxido nitroso (N<sub>2</sub>O), que son considerados los gases de efecto invernadero. Los GEI son los responsables de absorber la radiación emitida por la superficie terrestre y generar el efecto invernadero, que es un fenómeno natural. Sin los GEI en la atmósfera estaríamos congelados con una temperatura efectiva de – 18°C. El problema del efecto invernadero radica en que

su acción se ha exacerbado por la desmesurada producción de GEI por interés exclusivo de los seres humanos (Garduño 2004; Vela *et al.*, 2012).

### **3.4. Gases de efecto invernadero**

#### **3.4.1. Bióxido de carbono (CO<sub>2</sub>)**

La incorporación del bióxido de carbono a la atmósfera durante los últimos 50 años tuvo su origen en un 75% en la quema de combustibles fósiles (derivados de petróleo, gas, carbón) y el 25% restante, sobre todo, como resultado de los cambios en el uso del suelo (conversión de ecosistemas a agroecosistemas) y muy particularmente de la deforestación que podría ser de un 6 a 17 %. El bióxido de carbono es responsable de alrededor del 65% del efecto invernadero (FAO, 2002; Lal, 2003; Baccini *et al.*, 2012; Vela *et al.*, 2012).

La concentración de bióxido de carbono en la atmósfera ha incrementado de 280 ppm en 1750, a 360 ppm en 2000, en el 2004 a 379 ppm, a 385.3 ppm en 2008, en el 2015 a 400.1 ppm, 2016 a 403.3 ppm y 2017 a 405.5 ppm. En la década pasada se estimó un incremento mayor a 1 ppm anual, pero en los últimos años ha sido superior a 2 ppm anual (Gómez-Echeverri, 2000; Epstein y Rogers, 2004; OMM, 2009; OMM, 2019).

#### **3.4.2. Metano (CH<sub>4</sub>)**

El metano es emitido en menor volumen que el bióxido de carbono, pero tiene un mayor potencial de retención de calor, y tiene un potencial de calentamiento global de 21 veces más alto del que tiene el bióxido de carbono. Las emisiones de metano son producidas principalmente en la fermentación digestiva de rumiantes, desperdicios sólidos y líquidos, y en la descomposición anaeróbica del carbono orgánico de los suelos inundados de cultivos de arroz (Caviglia *et al.*, 2016).

#### **3.4.3. Óxido nitroso (N<sub>2</sub>O)**

El óxido nitroso proviene del uso de fertilizantes químicos con nitrógeno en cultivos para forraje y cereales para la ganadería, es un subproducto de los procesos de nitrificación y desnitrificación en el suelo. El óxido nitroso tiene un potencial de calentamiento global de 310 veces más alto que el del bióxido de carbono (Verhulst *et al.*, 2015a).

### **3.4.5. Vapor de agua (H<sub>2</sub>O)**

El vapor de agua es el principal gas de efecto invernadero, pero las actividades humanas no añaden vapor de agua a la atmósfera, éste forma parte del ciclo hidrológico, un sistema cerrado de circulación de agua, del cual existe una cantidad limitada en la tierra.

### **3.5. Ciclo del carbono**

El carbono es el elemento químico esencial en los compuestos orgánicos, circula entre los océanos, la atmósfera, el suelo y el subsuelo. El paso entre ellos ocurre mediante procesos de orden químico, físico y biológico (Rügnitz *et al.*, 2009). El ciclo del carbono se inicia con la fotosíntesis de las plantas y algunos microorganismos. En la fotosíntesis, el bióxido de carbono y el agua reaccionan para formar materias primas y a la vez, liberar oxígeno, que va a la atmósfera. Las materias primas como la glucosa, son usadas por la propia planta para tener energía y desarrollar las estructuras necesarias para su crecimiento, y se libera bióxido de carbono a través de sus hojas o de las raíces. Los componentes de la planta que entran en senescencia, caen al suelo y al degradarse se incorporan como materia orgánica estable, a su vez que aportan bióxido de carbono al entorno. La otra parte la consumen los animales, que también liberan bióxido de carbono en sus procesos metabólicos. Cuando los animales y las plantas mueren, sus tejidos son descompuestos por microorganismos y liberan bióxido de carbono que regresa a la atmósfera. El carbono también se encuentra en los combustibles fósiles y en las rocas (Lessard *et al.*, 2009; Orellana *et al.*, 2012).

En la biosfera se debe diferenciar entre el carbono almacenado en el ecosistema y el flujo de carbono, que es la corriente de carbono entre las existencias de carbono - contenido- en el ecosistema y la atmósfera. También, la expresión sumidero de carbono alude a la existencia de un flujo neto de carbono desde la atmósfera al sistema (vegetación y suelo), en tanto que la expresión fuente de carbono se refiere a un flujo en sentido inverso, es decir, del sistema a la atmósfera (Pardos, 2010). Con estas consideraciones, los suelos en mayor o menor proporción pueden coadyuvar a los esfuerzos tendientes a disminuir el cambio climático, ya que desempeñan un rol estratégico en ciclo del carbono (Agencia Europea del Medio Ambiente, 2015).

### **3.6. Captura de carbono en el suelo**

El carbono en el suelo puede estar presente en dos formas, como orgánico del suelo y inorgánico del suelo. El carbono orgánico es el componente principal de la materia orgánica, la cual es primordial en la productividad de los suelos como reserva de nutrimentos.

Los procesos de captura-emisión son parte de un sistema con cuatro tipos generales de reservorios de carbono (vegetación, aérea y subterránea, materia en descomposición, suelos, productos forestales), con tiempos de residencia y flujos asociados muy diferentes

La reforestación, sobre todo en los suelos degradados, con bajo contenido de materia orgánica, será una forma importante de almacenar carbono a largo plazo, tanto en la biomasa, como en el suelo. Los suelos contienen más carbono que la vegetación y la atmósfera (Martínez *et al.*, 2008).

Los gases de efecto invernadero podrían reducirse mediante dos procesos: a) la reducción de emisiones antropogénicas de bióxido de carbono, y b) crear o mejorar los sumideros de carbono en la biósfera. Sobre este último punto, el manejo forestal y la conservación de los bosques pueden contribuir a la mitigación del calentamiento global mediante la conservación, secuestro, almacenamiento y concentración del carbono atmosférico. De igual manera, los sistemas agroforestales podrían remover cantidades significativas de carbono de la atmósfera, ya que las especies arbóreas pueden retener carbono por un tiempo prolongado, principalmente en su madera (Andrade e Ibrahim, 2003).

### **3.7. Carbono orgánico del suelo**

El carbono orgánico del suelo se encuentra en forma de residuos orgánicos de vegetales y, animales poco alterados, de forma principal en humus. En condiciones naturales, el carbono orgánico del suelo resulta del balance entre la incorporación de material fresco y la salida del bióxido de carbono a la atmosfera, erosión y lixiviación (Swift, 2001). Cuando los suelos tienen condiciones anaeróbicas, una parte importante

del carbono que ingresa al suelo es lábil y se mineraliza rápidamente y una pequeña parte se acumula como humus estable (Martínez *et al.*, 2008).

El carbono orgánico del suelo es importante ya que como parte de la materia orgánica influye en las propiedades del suelo como la estructura, la capacidad de intercambio catiónico, la densidad aparente, la porosidad y la infiltración (Vågen *et al.*, 2005; Hernández *et al.*, 2013). Una variable determinante para la acumulación de carbono orgánico del suelo es la pendiente, pues Mosquera *et al.* (2012) encontraron mayor contenido de carbono orgánico en suelos planos que en aquellos con pendientes. El almacenamiento de carbono orgánico en el suelo depende de dos variables: la concentración de carbono y de la densidad aparente (Andrade e Ibrahim, 2003).

El suelo es una fuente de bióxido de carbono bajo condiciones de cultivo convencional, ya que se pierde la materia orgánica más rápido de lo que se forma (Reicosky, 2002). Existen prácticas agronómicas que favorecen la captura de carbono en el suelo, como la labranza de conservación, que incluye la cero labranza (FAO, 2001), estas prácticas ayudan a que no se presenten problemas en calidad, sustentabilidad y capacidad productiva.

La acumulación de carbono en el suelo es un proceso importante para mitigar el efecto del cambio climático, ya que la superficie terrestre además de ser un sumidero es un reservorio de carbono estabilizado (FAO, 2002; Etchevers *et al.*, 2006; Sánchez-Hernández *et al.*, 2006). Hontoria *et al.* (2004) resaltan el enorme potencial de los suelos en el secuestro de carbono con la ventaja añadida del incremento de la productividad del suelo, de especial importancia en áreas con suelos degradados, sin embargo, cuando hay cambio de uso de suelo, este mismo sumidero puede transformarse en una fuente.

### **3.8. Incubación estática**

Es un método por el cual se determina el bióxido de carbono liberado por la respiración del suelo; esta respiración es llevada a cabo por las bacterias presentes en el suelo, que oxidan la materia orgánica, y genera bióxido de carbono que se desprende a la atmósfera. En este método se utiliza un sistema hermético, donde el suelo está a su capacidad de campo, agua para mantener una humedad relativa dentro del sistema e

hidróxido de sodio que será el álcali que adsorba el bióxido de carbono liberado durante la respiración aeróbica de las bacterias. La reacción en la cual el bióxido de carbono es adsorbido es:



La cantidad de  $\text{CO}_2$  adsorbido es equivalente a la cantidad de  $\text{NaOH}$  consumido. Para determinar esto se titula el  $\text{NaOH}$  con  $\text{HCl}$  estándar. La reacción es:



La cantidad de  $\text{NaOH}$  inicial menos la cantidad remanente al final del periodo de incubación se utiliza para calcular la cantidad de  $\text{CO}_2$  involucrado por suelo, que entra en la solución y reacciona con el  $\text{NaOH}$ .

#### **4. HIPOTESIS**

El contenido de materia orgánica del suelo en diferentes agroecosistemas tiene una relación proporcional con la liberación de bióxido de carbono.

#### **5. OBJETIVOS**

##### **5.1. Objetivo general**

Determinar la liberación de carbono en suelo de diferentes agroecosistemas y su relación con el contenido de materia orgánica.

##### **5.2. Objetivos particulares**

Cuantificar la materia orgánica en los suelos de los diferentes agroecosistemas.

Cuantificar el bióxido de carbono liberado por incubación estática en los suelos de diferentes agroecosistemas.

## **6. MATERIALES Y MÉTODOS**

Las muestras obtenidas en el proyecto de investigación fueron analizadas en el Laboratorio de Suelos, Aguas, Plantas y Alimentos del Colegio de Postgraduados Campus Veracruz, ubicado en la Carretera Federal Xalapa-Veracruz Km 88.5, predio Tepetates, municipio de Manlio Fabio Altamirano, Veracruz

### **6.1. Descripción de las áreas de estudio**

#### **6.1.1. Acatzingo, Puebla**

El municipio de Acatzingo, Puebla fue seleccionado para la toma de muestras de suelo de tuna. Ubicada entre las coordenadas extremas 18.95° N, 97.83° O y 19.11° N, 97.68° O, a una altitud promedio de las localidades de 2000 msnm. La superficie es de 140.987 km<sup>2</sup>. Los climas predominantes son C(w<sub>1</sub>) y C(w<sub>0</sub>) (60.5 % y 38.9 % de la superficie municipal, respectivamente). El clima es cálido y templado, los veranos tienen una buena cantidad de lluvia, mientras que los inviernos tienen muy poca. La temperatura media anual es de 17.9 °C. La precipitación media anual aproximada es de 674 mm (SEDESOL, 2019).

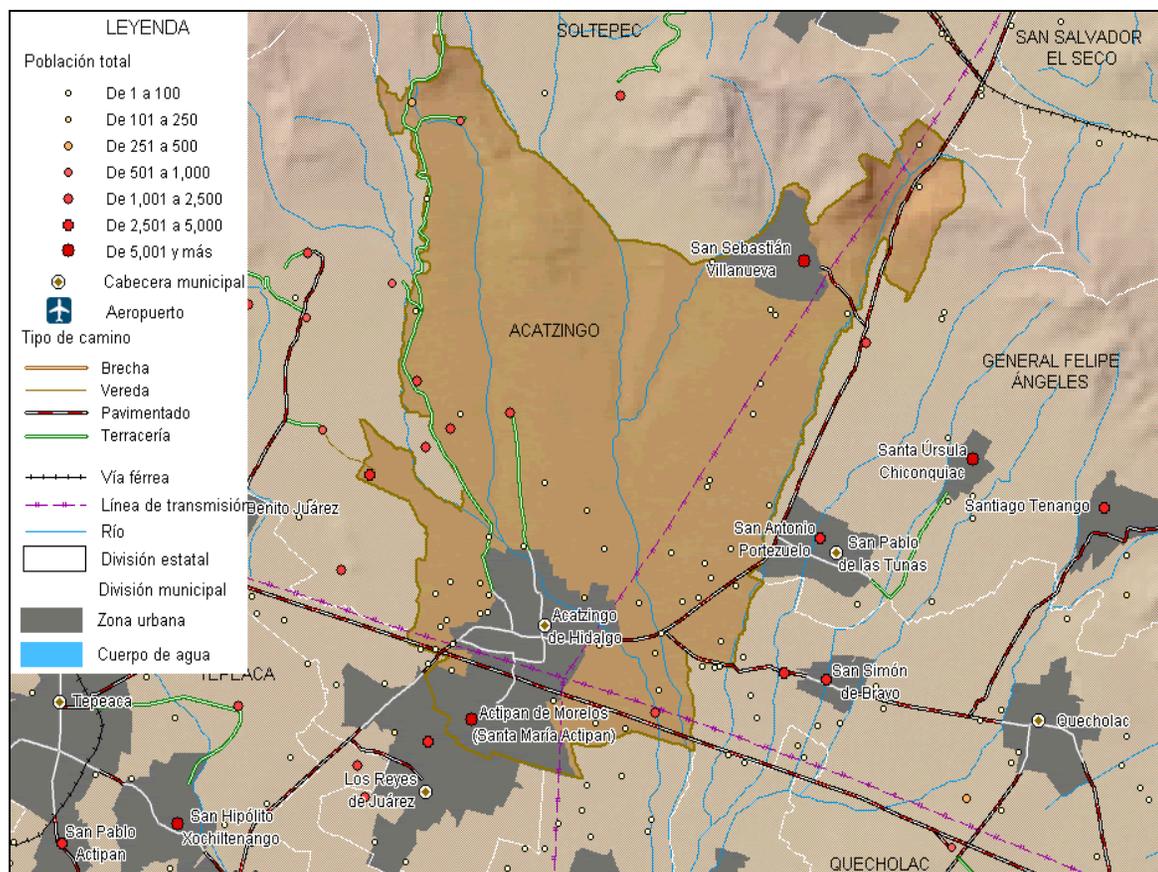


Figura 1. Municipio de Acatzingo, Puebla, sitio de muestreo del cultivo de nopal tunero (SEDESOL, 2009).

### 6.1.2. Alvarado, Veracruz

El municipio de Alvarado, Veracruz, fue seleccionado para la toma de muestras de suelo de manglar. Ubicada entre las coordenadas extremas 18.56° N, 96.12° O y 19.10° N, 95.51° O, a una altitud promedio de las localidades de 12.6 msnm. Superficie es de 829.557 km<sup>2</sup>. El clima predominante es Aw<sub>2</sub> (94.3 % de la superficie municipal). El clima es tropical, en invierno hay mucho menos lluvia que en verano. La temperatura media anual es de 26.4°C. La precipitación media anual aproximada es de 1669 mm (SEDESOL, 2019).

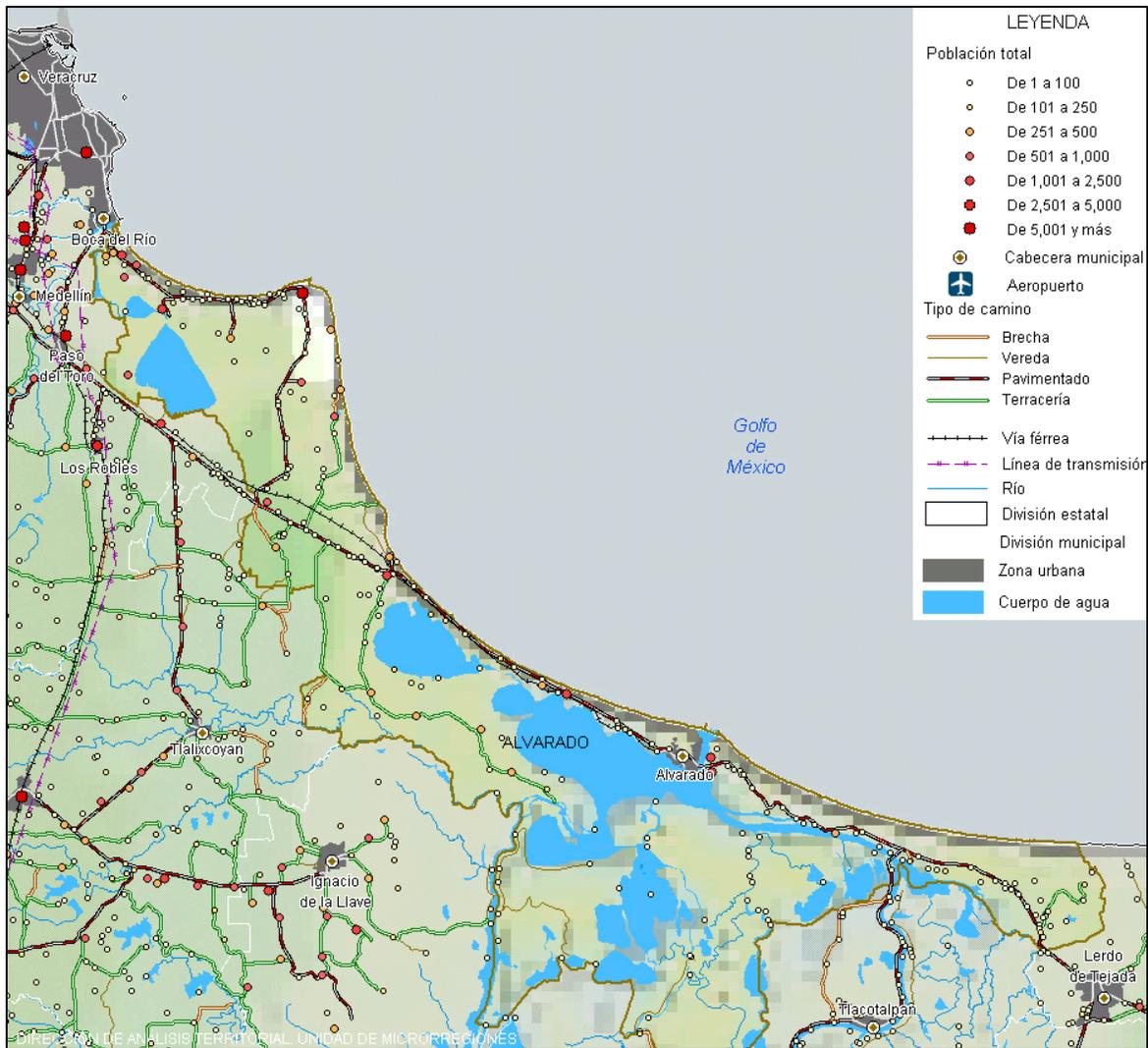


Figura 2. Municipio de Alvarado, Veracruz, sitio de muestreo de manglar (SEDESOL, 2009).

### 6.1.3. Medellín, Veracruz

El municipio de Medellín, Veracruz, fue seleccionado para la toma de muestras de suelo con cultivo de caña y de piña. Ubicada entre las coordenadas extremas 18.84° N, 96.27° O y 19.14° N, 96.02° O, a una altitud promedio de las localidades de 16.65 msnm. La superficie es de 148.37 Km<sup>2</sup>. Los climas predominantes son Aw<sub>2</sub> y Aw<sub>1</sub> (77.9 % y 22.1 % de la superficie municipal respectivamente). El clima es tropical, en comparación con el invierno, los veranos tienen mucha más lluvia. La temperatura media anual es de 25.7°C. La precipitación media anual aproximada es de 1570 mm (SEDESOL, 2019).

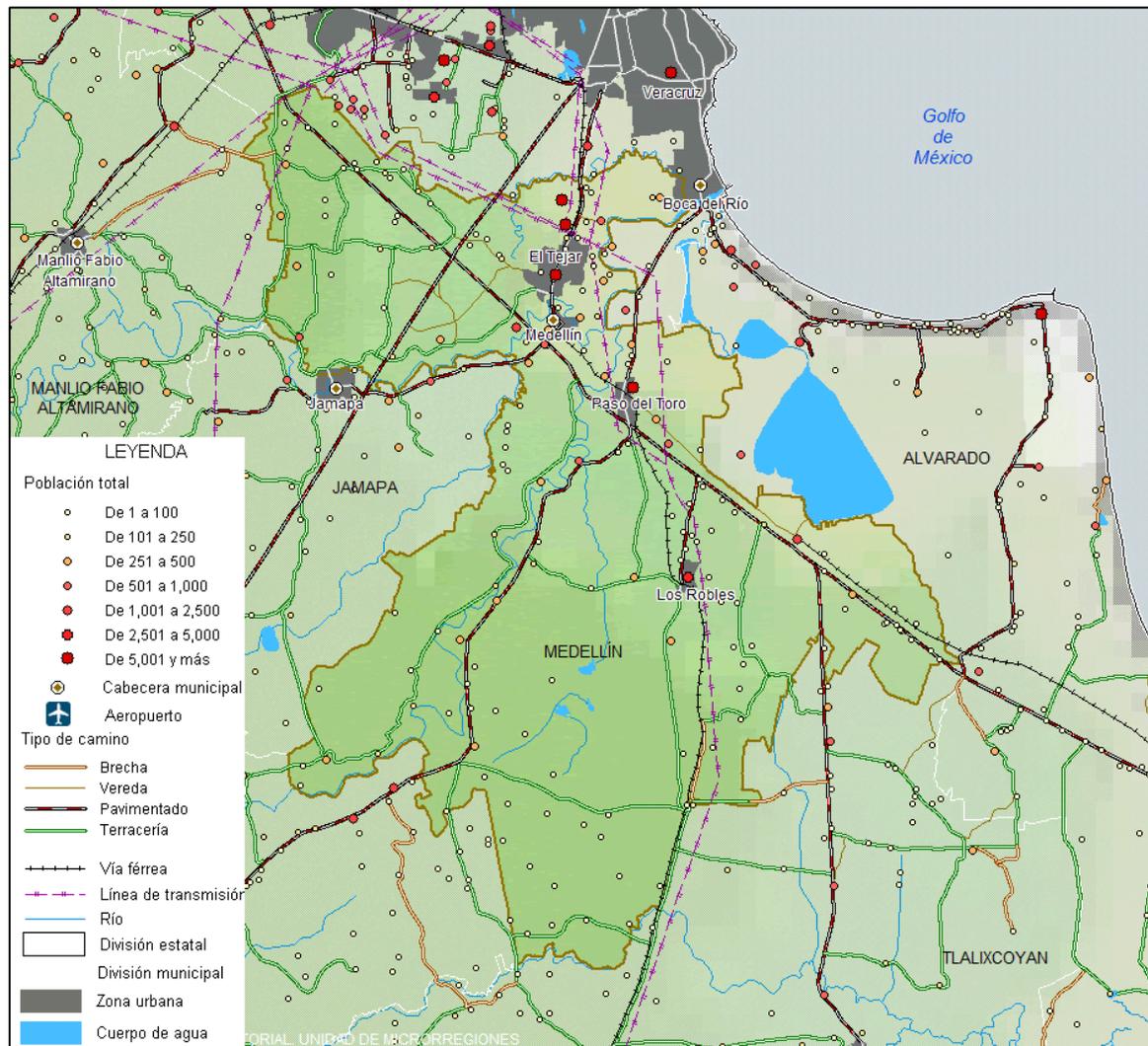


Figura 3. Municipio de Medellín, Veracruz, sitio de muestreo de los cultivos de piña y caña de azúcar (SEDESOL, 2009).

## 6.2. Diseño experimental

El diseño experimental que se utilizó en el presente trabajo de investigación fue completamente al azar. Se tomaron tres sitios de muestreo de cultivo de nopal tunero, un cultivo de piña, uno más de cultivo de caña de azúcar y también un sitio de manglar para tener como referencia de un ecosistema no modificado. Por lo tanto, se evaluaron seis diferentes sitios de muestreo más un blanco, considerándose cada uno de ellos

un tratamiento. Cada tratamiento contó con cinco repeticiones, para un total de 35 unidades experimentales.

Como primer análisis se realizó una comparación entre los tres diferentes sitios de cultivo de nopal tunero para saber si existe diferencia en la liberación de bióxido de carbono, ya que las zonas áridas han sido poco estudiadas. Después se realizó la comparación de la liberación de bióxido de carbono entre los diferentes cultivos, incluido el ecosistema manglar. Se realizó un análisis de correlación entre el contenido de materia orgánica con la liberación de bióxido de carbono.

### **6.3. Muestreo**

En cada sitio fueron tomadas cinco muestras individuales, colectándose en forma de zigzag, a fin de cubrir de manera homogénea la unidad de muestreo. Las muestras fueron tomadas a una profundidad entre 0-30 cm. Se colectaron 2 Kg de suelo por muestra individual en bolsa de plástico transparente, para ello se utilizó una pala recta, se excluyó el residuo no descompuesto encontrada sobre la superficie, se incluían las rocas pequeñas y las raíces. Se trasladaron las muestras protegidas de la luz y el calor (SEMARNAT, 2003).

### **6.4. Preparación de muestras de suelo**

Las muestras se secaron al ambiente (25°C) sobre charolas de aluminio, extendiéndolas en una capa de 2.5 cm de profundidad. Previo a la molienda se eliminaron las rocas y material orgánico visible, se utilizó un mazo de madera para la molienda. El tamizado de las muestras se realizó con un tamiz con abertura de dos mm de diámetro (malla #10) de acero inoxidable. Las muestras se homogenizaron al momento de almacenarlas en bolsas de plástico transparente, para evitar sesgos en las determinaciones analíticas (SEMARNAT, 2003).

### **6.5. Análisis de muestras de suelo**

A las muestras se les realizaron las siguientes determinaciones analíticas: pH, conductividad eléctrica, textura y contenido de materia orgánica.

### **6.5.1. Determinación de pH y conductividad eléctrica**

Se pesaron 20 g de suelo en un vaso de precipitados de 250 mL y se le agregaron 100 mL de agua destilada para tener una relación suelo: agua 1:5. Se agitó por 5 min y se dejó reposar por otros 5 min, concluido el tiempo de reposo se introdujo el electrodo del potenciómetro y del conductímetro en la suspensión para tomar las lecturas. El potenciómetro se calibró con soluciones buffer de pH 7.01 y 4.01, y el conductímetro se calibró con solución buffer de  $1413 \mu\text{S cm}^{-1}$  (USDA, 2004).

### **6.5.2. Determinación de textura**

Se realizó por el método de Bouyoucos (1927). La muestra fue tratada previamente con peróxido de hidrógeno para la eliminación de la materia orgánica. Se pesaron 50 g de suelo tratado y se adicionaron 150 mL de agua destilada, además se le agregaron 5 mL de oxalato de sodio saturado y 5 mL de metasilicato de sodio. Se dejó reposar por 15 min, para luego ser agitado por 5 min en agitador mecánico. Se traspasó la totalidad de la muestra a una probeta de 1 L y se aforó, se agitó durante un minuto de manera manual, y se tomaron lecturas a los 40 seg y las 2 h con el hidrómetro, al mismo tiempo se tomó la temperatura con termómetro de vidrio (SEMARNAT, 2003).

### **6.5.3. Determinación de carbono y materia orgánica**

La materia orgánica se evaluó por el método de Walkley y Black (1934). La muestra se pasó por el tamiz de 0.5 mm previo al análisis. Se pesaron 0.5 g de suelo y se le agregaron 10 mL de dicromato de potasio 0.166 M y 20 mL de ácido sulfúrico concentrado, se realizó este proceso dentro de la campana de extracción de gases, se dejó reposar por 30 min, posterior al reposo se le adicionaron 5 mL de ácido fosfórico concentrado, 200 mL de agua destilada y 10 gotas de indicador de difenilamina. Se tituló con una solución de sulfato ferroso 1 M. Con este método se determinó el porcentaje de carbono orgánico, al multiplicar este valor por 1.724 (factor de Van Benmelen) se obtiene el porcentaje de materia orgánica (SEMARNAT, 2003).

#### **6.5.4. Incubación estática para la determinación de bióxido de carbono liberado por el suelo**

Cada unidad experimental consistió de un frasco de vidrio de 1 L de capacidad con sello hermético a presión que contenían tres vasos de precipitado de 50 mL, de los cuales uno tenía 10 mL agua destilada, otro contenía 20 g suelo humedecido a su capacidad de campo y el último tuvo 10 mL de hidróxido de sodio 1 N. El blanco solo contuvo 2 vasos, uno con 10 mL de agua destilada y el segundo con 10 mL de hidróxido de sodio 1N.

La liberación de carbono fue evaluada los días 1, 3, 7, 14, 21, 30 de establecido el experimento, por titulación con ácido clorhídrico 0.5 N. Cada día de evaluación se retiraba el vaso con hidróxido de sodio y era sustituido por otro con el mismo contenido. En la titulación se utilizó como indicador fenolftaleína al 1%, agregándolo al hidróxido de sodio dándole una coloración fucsia, el punto final de la titulación fue cuando el hidróxido de sodio cambiaba de color rosa a transparente (Alef y Nannipieri, 1995; García *et al.*, 2003).

#### **6.6. Análisis estadístico**

Los datos de las determinaciones realizadas en el laboratorio fueron integrados en una hoja de cálculo de Excel versión 2016, y se realizaron las pruebas de ANOVA, prueba de Tukey con una  $p \leq 0.05$ , y correlación de Pearson en el programa IBM SPSS Statistics Versión 25. Los modelos de regresión se obtuvieron por análisis en el programa CurveExpert Profesional 2.6.5.

### **7. RESULTADOS Y DISCUSIÓN**

Los resultados y discusión se dividen en dos secciones: se realizó una primera sección para comparar los resultados de los sitios de nopal tunero para conocer si existía diferencia entre ellos, y en la segunda sección se compararon los diferentes agroecosistemas entre sí.

### 7.1. Propiedades químicas del suelo en los cultivos de nopal tunero.

En el análisis de varianza se encontraron diferencias estadísticas significativas en el pH ( $p=0.001$ ), conductividad eléctrica ( $p=0.004$ ) y materia orgánica ( $p=0.042$ ). El cultivo de tuna tiene un óptimo desarrollo a un pH de 7.5, pero se puede cultivar en suelos alcalinos desde un pH de 6-5 a 8.5. El cultivo de nopal tunero del sitio B tiene un pH por debajo del óptimo, pero dentro del rango recomendado para el cultivo. Los sitios de cultivo de Nopal tunero A y C, se encuentran por debajo del pH recomendado, aunque en términos generales existe la disponibilidad de la mayoría de nutrientes a este pH. Los efectos de la salinidad son considerados nulos ya que todos ellos se encuentran por debajo de  $2.0 \text{ dS m}^{-1}$ , esto es bueno porque al nopal no le favorece la salinidad alta (SEMARNAT, 2003; FAO, 2018).

Cuadro 1. Propiedades químicas de los suelos del cultivo de tuna (los valores corresponden a las medias  $\pm$  errores estándar)

Nopal Tunero	pH (u. de pH)	Conductividad eléctrica ( $\text{dS m}^{-1}$ )	Materia Orgánica (%)
Sitio A	$6.30 \pm 0.17 \text{ a}^\dagger$	$0.06 \pm 0.01 \text{ b}$	$1.94 \pm 0.06 \text{ b}$
Sitio B	$7.03 \pm 0.14 \text{ a}$	$0.15 \pm 0.03 \text{ a}$	$2.81 \pm 0.18 \text{ a}$
Sitio C	$5.17 \pm 0.06 \text{ b}$	$0.04 \pm 0.00 \text{ b}$	$2.20 \pm 0.08 \text{ ab}$

† Letras distintas en la misma columna indican diferencias significativas, según la prueba de Tukey ( $p \leq 0.05$ ).

El contenido de materia orgánica en los cultivos de tuna en los sitios B y C se considera de clase media y el de sitio A se considera como pobre (Cuadro 1), según la clasificación de Tavera (1985), lo que es comprensible ya que el nopal tunero se siembra en terrenos que no tienen los requerimientos para sembrar otros cultivos. Los productores comentaron que tratan de incorporar los residuos de las podas al suelo, hacen agujeros cerca de las plantas y entierran los cladodios, o en algunos casos hace

incorporación de abonos (excremento de animales). Esta práctica aporta carbono al suelo a través de la descomposición de los residuos, y ella no solo depende de la cantidad reintegrada, sino de las características del suelo y la composición de los residuos, en especial de la fracción soluble, el contenido de lignina, hemicelulosa y polifenoles (Verhulst *et al.*, 2015b). Algunos tienen el inconveniente de que son plantaciones que tienen más de diez años y no están distribuidas en hileras de manera que se puedan hacer las labores culturales.

Lo nopales se desarrollan bien en suelos de textura franca: suelos franco-arenoso, franco-arenoso-arcilloso y arenas francas, lo cual concuerda con las clases texturales encontradas en los cultivos de nopal de la zona de Acatzingo, Puebla (Cuadro 2) (Amaya, 2009).

Cuadro 2. Clases texturales de los suelos de los sitios de cultivo de nopal tunero

Nopal tunero	Arena	Arcilla	Limo	Clase textural
	(% )			
Sitio A	54.14 ± 0.66	18.38 ± 0.87	27.47 ± 0.89	Franco arenoso
Sitio B	45.77 ± 1.62	19.09 ± 1.78	35.14 ± 1.12	Franco
Sitio C	43.73 ± 1.05	21.77 ± 1.11	34.50 ± 0.93	Franco

## 7.2. Liberación de carbono por incubación estática del suelo de los cultivos de tuna.

El comportamiento de los suelos durante la incubación estática por día (Cuadro 3) solo tuvo diferencias significativas los días 3 y 30 ( $p=0.039$  y  $p=0.012$ , respectivamente), en ambos casos la liberación fue mayor en el sitio B. El incremento en la liberación de bióxido de carbono fue proporcional al tiempo que había entre cada día de titulación.

Cuadro 3. Liberación de bióxido de carbono ( $\text{mg CO}_2\text{-C g suelo}^{-1}$ ) de los cultivos de nopal tunero (los valores corresponden a las medias  $\pm$  errores estándar).

Sitio	Día 1	Día 3	Día 7	Día 14	Día 21	Día 30
Nopal tunero A	1.52 $\pm$ 0.22 a	1.52 $\pm$ 0.34 b	3.27 $\pm$ 0.27 a	5.67 $\pm$ 0.64 a	5.67 $\pm$ 0.22 a	5.67 $\pm$ 0.22 b
Nopal tunero B	1.52 $\pm$ 0.22 a	3.04 $\pm$ 0.55 a	4.15 $\pm$ 0.64 a	5.67 $\pm$ 0.80 a	5.89 $\pm$ 0.82 a	8.29 $\pm$ 0.56 a
Nopal tunero C	1.74 $\pm$ 0.43 a	2.83 $\pm$ 0.22 ab	4.15 $\pm$ 0.22 a	4.80 $\pm$ 0.56 a	4.58 $\pm$ 0.41 a	6.98 $\pm$ 0.65 ab

†Letras distintas en la misma columna indican diferencias significativas, según la prueba de Tukey ( $p \leq 0.05$ ).

Para realizar una mejor representación de los resultados se realizó la Figura 4 que nos presenta los acumulados de liberación de bióxido de carbono por los diferentes días de titulación. El sitio que tuvo la mayor liberación de bióxido de carbono fue el sitio B, después de 30 días liberó  $28.57 \text{ mg CO}_2\text{-C g suelo}^{-1}$ , seguido del sitio C que liberó  $25.07 \text{ mg CO}_2\text{-C g suelo}^{-1}$  ambos iniciaron con los mismos valores en los días 1, 3, y 7, pero después la liberación del sitio C fue menor en los siguientes días de titulación, la liberación acumulada para el sitio A fue de  $23.33 \text{ mg CO}_2\text{-C g suelo}^{-1}$ .

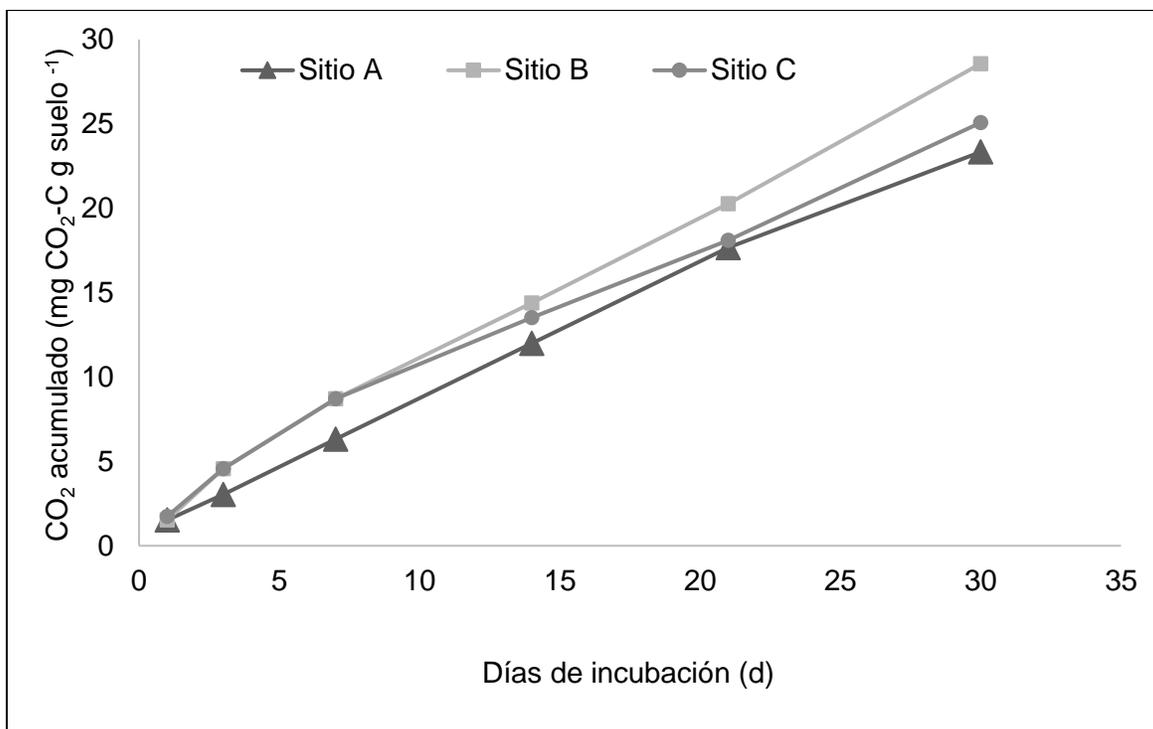


Figura 4. Liberación acumulada de bióxido de carbono en los sitios de cultivo de nopal tunero.

En la figura 4, se puede observar que se presenta una tendencia casi lineal para los tres sitios analizados. Para encontrar un modelo de regresión que represente los datos de mejor manera se realizó un análisis en el programa CurveExpert Profesional 2.6.5. En todos los sitios el modelo que mejor se ajustan es el de regresión lineal simple, por lo cual son representados por la ecuación:

$$y = a + b x$$

Los valores de los coeficientes de regresión para cada uno de los sitios se muestran en el Cuadro 4. Los tres sitios tienen un coeficiente de determinación alto, así como también el coeficiente de correlación, lo que nos muestra que son representados de manera adecuada por estos modelos.

Cuadro 4. Coeficientes de modelos de regresión lineal simple de los sitios del cultivo de tuna en relación a su liberación de bióxido de carbono.

Nopal Tunero	a	b	R <sup>2</sup>	r	Error estándar
Sitio A	0.950	0.765	0.92	0.96	2.43
Sitio B	1.560	0.903	0.85	0.92	4.08
Sitio C	2.154	0.773	0.90	0.85	2.73

a=punto de corte en el eje de ordenadas, b=pendiente o gradiente de la recta, R<sup>2</sup>=coeficiente de determinación, r= coeficiente de correlación.

En la Figura 5 se muestran las líneas generadas con los datos de coeficientes de regresión y se compran con los valores obtenidos del experimento del laboratorio. Los resultados nos muestran que la liberación de carbono se mantuvo constante durante todos los días de incubación en los tres sitios.

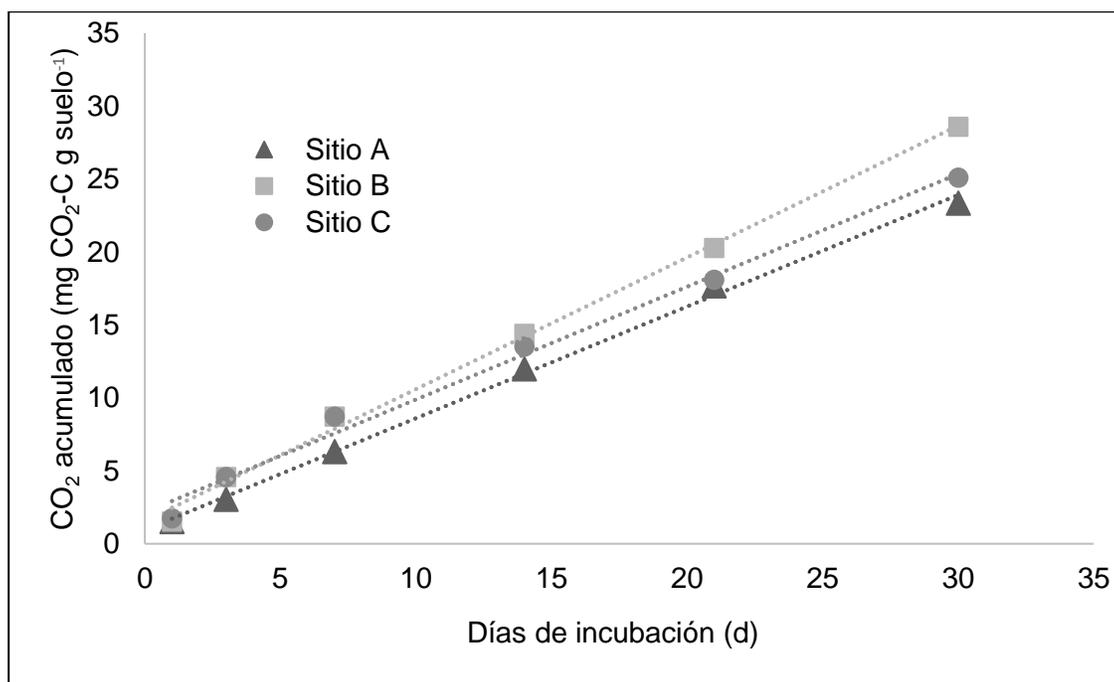


Figura 5. Modelos de regresión lineal simple y datos de incubación acumulada para los cultivos de nopal tunero.

En la presente investigación se propone que existe una relación entre el contenido de materia orgánica y la liberación de bióxido de carbono por lo cual se realizó un análisis de correlación de Pearson. El coeficiente de correlación obtenido fue de 0.646 para una significancia de  $p=0.01$ , por lo cual se puede decir que tiene una correlación regular directamente proporcional entre el contenido de materia orgánica y la liberación de carbono.

Para la comparación con los otros cultivos analizados se consideró el sitio A por tener los coeficientes más altos en determinación y correlación en el modelo de regresión lineal simple.

### **7.3. Propiedades químicas del suelo de los diferentes agroecosistemas**

El pH de los suelos analizados (Cuadro 5) se encontró entre el rango de 4.15 a 7.53, siendo el menor el del cultivo de piña, esto concuerda con lo reportado por Sánchez *et al.* (2011), que reportó un pH de 4.4, para el cultivo de piña se recomienda un pH entre 4.5 a 5.5. El pH para el cultivo de caña de azúcar se considera adecuado cuando se encuentra en el rango de 5.5 a 7.8, por lo cual el encontrado en el cultivo analizado se puede considerar ligeramente debajo del óptimo, ya que a ese pH se pueden presentar problemas por la presencia de elementos en concentraciones tóxicas de aluminio, hierro y manganeso (SAGARPA, 2015).

Todos los sistemas que se estudiaron presentaron diferencias estadísticamente significativas en pH, conductividad eléctrica y materia orgánica. La materia orgánica y el pH son los parámetros químicos que influyen de manera directa e importante en la biota del suelo, y ambos son afectados por el manejo que se le da al sistema por parte del humano, lo que provoca una degradación de las propiedades químicas, físicas y biológicas del suelo, lo que conlleva que la productividad disminuya (Sánchez *et al.*, 2011).

Cuadro 5. Propiedades químicas de los suelos de los diferentes sistemas (los valores corresponden a las medias  $\pm$  errores estándar)

Sistema	pH (u. de pH)	Conductividad eléctrica (dS m <sup>-1</sup> )	Materia Orgánica (%)
Manglar	7.53 $\pm$ 0.36 a	17, 28 $\pm$ 6.62 a	1.85 $\pm$ 0.33 ab
Piña	4.15 $\pm$ 0.34 c	0.66 $\pm$ 0.39 b	1.45 $\pm$ 0.42 b
Caña de azúcar	5.34 $\pm$ 0.30 bc	0.25 $\pm$ 0.12 b	2.55 $\pm$ 0.12 a
Nopal tunero	6.30 $\pm$ 0.17 ab	0.06 $\pm$ 0.01 b	1.94 $\pm$ 0.06 ab

†Letras distintas en la misma columna indican diferencias significativas, según la prueba de Tukey ( $P \leq 0.05$ ).

El contenido de materia orgánica en el cultivo de caña de azúcar se considera medio según la clasificación de Tavera (1985), y los cultivos de piña y nopal tunero se consideran pobres. En el cultivo de piña hay reincorporación del rastrojo de las plantas después de la segunda cosecha (27 a 29 meses), puede ser de dos formas, la primera se realiza por medio de un secado químico y posterior quema, los residuos se incorporan al suelo a través de rastra; la segunda se hace en verde, se aplica la rastra para molienda e incorporación al suelo del rastrojo, y se puede acompañar con la aplicación de microorganismos degradadores, porque los suelos tiene un pH bajo y eso limita la presencia de microorganismos. Este tipo de materia orgánica es de lenta degradación (Hernández-Chaverri y Prado, 2018).

El suelo del cultivo de caña de azúcar analizado tiene condiciones de textura para el cultivo (Cuadro 6), ya que los suelos más adecuados para ello son los de textura franca arcillosos. La textura encontrada para el cultivo de piña es cercana a las óptimas del cultivo, que son desde arcillo arenosa hasta arenosa, aunque es recomendable suelo con menos de 20% de arcilla (Sánchez y Caraveo, 1996).

Cuadro 6. Clases texturales de los diferentes sistemas

Sistema	Arena	Arcilla	Limo	Clase textural
	(% )			
Manglar	75.16 ± 1.26	6.89 ± 2.23	17.95 ± 1.12	Franco arenoso
Piña	59.83 ± 4.02	30.17 ± 2.56	10.00 ± 2.19	Franco arcillo arenoso
Caña de azúcar	63.68 ± 0.91	22.13 ± 0.65	14.19 ± 1.02	Franco arcillo arenoso
Nopal tunero	54.14 ± 0.66	18.38 ± 0.87	27.47 ± 0.89	Franco arenoso

#### 7.4. Liberación de carbono por incubación estática del suelo de los diferentes agroecosistemas.

El comportamiento de los suelos durante la incubación estática por día (Cuadro 7) tuvieron diferencias significativas los días 1, 14 y 30 ( $p=0.001$ ,  $p=0.001$  y  $p=0.000$ , respectivamente). Los suelos de Manglar y caña de azúcar fueron los que iniciaron con mayor liberación de bióxido de carbono, pero conforme pasaron los días de titulación en incubación estática el suelo del cultivo de caña fue disminuyendo su liberación. El cultivo de piña liberó más bióxido de carbono en los primeros siete días y luego bajo drásticamente. En los primeros días, el cultivo de tuna tuvo menor liberación de bióxido de carbono, sin embargo, en los últimos días, este tratamiento fue de los más altos. La alta liberación, refleja la presencia de carbono de disponibilidad inmediata proveniente de compuestos fácilmente degradables (Santibáñez *et al.*, 2006)

Cuadro 7. Liberación de bióxido de carbono (mg CO<sub>2</sub>-C g suelo<sup>-1</sup>) de los diferentes sistemas (los valores corresponden a las medias ± errores estándar).

Sistema	Día 1	Día 3	Día 7	Día 14	Día 21	Día 30
Manglar	4.24 ±	5.31 ±	7.70 ±	3.45 ±	3.80 ±	5.87 ±
	0.62 a	1.84 a	2.47 a	0.35 ab	0.92 ab	3.81 a
Piña	3.18 ±	1.77 ±	4.19 ±	1.38 ±	0.34 ±	0.69 ±
	0.00 ab	0.35 a	0.01 a	0.35 b	0.34 c	0.34 a
Caña de azúcar	4.24 ±	4.95 ±	4.88 ±	3.80 ±	3.11 ±	2.42 ±
	0.62 a	2.83 a	0.71 a	0.35 a	0.60 b	0.70 a
Nopal tunero	1.52 ±	1.52 ±	3.27 ±	5.67 ±	5.67 ±	5.67 ±
	0.22 b	0.34 a	0.27 a	0.64 a	0.22 a	0.22 a

†Letras distintas en la misma columna indican diferencias significativas, según la prueba de Tukey ( $p \leq 0.05$ ).

Para exponer de mejor los resultados se realizó la Figura 6, en donde se presentan los acumulados de liberación de bióxido de carbono para los días de titulación en los diferentes sistemas. El sitio que tuvo la mayor liberación de bióxido de carbono fue el manglar, después de 30 días liberó 30.40 mg CO<sub>2</sub>-C g suelo<sup>-1</sup>, seguido de los cultivos de caña de azúcar y nopal tunero que liberaron 23.40 y 23.33 mg CO<sub>2</sub>-C g suelo<sup>-1</sup> respectivamente, el tratamiento que arrojó menos carbono liberado fue el suelo del cultivo de piña con un valor acumulado de 11.54 mg CO<sub>2</sub>-C g suelo<sup>-1</sup> después de 30 días. Estas diferencias se pueden deber al manejo del cultivo, de manera importante en el uso de productos químicos, que pudieran generar cierta toxicidad en el suelo, lo cual puede afectar a los microorganismos del suelo (Pose-Juan *et al.*, 2015). Aunque también es importante señalar que puede deberse a los factores abióticos que determinan los procesos de respiración del suelo, dos de ellos son la presencia de humedad y temperatura (Maya y Arriaga, 1996). En el caso del nopal tunero al haber humedad presente y temperatura, se logra activar el crecimiento de microorganismos del suelo liberando bióxido de carbono a la atmósfera.

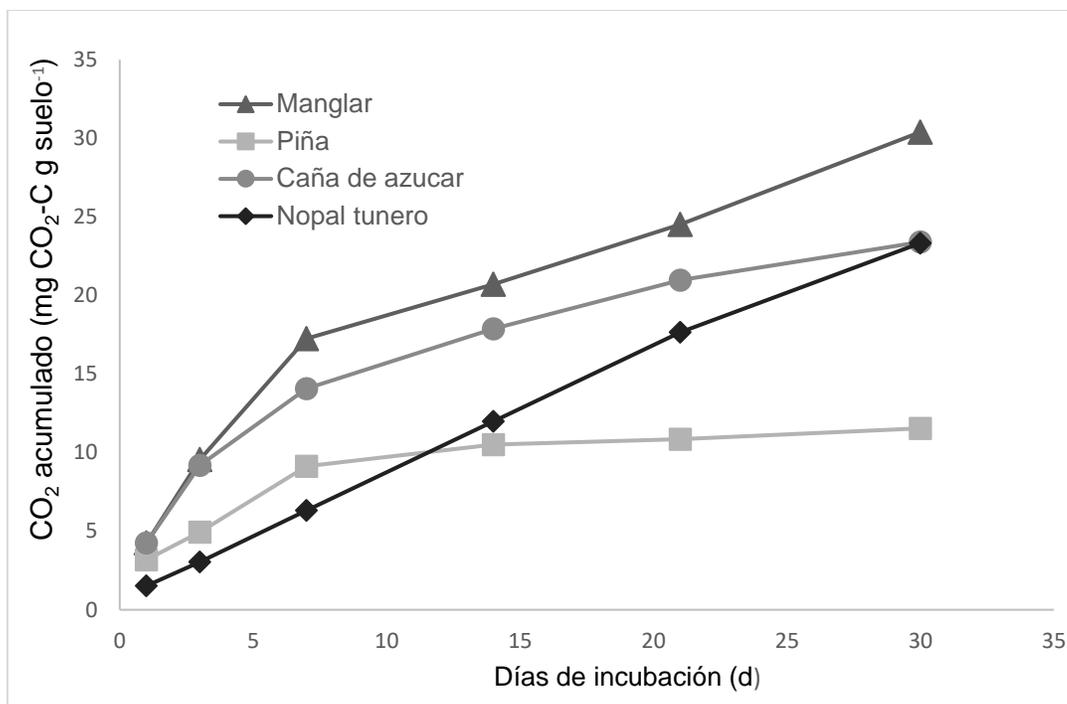


Figura 6. Liberación acumulada de bióxido de carbono en los diferentes sistemas.

Por las diferentes tendencias de liberación de bióxido de carbono que presentan los agroecosistemas, se analizaron los datos en programa CurveExpert para identificar cual modelo de regresión se ajusta a cada caso. En el cuadro 8, se observa que para los casos de manglar, piña y caña de azúcar se obtienen regresiones polinomiales de segundo grado, esto indica que la liberación de carbono es mayor en los primeros días y luego tiende a estabilizarse, y es más notorio en la piña, ya que a partir del día 7, su liberación de bióxido de carbono tiende a estabilizarse. En el caso del nopal tunero se obtiene un modelo de regresión lineal, en donde muestra que este sistema se mantiene liberando carbono de manera constante durante el tiempo del experimento.

Los cuatro sitios tienen un coeficiente de determinación alto, así como también el coeficiente de correlación, lo que muestra que son representados de manera adecuada por estos modelos. Al comparar las líneas de los modelos de regresión obtenidos con los valores del experimento se observa que se ajustan de manera adecuada (Figura 7).

Cuadro 8. Coeficientes de modelos de regresión de los diferentes sistemas en relación a su liberación de bióxido de carbono.

Sistema	a	b	c	R <sup>2</sup>	r	Error estándar
Manglar	4.791	1.494	-0.022	0.96	0.98	2.47
Piña	3.035	0.774	-0.017	0.93	0.97	1.15
Caña de azúcar	4.490	1.319	-0.023	0.97	0.99	1.49
Nopal tunero	0.950	0.765	N.A.	0.92	0.96	2.43

a=punto de corte en el eje de ordenadas, b y c=coeficientes de la ecuación, R<sup>2</sup>=coeficiente de determinación, r= coeficiente de correlación, N.A.= No aplica.

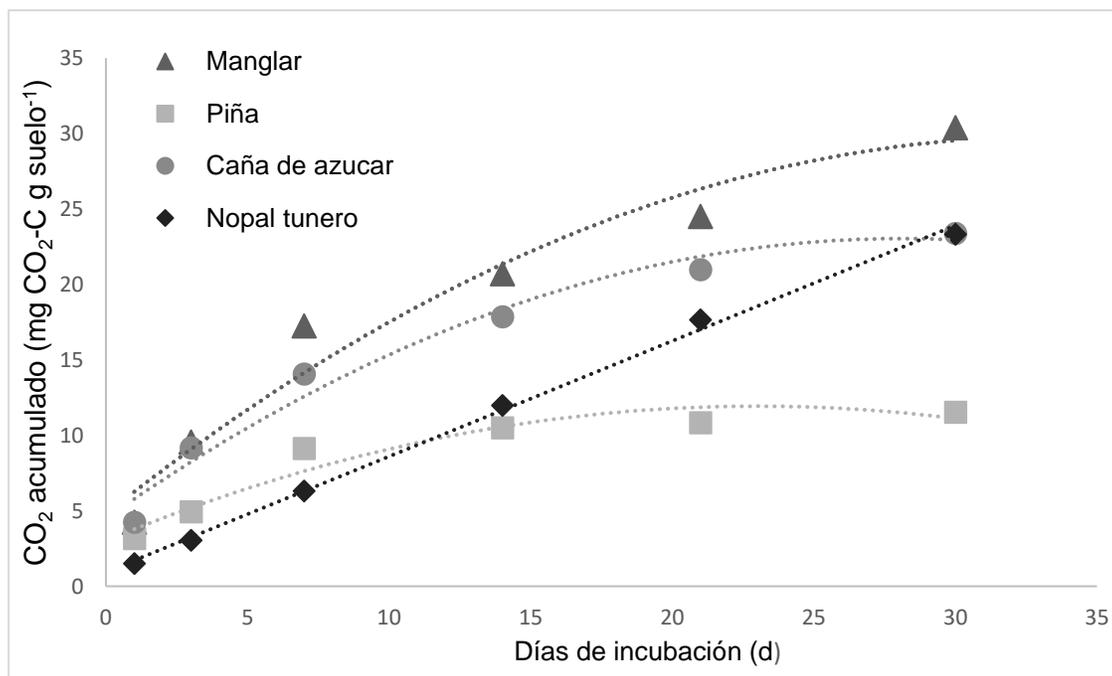


Figura 7. Modelos de regresión y datos de incubación acumulada para los diferentes sistemas.

En la presente investigación se propone que existe una relación entre el contenido de materia orgánica y la liberación de bióxido de carbono por lo cual se realizó un análisis de correlación de Pearson. No se encontró correlación entre el contenido de carbono y la liberación de carbono (Coeficiente de correlación 0.358 a una significancia de 0.280). Esto probablemente se debe a que puede haber más factores que influyen en la liberación de bióxido de carbono del suelo a la atmósfera.

## **8. CONTRASTACIÓN DE HIPÓTESIS**

La hipótesis establece que el contenido de materia orgánica en suelo de diferentes agroecosistemas tiene una relación proporcional con la liberación de bióxido de carbono. Por los resultados obtenidos en la investigación, en donde no se puede establecer una correlación entre los contenidos de materia orgánica y la liberación de bióxido de carbono de los diferentes agroecosistemas, se rechaza la hipótesis.

## **9. CONCLUSIONES**

Los suelos involucrados en la investigación resultaron con un contenido medio y bajo de materia orgánica, y esto es una señal de la pérdida de calidad del suelo a nivel productivo, pero a nivel ambiental indica que el suelo pierde su capacidad de ser un reservorio de carbono.

El pH de los suelos está por debajo de lo recomendado para cada tipo de cultivo, por lo cual la disponibilidad de nutrientes se puede ver limitada en algunos aspectos para el desarrollo óptimo de las plantas.

La liberación de carbono del suelo es un indicativo de los procesos que se llevan a cabo en el suelo, por lo cual un suelo con baja liberación es indicativo de que la calidad del suelo es mala.

## **10. RECOMENDACIONES**

En algunos cultivos se pretende reintegrar material vegetal para reponer la materia orgánica, sin embargo, debido a los resultados obtenidos esta acción es siendo insuficiente. Por lo cual se recomienda integrar mejores fuentes de materia orgánica para que el suelo recupere su calidad.

Tener un control de las propiedades químicas del suelo para un desarrollo adecuado de las plantas y con ello lograr mayor captura de carbono en la biomasa vegetal.

La liberación de carbono en el agroecosistema nopal tunero mostró un comportamiento diferente al resto de los agroecosistemas, por lo cual se sugiere que se estudie de manera más amplia los factores que intervienen.

Se sugiere integrar más variables para el estudio de la liberación de carbono en los diferentes tipos de agroecosistemas, ya que al tener cada uno un manejo distinto, hay variables que pueden tener un mayor efecto en la transformación de carbono en bióxido de carbono.

## 11. LITERATURA CITADA

- Acosta-Mireles, M., J. Vargas-Hernández, A. Velázquez-Martínez, y J. Etchevers-Barra. 2002. Estimación de la biomasa aérea mediante el uso de relaciones alométricas en seis especies arbóreas en Oaxaca, México. *Agrociencia* 36: 725-736.
- Agencia Europea del Medio Ambiente. 2015. El suelo y el cambio climático. Señales - Vivir en un clima cambiante. pp: 27-31.
- Alef, K., and P. Nannipieri. 1995. *Methods in applied soil microbiology and biochemistry*. Academic Press. London, England. pp: 49-121.
- Amaya R., J. E. 2009. El cultivo de tuna (*Opuntia ficus indica*). Gerencia Regional Agraria La Libertad, Trujillo, Perú. 18 p.
- Andrade, J. H., y M. Ibrahim. 2003. ¿Cómo monitorear el secuestro de carbono en los sistemas silvopastoriles? *Agroforestería en las Américas* 10: 109-116.
- Arnold, M., y F. Osorio. 1998. Introducción a los Conceptos Básicos de la Teoría General de Sistemas. *Cinta de Moebio* 3: 40-49.
- Arras V., A. M. 2010. Comunicación organizacional. Dirección de extensión y Difusión Cultural. 3 ed. UACH-Doble Hélice. pp. 111-150.
- Baccini, A., S. J. Goetz, W. S. Walker, N. T. Laporte, M. Sun, D. Sulla, J. Hackler, P. S. A. Beck, R. Dubayah, M. A. Friedl, S. Samanta, and R. A. Houghton. 2012. Estimated carbon dioxide emissions from tropical deforestation improved by carbon-density maps. *Nature Climate Change* 2: 182-185.
- Bouyoucos, G. J. 1927. The hydrometer as a new method for the mechanical analysis of soils. *Soil Science* 23: 343-354.
- Burbano O., H. 2018. El carbono orgánico del suelo y su papel frente al cambio climático. *Revista de Ciencias Agrícolas* 35: 82-96.
- Castillo, X., C. García-Delgado, y E. Eymar. 2010. Determinación del flujo de liberación de CO<sub>2</sub> de materiales orgánicos en relación al contenido de humedad. *Acta de Horticultura* 59: 59-64.

- Caviglia, O. P., A. B. Wingeyer, y L. E. Novelli. 2016. El rol de los suelos agrícolas frente al cambio climático. Serie de Extensión INTA Paraná 78: 27-32.
- Equihua Z., M., A. Hernández H., O. Pérez M., G. Benítez B., y S. Ibáñez B. 2016. Cambio global: el Antropoceno. Ciencia Ergo Sum 23: 67-75.
- Epstein, P. R., y C. Rogers. 2004. Inside the Greenhouse. The impacts of CO<sub>2</sub> and climate change on public health in the Inner City. The Center for Health and the Global Environment-Harvard Medical School, Boston, USA. 28 p.
- Etchevers, J. D., C. Prat, C. Balbontín, M. Bravo, and M. Martínez. 2006. Influence land use on carbon sequestration and erosion in Mexico: A review. Agronomy for Sustainable Development 26: 21-28.
- FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura). 2001. Soil carbon sequestration for improved land management. World soil reports 96. Roma, Italia. 58 p.
- FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura). 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 (FAO), Roma, Italia. 61 p.
- FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura). 2018. Ecología del cultivo, manejo y usos del nopal. Inglese, P., C. Mondragon J., A. Nefzaoui, y C. Sáenz (ed.) FAO. pp: 31-43.
- Garduño, R. 2004. ¿Qué es el efecto invernadero? *In*: Cambio climático: una visión desde México. Martínez, J. y A. Fernández B. (comps). Secretaria del Medio Ambiente y Recursos Naturales e Instituto Nacional de Ecología. D. F., México. pp: 29-39.
- García, C., F. Gil-Sotres, T. Hernández, y C. Trasar-Cepeda. 2003. Técnicas de análisis de parámetros bioquímicos en suelos: medida de actividades enzimáticas y biomasa microbiana. Mundi-Prensa, Madrid, España. 371 p.

- Gómez-Echeverri, L. 2000. Cambio climático y desarrollo. PNUD-Yale School of Forestry and Environmental Studies. San José, Costa Rica. 465 p.
- Hernández-Chaverri, R. A. y L. A. Prado B. 2018. Impacto y oportunidades de biorrefinería de los desechos agrícolas del cultivo de piña (*Ananas comosus*) en Costa Rica. UNED Research Journal 10: 455-468.
- Hernández, M. E. 2010. Suelos de humedales como sumideros de carbono y fuente de metano. Terra Latinoamericana 28: 139-147.
- Hernández J., A., A. Cabrera R., Y. Borges B., D. Vargas B., A. Bernal F., M. Morales D., y M. O. Ascanio G. 2013. Degradación de los suelos ferralíticos rojos lixiviados y sus indicadores de la Llanura Roja de La Habana. Cultivos Tropicales 34: 45-51.
- Hernández, J. E., D. Tirado T. y R. I. Beltrán H. 2014. Captura de carbono en los suelos. Pádi Boletín Científico de Ciencias Básicas e Ingenierías del ICBI 1. <https://www.uaeh.edu.mx/scige/boletin/icbi/n2/e4.html>. (Consulta: mayo, 2019).
- Hernández X., E. 1977. El agroecosistema, concepto central en el análisis, la investigación y la educación agrícola en México. *In: Agroecosistemas de México: contribución a la enseñanza, investigación y divulgación agrícola*. Hernández X., E. (ed.). Colegio de Postgraduados. Chapingo, México. pp: 15-20.
- Hontoria, C., J. C. Rodríguez-Murillo, y A. Saa. 2004. Contenido de carbono orgánico en el suelo y factores de control en la España peninsular. Edafología 11: 149-157.
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). 2001. Climate Change 2001: The Scientific Basis. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Houghton, J.T., Y. Ding, D.J. Griggs, M. Noguer, P.J. van der Linden, X. Dai, K. Maskell, and C.A. Johnson (eds.). Cambridge University Press. Cambridge, United Kingdom and New York, USA. 881p.
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). 2007. Cambio climático 2007: Informe de síntesis. Contribución de los grupos de trabajo I, II y III al cuarto informe de evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático. R. K. Pachauri y A. Reisinger (eds.). IPCC. Ginebra, Suiza. 103 p.

- Lal, R. 2003. El cambio climático global y la dinámica del carbono en el suelo. IAI NewsLetter 32: 28-30.
- Lessard, R., L. D. Gignac, y P. Rochette. 2006. El ciclo del carbono: Midiendo el flujo del CO<sub>2</sub> del suelo. Disponible en: <https://greenteacher.com/article%20files/elciclodelcarbono.pdf>. (Consulta: mayo, 2019).
- Maya, Y., and L. Arriaga. 1996. Litterfall and phenological patterns of the dominant overstorey species of a desert scrub community of the northwestern Mexico. Journal of Arid Environment 34: 23-35.
- Martínez H. E., J. P. Fuentes E., y E. Acevedo H. 2008. Carbono orgánico y propiedades del suelo. Revista de la Ciencia del Suelo y Nutrición Vegetal 8: 68-96.
- Moreno C., E., A. Guerrero P., M. del C. Gutiérrez C., C. A. Ortiz S., y D. J. Palma L. 2002. Los manglares de Tabasco, una reserva natural de carbono. Madera y Bosques 8: 115-128.
- Mosquera, O., P. Buurman, B. L. Ramírez, and M. C. Amézquita. 2012. Carbon replacement and stability changes in short-term silvo-pastoral experiments in Colombian Amazonia. Geoderma 170: 56-63.
- OMM (Organización Meteorológica Mundial). 2009. Greenhouse gas bulletin No. 5. The state of greenhouse gases in the atmosphere using global observations through 2008. Geneva, Switzerland. 4 p.
- OMM (Organización Meteorológica Mundial). 2019. Declaración de la OMM sobre el estado del clima mundial en 2018. Ginebra, Suiza. 42 p.
- Orellana-Rivadeneira, G., M. L. Sandoval-Solís, G. Linares-Fleites, N. E. García-Calderón, y J. V. Tamariz-Flores. 2012. Descripción de la dinámica de carbono en suelos forestales mediante un modelo de reservorios. Avances en Ciencias e Ingeniería 3: 123-135.
- Ortiz, A., L. Riascos, y E. Somarriba. 2008. Almacenamiento y tasa de fijación de biomasa y carbono en sistemas agroforestales de cacao (*Theobroma cacao*) y laurel (*Cordia alliodora*). Agroforestería en Américas 46: 26-29.

- Pardos, J. A. (2010). Los ecosistemas forestales y el secuestro de carbono ante el calentamiento global. Instituto Nacional de Investigación y Tecnología Agraria y Alimentaria (INIA). Ministerio de Ciencia e Innovación. Madrid, España. 253 p.
- PNUD (Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo). 2007. Informe sobre Desarrollo Humano 2007-2008. La lucha contra el cambio climático: solidaridad frente a un mundo dividido. Mundi-Prensa. Distrito Federal. México. pp: 1-30.
- Pose-Juan, E., M. J. Sánchez-Martín, E. Herrero-Hernández, and M. S. Rodríguez-Cruz. 2015. Application of mesotrione at different doses in amended soil: Dissipation and effect on the soil microbial biomass and activity. *Science of the Total Environment* 536: 31-38.
- Reicosky, D. C. 2002. Long – Term effect of moldboard plowing on tillage – Induced CO<sub>2</sub> loss. *In: Agricultural Practices and Policies for Carbon Sequestration in Soil*. J. M. Kimble, R. Lal, and R. F. (ed.). Lewis Publishers. Papers from symposium held July 1999 at Ohio State University, Columbus, Ohio. USA. pp: 87-96.
- Ruiz-Rosado, O. 2006. Agroecología: una disciplina que tiende a la transdisciplina. *Interciencia* 31: 140-145.
- Rügnitz T., M., M. Chacón L., y R. Porro. 2009. Guía para la determinación de carbono en pequeñas propiedades rurales. Centro Mundial Agroforestal (ICRAF)/Consorcio Iniciativa Amazônica (IA). Lima, Perú. 79p.
- SAGARPA (Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación). 2015. Ficha técnica del cultivo de la caña de azúcar (*Saccharum officinarum* L.). Comité Nacional para el Desarrollo Sustentable de la Caña de Azúcar (CONADESUCA). 19 p.
- Sánchez-Hernández, R., V. M. Ordaz-Chaparro, G. S. Benedicto-Valdés, C. I. Hidalgo-Moreno, y D. J. Palma-López. 2006. Regeneración estructural de un suelo arcilloso por aportes de vermicompost en la Chontalpa, Tabasco, México. *Universidad y Ciencia* 22: 13-26.
- Sánchez-Hernández, R., R. Ramos-Reyes, V. Geissen, J. de D. Mendoza-Palacios, E. de la Cruz-Lázaro, E. Salcedo-Pérez, y D. J. Palma-López, 2011. Contenido de

- carbono en suelos con diferentes usos agropecuarios en el trópico mexicano. *Terra Latinoamericana* 29: 211-219.
- Sánchez P. V., y F. J. Caraveo L. 1996. El sistema producto-piña en México: Situación, tendencias, problemáticas y alternativas. Centro de investigaciones Económicas, Sociales y Tecnológicas de la Agroindustria y la Agricultura Mundial de la Universidad Autónoma de Chapingo, México. 105 p.
- Santibáñez, C., M. T. Varnero, y R. Ginocchio. 2006. Mineralización de carbono y nitrógeno en relaves mineros acondicionados con biosólidos. *In: Medio ambiente de Iberoamérica. Visión desde la física y la química en los árboles del siglo XXI. Tomo III.* J. F. Gallardo (ed.). Sociedad Iberoamericana de Física y Química Ambiental. Badajoz, España. pp. 337-343.
- SEDESOL (Secretaría de Desarrollo Social). 2019. Unidad de microrregiones. Cédulas de Información Municipal (SCMI). <http://www.microrregiones.gob.mx/zap/Default.aspx>. (Consulta: marzo, 2019).
- Segura-Castruita, M. A., P. Sánchez-Guzmán, C. A. Ortiz-Solorio, y M. A. Gutiérrez-Castonera. 2005. Carbono orgánico de los suelos de México. *Terra Latinoamericana* 23: 21-28.
- SEMARNAT (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales). 2003. Norma Oficial Mexicana NOM-021-SEMARNAT-2000 que establece las especificaciones de fertilidad de fertilidad, salinidad y clasificación del suelo, estudio, muestreo y análisis. Diario Oficial de la Federación. Distrito Federal. México. 85 p.
- Smith, R. L., y T. M. Smith. 2005. *Ecología*. Pearson Addison Wesley. Madrid España. pp: 653-682.
- Swift, R. 2001. Sequestration of carbon by soil. *Soil Science* 166: 858-871.
- Tavera, S. G. 1985. Criterios para la interpretación y aprovechamiento de los reportes de laboratorio para las áreas de asistencia técnica. Publicación 3. Sociedad Mexicana de la Ciencia del Suelo. Delegación La Laguna. Coahuila, México. 258 p.

- Torres, J., W. Espinoza, L. Reddiar, y A. Vázquez. 2011. Secuestro de carbono en potreros arbolados, potreros sin árboles y bosques caducifolio de Huatusco, Veracruz. *Tropical and Subtropical Agroecosystems* 13: 543-549.
- USDA (United State Department of Agriculture). 2004. Soil Survey Laboratory Methods Manual. R. Burt (ed.). Soil Survey Investigations Report 42. 700 p.
- Vågen, T.-G., R. Lal y B. R. Singh. 2005. Soil carbon sequestration in sub-Saharan Africa: a review. *Land Degradation and Development* 16: 53-71.
- Vela C., G., J. López B., y M. de L. Rodríguez G. 2012. Niveles de carbono orgánico total en el Suelo de Conservación del Distrito Federal, centro de México. *Investigaciones Geográficas* 77: 18-30.
- Verhulst, N., I. François, y B. Govaerts. 2015a. Agricultura de conservación y captura de carbono en el suelo: Entre el mito y la realidad del agricultor. Centro Internacional de Mejoramiento Maíz y Trigo. Distrito Federal, México. 16 p.
- Verhulst, N., I. François, y B. Govaerts. 2015b. Agricultura de conservación, ¿mejora la calidad del suelo a fin de obtener sistemas de producción sustentable? Centro Internacional de Mejoramiento Maíz y Trigo. Distrito Federal, México. 18 p.
- Von Bertalanffy, L. 1976. El significado de la teoría general de sistemas. *In*: La teoría general de sistemas. Fondo de Cultura Económica. Distrito Federal, México. pp. 30-53.
- Walkley, A., and A. Black. 1934. An examination of the Degtjareff method for determining soil matter and proposed modification of the chromic acid titration method. *Soil Science* 37: 29-38.
- Zamora-Morales, B. P., M. Mendoza-Cariño, D. M. Sangerman-Jarquín, A. Quevedo N., y A. Navarro B. 2019. La investigación científica en México: secuestro de carbono orgánico en suelos agrícolas y de agostaderos. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas* 10: 155-164.

## 12. ANEXO



Sitios de muestreo de nopal tunero en Acatzingo, Puebla (a, b y c), toma de muestras en cultivo de nopal tunero (d y e), Sitio de muestreo de manglar en Alvarado, Veracruz (f), toma de muestra en manglar (g y h).



Sitio de muestreo de piña y caña de azúcar en Medellín, Veracruz (i, j y k). Acondicionamiento de la muestra para análisis de laboratorio (l). Incubación estática para cuantificar liberación de bióxido de carbono (m y n).