

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA CHAPINGO



**DIVISIÓN DE CIENCIAS ECONÓMICO
ADMINISTRATIVAS**

DOCTORADO EN CIENCIAS EN ECONOMÍA AGRÍCOLA

**META-ANÁLISIS DE CAPTURA DE CARBONO ATMOSFÉRICO A
TRAVÉS DE AGRICULTURA DE CONSERVACIÓN EN MÉXICO**

TESIS PROFESIONAL

QUE COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL GRADO DE:

DOCTOR EN CIENCIAS EN ECONOMÍA AGRÍCOLA

PRESENTA:

NIDIA SARAHÍ RESÉNDIZ FLORES.

BAJO LA SUPERVISIÓN DE:

DRA. ROSA MARÍA GARCÍA NÚÑEZ

DR. IGNACIO CAAMAL CAUICH



DIRECCIÓN GENERAL ACADÉMICA
DEPTO. DE SERVICIOS ESCOLARES
OFICINA DE EXÁMENES PROFESIONALES

CHAPINGO, ESTADO DE MÉXICO. NOVIEMBRE 2017.

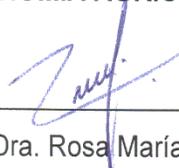


**META-ANÁLISIS DE CAPTURA DE CARBONO
ATMOSFÉRICO A TRAVÉS DE AGRICULTURA DE
CONSERVACIÓN EN MÉXICO**

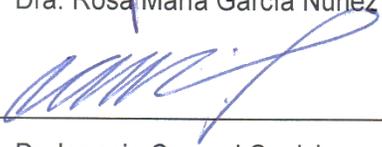
Tesis realizada por **NIDIA SARAHI RESÉNDIZ FLORES** bajo la supervisión del Comité Asesor indicado, aprobada por el mismo y aceptada como requisito parcial para obtener el grado de:

DOCTOR EN CIENCIAS EN ECONOMÍA AGRÍCOLA

DIRECTOR: _____


Dra. Rosa María García Núñez

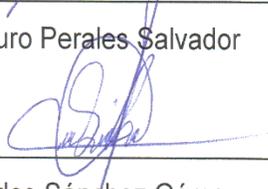
CO-DIRECTOR: _____


Dr. Ignacio Caamal Cauich

ASESOR: _____


Dr. Arturo Perales Salvador

ASESOR: _____


Dr. Carlos Sánchez Gómez

LECTOR EXTERNO: _____


Dra. Verna Gricel Pat Fernández

DEDICATORIA

D e d i c o este trabajo a la Sociedad Civil y a toda la gente honorable y trabajadora de México, deseado que con esta contribución se pueda hacer algo con la madre naturaleza y le restituyamos un poco de lo mucho que nos ha dado.

A la **Universidad Autónoma Chapingo**, al **Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología** y a toda la planta docente y administrativa que labora en mencionadas instituciones.

A mi **familia, amigos y parientes** que con infinito amor y paciencia me dieron un buen consejo, una crítica constructiva y un aliciente para culminar.

No hay secretos para el éxito. Es el resultado de la preparación, el trabajo duro y el aprendizaje del fracaso (Colin Powell).

Cada poco tiempo, alguien nos muestra, que se puede llegar un poco más lejos, que somos más de lo que pensábamos (Fernando Álvarez).

AGRADECIMIENTOS

A g r a d e z c o infinitamente a ese ser supremo de luz que ilumina y guía mi camino, al **Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología**, a la **Universidad Autónoma Chapingo - División de Ciencias Económico Administrativas** y a la **Universidad de Córdoba, España** por su colaboración al recibirme para realizar parte de esta investigación, especialmente al Dr. Emilio González Sánchez.

A mi comité asesor: A la Dra. Rosa María García Núñez
Al Dr. Ignacio Caamal Cauich
Al Dr. Arturo Perales Salvador
Al Dr. Carlos Sánchez Gómez
A la Dra. Verna Gricel Pat Fernández

A todos y cada uno de mis profesores que además de orientarme, me aconsejaron....gracias infinitas.

A mi familia, especialmente a mi esposo Francisco Torres Cruz por su amor, apoyo y comprensión en todo momento.

A mis amigos y compañeros que juntos compartimos esta etapa de nuestras vidas: Ana Mónica Zetina Espinosa, Oscar Ariel Zerecero Salazar, Antonio Aguilar López, German Gordillo Espinosa y Enrique Melo Guerrero.

DATOS BIOGRÁFICOS



Datos personales

Nombre: Nidia Sarahí Reséndiz Flores.
Fecha de nacimiento: 01/ octubre/1983
Lugar de nacimiento: Texcoco, Estado de México
CURP: REFN831001MMCSLD01
Cédula Profesional: 08703939. Maestría en Ciencias en Agroforestería para el Desarrollo Sostenible.

Egresada de la Universidad Autónoma Chapingo de la generación 2002-2007 de la carrera de Licenciados en Comercio Internacional de Productos Agropecuarios. Al egresar la Lic. Reséndiz colaboró con el INEGI como Jefa de Entrevistadores en el Censo Agropecuario 2007 y en el Censo de Población 2010. De febrero 2008 a febrero 2009 fue becaria en FIRA Tulancingo Hidalgo donde aprendió el proceso de crédito y de los programas que maneja dicha dependencia. En el 2009 fue socia fundadora de Consultores CANEA S.C de R. L., Empresa de Servicios Especializados para trámites de créditos y posteriormente en 2010 se certificó con Secretaria de Reforma Agraria con Clave Única de Habilitación y gestiona proyectos en comunidades rurales; así como capacitación a productores en diversos estados de la República. También es Prestadora de Servicios Profesionales en Financiera Nacional de Desarrollo. Para el 2011 fue aceptada en la Maestría en Agroforestería para el Desarrollo Sostenible y obtiene el grado de Maestra en Ciencias en Junio 2013 con la investigación titulada: “Goma de Mezquite y Huizache como Alternativa de Aprovechamiento en Sistemas Agroforestales”. Decide continuar sus estudios aspirando al Doctorado en Ciencias en Economía Agrícola, donde es aceptada a partir de Julio 2013.

META-ANÁLISIS DE CAPTURA DE CARBONO ATMOSFÉRICO A TRAVÉS DE AGRICULTURA DE CONSERVACIÓN EN MÉXICO ¹

RESUMEN

Se analizó la información de 15 artículos científicos de nueve estados de México, con el objetivo de conocer la factibilidad del cumplimiento de los compromisos propuestos en el Protocolo de Kioto para el 2020 cuyo objetivo primordial fue reducir las emisiones de gases de efecto invernadero y limitar el aumento de la temperatura global a 2 °C, con base en el potencial que tiene la agricultura de conservación (AC) en México, para secuestrar carbono (C) y con ello reducir la concentración de bióxido de carbono (CO₂). Lo cual servirá para obtener algunas bases científicas para los tomadores de decisiones. Con la aplicación de fórmulas se determinó el coeficiente de fijación de carbono realizando ajustes de algunas variables debido a que las técnicas de AC no son las mismas en los diferentes estados evaluados con respecto al clima, suelo, densidad y rotación de cultivos herbáceos. Se encontró que las técnicas de AC pueden promover la fijación de hasta 1.6 Gg de C año⁻¹ en el suelo, con coeficientes de fijación de C de 0.41 y 0.58 Mg ha⁻¹ año⁻¹ para Siembra Directa (SD) y Labranza Mínima (LM) respectivamente; promisorios para la adopción de AC en cada estado Mexicano.

Palabras clave: agricultura de conservación, siembra directa, labranza mínima, fijación de carbono, cambio climático.

¹ Tesis de Doctorado en Ciencias en Economía Agrícola, Universidad Autónoma Chapingo.
Autor: Nidia Sarahí Reséndiz Flores
Directora de Tesis: Dra. Rosa María García Núñez.

ABSTRACT

META-ANALYSIS OF ATMOSPHERIC CARBON CAPTURE THROUGH CONSERVATION AGRICULTURE IN MEXICO²

This information from is about 15 scientific articles from nine states of Mexico, they were analyzed in order to ascertain the feasibility of fulfilling the commitments proposed in the Kyoto Protocol for 2020. The main objective of this protocol was to reduce greenhouse gas emissions and to limit the increase in global temperature to 2 °C, based on the potential of conservation agriculture (CA) in Mexico to capture carbon (C) and thereby reduce the concentration of carbon dioxide (CO₂). It will help to provide a scientific basis for decision makers. With the application of formulas, the coefficient of carbon fixation was determined, adjusting some variables because the CA techniques are not the same in the different states evaluated with respect to climate, soil, and density and rotation of arable crops. It was found that CA techniques can promote the fixation of up to 1.6 Gg of C year⁻¹ in the soil, with C fixation coefficients of 0.41 and 0.58 Mg ha⁻¹ year⁻¹ for Direct Seeding (DS) and Minimum Tillage (MT) respectively. It is very promising for the adoption of CA in each Mexican state.

Keywords: conservation agriculture, direct seeding, minimum tillage, carbon sequestration, climate change.

² Doctoral thesis in Science in Agricultural Economics. Universidad Autónoma Chapingo.
Author: Nidia Sarahí Reséndiz Flores.
Advisor: Ph. D. Rosa María García Núñez.

CONTENIDO

DEDICATORIA	iii
AGRADECIMIENTOS.....	iv
DATOS BIOGRÁFICOS.....	v
RESUMEN	vi
ABSTRACT	vii
CONTENIDO	viii
ÍNDICE DE CUADROS.....	x
ÍNDICE DE FIGURAS.....	xi
INTRODUCCIÓN.....	12
Antecedentes	12
Justificación e importancia.....	13
Planteamiento del problema	15
Objetivos	17
Hipótesis	18
CAPÍTULO 1. CONTEXTUALIZACIÓN MUNDIAL DE AGRICULTURA DE CONSERVACIÓN Y CAMBIO CLIMÁTICO	19
1.1. La agricultura y la crisis ambiental global.....	19
1.2. El cambio climático y sus efectos en la obtención de alimentos.....	24
1.3. Panorama Mundial de la Agricultura de Conservación.....	30
CAPÍTULO 2. ELEMENTOS TEÓRICOS DE AGRICULTURA DE CONSERVACIÓN.....	40
2.1. Situación actual de la agricultura en México	40
2.2. Agricultura de conservación en México.....	46
2.3. Beneficios y limitaciones de la agricultura de conservación	49
2.4. El suelo como sumidero de carbono, beneficio de alto impacto de la agricultura de conservación	61

CAPÍTULO 3. MÉTODOS DE DEFINICIÓN DE VARIABLES Y ESTIMACIÓN DE CAPTURA DE CARBONO EN MÉXICO	65
3.1. Localización de sitios para el cálculo de fijación de carbono	66
3.2. Factores clave para el cálculo de fijación del carbono.....	70
3.3. Cálculo del coeficiente de fijación de carbono	77
3.4. Investigaciones con agricultura de conservación.....	78
CAPÍTULO 4. DISCUSIÓN DE RESULTADOS OBTENIDOS DEL COEFICIENTE DE FIJACIÓN DE CARBONO EN MÉXICO	92
4.1. Conversiones de las investigaciones con Agricultura de Conservación.....	92
4.2. Coeficientes de Fijación de carbono para Siembra Directa	102
4.3. Coeficientes de Fijación de carbono para Labranza Mínima	105
4.4. Superficie cultivada bajo agricultura de conservación	108
4.5. Promedio potencial de fijación de CO ₂ basado en la superficie bajo Agricultura de Conservación en México	110
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	112
LITERATURA CITADA	114

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 1. Principales beneficios medioambientales de la agricultura de conservación.....	53
Cuadro 2. Lista de localizaciones y sistemas de manejo de suelos comparados en las diferentes regiones analizadas.	68
Cuadro 3. Porcentajes promedio de carbono orgánico en los suelos (COS) de las regiones fisiográficas de México	73
Cuadro 4. Valores de carbono orgánico del suelo (COS) en los diferentes grupos climáticos de México	76
Cuadro 5. Información de Morelos y conversiones	93
Cuadro 6. Incremento de carbono en Morelos	94
Cuadro 7. Incremento de carbono en Tlaxcala	94
Cuadro 8. Información de Guanajuato	95
Cuadro 9. Información obtenida para Pátzcuaro Michoacán.....	96
Cuadro 10. Datos de carbono para Casas Blancas, Morelia, Apatzingán y Tepatitlán.....	97
Cuadro 11. Aumento de carbono en el Estado de México	98
Cuadro 12. Aumento de carbono en Tamaulipas.....	99
Cuadro 13. Impacto de Sistemas de Labranza de conservación y convencional por profundidad sobre el comportamiento promedio de la MO en función del tiempo (abril 2007; nov 2007 y abril 2008).	100
Cuadro 14. Promedio de MO en función del tipo de labranza y profundidad en los sitios: Tapachula, Tuxtla Chico y Frontera	101
Cuadro 15. Lista de estudios referidos al incremento de Siembra Directa con diferentes tipos de clima.	103
Cuadro 16. Lista de estudios referidos al incremento de Labranza Mínima con diferentes tipos de clima.	105
Cuadro 17. Área cultivada con Agricultura de Conservación en México.	108
Cuadro 18. Área cultivada en México con Agricultura de Conservación (2014) y potencial de fijación de carbono sobre agricultura tradicional.	110

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Degradación del suelo en México (2008)	44
Figura 2. Localización de sitios de investigaciones con agricultura de conservación.....	67
Figura 3. Fijación de carbono en SD y LM para climas tropical con lluvias en verano (Aw), seco estepario (Bs), seco desértico (Bw) y templado con lluvias en verano (Cw).....	107

INTRODUCCIÓN

Antecedentes

La agricultura es el conjunto de técnicas y conocimientos para cultivar las diferentes plantas, semillas y frutos. En ella se engloban los diferentes trabajos de tratamiento del suelo y tierra para los cultivos. Comprende todo un conjunto de acciones humanas que transforma el medio ambiente natural, en un sector de alimentación (Jácome & del Almo Rodríguez, 1999).

Todas las actividades económicas que abarca dicho sector tienen su función en la explotación de los recursos que la tierra origina, favorecida por la acción humana en el sector. Es una actividad de gran importancia estratégica como base fundamental para el desarrollo autosuficiente y riqueza de las naciones, en especial para la alimentación humana.

En México y en general en todas partes del mundo, existen dos tipos de agricultura: la de subsistencia o tradicional, y la convencional o comercial. La tradicional es donde el productor depende de la lluvia para la producción y utiliza mano de obra no asalariada para producción de sus cosechas. Esta agricultura es utilizada generalmente para el autoconsumo, y también es denominada familiar. En cambio la agricultura convencional o comercial, se caracteriza fundamentalmente por la utilización de paquetes tecnológicos, que incluyen el uso intensivo de semilla mejorada genéticamente, fertilizantes y pesticidas químicos, maquinaria agrícola y agua, entre otros; y a diferencia de la agricultura de subsistencia, las cosechas se destinan principalmente al mercado para comercializar (Taylor, 2012).

Como respuesta a los impactos ambientales de la agricultura convencional, los cuales han causado severas crisis en diversas partes del mundo, en las últimas décadas se han extendido en casi todo el mundo nuevas formas de practicar la agricultura, buscando con ello alcanzar un mayor grado de sustentabilidad en esta

actividad productiva. La denominada agricultura de conservación (AC) es un claro ejemplo de esta tendencia, la cual se define como un sistema de producción agrícola sostenible que comprende un conjunto de prácticas agronómicas adaptadas a las exigencias del cultivo y a las condiciones locales de cada región, cuyas técnicas de cultivo y de manejo de suelo lo protegen de su erosión y degradación, mejoran su calidad y biodiversidad, contribuyen a la preservación de los recursos naturales agua y aire, sin menoscabo de los niveles de producción de las explotaciones (FAO, 2016).

Para alcanzar estos objetivos, la agricultura de conservación (AC) se basa en tres principios: 1) Mínima alteración mecánica del suelo, idealmente en la forma de labranza cero y siembra directa, 2) Cubierta vegetal permanente, ya sea con materia orgánica o mediante cultivos vivos y 3) Diversificación de las especies agrícolas cultivadas, así como prácticas de rotación y asociación de cultivos. (Friedrich, 2007)

El objetivo del presente estudio es dotar de bases científicas sólidas a los tomadores de decisiones e inferir en la factibilidad de los compromisos propuestos en el Protocolo de Kioto a 2020; en base a el potencial de la agricultura de conservación en el secuestro de carbono, mediante la revisión y análisis de trabajos de investigación, con la finalidad de dar a conocer la importancia de la agricultura de conservación en la reducción de la concentración de dióxido de carbono en la atmósfera.

Por lo anterior la agricultura y el cambio climático están íntimamente relacionados, Y el presente documento pretende servir de base a la toma de decisiones en la ciencia y en la experimentación agraria en México.

Justificación e importancia

La agricultura de conservación es una alternativa de mitigación al calentamiento global y al cambio climático, debido a que en dicha labranza se destacan ventajas como la utilización de los residuos de cosechas anteriores (rastros), contribuye de manera esencial a frenar la erosión, rehabilitar, conservar el suelo y a reducir los

costos de producción, con lo que los productores pueden practicar un agricultura sustentable, aumentar la producción y productividad del agro mexicano.

En la Agricultura de Conservación se incluyen varias prácticas agronómicas que, como consecuencia, favorecen la reducción del crecimiento de malezas. Por un lado, la rotación de cultivos es útil para romper el ciclo biológico de las malezas adaptadas a un cultivo específico y a coberturas de suelo que crean un ambiente particular e inhiben la germinación de las semillas de malezas, ya sea impidiendo el pasaje de los rayos solares o mediante la exudación de sustancias alelopáticas. Además, se reduce el uso de herbicidas el que en pequeñas áreas agrícolas y a largo plazo puede ser eliminado completamente; además la presión de las malezas y su control manual se reducen sensiblemente. Al inicio de la adopción de la Agricultura de Conservación, algunas malezas perennes pueden convertirse en un problema y puede ser necesario el uso de herbicidas sistémicos particulares con el fin de agotar sus propágulos (en biología es cualquier germen, parte o estructura de un organismo, producido sexual o asexualmente, capaz de desarrollarse de manera separada para dar lugar a un nuevo organismo idéntico al que lo formó) bajo tierra. Una vez que el suelo se comienza a repoblar esa población tenderá a disminuir.

La agricultura de conservación tiene las siguientes ventajas: las semillas de malezas no son diseminadas e incorporadas en el suelo ni tampoco son traídas nuevamente a la superficie o redistribuidas por partes de las raíces, permite la integración de diferentes prácticas, lo que hace que el sistema sea más sostenible.

Las anteriores son algunas de las razones por las cuales debe realizarse esta investigación, la relevancia del presente estudio es que actualmente no se tienen datos precisos de captura de carbono atmosférico a través de la agricultura de conservación en México. Es importante para poder incentivar estas técnicas de agricultura de conservación con todos los beneficios que ellas conllevan y mejorar la situación de un modo favorable del impacto negativo de la agricultura tradicional, del calentamiento global y del cambio climático. El gobierno, los científicos y los tomadores de decisiones deben realizar políticas públicas que coadyuven a la disminución de dichos efectos negativos.

Planteamiento del problema

La agricultura convencional está fuertemente asociada a la crisis ambiental contemporánea (pérdida de biodiversidad y cambio climático), ya que las prácticas agrícolas que utilizan contribuyen a la degradación ambiental. Si hay alguna actividad productiva que dependa directamente del clima y de su variabilidad, sin duda, es ésta. Un cambio de los patrones de comportamiento en las temperaturas y precipitaciones, o del incremento de la concentración del dióxido de carbono (CO₂) atmosférico, afectará de manera significativa al desarrollo de los cultivos. Se estima que a nivel global la variabilidad climática es responsable de entre el 32 y el 39 % de la variabilidad en los rendimientos (Gil *et al.* 2017).

Para 2050 se tendrán que producir 70 % más alimentos para una población adicional de 2,300 millones de personas. (FAO, 2009) Sin embargo, es necesario mencionar que la agricultura no solo se ve afectada por el cambio climático, sino que también contribuye directa e indirectamente, de manera importante en la emisión de los tres principales gases de efecto invernadero. Ya que un tercio del cambio climático global se debe a la agricultura y ganadería debido a que aportan el 25 % de las emisiones de dióxido de carbono (CO₂), el principal gas de efecto invernadero. Algunos cultivos (como el arroz de humedales) y especies de ganado domesticado (rumiantes) son los principales emisores del metano (CH₄) atmosférico, otro gas de invernadero que, aunque tiene una concentración 220 veces menor que el CO₂, atrapa 23 veces más calor que aquel (Kasting, 2004). La fertilización nitrogenada genera el 70 % de los óxidos nitrosos (N₂O) atmosféricos (FAO, 2002). La superficie de bosques tropicales se está reduciendo en 5 % cada década. La labranza del suelo altera su estructura física, favoreciendo su erosión. Entre el 10 y 20 % de las tierras del mundo están degradadas de manera irreversible, y un tercio está en proceso de desertificación (Chomitz, 2007).

Globalmente, la causa principal del incremento en las emisiones de Gases Efecto Invernadero (GEI) son las actividades relacionadas con el sector energético que representan el 26 % de las emisiones, seguido del sector industrial con 19 %,

forestal 17 %, agrícola 14 %, residencial y comercial 8 % y de manejo de desechos 3 % (IPCC, 2013). Aunque las actividades agrícolas son la cuarta causa de emisiones de GEI, éste sector emite grandes cantidades de los llamados “gases que no son CO₂” (Montzka *et al.*, 2011). Estos gases incluyen al N₂O y el CH₄ con un poder de calentamiento 265 y 28 veces, respectivamente, mayor en comparación con el CO₂ en un escenario proyectado a 100 años (IPCC, 2013).

Científicos de todo el mundo están de acuerdo en que cuanto menos se labra, el suelo absorbe y almacena más carbono (C), y por consiguiente sintetiza más materia orgánica (MO), lo que a largo plazo aumenta su capacidad productiva (Balbotín *et al.* 2009; Carbonell-Bojollo *et al.*, 2011; González *et al.*, 2012; Houghton, 2012; Mora, 2014; Gil *et al.*, 2017) Además, está comprobado que los restos de cosecha sobre la superficie y la no alteración mecánica del suelo, trae como consecuencia directa una reducción en la tasa de descomposición de los rastrojos; una disminución de la mineralización de la MO del suelo, debido a una menor aireación y menor accesibilidad de los microorganismos a la misma; y un incremento del C del suelo. Al mismo tiempo, el no labrar disminuye el CO₂ que se libera a la atmósfera, ya que las continuas labores oxigenan el terreno en exceso, lo que favorece la oxidación del carbono, que se emite en forma de CO₂. (Gil *et al.*, 2017).

Es conocido que todo proceso energético conlleva emisión de CO₂. La Agricultura de Conservación representa una solución integral a todas las cuestiones planteadas anteriormente, contribuyendo a la mitigación del cambio climático al ser una medida de doble acción frente al aumento de la concentración de GEI en la atmósfera. Por un lado, los cambios introducidos por la AC en la dinámica del C en el suelo, traen como consecuencia directa un incremento del C en el suelo, lo que convierte a estas técnicas en una actividad de sumidero de C.

Por otro lado, la reducción drástica del número de labores junto con la no alteración mecánica del suelo, suponen una reducción de las emisiones de CO₂ derivada del ahorro energético y de la reducción de los procesos de mineralización de la MO de CO₂ a la atmósfera, toda actuación encaminada al ahorro de energía y combustible, como la reducción del número de labores, optimización del uso de insumos agrarios

y correcta ejecución de las operaciones, repercute directamente en una reducción en la emisión de GEI (Gil *et al.*, 2017).

Adicionalmente, si no se intensifican los esfuerzos de mitigación de estos gases, las emisiones de GEI del sector agrícola podrían neutralizar los esfuerzos de mitigación y de captura de carbono del sector agrícola (Saynes *et al.*, 2016).

Para poner freno a la escalada de emisiones, a finales del 2015 se celebró en Francia la 21ª sesión de la Conferencia de las Partes (COP21) y la 11ª sesión de la Conferencia de la Partes en calidad de reunión de las Partes al Protocolo de Kioto (CMP). Ésta concluyó con la adopción de un acuerdo histórico para combatir el cambio climático e impulsar medidas e inversiones para un futuro bajo en emisiones de carbono, resiliente y sostenible, el llamado Acuerdo de París.

Objetivos

General

- ✓ Analizar el potencial que tiene la agricultura de conservación en el secuestro de carbono en diferentes regiones de México para incentivar su uso.

Específicos

- Evaluar la perspectiva y panorama actual los múltiples beneficios de la agricultura de conservación en México.
- Analizar metodologías de trabajos relativos al carbono bajo agricultura de conservación.
- Calcular el coeficiente de fijación de carbono a través de diversos indicadores y conversiones de agricultura de conservación.
- Valorar la agricultura de conservación como medida de mitigación y adaptación ante el cambio climático.

Hipótesis

La Agricultura de Conservación coadyuva a disminuir los Gases Efecto Invernadero secuestrando dióxido de carbono el cual puede comercializarse en el mercado mediante certificados de reducción de emisiones para mitigar los efectos del cambio climático.

Con el propósito de organizar la información, el documento se estructuró de la siguiente forma:

En el capítulo uno, denominado Contexto Mundial de Agricultura de Conservación y cambio climático; se presentan los panoramas de agricultura y la crisis ambiental global, el cambio climático en sus efectos en la obtención de alimentos, y la situación en la que se encuentra la agricultura de conservación a nivel global.

En el capítulo dos se ubican los elementos teóricos de la agricultura de conservación de manera general y específicamente como se desarrolla la agricultura de conservación en México, sus beneficios, limitaciones y el principal beneficio: la agricultura de conservación como sumidero o captura de carbono.

El capítulo tres se denomina Métodos de definición de variables y estimación del coeficiente de fijación de carbono en México, en el cual se desarrollan las conversiones de los datos utilizados de los artículos científicos con los que se realizó este trabajo, se desarrollan las fórmulas y los cálculos para el coeficiente de fijación de carbono.

El capítulo cuatro es la discusión de resultados obtenidos de fijación de carbono en México y se presentan los resultados obtenidos, los coeficientes de fijación de carbono de la siembra directa y de labranza mínima, así como el potencial que tiene la agricultura de conservación en México de acuerdo a la superficie cultivable. Posteriormente, también se presentan las discusiones de diferentes autores y los contrastes de dichas investigaciones.

CAPÍTULO 1. CONTEXTUALIZACIÓN MUNDIAL DE AGRICULTURA DE CONSERVACIÓN Y CAMBIO CLIMÁTICO

1.1. La agricultura y la crisis ambiental global

El medio ambiente está lleno de recursos naturales que el ser humano ha sobre explotado de manera irracional y es hasta ahora que se ha percatado de los cambios ocurridos a nivel mundial como el aumento de temperatura, la disminución del nivel de los mantos acuíferos, la contaminación, la extinción de especies vegetales y animales, entre muchos otros aspectos que se han manifestado para demostrar que los medios de producción agrícola han cambiado y la situación es diferente.

La agricultura es el conjunto de técnicas y conocimientos para cultivar las diferentes plantas, semillas y frutos. En ella se engloban los diferentes trabajos de tratamiento del suelo y tierra para los cultivos. Comprende todo un conjunto de acciones humanas que transforma el medio ambiente natural, en un sector de alimentación (Jácome & del Almo Rodríguez, 1999).

Todas las actividades económicas que abarca dicho sector tienen su función en la explotación de los recursos que la tierra origina, favorecida por la acción humana en el sector. Es una actividad de gran importancia estratégica como base fundamental para el desarrollo autosuficiente y riqueza de las naciones, en especial para la alimentación humana.

La agricultura y la seguridad alimentaria mundiales afrontan enormes desafíos. El aumento de la población y la elevación de los ingresos en una buena parte del mundo en desarrollo han impulsado la demanda de alimentos y de otros productos agrícolas hasta niveles sin precedentes. La Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO) ha calculado que, para poder satisfacer la demanda de alimentos en 2050, la producción agrícola y ganadera mundial anual debería ser un 60 % mayor que en 2006. Aproximadamente un 80 % del incremento necesario tendría que ser producto de un aumento del rendimiento y un 10 % de un mayor número de ciclos agrícolas por año (Alexandratos & Bruinsma, 2012). Sin

embargo, la generalizada degradación de la tierra y el aumento de la escasez de agua limitan las posibilidades de incrementar el rendimiento. Si no se redoblan los esfuerzos para reducir la pobreza y llevar a cabo la transición a una agricultura que sea a la vez productiva y sostenible, habrá muchos países de ingresos bajos a los que les resulte difícil garantizar el acceso de toda su población a una cantidad adecuada de alimentos.

La agricultura moderna está fuertemente asociada a la crisis ambiental contemporánea. Muchas prácticas agrícolas contribuyen a la degradación ambiental, y ésta a su vez afecta sensiblemente a la producción agrícola. Aunque se podría abrir nuevas zonas de cultivo, esto no resolvería el problema, dado que bajo el esquema actual de producción, distribución y consumo, se caería en los mismos problemas de la división internacional de la producción agrícola. La agricultura convencional, basada en el elevado consumo de insumos químicos y maquinaria, y el uso intensivo de agua, convierten a esta actividad en uno de los campos de la acción humana que más impactan al medio ambiente a nivel mundial.

La visión hegemónica afirma que el mundo experimenta desde hace varias décadas una crisis ambiental. Para la ONU el cambio climático es la amenaza más grave que haya sufrido la humanidad en toda su historia (PNUD, 2007).

Dentro de las múltiples versiones que se han extendido sobre la gravedad de la degradación ambiental, considérense dos de ellas. La primera establece que la degradación ambiental se manifiesta básicamente en dos vías: depredación y contaminación. Los dos principales indicadores de la degradación ambiental son la pérdida de biodiversidad y el cambio climático global (Vitousek *et al.*, 1997).

Por diversidad biológica se entiende el número de diferentes especies de plantas, animales y microorganismos existentes, y los cálculos varían de 2 a 10 millones, la mayoría aún sin clasificar. La diversidad biológica incluye también las variaciones genéticas dentro de las especies y su interrelación con los ecosistemas. La biodiversidad es importante por razones ecológicas y económicas, ambas cruciales para la vida humana. Se ha estimado el valor económico de los servicios

ambientales de todos los ecosistemas del mundo en 33 millones de millones de dólares, una cifra mayor al Producto Interno Bruto (PIB) de todas las naciones juntas (Conservation International, 2007). Los servicios ambientales incluyen alimento, agua potable, almacenamiento de carbón, regulación de lluvias y otros valiosos recursos naturales para la supervivencia humana y el desarrollo económico.

Algunas fuentes señalan que el número de especies podría alcanzar los 100 millones, por lo cual el porcentaje de extinción, ubicado entre el 15 y 20 %, es muy incierto (Tommasino *et al.*, 2005)

En la segunda manera de visualizar la crisis ambiental, Foster argumenta que el hombre toma de la naturaleza los recursos materiales que necesita para satisfacer ciertos fines, históricamente determinados. Pero del medio natural no se puede extraer materiales y energía de manera ilimitada. Por lo tanto la ecología ha establecido nueve límites o umbrales críticos, denominados límites planetarios, que muestran la capacidad limitada que tiene el medio ambiente físico como fuente de recursos para el crecimiento (Foster, 2010). Enseguida se enuncian:

- 1) El cambio climático
- 2) La acidificación de los océanos
- 3) El agotamiento del ozono de la estratósfera
- 4) El límite de la circulación biogeoquímica (el ciclo del nitrógeno y los ciclos del fósforo)
- 5) La utilización de agua dulce global
- 6) El cambio en la utilización del suelo
- 7) La pérdida de biodiversidad
- 8) La carga atmosférica con aerosoles
- 9) La contaminación química

Los anteriores límites se consideran esenciales para mantener el clima, relativamente benigno para la condición humana, que ha prevalecido durante los últimos 20,000 años (era del Holoceno). Como producto de los procesos de acumulación en el sistema capitalista, ya se han rebasado los límites en tres de estos sistemas: el cambio climático, la biodiversidad y la interferencia humana en el ciclo del nitrógeno (Foster, 2010). En el resto de los umbrales críticos el nivel de deterioro es evidente, y en todos ellos se avanza hacia una situación que podría alcanzar el límite que el medio ambiente físico es capaz de soportar antes de representar una situación de crisis.

Las manifestaciones del impacto ambiental de la agricultura moderna se hacen visibles sobre todo a nivel de la degradación del entorno físico, y en primera instancia pareciera que son productos únicamente de los medios técnicos utilizados en las unidades de producción agrícolas. La agricultura moderna se caracteriza fundamentalmente por la utilización de paquetes tecnológicos que son producto en gran medida de las innovaciones introducidas en el período de la llamada revolución verde, a mediados del siglo XX. Estos paquetes tecnológicos incluyen el uso intensivo de semilla mejorada genéticamente, fertilizantes y pesticidas químicos, maquinaria agrícola y agua. Todos estos elementos de carácter técnico, que son los que se presentan en esta sección, no deben hacer pensar que la causa de fondo del elevado impacto ambiental de la agricultura es la tecnología que se utiliza, porque estos medios técnicos son en el fondo una consecuencia de las relaciones sociales propias del sistema capitalista, de tal manera que la causa de fondo de la elevada degradación ambiental asociada a la agricultura moderna es de origen social, y no técnico.

En la prehistoria, la forma más primitiva de agricultura consistía en talar una región y sembrar varias temporadas hasta que el suelo se agotaba, luego todo el pueblo se mudaba a una nueva región e iniciaba la tala para un nuevo ciclo agrícola (Childe, 1992). Aunque los suelos se agotaban, no se causaban problemas ambientales duraderos, porque la población humana era tan pequeña que las regiones abandonadas se recuperaban antes de que algún nuevo pueblo las utilizara

nuevamente. La situación actual es diferente. La agricultura es una de las principales fuentes de impacto ambiental. Este contraste es evidencia de que la sobreexplotación de los recursos no obedece necesariamente a la utilización de cierta tecnología, sino a que el ritmo de explotación humano es muy superior hoy al ritmo en que la naturaleza regenera sus recursos y procesos. El ritmo de explotación no es consecuencia de la técnica empleada, sino de las relaciones sociales existentes, las cuales se manifiestan con claridad en el hecho que la producción mundial de alimentos está comandada en gran medida por grandes empresas transnacionales, cuyo objetivo primordial es la obtención de una ganancia económica.

Con lo anterior se fundamenta el hecho de que a mayor número de habitantes en el planeta, mayor será el requerimiento alimenticio y por ende mayor capacidad de producción agrícola y pecuaria; por lo tanto se da la sobreexplotación de los recursos naturales, siendo que estos necesitan tiempo para poder regenerarse, actividad que no se empata con la velocidad de crecimiento de la población.

Según la FAO, (2009) para 2050 se tendrán que producir 70 % más alimentos para una población adicional de 2,300 millones de personas. Sin embargo, es necesario mencionar que la agricultura no solo se ve afectada por el cambio climático, sino que también contribuye directa e indirectamente, de manera importante en la emisión de los tres principales gases de efecto invernadero. Ya que un tercio del cambio climático global se debe a la agricultura y ganadería debido a que aportan el 25 % de las emisiones de dióxido de carbono (CO_2), el principal gas de efecto invernadero. Algunos cultivos (como el arroz de humedales) y especies de ganado domesticado (rumiantes) son los principales emisores del metano (CH_4) atmosférico, otro gas de invernadero que, aunque tiene una concentración 220 veces menor que el CO_2 , atrapa 23 veces más calor que aquel (Kasting, 2004). La fertilización nitrogenada genera el 70 % de los óxidos nitrosos (N_2O) atmosféricos (FAO, 2002). La superficie de bosques tropicales se está reduciendo en 5 % cada década.

La labranza del suelo altera su estructura física, favoreciendo su erosión. Entre el 10 y 20 % de las tierras del mundo están degradadas de manera irreversible, y un tercio está en proceso de desertificación (Chomitz, 2007).

El control químico de plagas y enfermedades también mata o afecta severamente a organismos inofensivos. Cada año, según la OMS, los pesticidas matan unas 200,000 personas, principalmente en los países en desarrollo. 450 especies de insectos plaga han desarrollado resistencia a los plaguicidas, lo que estimula el desarrollo de sustancias cada vez más letales para su control. La agricultura y la ganadería consumen el 79 % del agua dulce del mundo. La agricultura de riego suministra 40 % de los alimentos, con un 20 % de la superficie cultivada. El riego agrícola está agotando y contaminando muchas reservas estratégicas de agua en el mundo, aumentando así los niveles de desertificación y salinización en muchas zonas de importancia agrícola mundial (FAO, 2007).

1.2. El cambio climático y sus efectos en la obtención de alimentos

El Cambio Climático es un fenómeno multidisciplinario y multifactorial, por lo cual abarca una enormidad de doctrinas, clasificaciones, teorías y definiciones. Para los efectos de este trabajo se considera a el Cambio Climático como *“Un cambio de clima atribuido directa o indirectamente a la actividad humana que altera la composición de la atmósfera mundial y que se suma a la variabilidad del clima observadas durante periodos de tiempo comparables”* (Naciones Unidas, 1992).

Ahora, ¿cómo se produce esta alteración atmosférica? La comunidad científica ha estimado, con un alto grado de probabilidad, que el cambio climático se debe al llamado efecto invernadero.

Este fenómeno es generado por la radiación solar que atraviesa la capa de ozono. Nuestra atmósfera es capaz de desviar aproximadamente la mitad de la radiación permitiendo que la otra parte ingrese a la biósfera, calentando el suelo y los océanos, los cuales a su vez reaccionan, ya sea absorbiendo el calor o devolviendo el calor en forma de radiación infrarroja.

La radiación reflejada por la superficie terrestre choca con los diversos gases que componen la atmósfera, los cuales envían los rayos que ésta emite en todas direcciones. Estos gases evitan que los rayos de calor se disipen y actúan como un espejo, devolviéndolos otra vez hacia la superficie terrestre, teniendo como consecuencia el aumento de la temperatura.

Contrario a lo que se podría pensar, estos gases también son producidos de manera natural y forman parte de la tierra en su evolución. Por esto se explica el constante cambio de temperaturas que ha sufrido nuestro planeta, fluctuando continuamente, y por medio de diversos eventos, entre épocas de glaciación y épocas de calentamiento global.

Sin embargo, la problemática actual del cambio climático radica en una súper aceleración del calentamiento global hasta un punto en que no se sabe a ciencia cierta si se tornará *irreversible*. Lo anterior se aprecia en el aumento sostenido de la temperatura de la tierra a partir del siglo XIX y cuyos efectos, al principio meramente teóricos, se pueden apreciar en la actualidad como ciertos (GIECC; 2014).

Pero, ¿A qué se debe este aumento? Este punto fue altamente discutido por la comunidad científica, en especial durante los primeros años en que el tema tomó relevancia. En la actualidad esta discusión se encuentra zanjada en su totalidad y los científicos han estimado casi sin margen de error que la aceleración en el calentamiento global se debe a los gases de efecto invernadero de origen antropogénico (Albaladejo *et al.*, 1998; Paustian *et al.*, 2004; Patiño-Zúñiga, 2009; Dendooven *et al.*, 2012; IPCC, 2013; FAO, 2016; Saynes *et al.*, 2016)

Los gases de efecto invernadero, se producen de forma natural en el medio ambiente a través de diversos procesos, dentro de los que se encuentran la actividad volcánica, los incendios forestales no producidos por el hombre y el proceso de evaporación en el ciclo hidrológico de la tierra. Sin embargo, la mayor cantidad de GEI (aproximadamente el 90 %) son de origen antropogénico, es decir, generados por el hombre.

Según lo ya expuesto, los GEI, para los efectos de este trabajo, serán definidos como *“Aquellos componentes gaseosos de la atmósfera, tanto naturales como antropógenos, que absorben y reemiten la radiación infrarroja”* (Naciones Unidas, 1992).

Dentro de los GEI, los más relevantes son el dióxido de carbono (CO_2), el vapor de agua (H_2O), el óxido nitroso (N_2O), el metano (CH_4), los fluorocarbonados (CCl_2F), los hidrofluorocarbonados (HFC), el hexafluoruro de azufre (SF_6) y el perfloroetano (C_2F_6). Todos estos gases tienen la capacidad de absorber y emitir nuevamente el calor, pero tienen efectos diversos. Por ejemplo, el vapor de agua y el dióxido de carbono son los responsables de la mayoría de los GEI del actual efecto invernadero, pero los clorofluorocarbonados (CFC) son los más nocivos.

Por otra parte, las fuentes humanas de los GEI también cambian dependiendo del gas en específico. El dióxido de carbono, compuesto químico de mayor relevancia en el cambio climático debido a que se estima que por sí solo forma el 60 % de los GEI que producen el calentamiento global es producido en su mayoría por la utilización de combustibles fósiles y la deforestación por quema o tala. El metano se genera principalmente por medio de descomposición de biomasa y la producción de combustible; el óxido nitroso por el uso de fertilizantes y producción industrial química; y el vapor de agua por cualquier proceso que implique ebullición a gran escala.

Los CFC, requieren una mención especial. Ya que emanan de la industria de la refrigeración, pinturas y aerosoles. Es por esto que se les llama comúnmente gases aerosol y se cree que por sí solos son los causantes del adelgazamiento de la capa de ozono y en consecuencia del Agujero de Ozono Antártico. Este suceso preocupó de tal forma a la comunidad internacional que decantó en uno de los primeros tratados internacionales que versaba exclusivamente sobre materias ambientales: El Convenio de Viena para la Protección de la Capa de Ozono de 1987. Este convenio llevó a la ratificación del Protocolo de Montreal el año 1989 y es considerado como uno de los mayores éxitos de cooperación internacional en tanto logró reducir el nivel mundial de Sustancias Agotadoras de Ozono (PNUMA, 2009).

A pesar de los grandes esfuerzos que se están haciendo para minimizar los efectos del cambio climático, en muchas regiones, la producción agrícola ya se está viendo afectada negativamente por un aumento y una mayor variabilidad de las temperaturas, cambios en el nivel y la frecuencia de las precipitaciones, una mayor frecuencia de períodos sin lluvia y sequías, la intensificación de los fenómenos meteorológicos extremos, el aumento del nivel del mar y la salinización de los terrenos de cultivo y del agua dulce. A medida que se intensifiquen los efectos del cambio climático sobre la agricultura, será cada vez más difícil producir cosechas, criar animales, cultivar bosques y capturar peces en los mismos lugares y de la misma manera que antes. Los cultivos que se siembran para la obtención de alimentos, fibra y energía requieren condiciones específicas para desarrollarse, tales como un grado óptimo de temperatura y una cantidad de agua suficiente. Hasta cierto punto, unas temperaturas más cálidas pueden beneficiar el crecimiento de determinados cultivos en algunas partes del mundo (FAO, 2016).

Sin embargo, si las temperaturas superan los niveles óptimos para el cultivo, o si no se dispone de agua o de nutrientes suficientes, probablemente se producirá una disminución del rendimiento. Un aumento en la frecuencia de los fenómenos extremos, especialmente de inundaciones y sequías, también es perjudicial para los cultivos y reduce los rendimientos. Combatir la sequía podría convertirse en un importante reto en zonas en las que se prevé un aumento de la temperatura media y una disminución de las precipitaciones. Existen numerosas malas hierbas, plagas de insectos y enfermedades que crecen en condiciones de temperaturas más cálidas, climas más húmedos y niveles más altos de dióxido de carbono (CO₂) en la atmósfera. Un incremento de las temperaturas extremas, unido a una disminución de las precipitaciones, puede impedir que los cultivos lleguen a crecer (FAO, 2016).

Las olas de calor, que previsiblemente se harán más frecuentes con el cambio climático, suponen una amenaza directa para el ganado. Con el tiempo, el estrés térmico incrementará la vulnerabilidad de los animales a las enfermedades, reduciendo así su fertilidad y la producción de carne y leche.

El cambio climático modificará asimismo la prevalencia de los parásitos y enfermedades del ganado. En las zonas en las que aumenten las precipitaciones, se espera un crecimiento de patógenos dependientes de la humedad. El cambio climático amenaza asimismo la capacidad ganadera de los pastizales y la producción de piensos para los sistemas sin pastoreo (FAO, 2016).

La pesca y la acuicultura que proporcionan al menos el 50 % de la proteína de origen animal a millones de personas en los países de ingresos bajos se encuentran sometidas a múltiples presiones, entre ellas la pesca excesiva, la pérdida de hábitat y la contaminación del agua. El cambio climático acentuará aún más estas presiones. El aumento de la temperatura del agua originará probablemente la extinción de algunas especies de peces, un cambio en los rangos de hábitat de otras, así como un mayor riesgo de enfermedades a lo largo de toda la cadena de producción. Los océanos del mundo se están volviendo más ácidos debido al aumento de los niveles de CO₂ en la atmósfera, lo que tiene consecuencias especialmente graves para la pesca que depende del marisco y el calamar, los manglares y los sistemas de arrecifes de coral. Una mayor frecuencia e intensidad de tormentas, huracanes y ciclones dañará la acuicultura, los manglares y la pesca costera (FAO, 2012).

Los bosques proporcionan empleo remunerado a más de 100 millones de personas y sustentan los medios de vida de gran parte de la población rural pobre del mundo. Albergan más del 80 % de la biodiversidad terrestre mundial, y proporcionan alimentos, medicamentos, combustible y servicios ecosistémicos fundamentales. El cambio climático y el aumento de la variabilidad climática tienen efectos directos e indirectos sobre los bosques y sobre las personas que dependen de ellos, y limitan la capacidad de los bosques de proporcionar estos bienes y servicios esenciales. Si bien algunos bosques se beneficiarán de una concentración más elevada de dióxido de carbono en la atmósfera, de temperaturas más elevadas y de cambios en las precipitaciones, la mayoría experimentará la pérdida de importantes especies, una disminución de los rendimientos y un incremento de la frecuencia e intensidad de las tormentas y otras perturbaciones (FAO, 2013).

Aunque es sumamente difícil predecir cuáles serán los efectos exactos del cambio climático en la agricultura, la mayoría de los estudios indica que estos efectos cambiarán con el tiempo y variarán de un lugar a otro. En una revisión de los estudios realizados para el Quinto Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPPC) se apuntaba que, si bien las previsiones positivas y negativas de los efectos del cambio climático sobre el rendimiento de los cultivos se contrarrestan entre sí mundialmente hasta más o menos 2030, después de esa fecha la balanza se inclina cada vez más hacia el lado negativo (Porter *et al.*, 2014).

Estos efectos variarán asimismo considerablemente según el tipo de cultivo y la región. Se presupone una trayectoria intermedia para el crecimiento económico y demográfico, así como una adaptación limitada, y no se incluye la “fertilización por CO₂”, es decir, el efecto estimulante de un aumento de los niveles de dióxido de carbono atmosférico en el crecimiento de las plantas. A medida que se alargan las temporadas de cultivo, la tendencia en latitudes más altas es que se produzcan pérdidas de rendimiento menores, o incluso aumentos de rendimiento en el caso de algunos cultivos, en comparación con lo previsto sin condiciones de cambio climático. Las pérdidas de rendimiento en las regiones de latitudes más bajas suelen ser mayores. El rendimiento del cultivo de maíz disminuiría en casi todas las regiones en la mayoría de los supuestos climáticos, siendo las pérdidas progresivamente mayores en los supuestos más extremos. Aunque los efectos en el rendimiento del cultivo de trigo son pequeños a escala mundial, en el caso de Asia meridional y el África subsahariana son considerables. (FAO, 2016).

En este apartado se ha analizado los escenarios de los servicios ambientales forestales, agrícolas, pecuarios, acuícolas y pesqueros que han sufrido cambios debido al calentamiento global, a la sobreproducción y al incremento de la población en el planeta; situación que es alarmante y en la búsqueda de alternativas, surge la llamada agricultura de conservación.

1.3. Panorama Mundial de la Agricultura de Conservación

Como respuesta a los impactos ambientales de la agricultura convencional, los cuales han causado severas crisis en diversas partes del mundo, en las últimas décadas se han extendido en casi todo el mundo nuevas formas de practicar la agricultura, buscando con ello alcanzar un mayor grado de sustentabilidad en esta actividad productiva. La denominada agricultura de conservación es un claro ejemplo de esta tendencia.

La agricultura de conservación es definida por la FAO como un sistema para el manejo de los agroecosistemas para mejorar la productividad de manera sustentable:

Según la Organización Mundial de la Agricultura y la Alimentación, la Agricultura de Conservación se define como "un enfoque para la gestión de agroecosistemas para una productividad mejorada y sostenida, mayores ganancias y seguridad alimentaria al tiempo que preserva y mejora la base de recursos y el medio ambiente" (Friedrich & Kasamm, 2011).

En la agricultura de conservación, definida en estos términos, se busca incrementar la rentabilidad y el aseguramiento de la alimentación, al mismo tiempo que la protección de los recursos naturales y los factores ambientales que la hacen posible. Para alcanzar estos objetivos, la agricultura de conservación se basa en tres principios (Friedrich, 2007):

- 1) Mínima alteración mecánica del suelo, idealmente en la forma de labranza cero y siembra directa.
- 2) Cubierta vegetal permanente, ya sea con materia orgánica o mediante cultivos vivos.
- 3) Diversificación de las especies agrícolas cultivadas, así como prácticas de rotación y asociación de cultivos.

Las diferentes modalidades de laboreo de conservación han crecido en el mundo de forma espectacular en los últimos años. En 1996 se cultivaron 78 millones de hectáreas de cultivos anuales con los sistemas de laboreo de conservación y la tendencia creciente es muy clara. En concreto el no laboreo ha aumentado de 45 millones de hectáreas en 1999 a 106 millones de hectáreas en 2008 a nivel mundial. Los incrementos más rápidos se han experimentado en América del Sur, donde algunos países están utilizando no laboreo en un 70 % de la superficie cultivada total. La adopción de esta técnica de no laboreo muestra la gran adaptabilidad del sistema a todo tipo de climas, suelos y condiciones de cultivo.

El no laboreo está siendo practicado por los agricultores del círculo ártico (como, Finlandia), en los trópicos (como, Kenya, Uganda) y a unos 50° de latitud Sur (como, Malvinas). También se utiliza desde el nivel del mar en varios países del mundo hasta 3000 m de altitud (como en Bolivia, Colombia), de condiciones extremadamente secas con 250 mm de precipitación por año (como, Australia Occidental) a zonas con precipitaciones de 2000 mm al año (como, Brasil) o 3000 mm al año (como, Chile).

El no laboreo se practica en explotaciones de todos los tamaños, desde media hectárea (como, China, Zambia), a cientos de hectáreas en muchos países del mundo, y a miles de hectáreas en otros países como Australia, Brasil, EE.UU. o Kazajstán.

Esta técnica se practica en suelos diversos que varían desde el 90 % de arena (como, Australia) al 80 % de arcilla (como, Oxisoles de Brasil y Alfisoles). Los suelos que son extremadamente sensibles al encostramiento no presentan este problema en no laboreo porque la cubierta vegetal evita la formación de la costras.

El no laboreo incluso ha permitido la expansión de la agricultura a tierras marginales en términos de lluvia o de fertilidad (como, Australia, Argentina).

En 1973/74, el no laboreo se utilizaba en 2.8 millones de hectáreas (ha) en todo el mundo. Diez años más tarde, la superficie aumentó considerablemente hasta

alcanzar 6.2 millones de hectáreas, donde el 75 % de la superficie total se encontraba en Estados Unidos.

En 1996/97, la superficie de no laboreo creció hasta 38 millones de hectáreas. En los últimos 10 años, el no laboreo se ha expandido a un tasa media de 6 millones de hectáreas por año, pasando de 45 a 106 millones de hectáreas, mostrando el creciente interés de los agricultores por esta tecnología.

Dicha superficie se distribuye principalmente en el continente americano con 90 millones de hectáreas, seguido de Australia y Nueva Zelanda con 12 millones de ha, Asia con 2.5 millones de ha y en menor nivel se encuentran Europa y África con 1.1 y 0.3 millones de ha. El 92 % de esta superficie dedicada a no laboreo se localiza en Estados Unidos, Brasil, Argentina, Canadá y Australia. Los incrementos más rápidos se han experimentado en América del Sur, donde algunos países están utilizando no laboreo en un 70-80 % de la superficie cultivada total.

Experiencias de agricultura de conservación en América

Estados Unidos fue el país pionero en la adopción de técnicas conservacionistas de laboreo y actualmente es el líder indiscutible en la adopción del laboreo de conservación. Esto se debe en gran parte al apoyo de la administración norteamericana mediante acciones administrativo económicas en diferentes años.

En 2007, en este país se sembraron 26 millones de hectáreas en no laboreo o siembra directa. Aunque el porcentaje de suelo cultivado en no laboreo ha aumentado, las cifras revelan que la mayoría de los agricultores en este país siguen utilizando las prácticas convencionales o reducidas.

En la última década, el crecimiento del área bajo no laboreo en EE.UU. ha sido continuo y constante. Canadá tuvo un desarrollo similar al de Estados Unidos, con fuertes problemas de erosión en los años 30 que centraron la atención posterior en los laboreos de conservación. De acuerdo con el censo de 2006, el no laboreo se practica en 13.48 millones de hectáreas.

Las regiones con mayor porcentaje de suelo en no laboreo son Saskatchewan (60.1 %), Alberta (47.8 %), Ontario (31.2 %), Manitoba (21.3 %) y British Columbia (19.0 %). En Brasil, los primeros experimentos sobre no laboreo comenzaron en 1971 en Londrina. Veinte años se necesitaron para alcanzar una superficie de 1 millón de ha cultivadas por esta técnica. Sin embargo, después de este millón de ha, esta tecnología ha experimentado un crecimiento exponencial.

De acuerdo con la Federación brasileña de Agricultores de no laboreo o agricultura convencional, en la campaña 2005-2006, había 25.5 millones de hectáreas cultivadas con no laboreo. Brasil continúa siendo uno de los países líderes en el mundo en términos de adopción de no laboreo. El crecimiento rápido y constante de agricultura convencional en este país ha sido posible gracias a la fabricación de máquinas especializadas en siembra directa (SD).

Hoy en día exporta máquinas a todo el mundo. Los fabricantes no sólo se dedican a producir equipos para la mecanización, también producen equipos de tracción animal y operación manual. Estos equipos han sido muy apreciados en muchos países en vías de desarrollo.

La FAO ha desempeñado un papel fundamental en la distribución desde Brasil de máquinas de no laboreo para los pequeños agricultores de todo el mundo. El desarrollo de esta industria ha sido posible ya que hay cerca de 100, pequeños agricultores que utilizan sistemas de no laboreo agrícola en este país y necesitan máquinas especializadas.

En Argentina, las primeras experiencias con no laboreo comenzaron en los primeros años setenta, pero la falta de herbicidas adecuados, de maquinaria especializada y de conocimientos técnicos constituyeron uno de los principales problemas para adoptar esta técnica. Un hito en el desarrollo y la difusión de no laboreo fue la creación de la Asociación Argentina de agricultores de no laboreo (AAPRESID) en 1986, en Rosario y desde entonces la práctica de no laboreo también experimentó un crecimiento exponencial. De acuerdo con esta asociación, en el año 2006 había

19.7 millones de hectáreas de no laboreo. En este mismo año cerca del 69 % de todas las tierras de cultivo en la Argentina estaba bajo agricultura de conservación.

Las experiencias detectadas en Paraguay, son que los agricultores se encontraron en problemas similares a los de Argentina y Brasil. En 1983, el presidente de una cooperativa comenzó a experimentar con estas técnicas y en 1992 sólo había 20,000 hectáreas, sin embargo en 2008, se estima que alrededor del 90 % de todos los cultivos están bajo siembra directa, alcanzando cerca de 2.4 millones de hectáreas. La mayoría de los agricultores aplican permanentemente el no laboreo, incluso los pequeños agricultores con sistemas de producción manual o basada en la tracción animal han optado por la agricultura de conservación.

Para Bolivia, en el año 2000 se dedicaban 240, 000 hectáreas (30 % de adopción) y en 2007 se alcanzaban ya más de 706.000 hectáreas (72 % de adopción). La erosión del viento en sistemas convencionales y el aumento de la eficiencia de uso de agua bajo no laboreo en regiones con bajas y erráticas precipitaciones han sido las dos razones más importantes para la adopción de estas técnicas. Otros países de América Central y Sur que se han iniciado en el no laboreo son Uruguay, Venezuela, Chile, Colombia y México con 672, 000; 300, 000; 180, 000; 100, 000 y 50, 000 hectáreas respectivamente.

Lo anterior se considera promisorio para una actividad tan importante como es la agricultura, debido a que de esta actividad dependen muchas otras sub actividades que con llevan a eficientizar los modos de producción así como a la mejora y búsqueda de alternativas que permitan comercializar la agricultura de una manera sustentable y equilibrada en el mundo.

Cabe mencionar que la agricultura de conservación es una actividad incipiente en muchas partes del planeta, sin embargo ya se utilizaba desde nuestros antepasados puesto que eran nómadas y cambiaban constantemente de tierras para cosechar por lo que se producía un descanso y se regeneraban naturalmente, actualmente todos estos procesos han sido alterados por el incremento poblacional y por acelerar la producción de alimentos.

Otras experiencias en el mundo

En Australia, la superficie dedicada a la agricultura de conservación alcanza los 12 millones de hectáreas. El porcentaje varía de un 24 % en el Noreste de Nueva Escocia y un 42 % en el Sur de Australia hasta alcanzar un 86 % en el Oeste del País. Debido al ahorro de agua, tiempo y gasoil con el no laboreo como por otras ventajas del sistema, se espera que su uso siga creciendo. En Nueva Zelanda es otro país en el que la agricultura de conservación ha progresado enormemente alcanzando 160, 000 hectáreas que corresponden a un 25 % de todas las tierras arables.

Son interesantes también las experiencias realizadas en China, teniendo en cuenta que la media de superficie que trabaja un agricultor en China es de 0.08 hectáreas y que hay de 3 a 5 personas de media en cada familia, es difícil calcular el área bajo agricultura de conservación en este país. Pero una cosa es cierta, el área en la agricultura de conservación ha aumentado considerablemente en los últimos años en China. Según una encuesta realizada por el Ministerio de Agricultura sobre las prácticas agrícolas en 2008, se cultivan 2.66 millones de ha, de las cuales 1.33 millones son de no laboreo; es decir aproximadamente un 50 % de la superficie dedicada a la actividad agrícola. La erosión hídrica y eólica del suelo, así como la escasez de agua, los bajos niveles de materia orgánica y la disminución de la productividad han sido algunas de las principales fuerzas impulsoras de una rápida adopción de estas técnicas en China.

Según lo comentado anteriormente, Kazajstán ha experimentado grandes cambios en los sistemas de tenencia de tierras y la agricultura en las últimas décadas. La adopción del no laboreo ha sido promovida por algún tiempo por el CIMMYT y la FAO. Una encuesta realizada en este país mostró una superficie de 600,000 hectáreas en 2007 y de 1.3 millones de hectáreas en 2008. Hecho que demuestra el avance en la adopción de estas técnicas conservacionistas.

Para las Llanuras del Indo Ganges: Incluyen cuatro países en el sur de Asia: India, Pakistán, Nepal y Bangladesh. En 2005, alrededor de 1.9 millones de hectáreas se cultivaban bajo no laboreo en esta región.

En el caso de la India: La adopción de prácticas de no laboreo por los agricultores en la India se ha producido principalmente en el doble cultivo arroz/trigo donde el no laboreo se adopta solo para el cultivo de trigo. Se han realizado estimaciones sobre superficies con agricultura de conservación si bien no han sido concluyentes. Esto se debe a su manera tradicional de producir y al no ver resultados acelerados como los que actualmente se utilizan con aplicación de fertilizantes químicos, los campesinos de la India han adoptado y renunciado de manera intermitente a la agricultura de conservación, razón por la cual no se han reportado datos precisos.

La situación en África ha tenido un auge importante por la promoción de las FAO CIMMYT y otros centros de investigación mostrando resultados atractivos a aquella zona bastante promisorio para la producción.

En la última década, la agricultura de conservación ha tenido una promoción intensiva en África. Los niveles registrados siguen siendo bajos y la adopción en África está en las primeras etapas.

Para el caso de Sudáfrica, se encontró que desde 2005, el país ha experimentado un crecimiento bajo en siembra directa. La superficie cultivada en no laboreo ha alcanzado 368.000 hectáreas en este país.

En África meridional y oriental ya se han reportado y registrado datos incipientes pero importantes. Muchos países africanos, particularmente en el Sureste y Este de África han practicado sistemas de agricultura de conservación y FAO ha reunido información inicial sobre la aplicación del no laboreo con los resultados preliminares de Ghana 30, 000 ha; Kenya 15, 000 ha; Mozambique 9, 000 ha; Sudán 10, 000 ha; Tanzania 6, 000 ha; Zambia, 40, 000 ha; Zimbabwe 7, 500 ha.

En el Norte de África, los sistemas de agricultura de conservación se promovieron principalmente en Marruecos y Túnez. En Marruecos se han alcanzado 4, 000 hectáreas y en Túnez 6,000 hectáreas bajo siembra directa.

Las experiencias investigadas en Europa son atractivas debido a que recientemente han obtenido resultados importantes y los programas gubernamentales, universidades y diversos centros de investigación están constantemente promoviendo la agricultura de conservación.

Anteriormente, Europa era el continente en el que el laboreo de conservación no estaba tan difundido como en los anteriormente citados, solamente África tiene un área más pequeña dedicada a este sistema. Europa y las administraciones nacionales todavía no están plenamente convencidas de que el concepto de agricultura de conservación sea el más prometedor para satisfacer las necesidades de una agricultura respetuosa con el medio ambiente, para reducir costos de producción y aumentar los ingresos agrícolas, y para satisfacer a la demanda del consumidor de alimentos de calidad suficiente y asequible. La dependencia de la agricultura de conservación del uso de herbicidas y otros productos químicos para controlar plagas y enfermedades son los principales obstáculos para la plena aceptación de la Agricultura de Conservación como sistema de producción sostenible (Basch, 2005).

Aunque actualmente la Universidad de Córdoba en coordinación con el Instituto de Investigación y Formación Agraria y Pesquera (IFAPA) de la Junta de Andalucía y la Asociación Española de Agricultura de conservación y Suelos Vivos (AEAC.SV) se encuentran en colaboración realizando experimentos e incentivando esta técnica de laboreo conservacionista y demostrando los múltiples beneficios.

En la Unión Europea, el 14 de enero de 1999 se constituyó la Federación Europea de Agricultura de Conservación (ECAAF), asociación sin ánimo de lucro. Reúne quince asociaciones nacionales que promueven las buenas prácticas agrícolas y aspectos relacionados con la agricultura de conservación entre los agricultores. Con asociaciones de países como Bélgica, Dinamarca, Finlandia, Francia, Alemania,

Grecia, Hungría, Irlanda, Italia, Portugal, Rusia, Eslovaquia, España, Suiza y el Reino Unido, ECAF representa los intereses de la mayoría de las tierras agrícolas de la Unión Europea. Se concibió para solventar cualquier problema enfocado a la conservación del suelo agrario y su biodiversidad en el contexto de una agricultura sostenible. Los objetivos de ECAF son: mejorar la transferencia tecnológica a las explotaciones; promover políticas agrícolas y medioambientales que apoyen una gestión sostenible del suelo; mejorar el intercambio de información en el sector agrícola, incluyendo investigadores y políticos, y finalmente investigar, desarrollar, evaluar y promover sistemas de manejo de suelo para mejorar la producción de cultivos y la protección medioambiental. Según ECAF, la superficie total en Agricultura de conservación en Europa asciende a 3 millones de ha, distribuyéndose principalmente en Rusia con un 50 %, seguida de Francia y España con un 12 y 10 % respectivamente. Respecto a la distribución de la superficie de siembra directa, según fuentes de ECAF, asciende a 2, 342 miles de ha, destacando España con un 28 %, seguida de Rusia con un 20 %. Francia, Finlandia y Alemania presentan una superficie en siembra directa del 8 % respectivamente.

España es el país líder en Europa en términos de adopción de agricultura de conservación. Según la Asociación Nacional de Agricultura de Conservación y Suelos Vivos, en este país se practica el no laboreo en cultivos anuales en 700,000 hectáreas. Los cultivos principales en los que se practica son trigo, cebada y en menor medida maíz y girasol. Según la misma fuente, también se aplica el laboreo bajo cubierta en 893,000 hectáreas principalmente en árboles perennes como el olivo y en menor medida en frutales. Considerando solo los cultivos herbáceos extensivos, la agricultura de conservación se aplica en un 10 % de las tierras de cultivo en España.

Para Francia, otro país europeo en el que los experimentos sobre no laboreo comenzaron en los años setenta. La asociación APAD (Asociación Francesa de Agricultura de Conservación) calcula que el no laboreo se practica en alrededor de 200, 000 hectáreas.

En Finlandia, la adopción de este sistema de no laboreo ha sido muy rápida en este país. Según FINCA (Asociación Finlandesa de Agricultura de Conservación) en menos de diez años, el no laboreo pasó de un centenar de hectáreas a 200, 000 hectáreas en 2008.

Las experiencias en Ucrania, un país donde las estimaciones sobre la adopción del no laboreo varían mucho dependiendo de la fuente de información que van de menos de 30, 000 hectáreas a más de un millón de hectáreas. Estadísticas Oficiales hablan de 250, 000 hectáreas, pero después de un estudio minucioso de la información se estima que el área bajo siembra directa es provisionalmente unas 100, 000 hectáreas.

En el caso de Suiza, el país ha hecho notables progreso en términos de investigación y desarrollo. El no laboreo es una técnica cada vez más aceptada que se aplica en unas 12, 500 hectáreas, un 3.5 % de las tierras cultivables.

A pesar de las ventajas conocidas del no laboreo, en Alemania, la adopción de esta técnica aún es muy baja. Según el artículo de Derpsch (2009), se estima que los agricultores aplican esta tecnología en unas 5, 000 hectáreas. Sin embargo, según ECAF estas cifras suben a 200, 000 ha. Por los precios de fertilizantes y del combustible, además de los problemas de erosión en algunas regiones y las sequías periódicas, el interés en agricultura de conservación está en constante expansión y la adopción de este sistema va en aumento.

En diversos países de la Unión Europea es difícil obtener datos fiables, como en el caso de Rusia, no se sabe con exactitud la superficie empleada en agricultura de conservación. Sin embargo, se sabe que varios fabricantes de máquinas han exportado máquinas de siembra de no laboreo en un número significativo a este país, debido a que en esto son pioneros y están a la vanguardia. También existe una Fundación para el Desarrollo de la Conservación Agricultura (NFDCA) que promueve la agricultura de conservación y participa en la federación Europea (ECAF). Por estas razones, la superficie cultivada con estas técnicas debe de ser considerable, pero actualmente las estimaciones no son fiables.

CAPÍTULO 2. ELEMENTOS TEÓRICOS DE AGRICULTURA DE CONSERVACIÓN

2.1. Situación actual de la agricultura en México

Recientemente se han diversificado los mercados de los productos perecederos, especialmente los hortofrutícolas, debido a la insuficiente producción interna propia de cada país, o debido a varios factores como el clima, el suelo y la variedad de los productos perecederos, creando así nichos de mercado e incentivando la exportación de los productos hortofrutícolas.

La historia de la alimentación en México se relaciona directamente con la agricultura. El maíz, la calabaza, el chile y el jitomate, fueron los primeros alimentos del mexicano, ya que crecían en forma silvestre. Por su resistencia a condiciones variables, el maíz pudo ser cultivado junto con el frijol y la calabaza, surgiendo un tipo de agricultura que estaba destinada a alimentar a la población.

El país cuenta con un territorio de 198 millones de hectáreas, de las cuales el 73.2 % (145 millones) se dedican a la actividad agropecuaria. Del total del sector agropecuario, cerca del 20.7 % (30 millones de hectáreas) son tierras de cultivo (SAGARPA, 2007). El área bajo cultivo representa el 15.2 % de la superficie total del país. Sin embargo, solamente se cultivan entre 20 y 25 millones de hectáreas por año, y solo 4.8 millones son de riego, cerca de 1 millón son de humedad, y más de 8 millones son de temporal (Morales, 2003).

Actualmente, el espacio agrícola mexicano se ha diversificado, en parte por la necesidad de distintas variedades de cultivos y también por la gran variedad de climas, suelos, formas del paisaje y culturas. Existen distintos cultivos y tipos de agricultura, entre estos los dos tipos de agricultura que tienen más relevancia en México por su importancia son la agricultura comercial y la de subsistencia.

En general, en la agricultura existen 3 tipos de cultivos, que son básicos, cíclicos y perennes. Los cultivos básicos en México son el maíz, frijol, garbanzo, trigo, arroz.

Estos son los cultivos que por razones alimenticias, económicas, sociales, etc. se cultivan en casi todas las regiones. Los cultivos cíclicos dependen del periodo vegetativo, ya que si este es menor a un año se les denomina cíclicos. Y se concentran en dos periodos productivos: otoño-invierno y primavera-verano. Por último, los cultivos perennes, aquellos cuyo ciclo vegetativo es mayor a un año.

Se denomina año agrícola al período de dieciocho meses que resulta de la adición de las siembras y cosechas que se realizan en los ciclos agrícolas de otoño invierno y primavera-verano así como de las cosechas de productos perennes.

Comprende octubre-diciembre de un año, más el siguiente completo y los meses enero-marzo del año subsecuente (SAGARPA, 2008).

Un año agrícola de cultivos perennes hace referencia a frutales y plantación con vida económicamente útil de 2 a 30 años, aunque vegetativamente hay especies con más de 50 y hasta 100 años que pueden estar en producción. El registro inicia en el mes de enero y termina en el mes de diciembre del mismo año; excepto para café. (INEGI, 2013).

Cuando se habla de cosecha otoño-invierno, se refiere al periodo de cosecha, el cual abarca de marzo a septiembre del mismo año. Y la cosecha primavera- verano, se refiere al período de cosecha tipo, el cual inicia en septiembre y termina en marzo del año siguiente. De igual forma, cuando se habla de siembra primavera-verano o siembra otoño-invierno, toca los meses de marzo a septiembre del mismo año o de septiembre a marzo respectivamente, teniendo que la diferencia varia en que unos son cosechas y los otros de siembra.

En México existe un gran contraste al interior del sector agrícola, ya que por un lado se encuentra la agricultura de subsistencia o tradicional, donde el “campesino” depende de en parte de la lluvia para la producción y utiliza mano de obra no asalariada para producción de sus cosechas; es decir mano de obra familiar. Esta agricultura es utilizada generalmente para el autoconsumo, también podría denominarse familiar o agricultura de traspatio.

Por otro lado, se encuentra la agricultura comercial o industrial, donde la tecnología se emplea para aumentar la productividad. También se usa la irrigación y la mano de obra para la producción, y a diferencia de la agricultura de subsistencia, las cosechas se destinan principalmente al mercado para comerciar (Taylor, 2012).

En México y en general en todas partes del mundo, existen dos tipos de agricultura por su forma de abasto de agua; la que se relaciona con la de subsistencia es la de temporal, ésta depende exclusivamente de las lluvias y permite sembrar una vez al año, en ella el agricultor produce sin aporte de sistemas de irrigación.

Y el otro tipo de agricultura es de riego, esta se caracteriza por contar con canales, u otros sistemas de riego artificial y permite la siembra, al menos dos veces al año (INEGI, 2011).

De la superficie dedicada a la agricultura se puede señalar, en términos generales, que casi el 25 % se cultiva bajo condiciones de riego ya que la mayoría de las siembras del país son de temporal. En el caso de la superficie de riego, poco más del 10 % se encuentra bajo sistemas tecnificados, mientras que el resto opera bajo condiciones de riego no tecnificado (INEGI, 2011).

Esta misma polarización de la agricultura se puede ver en términos regionales, siendo la parte norte del país la que emplea las técnicas agrícolas con mayor tecnología y desarrollo, y la que recibe el mayor porcentaje de inversión extranjera (Wise & Nadal, 2010). Por su parte el sur mexicano, tiene una mayor presencia de agricultores tradicionales y a su vez a los estados más pobres.

Esta regularidad empírica de la distribución geográfica de los diferentes tipos de agricultura puede llevar a pensar que existe un vínculo entre pobreza y agricultura tradicional; sin embargo, esta relación entre pobreza y agricultura no es tan simple, ya que existe una gran cantidad de factores que generan la pobreza en el caso agrícola. Sin embargo, es posible afirmar que, comparativamente, la situación de marginalidad y pobreza se manifiesta en mayor proporción en los pequeños productores agrícolas o campesinos de subsistencia y más tradicionales, con

respecto a los medianos y grandes productores de agricultura comerciales (Braun & Díaz-Bonilla, 2008).

En México y en el planeta, el sector agrícola es la parte esencial para la subsistencia de la vida por ello, es importante conocer la situación actual de la agricultura en México, para poder coadyuvar a la mejora de la agricultura de manera sustentable y buscar alternativas de producción de alimentos que satisfagan las necesidades de la población mexicana y mundial. Aunque también se considera que la agricultura es generadora de efectos tanto positivos como negativos.

Daños ambientales en la agricultura

La agricultura representa el mayor uso de la tierra por el ser humano. Aproximadamente dos terceras partes del agua utilizada se destina a este sector.

La degradación de los recursos naturales es un tema de creciente preocupación mundial en la actualidad. Esa degradación ha sido denominada globalmente como desertificación, y constituye un proceso generalizado de deterioro de la tierra que afecta la regulación del ciclo hidrológico, el amortiguamiento de los cambios climáticos severos, la permanencia de la biodiversidad y la fijación de energía, entre otros aspectos. Todo esto afecta la capacidad biológica del ecosistema, según la Comisión Nacional de Zonas Áridas (CONAZA, 1994).

Secretaría del Medio Ambiente y de los Recursos Naturales (SEMARNAT) indica en su reporte “La degradación de los suelos en México” que “Las principales causas de la degradación de suelos en México son las actividades agrícolas y pecuarias.” También menciona que el 35 % de la degradación es por causas correspondientes a la actividad agrícola y 7.5 % a la pérdida de la cubierta vegetal.

La estructura de la degradación por la actividad agrícola para el año 2008. El 68 % del suelo se encuentra degradado. Esto refleja que los procesos que actualmente se están utilizando para el sector primario están realizándose sin visión de protección del suelo a futuro, lo que indica que no se está haciendo aprovechamiento de manera sustentable (Ver Figura 1).

El mayor porcentaje de degradación es de 30 % derivado del abuso de productos y a las actividades químicas.



Fuente: Elaboración con datos de SEMARNAT. Evaluación de la degradación del suelo. México 2008.

Figura 1. Degradación del suelo en México (2008)

Los métodos agrícolas, forestales y pesqueros empleados son las principales causas de la pérdida de biodiversidad del mundo. Los costos externos globales de los tres sectores pueden ser considerables. La agricultura afecta también a la base de su propio futuro a través de la degradación de la tierra, el cambio climático, la salinización, el exceso de extracción de agua y la reducción de la diversidad genética agropecuaria (FAO, 2011).

Por otra parte, la producción agropecuaria tiene profundos efectos en el medio ambiente en conjunto. De estos efectos la mayor fuente son antropogénicos y contribuyen a la creación de gases de efecto invernadero. Los Gases de Efecto Invernadero (GEI) como ya se ha mencionado son todos aquellos compuestos químicos en estado gaseoso que se acumulan en la atmósfera de la Tierra y que son capaces de absorber la radiación infrarroja del sol, aumentando y reteniendo el calor allí mismo, en la atmósfera, aumentando considerablemente la temperatura del planeta, y constituyendo un elemento central en lo que al calentamiento global

refiere. En la agricultura, los compuestos químicos que se usan para la producción de los insumos generan gases dañinos para el planeta.

Las emisiones de GEI procedentes de la agricultura consisten en los gases de dióxido de carbono (CO₂), metano (CH₄) y óxido nitroso (N₂O), y provienen de la producción agrícola y ganadera y las actividades de gestión. En el sector agrícola las emisiones de Gases de Efecto Invernadero encontradas en el estadísticas de la FAO (FAOSTAT) proceden de diferentes actividades de la producción como la combustión de residuos, sabana, cultivo de suelos orgánicos, estiércol aplicado y gestión de los suelos y pasturas, cultivo de arroz, fermentación entérica, uso de fertilizantes sintéticos, residuos agrícolas, uso de energía, combustión de biomasa y usos de la tierra. Del total de los Gases de Efecto Invernadero, la agricultura representa el 7.1% de lo que se emite en México. La energía representa el 58.5 %, los procesos industriales el 20.3 % y los desechos 14.1 %. Es preciso señalar que en el conjunto de los otros tres sectores se incluyen actividades agrícolas que por su giro no se contemplan como GEI producidos por la agricultura, como es la industria química para la fabricación de insumos agrícolas, la energía que se utilizan en los procesos, desechos de aguas residuales, entre otros (FAO, 2012).

De cara a los procesos evolutivos del sector primario, la mayoría de los gobernantes, empresarios, productores y campesinos se han dado a la tarea de buscar opciones, es decir generar alternativas de producción sin disminuir los rendimientos.

Dado lo anterior diversos centros de investigación han propuesto técnicas como la labranza de conservación que se han implementado en México y en el mundo con diferentes variables de agricultura de conservación. El auge de esta técnica data desde nuestros antepasados, sin embargo, por la evolución y el crecimiento desmedido de la población, se ha tenido que regresar a producir sin el uso de maquinaria pesada, sin semillas mejoradas o transgénicas, sin el uso de fertilizantes químicos y sí con la incorporación de residuos, el mínimo laboreo, cobertura vegetal, fertilizantes orgánicos, rotación de cultivos como lo hicieron los nómadas en su momento, solo que actualmente son pocas las tierras que se dejan en descanso, lo

importante es producir, producir y producir para las grandes empresas transnacionales y generar beneficios económicos sin considerar la naturaleza.

2.2. Agricultura de conservación en México

En México, recientemente, se puso en marcha una renovada iniciativa destinada a la agricultura de conservación (AC), cuyo objetivo es generar y difundir investigación estratégica y adaptativa sobre las prácticas de la AC, que podría ayudar a detonar una revolución en la agricultura y mejorar la seguridad alimentaria.

La semilla es buena solo si el suelo donde se la siembra lo es. Durante casi 40 años, el Centro Internacional de Mejoramiento de Maíz y Trigo (CIMMYT) ha ensayado y perfeccionado prácticas agronómicas pertinentes que mejoran la calidad del suelo y hacen que la semilla exprese su potencial al máximo. La AC es una de esas prácticas. Se basa en principios sustentables y adaptables que reducen la cantidad de agua que se utiliza para riego, mejoran la salud del suelo, elevan la productividad y los agricultores ahorran tiempo y dinero. “La labranza suele ser apropiada, pero es una de las principales causas de la no sustentabilidad”, según Pat Wall, director del nuevo Programa de Agricultura de Conservación del CIMMYT. La AC hace énfasis en que se haga menos labranza y se practiquen la retención adecuada de rastrojo y la rotación adecuada de cultivos.

Para ayudar a que los agricultores mexicanos adapten variantes de la AC que se ajusten a los sistemas comunes de cultivo, el CIMMYT está reuniendo información por medio de una iniciativa en curso, destinada a México, que promueve la agricultura mediante el establecimiento de nodos en regiones del país; dichos nodos sirven como centros de capacitación y de encuentro, y gracias a ellos se han establecido cerca de 70 parcelas en campos de agricultores de zonas de producción diversas.

Los agricultores están de acuerdo en facilitar sus parcelas por cinco años a cambio de recibir asistencia técnica en el manejo de sus cultivos, ya sea por parte de particulares o de técnicos del gobierno que tengan participación, tanto en la

investigación como en la divulgación de la iniciativa. Todo esto en conjunto es esencial porque la AC constituye un método de conocimiento intensivo que requiere implementos de siembra con características especiales y métodos nuevos para el control de malezas y plagas.

Otro desafío es, por ejemplo, convencer a los agricultores de dejar los rastrojos de sus cultivos en el terreno en lugar de quemarlos o usarlos como forraje.

Para respaldar la adopción e investigación de la AC, el CIMMYT cuenta con un equipo interdisciplinario de socio-economistas, edafólogos, patólogos y agrónomos. El equipo capacita a técnicos asociados y atiende a grupos de agricultores en visitas que éstos hacen a las estaciones experimentales. En colaboración con los técnicos, los miembros del equipo llevan un control exacto de lo que se hace en el campo (control de malezas y enfermedades, riego, fechas de siembra, aplicación de fertilizante, cosecha, o sobre algún problema que pudiera presentarse).

Todos estos datos se transfieren a un prototipo de “Conservation Earth”, una base de datos interactiva que se creó utilizando Google Earth. Con el globo virtual se pueden conocer la ubicación exacta y las condiciones (tipo de suelo, altitud, etc.) de las parcelas de cada agricultor, y esto facilita el análisis de los efectos de la AC.

“Lo que nosotros estamos aprendiendo es la mejor forma en que los agricultores pueden aplicar los principios de la agricultura de conservación” (Govaerts, 2009) quien es especialista en sistemas de producción y coordinador del programa de agricultura de conservación en México. “Es un proceso dinámico de aprendizaje para nosotros y para los agricultores.” En los dos primeros años del nodo para maíz en los Valles Altos de México, 150 familias adoptaron las prácticas de la AC en cerca de 1,000 hectáreas. También se adoptaron en una superficie similar dedicada a la siembra trigo con riego en el norte de México. Los agricultores recibieron beneficios significativos; por ejemplo, los que producen maíz en la zona centro de México ahorraron entre 110 y 300 dólares por hectárea en 2008, en comparación con aquellos que aplicaron prácticas convencionales. Además de bajar los costos, la AC aporta muchos otros beneficios relacionados con la conservación del suelo y el

medio ambiente: se necesita 25 % menos agua y también menos combustible. En lo que respecta al cambio climático, el beneficio es doble, ya que puede ayudar a proteger a los agricultores y a sus cultivos de las altas temperaturas, la precipitación pluvial errática y extrema y la creciente escasez de agua; puede ayudar también a erradicar las contribuciones de la agricultura al cambio climático. Por ejemplo, con la reducción de labranza se genera materia orgánica en el suelo, se controla la erosión y disminuyen las emisiones de dióxido de carbono. Disminuyen también el consumo de combustibles y los costos, al reducirse considerablemente los pasajes de tractor.

La sequía que azotó la zona del centro de México en 2009, la peor en 70 años ofreció una excelente oportunidad para apreciar las virtudes de la AC en el cultivo de maíz, ya que las plantas en terrenos donde se empleó esta tecnología sobrevivieron, cosa que no ocurrió con aquellos en que se utilizaron prácticas tradicionales. En los trópicos y en los subtrópicos suele llover esporádica pero torrencialmente. En terrenos que se han arado sin dejar rastrojo, mucha de esa agua se pierde por escorrentía, que también arrastra impresionantes cantidades de tierra. En cambio, el rastrojo que queda en el suelo atrapa las gotas de lluvia y amortiguan el golpe, hay menos escurrimiento y mayor infiltración de agua de lluvia en el suelo, un proceso que resulta más sencillo cuando los suelos son permeables y no se aran. Todo esto significa que los cultivos que se siembran con las prácticas de la AC en condiciones de temporal tienen acceso a más humedad. (Claridades Agropecuarias, 2011).

Estas actividades son respaldadas por ensayos a largo plazo en estaciones experimentales en las regiones desde donde se promueven la tecnología de AC. En los ensayos que se realizan ininterrumpidamente desde comienzos de los noventa se comparan las prácticas de la AC con las prácticas tradicionales para maíz y trigo -casi siempre incorporando rotaciones de frijol y cebada; y luego se evalúan los efectos de las prácticas en el rendimiento, la calidad del suelo y otros componentes del sistema. Los resultados han mostrado claramente que al paso del tiempo las prácticas de la AC producen rendimientos estables y elevados y mejoran la salud

del suelo. Son una muestra también de los riesgos que implica la aplicación inapropiada o parcial de los métodos de la AC. Los experimentos a largo plazo sirven como plataformas estratégicas y como base para mostrar la tecnología. En 2009, más de 40 eventos de capacitación se concentraron en dichas parcelas de ensayo, y desde 1996 más de 80 investigadores de 20 diferentes países que se han capacitado en el CIMMYT han podido apreciar, en la práctica, las bondades de la AC gracias a los ensayos a largo plazo.

En México se establecen nodos y módulos de AC con recursos económicos y apoyo técnico de varias organizaciones e instituciones, entre las que figuran Asgrow (subsidiaria de Monsanto); Fundación Produce Sonora; Fundación Produce Estado de México; Patronato para la Investigación y Experimentación Agrícola del Estado de Sonora (un grupo de productores del sector privado); Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP); Asociación de Organismos de Agricultores del Sur de Sonora (AOASS); Consejo Nacional de Productores de Trigo (CONATRIGO); y la Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación (SAGARPA).

2.3. Beneficios y limitaciones de la agricultura de conservación

Beneficios

Toda nueva tecnología debe presentar beneficios y ventajas que atraigan a un grupo amplio de agricultores que comprendan las diferencias entre lo que están haciendo y lo que necesitan. En el caso de la Agricultura de Conservación estos beneficios pueden ser agrupados como:

- Beneficios económicos que mejoran la eficiencia de la producción.
- Beneficios agronómicos que mejoran la productividad del suelo.
- Beneficios medio ambientales y sociales que protegen al suelo y hacen que la agricultura sea más sostenible.

Beneficios económicos

Son las ventajas que a todos los productores les interesa, es decir minimizar costos y maximizar la producción obteniendo mayores beneficios económicos durante todo el proceso productivo y durante la comercialización.

Existen tres beneficios económicos principales:

- Ahorro de tiempo y, de ese modo, reducción en el requerimiento de mano de obra.
- Reducción de los costos.
- Mayor eficiencia en el sentido de mayor rendimiento para un ingreso mayor.

El impacto positivo de la Agricultura de Conservación sobre la distribución de la mano de obra durante el ciclo de producción y, aún más importante, la reducción en los requerimientos de mano de obra es la principal razón para la adopción de la Agricultura de Conservación por los agricultores de América Latina, especialmente para aquellos agricultores que dependen completamente de la mano de obra familiar.

Beneficios agronómicos

Este subgrupo de ventajas son aquellas relacionadas con la mejora de los medios de producción, específicamente, ventajas agronómicas. Al adoptar la Agricultura de Conservación se genera el mejoramiento de la productividad del suelo mediante:

- El incremento de la materia orgánica.
- La conservación del agua en el suelo.
- El mejoramiento de la estructura del suelo y consecuentemente de la zona radical.

La adición constante de residuos de cultivos lleva a un incremento de la materia orgánica contenida en el suelo. Al inicio, esto es limitado a la capa superior del suelo, pero al pasar el tiempo se extenderá hasta capas más profundas. La materia orgánica tiene una función importante en el suelo: la eficiencia en el uso de los

fertilizantes, la capacidad de retención del agua, la agregación del suelo, la labranza biológica, mejor entorno de las raíces y retención de nutrientes.

Beneficios medio ambientales

Reducción de la erosión del suelo, y de esa manera de los costos de mantenimiento de los caminos y de las plantas hidroeléctricas.

- Mejoramiento de la calidad del agua.
- Mejoramiento de la calidad del aire.
- Incremento de la biodiversidad.
- Secuestro de carbono.

Los residuos sobre la superficie del suelo reducen el efecto del salpicado de las gotas de lluvia; una vez que la energía de las gotas de agua ha desaparecido, el agua de las gotas de lluvia prosigue hacia el suelo sin producir ningún efecto perjudicial. Esto resulta en una más alta infiltración y en una menor escorrentía y, consecuentemente, en una menor erosión. Los residuos también forman una barrera física que reduce la velocidad del agua y del viento sobre la superficie del suelo, la última de las cuales reduce la evaporación.

La reducción de la erosión del suelo se reduce a un valor cercano a la razón de regeneración del suelo o aún agregando más debido a la acumulación de materia orgánica. La erosión del suelo alcanza los embalses de agua con sedimentos, reduciendo su capacidad de almacenamiento. Los sedimentos en las aguas superficiales incrementan el desgaste de las instalaciones hidroeléctricas y en los sistemas de bombeo, lo cual conduce a mayores costos de mantenimiento y a un más rápido reemplazo de los equipos.

Con la Agricultura de Conservación (AC) se infiltra más agua en el suelo que la que se escapa por escorrentía en la superficie del suelo. Los ríos y arroyos son entonces alimentados más por el flujo subterráneo que por la escorrentía superficial. De esta manera, en la AC el agua superficial es más limpia y se asemeja más al agua subterránea que en las áreas donde predominan la labranza intensiva acompañada

con la erosión y la escorrentía. Una infiltración extensa reduciría las inundaciones, ocasionando más almacenamiento de agua en el suelo y una lenta liberación hacia los ríos y arroyos. La infiltración además recarga las aguas subterráneas y, por ende, incrementa su buen abastecimiento y revitaliza manantiales secados.

Los sedimentos y la materia orgánica disuelta en el agua superficial deben ser extraídos de las fuentes de abastecimiento de agua potable. Una menor pérdida de sedimentos y menor cantidad de partículas de suelo en suspensión conducen a un costo reducido del tratamiento de las aguas.

Al mantener la superficie del suelo cubierta, se reduce la erosión con su pérdida consecuente de fertilidad, compactación, y, por ende, cambios en el paisaje.

Un aspecto de la agricultura convencional es su capacidad para cambiar el paisaje. La destrucción de la capa vegetal afecta las plantas, los animales y los microorganismos. Algunos pocos aprovechan el cambio y se transforman en plagas. Sin embargo, la mayoría de los organismos son afectados negativamente y desaparecen completamente o su número se reduce drásticamente. Con la conservación del suelo y la cobertura en la Agricultura de Conservación se ha creado un hábitat para un número de especies que se alimentan de las plagas, las cuales a su vez atraen más insectos, pájaros y otros animales. La rotación de los cultivos y cultivos de cobertura restringe la pérdida de la biodiversidad genética; esa pérdida es favorecida por el monocultivo.

Los sistemas basados en la adición masiva de residuos de cultivos y en la no labranza, tienden a acumular más carbono en el suelo, comparado con la pérdida que se produce hacia la atmósfera. Durante los primeros años de implementación de la Agricultura de Conservación el contenido de materia orgánica del suelo es incrementado mediante la descomposición de las raíces y la contribución de los residuos vegetales sobre la superficie. Este material orgánico es descompuesto lentamente y de esta manera la liberación de carbono a la atmósfera también ocurre lentamente. En el balance total, tiene lugar una fijación o secuestro del carbono. Esto convierte al suelo en un sumidero neto de carbono. Este podría tener

resultados profundos en la lucha contra las emisiones de GEI a la atmósfera, y así ayudar en mitigar los impactos calamitosos del calentamiento global (FAO, 2015).

Como ya se ha mencionado anteriormente, el conjunto de técnicas que engloban la agricultura de conservación suponen una mejora medioambiental considerable, sin que ello implique una merma en los rendimientos productivos de las explotaciones.

Independientemente de los beneficios para el medio ambiente, carecería de sentido permitir su puesta en práctica si no fuera un sistema de producción viable desde el punto de vista energético y económico. Describiendo los múltiples beneficios en el aspecto medioambiental, la agricultura de conservación supone beneficios claros para suelo, aire y agua (ver Cuadro 1).

Cuadro 1. Principales beneficios medioambientales de la agricultura de conservación

Para el suelo	Reducción de la erosión
	Incremento en los niveles de materia Orgánica
	Mejora de la estructura y porosidad
	Mayor biodiversidad
	Incremento de la fertilidad natural del Suelo
Para el aire	Fijación de carbono
	Menor emisión de CO ₂ a la atmósfera
Para el agua	Menor escorrentía
	Menor contaminación de aguas superficiales y subterráneas
	Mayor capacidad de retención de agua
	Menor riesgo de inundaciones

Fuente: elaboración propia con datos de la FAO, 2016.

A continuación, se describen brevemente los principales beneficios agroambientales que tienen las prácticas de agricultura de conservación.

Disminución de los procesos erosivos

Según un considerable número de estudios científicos, mantener el suelo cubierto con vegetación, bien sean los restos de la cosecha anterior, o plantas vivas como en el caso de las cubiertas vegetales, es uno de los métodos más eficaces, a la par que económico, para luchar contra la erosión. Al cubrir el suelo, se minimiza el impacto directo de las gotas de lluvia sobre el mismo, evitando así su disgregación. Además, la descomposición de las raíces propician la apertura de canales que favorecen una mayor infiltración reduciendo la escorrentía y, por tanto, sus procesos erosivos asociados (Martínez, 2005). La efectividad de la protección del suelo contra la erosión será tanto más eficaz cuanto mayor sea la cobertura del suelo y, por tanto, cuanto menor sea el enterrado de los restos vegetales a través de las operaciones de laboreo.

En particular, con los sistemas de agricultura de conservación se reduce en gran medida la erosión del suelo, más del 90 % en el caso de siembra directa/ no laboreo (Towery, 1998), más del 60 % en el laboreo reducido (Brown et al., 1996), y un 85 % en cubiertas vegetales (Márquez *et al.*, 2008), lo que se traduce en una mejor calidad de las aguas superficiales debido a la disminución de los sedimentos transportados, así como de la pérdida de herbicidas y nutrientes en solución y asociados al sedimento. Todo lo anterior representa en su conjunto una mejora muy importante de la calidad de las aguas superficiales.

Mejora de los contenidos de materia orgánica

La materia orgánica se relaciona con la mayoría de los procesos, por no decir con todos, que ocurren en el suelo. La calidad de un suelo está determinada principalmente por su contenido en materia orgánica, si bien éste es variable y muy sensible a los sistemas de manejo del suelo. En las condiciones de España, destacamos la importancia de la materia orgánica en la formación de la estructura del terreno, frenando la erosión y mejorando la capacidad de retención de agua en el perfil, de especial interés en los secanos. Está ampliamente investigado que cuando se cambia de la agricultura convencional (laboreo intenso) a la de

conservación el contenido en materia orgánica del suelo aumenta con el tiempo, con todas las consecuencias positivas que ello conlleva (Giráldez *et al.*, 1995, 2003).

En ensayos realizados en el sur de España (Finca Tomejil en Carmona, Sevilla), tras más de 19 años de ensayo en siembra directa, comparando con el convencional, se fijaron 18 t/ha más de carbono en un perfil de suelo de 52 centímetros, aumentando el contenido en materia orgánica en torno al 40 % (Ordóñez *et al.*, 2007). En otros estudios realizados por la Asociación Española Agricultura de Conservación/Suelos Vivos, durante 4 años en 7 fincas en las que se implantaron cubiertas vegetales en olivar, se han medido incrementos en el carbono orgánico de los primeros 25 centímetros de suelo del 42 % (Márquez *et al.*, 2008).

Disminución de las emisiones directas de CO₂ a la atmósfera. Sumidero de carbono

El laboreo estimula la producción y acumulación de CO₂ en la estructura porosa del suelo a través de los procesos de mineralización de la materia orgánica. La acción mecánica de las labranzas supone una rotura de los agregados del suelo, con la consiguiente liberación del CO₂ atrapado en el interior de los mismos y su posterior emisión a la atmósfera.

Por otro lado, el consumo energético asociado a las diferentes prácticas agrícolas llevadas a cabo (laboreo, aplicación de abonos y enmiendas, riego, tratamientos fitosanitarios, etc.) se centra en el uso de combustibles fósiles, especialmente gasóleo, lo que implica inevitables emisiones a la atmósfera de gases de efecto invernadero (GEI).

Teniendo en cuenta que en la agricultura de conservación el número de operaciones sobre el suelo disminuyen en gran medida respecto a la agricultura convencional, las emisiones de GEI derivadas de los efectos anteriormente comentados se reducen de manera considerable.

En lo referente al papel del suelo como sumidero de carbono, la agricultura de conservación introduce cambios importantes en la dinámica del carbono en el terreno favoreciendo el secuestro del mismo. Los restos de cosecha sobre la

superficie y la no alteración mecánica del suelo, trae como consecuencia directa una reducción en la tasa de descomposición de los rastrojos y una disminución de la mineralización de la materia orgánica del suelo, debido a una menor aireación y menor accesibilidad de los microorganismos a la misma y, por consiguiente, un incremento en el contenido de carbono del suelo. Como consecuencia de ello, se captura en el terreno el carbono procedente del material vegetal, dificultándose su devolución a la atmósfera en forma de CO₂.

Aumento de la biodiversidad

Los sistemas agrícolas con abundantes restos de cosecha sobre el suelo proveen alimento y refugio a muchas especies animales durante períodos críticos de su ciclo de vida, de ahí que con la agricultura de conservación prosperen gran número de especies de pájaros, pequeños mamíferos, reptiles y lombrices, entre otros.

Asimismo, la agricultura de conservación permite el desarrollo de una estructura viva en el suelo, más estratificada, rica y diversa en seres vivos tales como microorganismos, nematodos, lombrices e insectos. La gran mayoría de las especies que constituyen la fauna del suelo son beneficiosas para la agricultura y contribuyen de alguna forma a la formación del suelo, a la movilización de nutrientes y al control biológico de los organismos considerados como plagas.

En el caso de lombrices, en ensayos realizados en España, en siembra directa se han alcanzado 200 individuos por metro cuadrado en los primeros 20 cm de suelo, frente a apenas 30 en agricultura convencional. En siembra directa, esta cifra equivale a unos 600 kg de biomasa por hectárea, casi un 700 % más que en convencional (Cantero *et al.*, 2004).

Mejora de la calidad de las aguas superficiales

Los contaminantes más importantes en las aguas superficiales son las partículas de suelo procedentes de la acción de la erosión hídrica. Una alta concentración de sedimentos perjudica notablemente a los ecosistemas acuáticos, ya que dificultan la penetración en el agua de la luz que las plantas acuáticas necesitan para la

fotosíntesis y deterioran los hábitats de peces y otros organismos (Christensen *et al.*, 1995).

Otros contaminantes que pueden estar presentes en las aguas superficiales son, por orden decreciente de importancia, nutrientes, patógenos, materia orgánica, metales pesados y pesticidas. En ocasiones, en embalses que recogen aguas de cuencas agrícolas vertientes, se han detectado tasas de concentración de algunos de estos componentes por encima de los valores admisibles permitidos por la ley, lo que ha motivado cortes en el suministro de agua y la prohibición de uso de algunas materias activas.

La agricultura de conservación se presenta como una solución para este problema, dado que los rastrojos o restos vegetales de la cosecha anterior sobre el suelo que caracterizan a estos sistemas, retienen en gran medida los fertilizantes y pesticidas en la zona agrícola en que fueron aplicados, hasta que son utilizados por el cultivo o descompuestos en otros componentes inocuos para el medio ambiente.

En consecuencia con lo anterior, se ha estimado que mediante la siembra directa y el laboreo de conservación, el arrastre de herbicidas en las aguas se reduce sustancialmente, y de forma similar los nitratos (más del 85 %) y fosfatos solubles (más del 65 %) (ECAAF, 1999). De la comparación de la siembra directa con el laboreo convencional se ha comprobado también que el transporte de herbicidas en las aguas superficiales se reduce un 70 %, el de sedimentos en un 93 % y la escorrentía se ve también reducida en un 69 % (ECAAF, 1999). Todos estos datos nos hacen ver que las técnicas de agricultura de conservación (siembra directa y agricultura de conservación) evitan en gran medida la contaminación de las aguas, mejorando su calidad.

Limitaciones

La limitación más importante donde se practica la Agricultura de Conservación, es la falta inicial de conocimientos. No hay un prototipo disponible para la Agricultura de Conservación, ya que todos los agroecosistemas son diferentes; especialmente la información sobre los cultivos de cobertura de adaptación local que producen una alta cantidad de biomasa es a menudo escasa. El éxito o fracaso de la Agricultura de Conservación depende en gran medida de la flexibilidad y creatividad de los agricultores, los técnicos y de los servicios de extensión e investigación de la región. Las pruebas y los errores, realizados ambos por instituciones o por los propios agricultores son a menudo la única fuente real de información.

Sin embargo, como la Agricultura de Conservación está ganando impulso rápidamente, en una gran cantidad de regiones ya existen organizaciones y grupos de agricultores y de personas interesadas que intercambian información y experiencias sobre cultivos de cobertura, herramientas y equipos usados en la Agricultura de Conservación.

La nerviosidad inicial referente el cambio de la agricultura basada en el arado a la AC, podría mejorarse por la formación de grupos de agricultores para intercambiar ideas y ganar conocimientos de los agricultores con mayor experiencia.

Como la AC depende parcialmente en el uso de herbicidas, por lo menos durante las etapas iniciales de adopción, algunas personas se preocupan que la adopción de AC incrementará el uso de herbicidas y lleva a mayor contaminación del agua por herbicidas. En realidad, la experiencia enseña que el uso de herbicidas tiende a reducirse con el tiempo como la cobertura del suelo previene la emergencia de malezas.

La reducción en lixiviación de pesticidas bajo la AC podría ser causada por mayor actividad microbial, y así se degradan con mayor rapidez; o al incremento en el contenido de materia orgánica que adsorbe los pesticidas.

La literatura sobre AC está dirigida fundamentalmente a analizar los beneficios de la AC y los factores que influyen en su adopción (Knowler y Bradshaw, 2007; Wall, 2007; Erenstein et al., 2012), sin embargo, existen algunos efectos negativos a corto plazo, dentro de los cuales se reportan la incidencia de malezas y plagas, la inmovilización de nutrientes del suelo, una baja germinación y ahogamiento en suelos con mal drenaje. A largo plazo, la acidez, compactación del suelo (dependiendo de la textura), toxicidad por aluminio y menor integración de materia orgánica al suelo (Giller et al., 2009).

Otros factores limitantes son el uso de los residuos de cosecha para forraje de los animales y la costumbre de libre pastoreo en áreas con épocas secas prolongadas (Wall, 2007; Kassam *et al.*, 2009; Erenstein *et al.*, 2012). Las normas sociales en las comunidades rurales también pueden afectar la adopción, debido a que el sistema de AC es muy distinto a los conocimientos convencionales. La seguridad del derecho sobre la parcela es importante debido a que muchos de los beneficios de la AC son a mediano y largo plazo (Govaerts *et al.*, 2005, 2009). Según Wall (2007) hay menos probabilidad de que los productores adopten la AC cuando no son propietarios de la parcela. Sin embargo, Knowler y Bradshaw (2007) encontraron estudios que lo confirman y otros que lo rechazan. Estos mismos autores también detectaron que hay una insuficiencia de conocimiento sobre los factores de adopción, por lo que o hay pocas o no existen variables que expliquen universalmente la adopción de AC.

Marenya y Barrett (2007) encontraron que los factores que aumentaron la probabilidad de adopción de AC son las mismas que contribuyen a su abandono. En su estudio encontraron que los factores importantes para la adopción de tecnologías sustentables para el manejo de suelo fueron: educación, tamaño del terreno agrícola, disponibilidad de mano de obra y los ingresos no agrícolas. No se ha prestado mucha atención al hecho de que algunos agricultores adoptan la AC u otras tecnologías de conservación del suelo por algunos años y luego la abandonan (Ramírez, *et al.*, 2013).

La principal causa de abandono es la falta de acompañamiento técnico. Aparte de la principal razón que ocasionó el abandono de la AC, mencionado por los agricultores, también revelaron tres causas adicionales de importancia en el abandono: establecimiento de la AC en parcelas rentadas, desinterés del productor hacia la AC y conflicto en el uso del rastrojo para cobertura versus forraje.

Los costos de producción en términos comparativos no son los mismos con agricultura de conservación que con agricultura tradicional, se ha dejado claro que existe una reducción de costos con la AC por menos utilización de maquinaria; sin embargo el costo por el uso de fertilizantes y herbicidas AC equilibra los costos en cuanto a los dos sistemas de labranza. Aunque es diferente el costo de producción de una ha de maíz, trigo y frijol en diversas regiones del país con AT que con AC, que es ahí donde estriba la diferencia.

No obstante, la necesidad de alimentar a la población mundial conlleva a la adopción y abandono de la AC. La mayoría de los productores prefiere producir tradicionalmente no importándole producir de manera sustentable; sino la forma de producir más para obtener mejores beneficios económicos. Además, para la transición de AT a AC tienen que pasar de 2 a 3 años para que se materialicen los beneficios agro – ambientales y económicos; hecho que perjudica de manera sustancial al abastecimiento de productos agrícolas y a las necesidades de seguridad alimentaria mundial.

Son varios los factores preponderantes acerca de las limitaciones de la agricultura de conservación, debido a que no se ha adoptado en gran parte de la República mexicana a pesar de existir parcelas demostrativas que enaltecen sus múltiples beneficios.

2.4. El suelo como sumidero de carbono, beneficio de alto impacto de la agricultura de conservación

Existe una gran preocupación acerca de la magnitud de las pérdidas pasadas y presentes de carbono provocadas por la actividad humana. Según las estimaciones, las pérdidas en los últimos 150 a 300 años debido al uso de la tierra y al cambio en el uso de la tierra, fundamentalmente la conversión de bosques en tierras agrícolas, oscilan entre 100,000 y 200,000 millones de toneladas (Houghton, 2012). Se reconoce cada vez más la importancia de los suelos como regulador terrestre de los ciclos del carbono y el nitrógeno, especialmente tras el nuevo régimen climático, establecido en virtud del Acuerdo de París de diciembre de 2015, por el que se pide la adopción de medidas para conservar y mejorar los sumideros y reservorios de gases de efecto invernadero.

Los suelos son el segundo mayor reservorio de carbono de la Tierra, después de los océanos; una pequeña variación en las existencias de carbono orgánico del suelo puede provocar cambios importantes en los niveles de CO₂ de la atmósfera (Chappell, Baldock & Sanderman, 2016). Hasta un metro de profundidad, los suelos del mundo, excepto el permafrost, contienen unas existencias totales de carbono orgánico de alrededor de 500±230 Gt C, el equivalente al doble de la cantidad de carbono en forma de CO₂ presente en la atmósfera (Scharlemann *et al.*, 2014). Los suelos ofrecen grandes posibilidades para retener carbono, y este es sobre todo el caso de los suelos degradados a través de las medidas de restauración (Lal, 2010).

La capacidad del suelo para retener el carbono puede mantenerse y mejorarse mediante prácticas agrícolas que también restauren la salud y la fertilidad de los suelos con miras a la producción agrícola. El hecho de favorecer la gestión sostenible de los suelos reporta, por tanto, múltiples beneficios: aumenta la productividad, impulsa la adaptación al cambio climático, la fijación de carbono y la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero (FAO y Grupo técnico intergubernamental sobre los suelos [GTIS], 2015). Si bien se reconoce el papel de los suelos como posibles sumideros y reservorios, son limitados los conocimientos sobre las existencias actuales de carbono del suelo y sobre el potencial real de

captación de carbono del suelo debido a la falta de sistemas adecuados de información y seguimiento.

Para aprovechar el potencial de fijación de carbono del suelo, es necesario fomentar la gestión sostenible de los suelos como un sistema con una gama de funciones que ofrece múltiples servicios ecosistémicos (FAO y GTIS, 2015). El potencial técnico de captación del carbono orgánico del suelo parece oscilar entre 0.37 y 1.5 Gt C por año (Sommer y Bossio, 2014; Smith et al., 2008; Paustian et al., 2004). Se trata de posibilidades técnicas, en el supuesto implícito de que las tierras agrícolas se gestionen a fin de retener el carbono. Sin embargo, la tasa de captación de carbono del suelo en tierras destinadas a usos agrícolas varía de 0,1 a 1 Gt C por hectárea al año (Paustian *et al.*, 2016). Por consiguiente, tendrían que gestionarse miles de millones de hectáreas para optimizar la fijación de carbono a fin de llegar a una tasa anual de 1 Gt C. Además, los niveles de captación serían relativamente bajos al principio, alcanzarían un nivel máximo al cabo de 20 años y luego disminuirían lentamente (Sommer & Bossio, 2014).

Emisiones de CO₂ desde el suelo

La emisión de CO₂ derivada de la acción mecánica sobre el perfil del suelo está directamente relacionada con la estabilidad de los agregados del mismo. En condiciones naturales, la MO se encuentra encapsulada en el interior de los agregados, no resultando accesible al ataque de los microorganismos presentes en el suelo. Cuanto menos estable sea un agregado, menor será su resistencia ante procesos de alteración que puedan ocasionar su rotura y, por tanto, más fácilmente será accesible la MO de su interior a los microorganismos, favoreciéndose los procesos de mineralización y de generación de CO₂ como subproducto que se emitirá a la atmósfera.

La adopción de prácticas alternativas de AC ha permitido no sólo un mayor control de la erosión del suelo sino también un descenso de las pérdidas de MO y de emisiones de CO₂ que se dan como consecuencia del laboreo intensivo del suelo. La no alteración del suelo que conllevan las prácticas de conservación, mejora la

estructura del mismo, aumentando la estabilidad de los agregados frente a los procesos de desagregación, permitiendo una mayor protección de la MO frente a los ataques de la microfauna edáfica, y manteniendo “atrapado” en el espacio poroso del suelo, el CO₂ resultante de los procesos de mineralización de la MO.

Por tanto, la disminución del laboreo reduce y ralentiza la descomposición de los restos vegetales, consiguiéndose un almacenamiento del CO₂ atmosférico (fijado en la estructura del cultivo y devuelto al suelo en forma de resto vegetal) en el suelo. De esta manera, el suelo tendrá la función de almacén de CO₂ atmosférico ayudando así, a mitigar las emisiones de GEI generadas por otras actividades.

En trabajos de investigación llevados a cabo en Estados Unidos (Reicosk y *et al.*, 2007), se evaluaron los efectos a corto plazo que, sobre las emisiones de CO₂, tenían dos sistemas de manejo de suelo, uno de ellos basado en la utilización del arado de vertedera y otro bajo SD. Las investigaciones dieron como resultado una mayor emisión tanto a corto como a medio plazo, de las parcelas labradas con respecto a las parcelas bajo SD, con valores que fueron desde emisiones 3.8 veces superiores a las cuantificadas en SD cuando la labor realizada fue más superficial (10 cm) hasta emisiones 10.3 veces mayores que las medidas en SD en el caso de labores más profundas (28 cm).

En experimentos llevados a cabo en la finca Tomejil (Sevilla) por Carbonell-Bojollo *et al.* (2011), los suelos en SD emitieron un menor flujo de gas en comparación con los suelos labrados. En concreto, en la operación de siembra, las parcelas bajo un manejo de suelo basado en el laboreo, emitieron entre un 34 % y un 75 % más de CO₂ que las parcelas manejadas bajo SD, dándose los picos de emisión después de 4 horas de realizar la operación.

Basándose en un estudio en el que se compararon diferentes sistemas de manejo del suelo, Prior *et al.*, (2000) sugirieron que el aumento de los flujos de CO₂ que ocurren después de la labranza se relaciona con la profundidad de la operación y con el grado de alteración del suelo. Esto coincide con los resultados obtenidos por Carbonell-Bojollo *et al.*, (2011), dado que, en la comparación de los dos sistemas

de labranza, se observó que la operación con arado de vertedera, el cual alcanzó hasta 40 cm de profundidad, fue la que produjo las mayores emisiones. Con todo ello, las emisiones de CO₂ producidas tras la operación realizada con arado de vertedera y con grada de discos fueron respectivamente 10.5 y 6.7 veces superiores a las emisiones producidas en las parcelas bajo SD.

Otros ensayos llevados a cabo en Aragón y Cataluña, se observó que, a largo plazo, los flujos medios fueron inferiores en las parcelas de SD y superiores en las parcelas bajo laboreo convencional. A corto plazo, los flujos de CO₂ en SD fueron bajos y constantes a lo largo del experimento ya que el suelo en este sistema no se alteró. Desde el inicio hasta 48 horas después del laboreo la emisión de CO₂ acumulada en el sistema de laboreo convencional ascendió a 45 g CO₂ m⁻², sin embargo, para ese mismo periodo las emisiones de CO₂ bajo SD alcanzaron los 24 g CO₂ m⁻², resultando un 40 % inferior al sistema de laboreo convencional (Álvaro- Fuentes *et al.*, 2007).

CAPÍTULO 3. MÉTODOS DE DEFINICIÓN DE VARIABLES Y ESTIMACIÓN DE CAPTURA DE CARBONO EN MÉXICO

En este apartado se analizaron publicaciones, las cuales muestran resultados de investigaciones realizadas en México con respecto a fijación de carbono y su relación con la agricultura de conservación. Los factores y las variables necesarias para el cálculo de fijación de carbono para este meta – análisis son descritas en este apartado.

Todos los trabajos presentan aspectos generales relacionados con la fijación de C atmosférico en suelos agrícolas, sin embargo el enfoque fue obtención de datos brutos sobre las técnicas y metodologías empleadas en cada investigación, especialmente, en el impacto de la adopción de prácticas de AC, frente a la utilización de Agricultura Tradicional (AT), en la reducción de emisiones de CO₂ en México.

Los artículos científicos revisados son de la primer década del año 2000 que es la etapa inicial de la agricultura de conservación, la cual estuvo en promoción por aquellos centros de investigación como CIMMYT, el INIFAP, Fideicomisos Instituidos en Relación a la Agricultura (FIRA), la FAO entre otras dependencias y Universidades que se han encargado de la difusión, trabajos y experimentos con diferentes técnicas de conservación, además de la región de estudio, clima, suelo, profundidad duración de los estudios entre otras variables que se describen en este apartado. El suelo es la parte esencial de los estudios pues en él es donde surge el efecto sumidero de carbono. Razón por la cual es importante múltiples estudios en diversas regiones y estados de la República mexicana.

Ante este escenario, una buena cuantificación de los stocks de carbono orgánico en el suelo (COS) resulta imprescindible. Actualmente, se emplean en el mundo dos metodologías diferentes para realizar esas medidas. La primera tiene en cuenta los diferentes horizontes genéticos del suelo, es decir, la estratificación natural de los mismos en los que los niveles se han ido construyendo de manera natural. La segunda se realiza mediante el estudio de secciones de control del suelo a

diferentes profundidades, sin que exista una uniformidad de criterio en la profundidad de estas secciones.

Se utilizó la metodología de González, (2012) que mediante fórmulas se obtiene el coeficiente de fijación de carbono, de acuerdo a la sumatoria de carbono orgánico secuestrado por medio de agricultura de conservación menos la sumatoria de carbono orgánico secuestrado por medio de agricultura tradicional. Con la diferencia de ambas sumatorias entre la profundidad de cada estudio se obtiene el aumento de carbono detectados en el suelo, posteriormente se multiplica por la profundidad del estudio en cuestión entre la profundidad máxima detectada y finalmente entre el número de años del estudio de acuerdo a la región climática.

Las variables independientes de esta investigación fueron el clima, el tipo, densidad y profundidad del suelo, la duración del estudio en cada caso.

Las variables dependientes son las técnicas de conservación: siembra directa y labranza mínima con las variantes de incorporación de residuos y rotación de cultivos.

En la investigación se analizaron trabajos previos publicados en relación a la captura de carbono en México a través de diferentes prácticas de agricultura de conservación, como lo fueron la siembra directa y labranza mínima; así como la incorporación de residuos y la rotación de cultivos.

Enseguida se clasificaron los trabajos con base en la región y localización de cada uno de los estudios. Además también se clasificaron de acuerdo a la práctica de conservación empleada.

3.1. Localización de sitios para el cálculo de fijación de carbono

Los sitios abarcan nueve Estados de la República Mexicana que incluyen el Estado de México, Tlaxcala, Morelos; Guanajuato, Michoacán, Querétaro; Sonora; Tamaulipas y finalmente Chiapas (Figura 2 y Cuadro 2).



Fuente: Elaboración propia (2016)

Figura 2. Localización de sitios de investigaciones con agricultura de conservación.

Para poder ordenar y clasificar los estudios, primero se clasifico de acuerdo a la región donde fue realizado el experimento, posteriormente se ubicó el estado y el municipio, enseguida se distinguió según el manejo de suelo o en base a la técnica de agricultura de conservación utilizada (Ver Cuadro 2).

Cuadro 2. Lista de localizaciones y sistemas de manejo de suelos comparados en las diferentes regiones analizadas.

Región	Estado	Localización	Clasificación de Suelo	Técnicas de conservación	
Norte	Sonora	Ciudad. Obregón	Calcic Vertisol	SD vs. AT	
	Tamaulipas	Río Bravo	Vertisol	SD, LM vs. AT	
	Guanajuato	Celaya	Udic Vertisol	SD vs. AT	
Centro-	Tlaxcala	Hueyotlipan	Cambisol	SD, LM vs. AT	
Occidente	México	Texcoco	Haplic Phaeozem	SD, LM, vs. AT	
	Michoacán	Pátzcuaro	Andisol	SD vs. AT	
	Michoacán	Casas Blancas	Andisol	SD, LM vs. AT	
	Michoacán	Morelia	Vertisol	SD, LM vs. AT	
	Michoacán	Apatzingán	Vertisol	SD, LM vs. AT	
	Michoacán	Tepatitlán	Alfisol	SD, LM vs. AT	
	Querétaro	Querétaro	Haplic Phaeozem	SD vs. AT	
	Sureste	Morelos	Tlaltizapán	Vertisol	SD, LM vs. AT
		Chiapas	Tapachula	Litosol	SD, LM vs. AT
Chiapas		Tuxtla Chico	Rendzina	SD, LM vs. AT	
Chiapas		Frontera Hidalgo	Andisol	SD, LM vs. AT	

Fuente: Elaboración propia (2016). Clasificación de acuerdo a Soil Taxonomy (Soil Survey Staff, 2003). SD, siembra directa; LM, labranza mínima y AT, agricultura tradicional.

De los 15 estudios anteriormente referidos, 2 investigaciones comprenden tres sitios de localización en los estados de Chiapas y Michoacán. En la Figura 1 se observa la localización de cada uno de los sitios de las investigaciones que se usaron para la elaboración de este trabajo.

En cada sitio experimental, se analizaron las diferencias y similitudes entre cada uno de ellos; por ejemplo las técnicas de conservación: siembra directa (SD) y labranza mínima (LM). Posteriormente se enunciaron y se clasificaron cada uno de los trabajos por su tipo de suelos y técnicas de conservación.

En la revisión de cada investigación se observó que el potencial para secuestro de carbono no siempre es igual y dependerá de varios factores entre los que resaltan clima del área, tipo y densidad de suelo; y técnica de labranza de conservación; así como la duración en que se realizó cada experimento a analizar.

Para obtener un buen manejo integrado de suelos es necesario considerar diversos factores como los que ya se han mencionado anteriormente. Sin embargo, una manera de aumentar la resiliencia del sector es mediante el manejo integral de los suelos (MIS) que contribuye a crear condiciones edafológicas favorables para el buen crecimiento de los cultivos, la germinación de las semillas, el crecimiento de las raíces, el desarrollo de las plantas, la formación del grano y la cosecha.

En el pasado, el modelo agrícola de la revolución verde permitió resolver un déficit importante en la producción de alimentos; sin embargo, estos modelos caracterizados por un alto contenido tecnológico y un uso amplio de fertilizantes, agroquímicos y sistemas de riego, han generado problemas de degradación ambiental, contaminación del suelo y aguas, erosión genética y han estimulado la inequidad, en vista de que los beneficios no fueron extendidos a los pequeños productores.

Actualmente se está generando un cambio de paradigma en la manera de desarrollar la agricultura hacia un modelo basado en la intensificación sostenible de la producción.

Se ve al hombre como parte de la fórmula que genera un balance entre el suelo y el clima. Cada vez más productores están haciendo un MIS agropecuario y de labranza conservacionista para mejorar y conservar los niveles de materia orgánica en los suelos.

Los elementos claves de las investigaciones son precisamente el MIS, el clima, la duración de los experimentos entre otros factores que pueden o no considerarse.

3.2. Factores clave para el cálculo de fijación del carbono

Existe una gran diversidad de factores para determinar la fijación del carbono, sin embargo dada la diversidad de datos presentados en los documentos base, se utilizaron diferentes técnicas de conservación, tipo y densidad de suelo; profundidad, duración y el factor climático

Técnicas de conservación

Las técnicas de conservación significan los procesos o métodos mediante los cuales se busca preservar el medio ambiente como lo son la disminución de la contaminación del suelo, la erosión y la vulnerabilidad a la cual está expuesta la tierra. Debido a lo anterior existen diversas técnicas de labranza como a continuación se enuncian.

La Siembra Directa sin labores o labranza cero (SD) y la labranza mínima (LM) son las técnicas agrícolas más relevantes de conservación del suelo. La primera consiste en que el suelo no recibe labor alguna desde la recolección del cultivo hasta la siembra del siguiente, excepto para la aplicación de fertilizantes mediante inyección o incorporación en bandas. La labranza Mínima (LM), consiste en labrar superficialmente sólo días antes de la siembra mediante la utilización de cultivadores, gradas y arados de cincel. El control de las malas hierbas y arvenses se realiza mediante herbicidas de bajo impacto ambiental y/o cultivadores. Por lo que, el potencial de conservación de carbono están relacionadas directamente con la técnica de conservación empleada. (González, 2015).

Tipo y densidad del suelo

Las propiedades físicas del suelo, como lo son el tipo y la densidad son consideradas importantes para determinar el cálculo de fijación de carbono en el análisis de los trabajos analizados en esta investigación: Por tal motivo fue necesario profundizar sobre dichas propiedades.

Mediante la determinación de la densidad se puede obtener la porosidad total del suelo. Se refiere al peso por volumen del suelo. Existen dos tipos de densidad, real y aparente. La densidad real, de las partículas densas del suelo, varía con la proporción de elementos constituyendo el suelo y en general está alrededor de 2,65. Una densidad aparente alta indica un suelo compacto o tenor elevado de partículas granulares como la arena. Una densidad aparente baja no indica necesariamente un ambiente favorecido para el crecimiento de las plantas (Balbotín, 2009).

La densidad aparente es la que interesa en este trabajo, razón por la cual se puede ver el Cuadro 3, que es un extracto del libro titulado Soil Carbon Sequestration and the Greenhouse Effect, donde los autores de dicho libro mencionan que un problema general relacionado con la conversión de concentraciones de Carbono Orgánico en el Suelo (COS %) con el COS (Mg ha^{-1}) expresado en masa de suelo es complicado debido a la falta de valores de densidad aparente.

Generalmente, las bases de datos de suelos mexicanos carecen de esto, principalmente porque la técnica de muestreo es complicada, y existe dificultad de transportar muestras no perturbadas desde lugares distantes al laboratorio para el análisis. Sin valores de densidad aparente recopilados in situ junto con las muestras de suelo, su aproximación se hace a partir de información secundaria de los factores que generalmente están relacionados con la densidad aparente.

Según el estudio antes mencionado por Balbotín (2009). El procedimiento utilizado para estimar la densidad aparente se basó principalmente en información de campo (compactación, estructura y génesis del horizonte) e información de laboratorio

(textura y materia orgánica). De acuerdo con estos criterios, se propusieron los siguientes rangos de densidad aparente para los diferentes tipos de suelo:

- Suelos de tipo Histosol o con abundante presencia de hojarasca en los primeros centímetros de suelo: 0.35 g cm^{-3}
- Suelos de origen volcánico de tipo Andosol o Regosol, compuestos principalmente por cenizas, lapilli o piedra pómez: 0.90 g cm^{-3}
- Suelos de textura fina, es decir, con más del 35% de arcilla en los 30 cm superiores de suelo: 1.10 g cm^{-3}
- Suelos de textura media: 1.20 g cm^{-3} .
- Suelos pesados del tipo Vertisol, con un predominio de arcillas esmectíticas: 1.40 g cm^{-3}
- Suelos de textura gruesa, es decir, suelos arenosos o muy pedregosos: 1.55 g cm^{-3}

El valor promedio de densidad aparente de los suelos mexicanos fue 1.25 g cm^{-3} . El más alto las densidades aparentes se concentraron en las regiones donde prevalecían las texturas arenosas (climas árido con bajos niveles de materia orgánica), por ejemplo, el estado de Sonora y la península de Baja California, al norte de Chihuahua, y los valores más bajos en algunos suelos del Cinturón Transvolcánico Mexicano.

Con el correspondiente valor de carbono orgánico en el suelo y la clasificación de densidad aparente; de acuerdo a la región de estudio y tipo de suelos referidos en el Cuadro 3 se utilizaron para determinar el coeficiente de fijación de carbono que más adelante se explica (Balbotín, 2009).

Se tuvieron que realizar las respectivas conversiones, ya que muchos de los datos publicados en los trabajos se encontraban en porcentajes o diferentes unidades de conversión que fueron necesarias homogenizar para poder ejecutar las fórmulas que más adelante se explican.

Cuadro 3. Porcentajes promedio de carbono orgánico en los suelos (COS) de las regiones fisiográficas de México

Tipo de Suelo	Región	No. de perfiles	COS	
			Media	SD
			%	
Eutric Histosol-Eutrico Histosol	Llanura Costera del Sur del Golfo	3	13.93	18.6
Mollic Solonchak-Mólico Solonchak	Península de Yucatán	3	12.58	11.5
Eutric Histosol-Éutrico Histosol	Cinturón volcánico transversal	4	9.54	3.4
Eitric Histosol- Éutrico Histosol	Península de Yucatán	6	8.86	6.4
Litosol	Península de Yucatán	78	7.15	4.3
Rendzina	Península de Yucatán	254	5.74	3.9
Humic andosol-Humico andosol	Sierra Madre Oriental	3	5.31	3.4
Mollic gleysol-Molico gleysol	Cinturón volcánico transversal	4	5.17	4.5
Mollic gleysol-Molico gleysol	Península de Yucatán	4	4.14	2.2
Rendzina	Sierra de Chiapas	19	4.03	3.2
Litosol	Sierra de Chiapas	19	3.97	2.9
Rendzina	Llanura Costera del Sur del Golfo	8	3.67	3.2
Rendzina	Sierra Madre del Sur	64	3.43	2
Litosol	Llanura Costera del Sur del Golfo	28	3.43	2.4
Rendzina	Cinturón volcánico transversal	14	3.32	1.9
Haplic Phaeozem	Cinturón volcánico transversal	332	1.42	1.4
Haplic Phaeozem	Sierra Madre del Sur	227	1.36	1.3
Haplic Phaeozem	Sierra Madre Occidental	339	1.29	0.9
Haplic Xerosol	Sierra Madre Oriental	191	1.19	0.8
Pelic Vertisol-Pélico vertisol	Cinturón volcánico transversal	202	1.12	0.7
Eutric Regosol-éutrico Regosol	Sierra Madre del Sur	416	1.06	1
Eutric Regosol-éutrico Regosol	Sierra Madre Occidental	238	1	1.8
Calcic Xerosol-Calcico Xerosol	Sierra Madre Oriental	274	0.95	0.7
Calcic Xerosol-Calcico Xerosol	Sierras Norte y Llanuras	203	0.64	0.4
Calcaric Fluvisol-Calcárico fluvisol	Península de Baja California	7	0.26	0.3
Calcaric Fluvisol-Calcárico fluvisol	Llanuras de Sonora	13	0.26	0.4
Luvic Yermosol-Luvico Yermosol	Sierra Madre Oriental	3	0.24	0.1
Eutric Fluvisol-Éutrico Fluvisol	Península de Baja California	23	0.23	0.2
Luvic Yermosol-Luvico Yermosol	Llanuras de Sonora	21	0.23	0.1
Takyrico Yermosol	Sierras Norte y Llanuras	8	0.23	0.1
Luvic Yermosol-Luvico Yermosol	Grandes Llanuras de América del Norte	6	0.22	0.1
Haplic Yermosol	Península de Baja California	38	0.21	0.1
Calcic Yermosol	Península de Baja California	16	0.2	0.1
Calcic Yermosol	Sierra Madre Occidental	4	0.2	0.1
Gypsic Yermosol	Sierras Norte y Llanuras	6	0.19	0.1
Calcic Yermosol	Llanuras de Sonora	35	0.14	0.1

Fuente: capítulo cinco titulado: Soil Carbon Sequestration in Different Ecoregions of Mexico del libro denominado Soil Carbon Sequestration and the Greenhouse Effect (Balbontín, (2009).

Profundidad y duración

La profundidad y duración, son factores que se encontraron en cada uno de los experimentos, sólo que la profundidad en algunos trabajos es dado en milímetros (mm), en centímetros (cm), otros en metros (m), por lo que fue necesario realizar las conversiones correspondientes en cm para poder realizar el cálculo de fijación de carbono.

La profundidad y duración de las diferentes investigaciones estudiadas mostraron una gran heterogeneidad. En algunos de los trabajos fue necesario extraer datos de dos diferentes profundidades, por ejemplo, de 0 a 15 cm y de 15 a 30 cm.

Factor climático

Los estudios revisados en esta investigación representan áreas con diferentes climas y suelos, indicando el potencial de fijación de C para las mismas prácticas de agricultura pudiendo variar considerablemente de un caso a otro, haciendo muy riesgoso asignar una tasa de secuestro de C para todo el país.

Por lo tanto, se comenzó describiendo las regiones de la República Mexicana basándose en las áreas de los suelos y climas de localización en cada trabajo, según CONEVYT, 2016 (Consejo Nacional de Educación para la Vida y el Trabajo). Las cuales se describen a continuación:

- Región Norte que comprende a los Estados de Sonora, Tamaulipas Guanajuato y Querétaro. Los climas secos se extienden en la mayor parte del norte del país, incluyendo la península de Baja California. En estos climas las temperaturas son extremas. Durante el día llega a estar por arriba de los 40° C y durante la noche puede disminuir por debajo de los 0° C. Además sus lluvias son escasas que se encuentran entre los 300 y 500 mm anuales. Los climas secos se clasifican en BS, seco estepario para el caso de Tamaulipas, Guanajuato y Querétaro; y BW, seco desértico para el caso de Sonora.

- Región Centro-Occidente que incluye a los Estados de México, Michoacán y Tlaxcala. Estos climas se presentan porque, a pesar de que a esas latitudes les corresponderían climas cálidos, la altitud disminuye la temperatura, y éstas son regiones altas. Las zonas templadas se localizan principalmente en las Sierras Madres Occidental y Oriental en el Sistema Volcánico Transversal y las Sierras de Chiapas, así como en la Mesa del Centro. Estos climas poseen una temperatura media anual que está entre los 12° y los 18° C; su cantidad de lluvia varía entre los 600 y 1 500 mm, llegando hasta los 3 000 mm en las zonas donde llueve todo el año. Hay varios tipos de climas templados: Cs, templado con lluvias en invierno; Cf, templado con lluvias todo el año y Cw, templado con lluvias en verano que comprende a los 3 estados mencionados anteriormente.
- Región Sureste que comprende a los Estados de Morelos y Chiapas con climas tropicales que se extienden de norte a sur a partir del Trópico de Cáncer, a lo largo de las llanuras costeras del Golfo de México y del océano Pacífico, así como en el istmo de Tehuantepec y en gran parte de la península de Yucatán. Estos climas se caracterizan porque su temperatura media anual es mayor a 18° C y llueve de 800 a 4 000 mm al año. Dependiendo de sus precipitaciones, existen dos tipos de climas tropicales: Af, tropical con lluvias todo el año y Aw, tropical con lluvias en verano al cual pertenecen Morelos y Chiapas.

La información relativa al valor del carbono orgánico del suelo en diferentes grupos de clima en México, fue obtenida del capítulo cinco titulado: Soil Carbon Sequestration in Different Ecoregions of Mexico del libro denominado Soil Carbon Sequestration and the Greenhouse Effect de Balbontín *et al.*, (2009), (Ver Cuadro 4).

Dichos autores mencionan el trabajo realizado para poder regionalizar por horizontes y de acuerdo a la clasificación climática, el área que comprende los grupos climáticos para definir los valores de carbono orgánico en el suelo.

Cuadro 4. Valores de carbono orgánico del suelo (COS) en los diferentes grupos climáticos de México

Grupo climático	Área 10 ³ ha	SOC			
		Media	SD	Media	SD
		%		Mg ha ⁻¹	
Tropical húmedo con fuertes lluvias en verano	7.41	1.66	1.5	117.95	111.6
Tropical húmedo con lluvias todo el año	3.59	2.59	2.1	168.79	161.6
Frío	0.01	1.43	0.9	110.57	11.3
Caliente y muy seco	5.74	0.49	0.3	34.75	27.8
Semicaliente y muy seco	34.06	0.74	0.6	37.44	35
Seco	25.88	1.11	0.8	56.65	48.8
Semitropical subhúmedo con lluvias en verano	23.26	1.89	1.7	126.33	127.6
Semitropical subhúmedo con menos humedad	16.03	1.53	1.3	86.56	103.8
Semifrío seco con escasas precipitaciones durante todo el año	0.32	1.23	1.3	38.14	34.4
Semifrío húmedo	0.08	2.5	1.2	163.44	128.1
Semifrío subhúmedo	4.8	1.45	0.9	76.48	72.4
Semiseco semi caliente	13.71	1.28	0.9	77.2	84.3
Semiseco templado	20.97	1.16	0.7	61.14	50
Templado húmedo con lluvias pesadas en verano	2.81	2.21	1.5	132.23	112.2
Templado húmedo con lluvias todo el año	0.45	2.62	1.8	163.18	103.7
Templado subhúmedo con lluvias en verano	20.4	1.57	1	98.98	98.5
Templado subhúmedo menos húmedo	12.2	1.45	1.1	84.06	104

Fuente: capítulo cinco titulado: Soil Carbon Sequestration in Different Ecoregions of Mexico del libro denominado Soil Carbon Sequestration and the Greenhouse Effect (Balbontín, (2009).

De acuerdo con los datos obtenidos en el Cuadro 4 y la clasificación climática de cada investigación fueron obtenidos los valores correspondientes y necesarios para el cálculo de fijación de carbono con las fórmulas que enseguida se explican.

Este factor del clima es esencial para el manejo integrado de suelos, necesario para poder comprender el desarrollo de los cultivos, según las características de cada zona de estudio y del grupo climático.

3.3. Cálculo del coeficiente de fijación de carbono

El análisis de efecto sumidero de C de la AC fue realizado a través de la literatura revisada en el año 2016, en estudios sobre sistemas de manejo de suelo y han tenido varios efectos en el contenido de materia orgánica (MO) sobre diferentes periodos. Dichos sistemas incluyen la Siembra Directa (SD) y Labranza Mínima (LM) en cultivos herbáceos. Para estimar el potencial de la AC con base en la captura de C, en cada estudio, se observó el aumento de MO a través del manejo de sistemas de conservación comparados con la Agricultura Tradicional (AT).

La metodología realizada en esta investigación es la propuesta por González-Sánchez *et al.*, (2012). De acuerdo con las siguientes fórmulas:

$$CO_i(Kg/ha) = CO_i(Kg_{CO}/100 Kg_{suelo}) \times \rho_i(Kg_{suelo}/m^3) \times D_i(m) \times 10^4 m^2/ha \quad (1)$$

$$CO_i (Mg/ha) = 10^{-3} CO_i(Kg/ha) \quad (2)$$

Donde ρ_i es la densidad aparente del suelo y D_i es la profundidad del intervalo estudiado. El contenido total de C es determinado por la profundidad total de los estudios D_t , haciendo la sumatoria de las cantidades obtenidas para cada profundidad de suelo del intervalo de muestra, como sigue:

$$CO_{Dt} AT(Mg/ha) = \sum_1^n CO_i AT \quad (3)$$

$$CO_{Dt} AC (Mg/ha) = \sum_1^n CO_i AC \quad (4)$$

Donde n es el número total de intervalos de profundidad en la experiencia que se está analizando. Este número de intervalos varía de un estudio a otro, ya que cada autor decide la profundidad total de la muestra. Por lo tanto, en un estudio j , determinado y revisado el promedio anual del crecimiento de C almacenado en los suelos bajo AC en comparación con AT a la profundidad total estudiada D_{ij} después de Y_j años de experiencia se obtiene como sigue:

$$\Delta CO_{Dtj}(Mg/ha \text{ año}) = \frac{(CO_{Dtj} AC(Mg/ha) - CO_{Dtj} AT(Mg/ha))}{Y_j} \quad (5)$$

Donde ΔCO_{Dtj} es el coeficiente de la fijación anual de C para la revisión del estudio j .

Para cada zona climática y la duración del estudio, se asocian incrementos de CO para diferentes profundidades totales D_t para cada estudio j revisado. El cálculo de la tasa media anual de fijación de C (FC) proviene de la media ponderada de estos aumentos, teniendo en cuenta la profundidad máxima de estudio en cada lugar y período considerado, como sigue:

$$FC \text{ (Mg/ha año)} = \frac{\sum_{j=1}^{j=s} \Delta CO_{Dtj} \times D_{tj} / D_{t \max}}{s} \quad (6)$$

Donde FC, es el coeficiente de fijación de C media anual. $D_{t \max}$ es la máxima profundidad del muestreo total de todos los estudios correspondientes a la zona climática y el período de tiempo considerado. S es el número total de estudios correspondientes a la región climática y el período de tiempo considerado.

Evaluación estadística

Para el análisis estadístico se consideró una media aritmética y un error estándar con $p < 0.05$. Debido a que esta investigación es un meta-análisis; es decir una evaluación de las evaluaciones, se considera pertinente la realización de la evaluación estadística sencilla.

3.4. Investigaciones con agricultura de conservación

En México, la agricultura de conservación, ha sido difundida en años anteriores; sin embargo los campesinos se resisten a los cambios y a trabajar con labranza cero, labranza mínima y a la rotación de cultivos debido a que son personas de edad avanzada y tradicionalistas; además buscan incrementar sus ingresos, razón por la cual prefieren la agricultura convencional o tradicional, debido a que intensifican su producción y maximizan sus ingresos pero no están conscientes de los daños que le causan al suelo y al medio ambiente.

Para el caso de Sonora, un estudio titulado: "Conventionally tilled and permanent raised beds with different crop residue management: Effects on soil C and N dynamics - Cultivos convencionales y cultivos con manejo de incorporación de residuos. Efecto del C y N en el suelo" muestra que la labranza de conservación que emplea es siembra directa con residuos de cultivos, se ha propuesto la retención como un sistema alternativo de producción de trigo para el noroeste de México. Sin embargo, poco se sabe sobre la dinámica de C y N en suelos con trigo / maíz en siembra directa (SD) donde la paja se quemó, se eliminó, se eliminó parcialmente o se conservó, en contraposición a la labranza tradicional (LT) donde se incorporó la paja. Se investigó la dinámica del suelo C y N y la diferencia normalizada del índice vegetativo (NDVI) en SD y LT sin cosecha después de 26 cultivos sucesivos maíz y trigo. El C orgánico y el N total fueron, respectivamente, 1,15 y 1,17 veces mayores en SD con paja parcialmente eliminado y con la paja retenida en la superficie, que en LT con la paja incorporada. C orgánico y el total de N fue 1,10 veces mayor en suelos con 300 kg de N ha⁻¹ que en el suelo no fertilizado. La producción acumulativa de CO₂ fue menor en LT con paja incorporada que en SD ya que la retención de CO₂ aumentó con incrementos en fertilizantes inorgánicos. La tasa de N-mineralización fue de 1,18 veces mayor que en los suelos no enmendados cuando se aplicaron 150 kg de N inorgánico N) 1, y 1,48 veces mayor cuando se añadieron 300 kg de N ha⁻¹ inorgánico. La tasa de N-mineralización fue significativamente (1,66 veces) mayor en SD donde la paja fue quemada o retenida en la superficie que en LT donde la paja fue incorporada, pero significativamente (1,25 veces) menor que en SD con la paja parcialmente eliminada. Los valores NDVI alcanzaron un máximo de 56 días después de la siembra y disminuyó a partir de entonces. El NDVI para suelo no fertilizado fue similar para LT con paja incorporada, SD con paja parcialmente removida y SD con paja retenida la superficie, pero significativamente menor para SD con paja quemada y SD con paja eliminada. En los suelos a que se añadieron 150 o 300 kg de N ha⁻¹, el NDVI fue significativamente menor para SD con paja quemada que para otros tratamientos. Entre otras cosas, esto sugiere la utilidad de rotar maíz o trigo con cultivos cuyos residuos tienen menores relaciones C-N, evitando así la

inmovilización de grandes cantidades de N para períodos. Con SD con quema de residuos, sin embargo, es una práctica insostenible que conduce a un bajo rendimiento de la cosecha, suelo y degradación ambiental (Govaerts, 2005).

El auge de las investigaciones sobre agricultura de conservación se da a principios del S. XXI, es decir a partir del año dos mil, debido a que el gobierno incentiva el uso de las técnicas de labranza de conservación mediante el acompañamiento de diversos programas. La agricultura de conservación fue usada durante la primera década por los grandes campesinos; sin embargo se considera que realmente solo fue un boom, ya que los campesinos produjeron con agricultura de conservación y posteriormente en años recientes volvieron a migrar al sistema de agricultura tradicional intensiva para incrementar sus rendimientos; aunque lastimosamente erosionando las tierras.

Experiencias en *Tamaulipas*, en donde se examinaron los efectos a mediano plazo (3 años) de la labranza cero, la labranza mínima y el agua sobre la distribución del perfil de suelo de la materia orgánica, los indicadores físicos y microbiológicos de la calidad del suelo en un campo de maíz bajo condiciones subtropicales. También se evaluó el secuestro de carbono en el suelo. El residuo en la superficie del suelo fue alrededor de 17-21 veces aumentado en las parcelas de labranza cero sobre las parcelas de labranza tradicional, con incrementos intermedios en las parcelas de labranza mínima. En la superficie de 0-5 cm, la materia orgánica disminuyó con la labranza creciente y fue aumentada por el riego. El suelo no cultivado había aumentado valores de las actividades solubles en agua C, deshidrogenasa, ureasa y fosfatasa ácida, estabilidad del agregado y glomalina en comparación con la capa más superficial (0-5 cm). El régimen hídrico no influyó en la estabilidad estructural del suelo ni en la actividad microbiana (Roldán, 2005).

En el país, la producción con agricultura de conservación fue muy promisoría por la sostenibilidad de las tierras, los múltiples beneficios y por el acompañamiento de diversas instituciones de investigación como el Instituto Nacional de Investigaciones Forestales Agrícolas y Pecuarias (INIFAP), así como el Centro Investigación y

Mejoramiento del Maíz y el Fríjol (CIMMYT) que tiene su matriz en Texcoco, Estado de México.

La labranza de conservación podría mejorar el secuestro de carbono orgánico del suelo (COS), pero rara vez se utiliza en sistemas de cultivo en México, especialmente bajo riego. Se realizó un estudio en un Udic Pellustert argiloso, esmético e isotérmico para evaluar el uso de los sistemas de labranza tradicional y labranza cero en la dinámica del SOC para los sistemas de cultivo; trigo - maíz y trigo-frijol. El diseño experimental fue un bloque al azar de cinco laboreos / rotación de sistemas de cultivos (dos cosechas por año) con cuatro repeticiones: (LT - TMq) trigo-maíz, quemando los residuos de ambos cultivos, arando y pasando el disco dos veces (LT-TM) labranza tradicional, trigo-maíz (arado y pasando dos veces el disco para incorporar residuos de cosecha de cada cultivo), trigo – maíz, bajo labranza cero (CL-TM), (LT-TF) trigo – frijol, bajo labranza tradicional y trigo - frijol (LC-TF) bajo labranza cero. Cada cultivo en la secuencia recibió uno de los tres tipos de fertilizante-N emitidos como urea: (a) 0, 150 y 300 kg N ha⁻¹ para maíz; (b) 0, 40 y 80 kg de N ha⁻¹ para frijol; y (c) 0, 125 y 250 kg N ha⁻¹ para el trigo. El año base fue 1994 y se midieron los cambios relativos entre 1994 y 1999 para el rendimiento de grano y la producción de residuos, los residuos de cultivos C y d13C, COS, relación C / N del suelo y cambio en el suelo d13C. Interacción del sistema de cultivo-fertilizante-N fue muy importante para los cereales producción y producción de residuos de cultivos y cantidad de residuos de cultivos producidos. Las altas tasas de N incrementaron, el secuestro de COS y disminución de las relaciones C / N del suelo. En los sistemas de TM, más d13C negativo se asoció con mayores tasas de N, lo que indica un aumento contribución del residuo C de trigo (una planta C3) respecto al maíz (una planta C4). En el TF, la tasa de N y la labranza no tuvieron ningún efecto sobre el secuestro de COS. La tasa más alta de secuestro de COS fue bajo LC-TM y cuando los aumentos en COS de 1994 a 1999 fueron anualizado fue de 1,0 y 1,9 Mg de COS año⁻¹ en las profundidades de 0-15 y 15-30 cm, respectivamente. Correspondientes COS en 0-15 y 15-30 cm de profundidad en el tratamiento de LT-TM fue 0,2 y 0,6 Mg⁻¹ y las cantidades en todos los otros tratamientos fueron iguales o menores que los observados para LC - TM Hubo una

correlación significativa entre el cultivo de residuos superficiales con el incremento de producción y la cantidad de COS secuestrado. Los resultados de este estudio indican que con Labranza cero y con sistemas TM fertilizados con N pueden potencialmente incrementar el secuestro de COS en grandes áreas de vertisoles irrigados en el centro de México, manteniendo al mismo tiempo altos rendimientos de cultivos. Este estudio fue realizado en *Guanajuato* (Follett, 2005).

En la zona central del valle de México las investigaciones fueron interesantes ya que se tenían tierras más fértiles por la incorporación de residuos orgánicos como hojarasca, estiércoles, residuos de cultivos anteriores, razón por la cual los suelos eran más protegidos y menos vulnerables a la erosión; se aumentaba el rendimiento de los cultivos, mejoraban las tierras, se controlaba más la rotación de cultivos, entre muchos otros beneficios. Los centros de investigación tenían mayor oportunidad de monitorear los proyectos de investigación con agricultura de conservación.

En el Estado de *Tlaxcala*, se estudió el efecto de diferentes sistemas de manejo agrícola sobre la fertilidad química en tepetates cultivados de cinturón transvolcánico mexicano, el experimento demuestra que los suelos volcánicos en su estado natural suelen requerir algunas mejoras para mejorar la agricultura. Los tepetates se definen como tobas volcánicas endurecidas derivadas de procesos geo-pedológicos; han sido parcialmente alterados por la intemperie. Los Tepetates ocupan amplias áreas de las tierras altas y algunas de ellas han sido adaptadas para uso agrícola después de la ruptura mecánica de este material duro. En su condición nativa los tepetates contienen solamente rastros de C, N y P. disponible. La incorporación en la producción agrícola, la adición de fertilizantes se hace necesaria para mejorar fertilidad del suelo. En el presente trabajo se modifican ciertas propiedades físico-químicas a los tepetates cultivados, se estudiaron a corto plazo (2002-2005) y a mediano plazo (1986-2005). Las parcelas experimentales situadas en Tlalpan (Estado de Tlaxcala) fueron sometidas a las siguientes sistemas de manejo: Tradicional (Tt), Mejorado (Ti) y Orgánico (O). En el corto plazo (4 años), el sistema de manejo (O), en el que se agregaron residuos orgánicos y estiércol, condujo a una disminución de la tendencia a la acidificación después del cultivo,

una recuperación de los niveles de K^+ intercambiables iniciales y un aumento del C orgánico en el suelo, nitrógeno total (Nt) y contenidos P (Pa) disponibles en el horizonte Ap. El manejo (Ti), en que los residuos de cosecha y más fertilizantes químicos fueron agregados, fue especialmente eficiente en la concentración de P disponible. Después de 20 años de cultivo tradicional, los tepetates mostraron una el pH del suelo y los valores intercambiables de Mg^{2+} y K^+ , lo que conduce a una disminución de la saturación de la base. Estos resultados señalan la fragilidad y la baja capacidad de amortiguación de estos sistemas. En contraste, una tendencia de acumulación de COS, Nt y Pa se observó después de 20 años de cultivo, influenciado por el sistema de manejo agrícola aplicado. Los tepetates adaptados para uso agrícola evolucionaron en sustratos más fértiles a lo largo de los años de cultivo (Covaleda, 2009).

El CIMMYT reportó diversas investigaciones sobre agricultura de conservación a las cuales incorporo retención de residuos con el objetivo de evaluar la producción de dichas parcelas de investigación; obteniendo resultados promisorios, como lo fue en el siguiente experimento.

La Influencia de la siembra directa y el manejo de residuos en la calidad física y química del suelo en sistemas de maíz / trigo de temporal. Muestra que, la agricultura de conservación con retención de residuos de cultivos ha sido propuesta como una alternativa de producción de trigo para esta zona agroecológica. En el experimento de campo de cinco años con incorporación de residuos diferentes bajo condiciones de secano fue en El Batán (Estado de México) (2,240 msnm, 19,31 N, 98,50 E; Phaeozem Cumulico) en 1999. El objetivo de este estudio fue determinar la calidad del suelo después de cinco años con diferente manejo de prácticas de agricultura de conservación. La concentración de K fue de 1,65 veces y 1,43 veces más grande en el 0-5 cm y 5-20 cm perfiles, respectivamente, para siembra directa (SD) en comparación con los agricultura tradicional o convencional (AT). La concentración de Na mostró la tendencia opuesta. La sodicidad fue más alta para los cultivados convencionalmente y con cantidades decrecientes para SD con residuos retenido en la superficie. SD con retención total de residuos aumentó el

contenido de carbono orgánico en el suelo en 1,4 veces en la capa 0-5 cm en comparación con LT con paja incorporada y aumentó significativamente con cantidades crecientes de residuos retenidos en la superficie del suelo. SD con retención de residuos tenía una media significativamente mayor diámetro de peso para el tamizado en húmedo y en seco a la LT. La SD con retención total de residuos obtuvo significativamente mayor estabilidad de agregados a aquellos con eliminación de residuos. Una agregación más baja resultó en una reducción de la infiltración. La labranza y el manejo de residuos tienen un efecto en los procesos del suelo. La investigación indica que la SD y la retención de residuos aumenta la calidad del suelo y puede ser una alternativa de producción sostenible para las tierras altas (sub) tropicales. Labranza extensiva, convencional o tradicional (LT) con sus altos costos asociados puede reducirse su mejoría con una retención de residuos de superficie parcial para asegurar la sostenibilidad de la producción (Govaerts, 2007).

Al producir las tierras con técnicas conservacionistas como la labranza cero o siembra directa, la labranza mínima, la incorporación y retención de residuos demuestran que son favorables. Sin embargo al incorporar cobertura leguminosa en las parcelas de investigación, se pudo observar un aumento considerable de carbono, como lo fue en los trabajos siguientes.

En el Municipio de Pátzcuaro, en *Michoacán se analizó, labranza cero*, adición de residuos de cultivos y cobertura de leguminosas y los efectos de los cultivos sobre las características de maíz, basado en prácticas convencionales de labranza ha resultado en la degradación de la cuenca del Pátzcuaro, en el centro de México. Se implementó un experimento de campo con siete tratamientos de manejo del suelo sobre un suelo franco arenoso Andisol para evaluar el impacto en la calidad del suelo del cultivo de maíz con labranza convencional, la labranza cero con porcentajes variables de cobertura de residuos superficiales (0, 33, 66 y 100%) y la labranza cero con 33% de cobertura de residuos y con cultivos de cobertura de (*Vicia sp.*) o (*Phaseolus vulgaris L.*) Los tratamientos de labranza cero bajo cobertura de residuos de cultivos fueron establecidos en 1995 y las especies de

leguminosas fueron plantadas en 1998. Para el año 2000, los tratamientos aumentaron las enzimas del suelo, C orgánico del suelo, fracciones C biodegradables tales como C soluble en agua, carbohidratos solubles en agua y la biomasa microbiana C y la estabilidad del agregado húmedo del suelo, en comparación con el tratamiento con LT. Se aumentó la estabilidad del agregado húmedo adoptando la labranza cero y aún más por residuos adicionales. La mayoría de las características de la calidad del suelo mejoraron en proporción directa a los insumos de residuos. El uso de manejo de labranza cero junto con una cantidad moderada de residuos de cultivos (33%) y plantados con las especies de leguminosas mejoraron rápidamente algunas características de la calidad del suelo. Se concluyó que las prácticas de labranza de conservación proporcionan una tecnología alternativa que contribuya a la agricultura sostenible en la cuenca del Pátzcuaro de México, extrapolado a áreas similares en otras partes de América Latina (Roldán, 2003).

Existen diversos factores como son el clima, densidad, profundidad, el número de años del experimento, entre otros. Los anteriores factores pueden beneficiar o perjudicar el uso de la agricultura de conservación según la localización de las áreas experimentales. Aunque las investigaciones demuestran resultados positivos y favorables para poder producir con agricultura de conservación, únicamente es necesario analizar cuál es la técnica más apropiada a cada sitio de producción.

Otras investigaciones en el mismo estado de Michoacán, en los municipios de Casas Blancas, Morelia, Apatzingán y Tepatitlán sobre los efectos de la labranza sobre la biomasa microbiana y la distribución de nutrientes en suelos bajo producción de maíz en el centro-oeste de México, el objetivo principal de dicha investigación es cuantificar cómo los sistemas de labranza afectan la biomasa microbiana del suelo y el ciclo de nutrientes mediante la manipulación y la colocación de residuos de cultivos, importante para entender cómo se pueden manejar los sistemas de producción para sostener la productividad del suelo a largo plazo. El objetivo también fue caracterizar la biomasa microbiana del suelo, la mineralización, el potencial de N y la distribución de nutrientes en los suelos

(Vertisoles, Andisoles y Alfisoles) de la producción de maíz bajo condiciones de lluvia (temporal) a partir de cuatro experimentos de labranza a mediano plazo (6 años) localizados en el centro oeste, México. Los tratamientos fueron tres sistemas de labranza: labranza convencional o tradicional (LT), labranza mínima (LM) y labranza cero (LC). El suelo fue recogido en cuatro lugares (Casas Blancas, Morelia, Apatzingán y Tepatitlán) antes de la siembra del maíz, a profundidades de 0-50, 50-100 y 100-150 mm. Los tratamientos de labranza de conservación (LM y CL) aumentaron significativamente la acumulación de la superficie del suelo. El C orgánico en el suelo, la biomasa microbiana C y N, la mineralización potencial de N, el N total y el P extraíble fueron más altos en la capa superficial de CL y disminuyó con la profundidad. El COS, biomasa microbiana C y N, N total y P extraíble de arado fueron generalmente más uniformemente distribuidos a lo largo de la profundidad 0-150 mm. La mineralización potencial de N estuvo estrechamente asociada con C orgánico y biomasa microbiana. Los niveles más altos de C orgánico del suelo, la biomasa microbiana C y N, la mineralización potencial de N, el N total y el P extraíble se relacionaron directamente con la acumulación superficial de residuos de cultivos promovida por la labranza de conservación. La calidad y productividad de los suelos se podría mantener o mejorar con el uso de la labranza de conservación (Salinas, 2002).

El INIFAP ha demostrado con diversas investigaciones que la agricultura de conservación tiene un potencial enorme como lo es el aumento de la producción y la disminución de costos, además de mejorar las condiciones de producción en lo que respecta a la sostenibilidad del medio ambiente; esto con los diferentes sistemas de manejo orgánico y el manejo integrado de plagas y enfermedades. Lo anterior coadyuva a la disminución de los gases efecto invernadero (GEI) como lo es el dióxido de carbono (CO₂) que mediante las técnicas conservacionistas facilitan la captura de carbono ayudando al medio ambiente y a disminuir los efectos del calentamiento global.

En el Instituto Nacional de Investigaciones Forestales Agrícolas y Pecuarias (INIFAP) Centro de Investigación Regional Centro , Sitio Experimental Querétaro a cargo de Manuel Mora Gutierrez de Junio de 2014, publicó resultados de sus investigaciones de 12 variedades de maíz en labranza de conservación en el Módulo demostrativo Regina, en el cual se muestra que para el estado de Querétaro durante el ciclo de primavera – verano se siembran anualmente cerca de 24 mil hectáreas de maíz de riego, con una producción sostenida cercana a las 170 mil toneladas y con un rendimiento promedio de 7.1 toneladas por hectárea. Destacan por su productividad los municipios de Colón (11.29 ton/ha), Pedro Escobedo (9.96 ton/ha), San Juan del Río (9.64 ton/ha) y Tequisquiapan (8.90 ton/ha). Actualmente los precios de este grano han venido a la baja y se requiere obtener rendimientos que superen las 10 toneladas por hectárea para que el cultivo sea rentable. La labranza de conservación es una alternativa sustentable y rentable ya que permite reducir costos, conservar la humedad y mejorar las condiciones de la estructura y fertilidad de los suelos, mejorando con el tiempo su productividad. En el Módulo Demostrativo y de Transferencia de Tecnología Regina, desde el año 2005, con el apoyo financiero de la SEDEA, SAGARPA y Fundación Produce, se han evaluado cada año variedades de maíz de diferentes empresas de semillas y del propio INIFAP, con el fin de orientar a los productores sobre las nuevas variedades que están disponibles en el mercado. En estas evaluaciones el productor tiene la oportunidad de ver todas las variedades juntas y decidir la que sea de su agrado. En el ciclo primavera verano de 2013 se evaluaron 12 variedades en labranza de conservación, que consistió en dejar el 30% de residuos de la cosecha de cebada sobre la superficie del terreno y la siembra se realizó sin preparación del terreno, es decir, no se barbechó ni se rastreó. La siembra se realizó el 3 de mayo de 2013, con una densidad de población de 90 mil plantas por hectárea. La dosis de fertilización por hectárea fue de 300 kg de nitrógeno, 80 kg de fósforo y 40 kg de potasio. Su aplicación se realizó de la siguiente manera: 100 kg de nitrógeno, todo el fósforo y todo el potasio a la siembra, y los 200 kg de nitrógeno restantes se aplicaron a los 30 días. En general, los rendimientos variaron de 10.3 a 14.7 toneladas por hectárea. De las 12 variedades evaluadas, 11 obtuvieron

rendimientos superiores a 10 toneladas por hectárea. Las variedades que estuvieron en el rango de producción señalado fueron: Cimarrón, Caimán, DK 2061, Campero, RS 3578, XR 47, SB 352, 215W, INIFAP H-383, Retinto y Bida 33. Estos resultados indican que la mayoría de las variedades disponibles en el mercado se adaptan a la labranza de conservación, lo cual contribuye a disminuir el uso de combustibles y por lo tanto a evitar la contaminación del ambiente. Datos publicados por la FAO indican que con el sistema de labranza de conservación se dejan de emitir alrededor de 30 kg de CO₂ a la atmósfera por hectárea. En el 2005, cuando se iniciaron las actividades en el módulo Regina, el contenido de materia orgánica era de 1.5%. En mediciones actuales, el contenido es de 2.6%, es decir han mejorado las condiciones de fertilidad del suelo, lo cual disminuye la utilización de grandes cantidades de fertilizantes. Asimismo, la materia orgánica ayuda a retener más la humedad y los nutrientes, permitiendo un mejor aprovechamiento. Uno de los beneficios importantes de la labranza de conservación, es la conservación de la humedad del suelo, debido al efecto de los residuos de la cosecha que se dejan en la superficie del terreno. En mediciones realizadas en el módulo Regina, se ha encontrado que se conserva en 2% más de humedad en labranza de conservación comparada con labranza convencional, donde no se dejan residuos. Este porcentaje de humedad, traducido a riegos, equivale aproximadamente al ahorro de un riego en todo el ciclo del cultivo. Este ahorro estará en función de la cantidad de residuos y superficie que cubren el terreno. Otro beneficio de la labranza de conservación, es la multiplicación natural de lombrices de tierra, en los residuos de la cosecha. En mediciones realizadas, se encontró que en el sistema de labranza de conservación se cuantificaron 1, 250,000 lombrices por hectárea y en labranza convencional, donde no hay residuos, se cuantificaron 250,000 lombrices. Los beneficios de las lombrices son muy importantes, debido a que crean canales en el interior del suelo. Estos canales mejoran la circulación del agua, aire y nutrientes, dando una mejor condición para el desarrollo de raíces y por lo tanto para el desarrollo del cultivo. Un beneficio más es que las lombrices hacen composteo de residuos. A través del composteo se facilita el aprovechamiento de nutrientes para la planta (Mora, 2014).

La rotación de cultivos es un factor clave para obtener resultados positivos con la combinación de las técnicas conservacionistas. A través de diversas investigaciones se muestra que al intercalar maíz con frijol se obtienen rendimientos mejores que el monocultivo; sin embargo diversos factores como el clima y el tipo de suelo puede causar variaciones en el efecto sumidero de carbono característico de la agricultura de conservación por lo que es necesario crear un ambiente favorable.

Una investigación más sobre agricultura de conservación fue la del estado de *Morelos* con el título de: Efecto de la labranza cero y la conservación de residuos en el cultivo continuo del maíz en un ambiente subtropical, los efectos de la labranza cero y la conservación de residuos en los sistemas de cultivo continuo de maíz son poco documentadas, especialmente en los trópicos, y se espera que varíen mucho con las condiciones climáticas y la disponibilidad del nitrógeno. En el presente estudio, el maíz fue cultivado durante las estaciones húmeda y seca en tres años consecutivos, bajo diferentes tratamientos combinando laboreo con técnicas de manejo de residuos y con diferentes tasas de nitrógeno. En algunos tratamientos, el maíz también fue intercalado con frijol blanco, (*Canavalia ensiformis L.*). Los componentes de rendimiento, así como los rasgos fisiológicos evaluados durante las estaciones húmeda y seca para el tercer año de cultivo. Durante la estación húmeda, la labranza cero se asoció con menos biomasa y rendimiento de grano. La concentración de clorofila foliar fue menor en cero labranza, lo que sugiere una menor absorción de nitrógeno. Tanto la labranza cero como la conservación de residuos redujeron el crecimiento temprano y fuertemente incrementada la pudrición de la oreja Durante la estación seca, la labranza cero se asoció con una mayor masa radicular, medido por la capacitancia eléctrica. La conservación de los residuos disminuyó el intervalo de mejor captación de agua. Sin embargo, no hubo un efecto significativo de las prácticas de labranza en cuanto a rendimiento. Se encontró que la labranza cero estaba asociada con un aumento de la densidad aparente del suelo, concentración de nitrógeno, biomasa microbiana y carbono orgánico. La conservación de residuos aumentó la concentración de carbono en el suelo, así como biomasa microbiana y conservación de residuos aumentó la concentración de

nitrógeno en el suelo. La investigación adicional puede proporcionar más información sobre los factores relacionados con la labranza cero y la conservación de residuos que afectan al crecimiento temprano del maíz, y determinar en qué medida las modificaciones observadas de las propiedades químicas y físicas del suelo inducidas por la labranza de conservación afectará aún más el rendimiento del maíz (Monneveux, 2006).

En la mayoría de las investigaciones el factor primordial es el suelo con sus respectivas propiedades tanto físicas como químicas, que hacen posible el efecto sumidero de carbono, característica necesaria para poder incentivar la producción con agricultura de conservación. Los efectos que se describen a continuación son la capacidad que tiene el suelo para retener humedad, la densidad aparente, el horizonte o capa de estudio, son características necesarias de conocer para poder calcular el coeficiente de fijación de carbono y revalorizar los beneficios y ventajas de la agricultura de conservación frente a la agricultura tradicional.

Finalmente, se localizó un artículo científico titulado: efecto de la labranza de conservación sobre las propiedades del suelo para el estado de Chiapas en tres sitios de la región del Soconusco, Chiapas, México: Tapachula (TAP), Tuxtla Chico (TCH) y Frontera Hidalgo (FRA); cuyo objetivo fue evaluar el impacto de la labranza de conservación (cero labranza, CL, y labranza mínima, LM), más labranza tradicional (LT) sobre el contenido de la materia orgánica (MO), densidad aparente (pb) y conductividad hidráulica a saturación (Ks) en dos ciclos sucesivos de producción de maíz: temporal y humedad residual. Los experimentos consistieron de tres tratamientos de 0.5 ha: CL, LM y LT; la primera y segunda fecha de siembra en cada sitio (TAP, TCH y FRA) se hicieron los días 10, 20 y 28 de mayo; 20, 25 y 30 de agosto de 2007, respectivamente. En cada tratamiento se determinó la MO inicial (abril, 2007) cada 10 cm hasta 40 cm de profundidad y después cada seis meses (noviembre, 2007 y abril, 2008); la pb y Ks se determinaron sólo al inicio y un año después. En el corto plazo, los análisis estadísticos de impacto de los sistemas de labranza por profundidad sobre la MO detectaron diferencia significativa en los sitios TAP y FRA, y altamente significativa en la profundidad, ya

que en todos los sitios se determinó mayor concentración de MO en el estrato de 0 a 20 cm (Tukey, 5 %). En relación con las variables pb y Ks no se detectó diferencia estadística significativa (Báez, 2011).

Las anteriores investigaciones relacionadas con los principios básicos de agricultura de conservación muestran evidencias en los resultados de la efectividad y de los múltiples beneficios para el medio ambiente.

Diversas alternativas de producción son demostradas de acuerdo a la región de producción, con las diferentes variables a analizar y con la finalidad de disminuir el calentamiento global, determinar algunas medidas de conservación de suelos y mitigación al cambio climático global.

Actualmente han disminuido las investigaciones en este tema debido al boom de la primera década de los años 2000 y de las incipientes experiencias. Los agricultores estuvieron interesados, sin embargo la producción aumento y posteriormente llego a su máximo; los agricultores se desesperaron y regresaron a la agricultura tradicional o convencional, dejando de lado las técnicas conservacionistas.

Pese a los esfuerzos de las instituciones educativas, centros de investigación y entidades gubernamentales, están retomando días demostrativos y viajes de observación a agricultores que adopten nuevamente la agricultura de conservación como medio de producción en dicha actividad productiva.

CAPÍTULO 4. DISCUSIÓN DE RESULTADOS OBTENIDOS DEL COEFICIENTE DE FIJACIÓN DE CARBONO EN MÉXICO

El contenido de Carbono Orgánico en el Suelo (COS) es influenciando directa o indirectamente ya sea por actividades humanas (Farina *et al.*, 2011;) y también de una manera importante por el volumen de almacenamiento que se ve afectado por la variabilidad del suelo en campo, características físico - químicas del suelo y las condiciones medioambientales que afectan la absorción y liberación de carbono (C).

Los resultados presentados por los autores son diferentes ya que se realizaron en diferentes regiones, por lo que hay variaciones climáticas, tipo de suelo en el ciclo del C. Otros factores que influyen y pueden diferenciar los resultados son la densidad y profundidad del perfil considerado en el estudio; así como las rotaciones de cultivos (González *et al.*, 2012).

Existe una gran variabilidad en el potencial de estas técnicas para fijar C; por lo tanto, no hay un solo valor de captura de C que se aplique a una práctica de AC en particular. El aumento de niveles de MO bajo AC depende del sistema de manejo del suelo y otros factores involucrados , tales como las condiciones climáticas de suelo (humedad y temperatura), la composición bioquímica del material orgánico, la disponibilidad de nutrientes y el nivel de perturbación del suelo (González *et al.*, 2012).

4.1. Conversiones de las investigaciones con Agricultura de Conservación

Para realizar el análisis y las conversiones para cada trabajo analizado, se buscaron los datos de profundidad del estudio en cuestión, número de años en estudio y el dato del C reportado según la técnica de conservación; la densidad aparente fue tomada de los cuadros descritos en el capítulo dos.

A continuación se desglosarán los cálculos de cada estado y de cada sitio de estudio:

Para la investigación del estado de *Morelos*, se obtuvo el siguiente cuadro de información:

Cuadro 5. Información de Morelos y conversiones

Labranza	C (%)	Mg ha
Cero	2	0.002
Tradicional	1.95	0.00195

Fuente: Elaboración propia (2016).

Donde un mega gramo (Mg) tiene mil gramos por lo que el 2 y el 1.95 % se dividió entre mil; respectivamente para poder obtener mega gramos (Mg ha). En el estudio se encontró que no existió cambio significativo en cuanto a la técnica conservacionista y de acuerdo al clima subtropical que tiene el estado de Morelos, sin embargo si existió un cambio significativo en la conservación de suelos, aumento de carbono en el suelo y disminución de la erosión del suelo.

El aumento de carbono fue de 0.005 Mg ha^{-1} de labranza cero sobre labranza tradicional. Aunque no fue considerable el aumento el monocultivo de maíz si se favoreció por la incorporación de residuos (Ver Cuadro 5).

De acuerdo con el estudio en el estado de Morelos resultaron incrementos poco significativos respecto a la cobertura vegetal (CV) con cero incorporaciones de residuos, incorporación de residuos con maíz e incorporación de residuos de maíz-fríjol. El incremento de carbono varia en 0.01 Mg ha de agricultura de conservación con respecto a la labranza tradicional. Lo que quiere decir es que por cada hectárea sembrada con agricultura de conservación se obtiene un 0.03 de incremento de carbono (Ver Cuadro 6).

Cuadro 6. Incremento de carbono en Morelos

Tratamiento	C (%)	Mg ha año	Incremento AC vs LT
LC	2	0.74	1.03
LT	1.95	0.73	1.02
CV CERO	1.92		
CV MAIZ	2.01		
CV MAIZ FRIJOL	2.01		
PROMEDIO	1.978	0.74	

LC= labranza cero, LT= labranza tradicional, CV= cobertura vegetal cero, maíz y maíz-frijol
Fuente: Elaboración propia con datos de Monneveux (2006).

El incremento de carbono obtenido en el estado de Tlaxcala se obtuvo de la diferencia de la Labranza de Conservación entre la Labranza Tradicional y se encuentra dentro de la media que oscila de 0.56 hasta 0.76 Mg ha⁻¹. El aumento de carbono no es muy significativo pero en superficies grandes de terreno se realiza el aumento y la técnica conservacionista más promisoría en este experimento es de labranza mínima (LM) con un incremento de 0.3 de agricultura de conservación con cobertura vegetal (CV); es decir con incorporación de residuos (Ver Cuadro 7).

Cuadro 7. Incremento de carbono en Tlaxcala

Tratamiento	Conversión C	Mg ha año	Incremento AC vs LT
LT	0.003	0.54	
LM	0.0032	0.58	1.06
LC	0.0031	0.56	1.03
CV	0.0011	0.76	1.4

LT= labranza tradicional, LM= labranza mínima, LC= labranza cero y CV= cobertura vegetal
Fuente: Elaboración propia con datos de Covalada(2009).

Se realizaron las conversiones respectivas, se detectó la densidad aparente de Tlaxcala que fue de 0.9 g cm³ a una profundidad de 20 cm, detectando así el incremento de la agricultura de conservación versus labranza tradicional. El valor del incremento fue de 0.34 más en la técnica de cobertura vegetal sobre labranza mínima. El valor medio fue de 0,37 más de cobertura vegetal con labranza cero.

Cuadro 8. Información de Guanajuato

Sistema de Manejo	Profundidad cm	C g kg	Incremento de C g kg
LTQ-TM	0-15	16.3	-0.01
LTQ-TM	15-30	15.4	1
LT-TM	0-15	16.5	0.5
LT-TM	15-30	16	2
LC-TM	0-15	17.3	0.6
LC-TM	15-30	18.2	4.1
LT-TF	0-15	14.9	-0.3
LT-TF	15-30	14.8	1.6
LC-TF	0-15	15	-1.2
LC-TF	15-30	14.9	1

LTQ – TM= LABRANZA TRADICIONAL CON QUEMA DE RESIDUOS TRIGO-MAÍZ

LT - TM=LABRANZA TRADICIONAL CON TRIGO-MAIZ-

LC – TM= LABRANZA CERO CON TRIGO-MAIZ

LT – TF=LABRANZA TRADICIONAL CON TRIGO-FRIJOL

LC – TF= LABRANZA CERO CON TRIGO-FRIJOL

Fuente: Elaboración propia con datos de Follett (2005).

Al existir diversos tratamientos se obtuvieron variabilidad en los resultados, por ejemplo se analizó que existe un incremento de 400% en labranza cero con rotación de cultivos trigo-maíz con la profundidad 15 a 30 cm en el estado de Guanajuato. Los resultados del estudio demuestran que las técnicas conservacionistas como la labranza cero y la simbiosis trigo maíz (LC-TM) fue la más promisoría, debido a que incremento el secuestro de carbono a 4 con respecto de la labranza tradicional trigo maíz (LT-TM) que era de 2, también la labranza cero pero con la simbiosis trigo frijol (LC-TF) presento un incremento de carbono de 1.6; tomado en cuenta que todos los tratamientos fueron irrigados y fertilizados con nitrógeno; además de las dos profundidades estudiadas que fueron de 0 a 15 cm y de 15 a 30 cm y otras variables que influyeron para el cambio en el valor del incremento de carbono secuestrado en el suelo (Ver Cuadro 8).

En cada sitio de estudio se tuvieron que hacer conversiones y adaptaciones para poder clasificar los sistemas de manejo y/o tratamientos.

Para el experimento estudiado en el primer sitio en Pátzcuaro, en el estado de Michoacán donde el cultivo principal es el maíz y se estudiaron los efectos de la cobertura vegetal en diversos porcentajes de incorporación de residuos como se presenta enseguida. (Ver Cuadro 9).

Cuadro 9. Información obtenida para Pátzcuaro Michoacán

TRATAMIENTO	C org g Kg	Mg ha	AUMENTO AC VS LT
LT	28.5	0.39	
LC-0	32	0.44	1.12
CV-33	34.5	0.47	1.56
CV-66	38	0.52	1.34
CV-100	42	0.57	
PROM CV	38.17	0.52	1.34
CV_L1	34.3	0.47	
CV_L2	33	0.45	1.26

LT= labranza tradicional, LC=labranza cero, CV= cobertura vegetal al 33, 66 y 100 % CV_L1= Cobertura vegetal con leguminosa 1 y 2. Fuente: Elaboración propia con datos de Roldán (2003).

Existió un incremento significativo con cobertura vegetal media de 33 % con respecto a un aumento de 56 %; aunque en general el incremento es significativo en los tratamientos con cobertura vegetal. Por los resultados obtenidos; el uso de labranza cero junto con una cantidad moderada de incorporación de residuos de los cultivos de 33 % y plantados con las especies de leguminosas mejoraron rápidamente algunas características del suelo. Por lo tanto, las técnicas de labranza conservacionista proporcionan una alternativa que contribuye a la agricultura sostenible y puede ser extrapolada en otras partes de la República Mexicana y en América Latina.

Para el segundo experimento en el estado de Michoacán para los cuatro estudios de investigación, -Casas Blancas, Morelia, Apatzingán y Tepatitlán en el cual el objetivo era caracterizar la biomasa microbiana, la mineralización en el suelo, el potencial de nitrógeno y la distribución de nutrientes en los diferentes tipos de suelo (andisoles, vertisoles y afisoles) de producción de maíz bajo condiciones de temporal (Ver Cuadro 10).

Cuadro 10. Datos de carbono para Casas Blancas, Morelia, Apatzingán y Tepatitlán

PROF (cm)	CASAS BLANCAS			MORELIA			APATZINGAN			TEPATITLAN		
	Mg m ³			Mg m ³			Mg m ³			Mg m ³		
TRATAM	CL	ML	LT									
0-5	0.68	0.56	0.51	1.12	1.1	1.05	1.15	1.11	1.04	1.18	1.09	1.05
5-10	0.7	0.65	0.52	1.13	1.1	1.08	1.16	1.11	1.08	1.18	1.1	1.09
10-15	0.7	0.65	0.54	1.14	1.11	1.09	1.17	1.12	1.12	1.18	1.14	1.12

Fuente: Elaboración propia (2016)

Se estudiaron tres tratamientos: labranza tradicional, labranza mínima y labranza cero, a profundidades de 0 - 50 mm, de 50 – 100 mm y de 100 – 150 mm; que de acuerdo a las conversiones respectivas quedaron de 0 – 5 cm, 5 – 10 cm y de 10 – 15 cm; respectivamente. Los tratamientos de labranza de conservación: labranza mínima (LM) y Labranza Cero (LC) aumentaron significativamente la acumulación de la superficie del suelo. El carbono orgánico en el suelo, la biomasa microbiana, la relación carbono – nitrógeno (C/N), la mineralización potencial de nitrógeno, el nitrógeno total y el fósforo extraíble (P) fueron más altos en la capa superficial de labranza cero (LC) y disminuyó con la profundidad. Por lo tanto el carbono orgánico del suelo, la mineralización y la biomasa microbiana reaccionaron favorablemente con la acumulación superficial de residuos de cultivos promovidas por la agricultura de conservación con la profundidad de 15 cm. La calidad y productividad de los suelos se podría mantener o mejorar con el uso de las técnicas de agricultura de conservación.

Otra investigación llevada a cabo en el Estado de México en la cual, se estudió la influencia de la siembra directa y el manejo de residuos de cultivos ha sido propuesto, como una alternativa de producción de trigo durante cinco años con incorporación de residuos bajo condiciones de secano en el Batán en el municipio de Texcoco. (Ver Cuadro 11).

Cuadro 11. Aumento de carbono en el Estado de México

TRAT	PROFUNDIDAD		Mg ha		Aumento AC vs. LT
	MOS (g Kg-1)		0-5 cm	5-20 cm	
	0-5 cm	5-20 cm	0-5 cm	5-20 cm	
CL+R	26	16	0.68	1.67	1.07
LT+R	19	15	0.50	1.57	
CV+ PART R	24	15	0.63	1.57	1.00
LM-RESIDUOS	20	15	0.52	1.57	1.00
LTT	23	16	0.60	1.67	
LTM	23	15	0.60	1.57	
prom LT				1.57	

LT=LABRANZA TRADICIONAL, CV+R COBERTURA VEGETAL + RESIDUOS, LM PARCIALES=LABRANZA MINIMA CON RESIDUOS PARCIALES, LM-R=LABRANZA MINIMA SIN RESIDUOS, LC +R= LABRANZA CERO CON RESIDUOS. Fuente: Elaboración propia con datos de Salinas - García(2002).

En el estado de México se obtuvo un mayor aumento de carbono con la práctica de labranza cero con rotación de cultivo con resultados más favorables en la profundidad de 5 – 20 cm.

La siembra directa (SD) con retención total de residuos obtuvo significativamente mayor estabilidad de agregados a aquellos tratamientos con eliminación de residuos. Una agregación de residuos más baja, resultó en una reducción de la infiltración. La labranza y el manejo de residuos tienen un efecto positivo en los procesos y conservación de suelos.

La investigación indica que la SD y la retención de residuos aumentan la calidad del suelo y representa una alternativa de producción sostenible para las tierras altas subtropicales.

Para Tamaulipas se examinaron los efectos a mediano plazo (3 años) de labranza cero (LC), labranza mínima (LM) y el agua sobre la distribución del perfil de suelo en materia orgánica, los indicadores físicos y microbiológicos de la calidad del suelo en un campo de maíz bajo condiciones subtropicales. Así mismo también se evaluó en secuestro de carbono en el suelo (Ver Cuadro 12.)

Cuadro 12. Aumento de carbono en Tamaulipas

(%) CO					
TRATAMIENTO	0-5 cm	5-10 cm	10-20 cm	Mg ha	Aumento de C sobre LT
CV	2.2	1.7	1.6	0.38	1.33
LT	1.3	1.2	1.2	0.29	
ML	1.5	1.5	1.3	0.31	1.08
ML	1.5	1.4	1.3		
LC	1.9	1.6	1.5	0.36	1.25
SD (CL y CV)					1.29

CV=COBERTURA VEGETAL, LT=LABRANZA TRADICIONAL, LM=LABRANZA MINIMA, LC=LABRANZA CERO. Fuente: Elaboración propia con datos de Roldán (2005).

En este sitio de experimentación el aumento de Carbono oscila alrededor del 1.33, lo que quiere decir que la agricultura de conservación con cobertura vegetal es favorable en 33 % más que la agricultura tradicional.

El residuo de la superficie del suelo fue alrededor de 17 – 21 veces aumentado en las parcelas de labranza cero sobre las parcelas de labranza tradicional, con incrementos intermedios en parcelas de labranza mínima. En la superficie de 0 – 5 cm, la materia orgánica disminuyó con la labranza cero creciente y aumento debido al riego.

El suelo no cultivado había aumentado valores de las actividades solubles en agua, como el carbono, deshidrogenasa, ureasa y fosfatasa ácida, estabilidad del agregado y glomalina en comparación con la capa más superficial (0 – 5 cm). El régimen hídrico no influyó en la estabilidad estructural del suelo ni en la actividad microbiana. En general, lo destacado del estudio es que las diferentes técnicas de

labranza de conservación secuestran más carbono mejorando la productividad de manera sustentable.

De acuerdo con los datos encontrados en una investigación para tres sitios de experimentación: Tapachula (TAP), Tuxtla chico (TCH) y Frontera Hidalgo (FRA) en la región del Soconusco, Chiapas; cuyo objetivo fue evaluar el impacto de la labranza de conservación: labranza cero (LC) y labranza mínima (LM) versus labranza tradicional y sobre los efectos en el contenido de materia orgánica en el suelo en dos ciclos sucesivos de maíz de temporal y humedad residual con profundidades de 10 hasta 40 cm. (Ver Cuadro 13).

Cuadro 13. Impacto de Sistemas de Labranza de conservación y convencional por profundidad sobre el comportamiento promedio de la MO en función del tiempo (abril 2007; nov 2007 y abril 2008).

<i>Sitio</i>	<i>LM</i>	<i>CL</i>	<i>LT</i>	<i>0-10 cm</i>	<i>LM Mg ha</i>	<i>10- 20 cm</i>	<i>LC Mg ha</i>	<i>20- 30 cm</i>	<i>LT Mg ha</i>	<i>30- 40 cm</i>
TAP	5.08	5.24	4.59	5.53	0.27	5.09	0.55	4.7	0.72	4.57
TCH	3.19	3.89	3.7	3.7	0.17	3.63	0.41	3.58	0.58	3.46
FRA	2.89	2.9	2.8	3.55	0.15	2.96	0.30	2.55	0.44	2.41
Promedio				4.26		3.89		3.61		3.48

TAP: Tapachula, TCH; Tuxtla Chico y FRA: Frontera Hidalgo. Fuente: Elaboración propia con datos de Baéz (2002).

Los experimentos consistieron en tres tratamientos de 0.5 ha con labranza cero (LC), labranza mínima (LM) y labranza tradicional (LT); la primera y segunda fecha de siembra en cada sitio Tapachula (TAP), Tuxtla chico (TCH) y Frontera Hidalgo (FRA) se hicieron los días 10, 20 y 28 de mayo; 20, 25 y 30 de agosto del año 2007; respectivamente. El cada tratamiento se determinó la materia orgánica (MO) inicial (abril, 2007), cada 10 cm hasta 40 cm de profundidad y después cada seis meses (noviembre, 2007 y abril, 2008); la densidad aparente (pb) se determinó sólo al inicio de un año después. En el corto plazo, los análisis estadísticos de impacto de los sistemas de labranza por profundidad sobre la materia orgánica detectaron diferencia significativa en los sitios Tapachula y Frontera Hidalgo, y altamente significativa en la profundidad, ya que en todos los sitios se determinó mayor

concentración de materia orgánica en estrato de 0 a 25 cm (Tukey, 5 %), (Ver Cuadro 14).

Cuadro 14. Promedio de MO en función del tipo de labranza y profundidad en los sitios: Tapachula, Tuxtla Chico y Frontera

sistema de labranza	MO (kg/ha) ^o (Mg/ha)	MO (%)	Profundidad (cm)	Promedio (%)	Prof. 40 cm	Aumento
LM		3.72	0-10	4.26	2.4708	0.89
CL		4.01	10-20	3.89	2.2562	0.81
LT		3.7	20-30	3.61	2.0938	0.75
			30-40	3.48	2.0184	0.73

Fuente: elaboración propia (2016).

Como en casi todos los estados la práctica más promisoría es la labranza mínima y labranza cero. En este estudio el tipo de labranza con resultados positivos fueron con labranza mínima (LM) con un valor de 1.18.

Aunque el porcentaje (%) de materia orgánica fue más favorable con la labranza cero (LC) con un 4 % con respecto a la labranza mínima y labranza tradicional; ya que el aumento en porcentaje fue de 0.03 % con respecto a las dos técnicas conservacionistas anteriormente descritas.

La profundidad del suelo fue con 0 a 10 cm, con más contenido de carbono fue la capa superficial del suelo con un promedio del 2 %. En la última capa del estudio en cuestión que fue a una profundidad de 40 cm se obtuvo más materia orgánica con la labranza mínima.

Los datos que se obtuvieron para el estado de Querétaro fueron que el contenido de materia orgánica con labranza tradicional era de 1.5 % y con agricultura de conservación fue de 2.6 % en un intervalo de profundidad de 0 a 5 cm en ocho años (2005 a 2013) y una densidad aparente de 0.90 g cm⁻³; lo que dio como resultado un importante aumento de C de 1.73 %.

4.2. Coeficientes de Fijación de carbono para Siembra Directa (SD)

El Cuadro 15 muestra los incrementos de C para la SD comparada con la AT. Según los artículos revisados demuestran que la SD y la conservación de residuos estimulan el secuestro de C para reducir la erosión del suelo, la lixiviación y la escorrentía de productos químicos agrícolas; los cuales son benéficos para la captura de C.

La materia orgánica del suelo es importante en el ciclo del carbono terrestre a nivel mundial; ya que aproximadamente el 74 % del carbono orgánico activo se almacena en los suelos. El manejo de los sistemas agrícolas y especialmente la retención de los residuos del cultivo tiene un importante impacto en el contenido de materia orgánica del suelo y su composición (Govaerts *et al.*, 2007). Por ejemplo, Albaladejo *et al.* (1998) informaron que en suelo bajo las prácticas agrícolas convencionales con eliminación de los residuos de los cultivos, el contenido de carbono orgánico puede disminuir en un 26 %, mientras que Dabney *et al.* (2004) reportaron una disminución del contenido de carbono orgánico en un 47 % dentro de los 5 años. Extracción y eliminación, incluso parcial de residuos de maíz y de trigo disminuyeron de manera significativa la materia orgánica del suelo.

Otras prácticas de manejo, como lomos cerrados y rotación de cultivos, no tuvieron ningún efecto sobre la MOS, pero la labranza si presento efecto positivo. La MOS fue mayor bajo camas de cultivo no labradas que de camas cultivadas tanto con retención de residuos de los cultivos. La SD favorece los agregados estables y protege físicamente la MOS por lo tanto, la reducción de las tasas de mineralización aumenta la MOS de 0-5 cm en la capa de suelo (Lichter *et al.*, 2008). La rotación de cultivos, retención de residuos y reducción de la labranza dará lugar al aumento del contenido de C.

Cuadro 15. Lista de estudios referidos al incremento de Siembra Directa con diferentes tipos de clima.

Estudio	Clima	Periodo de Estudio (años)	Máxima profundidad de suelo muestreada (cm)	Incremento de C sobre labranza tradicional (Mg ha ⁻¹ año ⁻¹)	Secuencia de cultivos ^y
MS (Monneveux <i>et al.</i> , 2006)	Aw	1	30	1.03	Monocultivo de maíz
TL (Covalada <i>et al.</i> , 2009)	Cw	4	20	1.40	Trigo-Cebada-Maíz
GT (Follett <i>et al.</i> , 2005)	Bs	5	30	1.07	Maíz-Trigo y Maíz-Frijol
MN1 (Roldán <i>et al.</i> , 2003)	Cw	5	15	1.34	Monocultivo de maíz
MN2 (Salinas <i>et al.</i> , 2001)	Cw	6	15	1.11	Monocultivo de maíz
MN3 (Salinas <i>et al.</i> , 2001)	Cw	6	5	1.31	Monocultivo de maíz
MC1 (Govaerts <i>et al.</i> , 2007)	Cw	6	20	1.07	Maíz-Trigo
MC2 (Patiño <i>et al.</i> , 2009)	Cw	6	20	1.11	Maíz-Trigo
MC3 (Fuentes <i>et al.</i> , 2010)	Cw	16	10	0.93	Maíz-Trigo
MC4 (Fuentes <i>et al.</i> , 2009)	Cw	16	20	0.97	Maíz-Trigo
MC5 (Dendooven <i>et al.</i> , 2012)	Cw	10	60	1.69	Maíz-Trigo
TS1 (Roldán <i>et al.</i> , 2005)	Bs	3	15	1.02	Monocultivo de maíz
TS2 (Roldán <i>et al.</i> , 2005)	Bs	3	15	1.29	Monocultivo de Trigo
SR (Govaerts <i>et al.</i> , 2006)	Bw	12	7	1.10	Maíz-Trigo
CS (Baéz <i>et al.</i> , 2002)	Aw	1	40	1.08	Monocultivo de maíz
QT (Mora, 2014)	Bs	8	5	1.73	Monocultivo de maíz
Promedio			20,44	1.21	
Desv Est (p < 0,05)				0.24	

MS, Morelos; TL, Tlaxcala; GT, Guanajuato; MN, Michoacán; MC, Estado de México; TS, Tamaulipas; SR, Sonora; CS, Chiapas; QT, Querétaro.

^y Nombres científicos: *Zea mays* L.; *Triticum* L.; *Hordeum vulgare* L.; *Phaseolus vulgaris*.

La mayoría de los sitios de experimentación presentan una tendencia positiva con SD, al no labrar las tierras para los cultivos; es decir presentan aumentos superiores a uno, lo cual conlleva a efectos favorables del secuestro de C con la AC, tanto en los climas Bs (secos esteparios) con una media de 1.28 Mg ha⁻¹, así como en los Cw (templado con lluvias en verano) con promedio de 1.21 Mg ha⁻¹ y para el tipo de clima Aw (tropical con lluvias en verano), una media de 1.05 Mg ha⁻¹.

La profundidad media total de todos los ensayos reportados es de 20.44 cm que se detecta en general en esta investigación; sin embargo, los datos pueden variar. De acuerdo con Roldán *et al.* (2006) reportó que el tipo de cultivo, el sistema de labranza y la profundidad del suelo tenían efectos significativos ($P < 0,001$) en C orgánico del suelo. En la capa de 0-5 cm, C orgánico fue mayor bajo SD que bajo AT, en particular en el suelo cultivado con frijol por debajo de la capa de 0-5 cm. La AT resultó que el C orgánico más bajo fue en la capa 0-15 cm del suelo.

La rotación de los cultivos es un elemento preponderante de cara a la AC y es necesario evaluar aún más sus efectos; en estos trabajos se detectó que un efecto positivo en la simbiosis de maíz – trigo y en los monocultivos de maíz; sin embargo también se hallaron casos de trigo- cebada-maíz y maíz-frijol de igual manera con efectos positivos.

La capacidad de un suelo para el secuestro de C está determinada principalmente por la protección de C en los agregados del suelo. Las existencias de C del suelo cambian con la labranza y prácticas de manejo (Govaerts *et al.* 2009a); Fuentes *et al.* (2010) informaron del mismo experimento como este estudio que el contenido de COS en la capa de 0-10 cm se vio afectada por la labranza y el manejo de residuos. El mayor contenido de COS era el que se encuentra en la capa de 0-5 cm con SD con rotación de cultivos. Los suelos con SD y retención de residuos (tanto para el monocultivo y rotación), mostró mayores porcentajes de COS, sumidero de C que con AT y retención de residuos y sin retención de residuos. En consecuencia, la combinación de SD con retención de residuos es lo que hace agregados más estables, protege C y por lo tanto aumenta el secuestro del mismo; y no sólo SD o retención de residuos separadamente. (Stewart *et al.*, 2008).

4.3. Coeficientes de Fijación de carbono para Labranza Mínima (LM)

Se presentan cinco estados de la República Mexicana que disminuyeron la AT a LM, que se define como una práctica agronómica de AC en cultivos anuales, en la que las únicas labores de alteración del perfil del suelo que se realizan son de tipo vertical y, al menos un 30 % de su superficie se encuentra cubierta por restos vegetales (Ver Cuadro 16).

Cuadro 16. Lista de estudios referidos al incremento de Labranza Mínima con diferentes tipos de clima.

Estudio	Clima	Periodo de Estudio (años)	Máxima profundidad de suelo muestreada (cm)	Incremento de C sobre AT (Mg ha ⁻¹ año)	Secuencia de cultivo ^a
TL (Covaleda <i>et al.</i> , 2009)	Cw	4	20	1.24	Trigo-Cebada-Maíz
MN1 (Roldán <i>et al.</i> , 2003)	Cw	5	15	1.26	Monocultivo de maíz
CM1 (Govaerts <i>et al.</i> , 2007)	Cw	6	20	1.00	Maíz-Trigo
CM2 (Patiño <i>et al.</i> , 2008)	Cw	6	20	1.01	Maíz-Trigo
TS1 (Roldán <i>et al.</i> , 2005)	Bs	3	15	1.00	Monocultivo de maíz
TS2 (Roldán <i>et al.</i> , 2005)	Bs	3	15	1.08	Monocultivo de Trigo
CS (Báez <i>et al.</i> , 2002)	Aw	1	40	1.18	Monocultivo de maíz
Promedio			20,71	1.11	
Desv Est				0.11	

TL, Tlaxcala; MN, Michoacán; MC, Estado de México; TS, Tamaulipas; CS, Chiapas.

^a Nombres científicos: *Zea mays* L.; *Triticum* L.; *Hordeum vulgare* L.

Resultados revisados indican que la adición de los residuos orgánicos previamente cultivados utilizando la AT, favorecen claramente la acumulación de materia orgánica del suelo (MOS) en comparación con el tratamiento tradicional (Báez *et al.*, 2002).

Estas prácticas de AC de SD y LM resultan una mejora para la acumulación de COS, ya que en esta investigación se obtuvo un aumento en promedio de 1.11 y 1.21 Mg ha⁻¹ año⁻¹; con LM y SD; es decir, existe una diferencia de 0.10 Mg ha⁻¹ año⁻¹; con lo cual se comprueba que el mejor incremento es con SD sobre la AT. A diferencia de otros trabajos para este caso, LM siempre supuso incrementos de C en el suelo (González *et al.*, 2012).

Los agricultores por lo general usan la LM en situaciones muy específicas; como es, para cambiar de cultivo; antes de la siembra del segundo cultivo; la tierra se limpia. En el caso de la compactación de horizontes menos profundos puede ser necesario el subsolado en el primer año y probablemente en el segundo, antes de cambiar a un verdadero sistema de LM. Los sistemas de AC basados en LM son parte del sistema total de producción, la competencia por residuos para la cobertura del suelo. El desarrollo de la LM y la SD como alternativas a las prácticas convencionales introducidas en climas templados; dependiendo del cultivo a sembrar, la superficie del suelo a ser disturbada se limita a una angosta faja de entre 10 y 50 cm de ancho. En esta faja es incorporada parcialmente la cobertura vegetal y la superficie conserva aún entre 60 y 80 % de protección contra las gotas de lluvia y los rayos solares (Boletín de la FAO No. 78, 2002)

En el estudio de Chiapas se promueve la utilización de tecnologías de producción que garanticen la reducción de emisiones de GEI mediante el secuestro de C in situ como en la AC y LM (Lal, 2004), que considera la permanencia del suelo del al menos un 30 % de los residuos de cosecha hasta la próxima siembra para conservar el suelo y el agua. Últimamente la SD y LM han demostrado alta eficiencia para secuestrar C y sucesivamente la recuperación continua de la MO (Lal, 2003).

Este trabajo no es la excepción, se presenta un aumento máximo de 1.26 y un mínimo de 1.00 Mg ha⁻¹ año⁻¹; respectivamente, de C sobre la AT.

Los tipos de climas tan diversos que existen en México, afectan en algunos casos tanto positiva como negativamente. La media de los cuatro tipos de climas identificados en este trabajo de investigación y el C capturado en Mg ha⁻¹ año⁻¹ con

cada clima. Aunque pareciera alto en el clima Bs que es el seco estepario con la práctica de SD, se debe a que el estudio de Querétaro con 8 años de transición de AT a AC inicio con un 1.5 % al 2013 incremento a 2.6 % de MOS con lo cual se mejoró la fertilidad del suelo, disminuyó la utilización de grandes cantidades de fertilizantes. Así mismo, la MO ayuda a retener más humedad y nutrientes, permitiendo un mejor aprovechamiento (Mora, 2014). Le sigue en rendimiento de C ($\text{Mg}^{-1} \text{ha}^{-1}$) de acuerdo al clima Cw, templado con lluvias en verano, por las condiciones del suelo, y por concentrarse la matriz del Centro de Investigación de Maíz y Mejoramiento y Trigo (CIMMYT) que incentiva a este tipo de experimentos dentro de sus parcelas y el clima Aw, que es el tropical con lluvias en verano con las condiciones necesarias para capturar C con SD, según esta investigación aunque cada sitio de estudio tiene sus propias condiciones, se debe propiciar factores ideales para fijar más carbono en el suelo (Ver Figura 2).

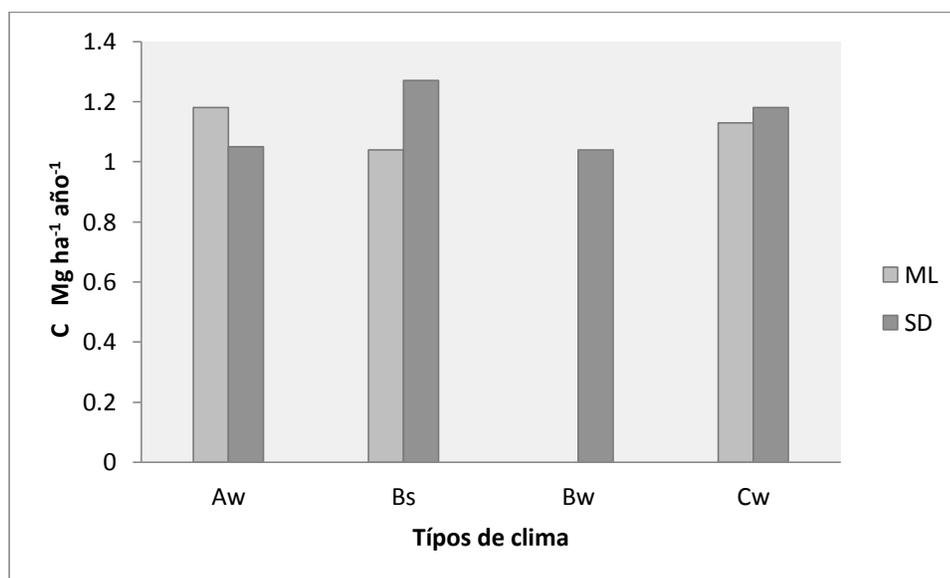


Figura 3. Fijación de carbono en SD y LM para climas tropical con lluvias en verano (Aw), seco estepario (Bs), seco desértico (Bw) y templado con lluvias en verano (Cw).

Dentro de la misma figura también se hace referencia a la LM que en la mayoría de los climas es inferior con respecto a la SD; a excepción del clima tropical con lluvias en verano (Aw) donde la tendencia de LM es superior y eso se debe a la fertilidad

del suelo y el clima relacionado con aumento de temperatura y retención de humedad, se presenta una diferencia 0,13 Mg ha⁻¹ año⁻¹ con respecto a la capacidad de captura de C en la SD.

4.4. Superficie cultivada con Agricultura de Conservación

Se realizó una evaluación de los coeficientes estimados y representa la reducción de las emisiones de gases efecto invernadero en México, teniendo en cuenta el porcentaje de tierra cultivable ocupada por cultivos bajo Agricultura de Conservación.

Al respecto, datos oficiales en México que se presentan en la Encuesta Nacional Agropecuaria (ENA) realizada por el Instituto Nacional de Estadística Geografía e Información (INEGI, 2014) en donde se aprecia el aumento de la superficie con Agricultura de Conservación con respecto al año 2012 (Ver Cuadro 17).

Cuadro 17. Área cultivada con Agricultura de Conservación en México.

	Cultivos arables (2014)	%	Cultivos arables (2012)	%
Total (ha)	27,496,118	100	25,808,000	100
SD (ha)	1,502,392	5.5	972,394	3.8
LM (ha)	1,756,199	6.6	1,294,041	5.0

Elaboración propia con datos de la ENA-INEGI, 2014.

El total de superficie cultivable creció en 6.5 % en 2014 con respecto al 2012; en dos años creció considerablemente. Es importante tomar en cuenta que el porcentaje con siembra directa y labranza mínima creció en 1.7 % y 1.6 %, respectivamente en 2014 con respecto al 2012: Por lo tanto se infiere que la siembra directa es más promisorio que la labranza mínima aunque ambas técnicas pertenecen a la agricultura de conservación.

La superficie cultivable con agricultura de conservación en México es una meta asequible demostrando el potencial de dichas técnicas en las labores del campo.

Más de 155 millones de hectáreas en el mundo han adoptado la agricultura de conservación como parte de su estrategia productiva. Estados Unidos, por ejemplo, tiene 35.6 millones de hectáreas, Brasil 31, Argentina 27, Canadá 18, Australia 17, China 6.6 y México creció en 1, 688, 118 ha en superficie cultivable y con técnicas de conservación registró un incremento de 3.3% con labores de conservación en la agricultura.

A nivel mundial, en los últimos 11 años, esta estrategia se ha incrementado a un ritmo promedio anual de 7 millones de hectáreas.

Aunque la superficie con agricultura de conservación ha crecido de manera muy lenta, México ya se encuentra en el camino de la transición y va adaptándose a estos cambios.

Pese a que se está adoptando la agricultura de conservación, aún falta impulso porque no ha existido una política pública que la impulse. Ha faltado formar recursos humanos, técnicos líderes sobre esta estrategia. La mecanización del campo mexicano no ha pasado más allá del apoyo con tractores y en algunos estados, minitractores sin el enfoque integral de mecanización.

Lo que se ha avanzado en la agricultura de conservación se debe en mucho a lo que han hecho, a lo largo de los últimos 25 años, los Fidecomisos Instituidos en Relación con la Agricultura en el Banco de México (FIRA) en su Centro Demostrativo Villadiego, ubicado en Guanajuato. También por los aportes del Programa MASAGRO a cargo del Centro Internacional de Mejoramiento de Maíz y Trigo (CIMMYT), a lo que ha aportado el Consejo Nacional de Agricultura de Conservación y a esfuerzos estatales generalmente descontinuados por los cambios de gobierno.

La agricultura de conservación es hoy por hoy la mejor herramienta que el mundo tiene para enfrentar la baja productividad en las zonas de temporal y mitigar el cambio climático, una amenaza real a la sobrevivencia.

4.5. Promedio potencial de fijación de CO₂ basado en la superficie bajo Agricultura de Conservación en México

Dados esos valores del uso de la tierra en México en cultivos bajo Agricultura de Conservación, la fijación potencial de Carbono en México son presentados enseguida; para cada una de las técnicas de Agricultura de Conservación, es decir, la SD y LM. Con base en la investigación realizada y los datos de superficie agrícola en México dedicada a la Agricultura de Conservación (Ver Cuadro 18).

Cuadro 18. Área cultivada en México bajo agricultura de conservación (2014) y potencial de fijación de carbono sobre agricultura tradicional.

Práctica Agrícola	Coefficiente de Fijación de C (Mg ha⁻¹ año⁻¹)	Área (ha)	Potencial de Fijación de C (Mg año⁻¹)
SD	0.41	1,502,392	617,085.64
LM	0.58	1,756,199	1,010,746.78
Total		3,258,591	1,627,832.42

Fuente: Elaboración propia con datos de ENA, 2014.

Este resultado indica que alrededor de 1.6 Gg de C por año pueden ser capturados bajo agricultura de conservación, con un área de cerca de 3.5 millones de hectáreas respecto a otro estudio realizado en España donde se obtuvo cerca de 2 Gg de C en 3 millones de hectáreas a pesar de que la AC es más aceptada y practicada en Europa (González *et al.*, 2012).

A diferencia de España, México tiene más potencial de poder adoptar estas técnicas de conservación debido a que cuenta con más superficie cultivable y por lo tanto mayor efecto de sumidero de carbono en sus suelos.

La agricultura de conservación es un sistema de producción caracterizado por la maximización a corto plazo de la producción del cultivo así como por la potencial sustentabilidad a largo plazo. Todavía se deben abordar brechas importantes si se

va a usar la agricultura de conservación como una estrategia para la captura de carbono.

Para el mundo en desarrollo y la mayoría de las áreas tropicales y subtropicales, falta información acerca de la influencia de la labranza y la rotación de cultivos sobre el almacenamiento del carbono. La mayoría de los estudios se han realizado a nivel de parcela, y se requiere más investigación holística a nivel de explotación agrícola, incluidas las limitantes del agro ecosistema, así como los presupuestos totales de la captura de carbono en el ámbito regional y global.

Aunque la captura de carbono es cuestionable en algunas áreas y en algunos sistemas de cultivo, la agricultura de conservación sigue siendo una importante tecnología que mejora los procesos del suelo, controla la erosión del suelo y reduce los costos de producción relacionados con la labranza. La seguridad alimentaria mundial, la preservación ambiental, así como un incremento en los medios de vida de los agricultores, deberían ser las principales metas de un sistema agrícola sustentable.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Existen diversas formas de labrar la tierra con diferentes factores importantes a considerar como lo son: el clima, la densidad y profundidad del suelo, localización, duración de la investigación; así como la técnica de conservación que se aplique como la siembra directa y la labranza mínima. Entre dichas técnicas puede existir un sinfín de variantes como la rotación de cultivos y la cobertura vegetal. La importancia de la agricultura de conservación para la fijación del carbono es esencial a pesar de que en México son pocos los estudios que se han realizado; sin embargo se consideran suficientes para determinar el efecto sumidero en los suelos arables porque no se altera la estructura del suelo. El factor de fijación de carbono en siembra directa y el factor de fijación de carbono para labranza mínima es aún mejor porque se combinan los elementos conservacionistas así como un manejo integral de plagas y enfermedades. El potencial de fijación de carbono con ambas técnicas de conservación es positivo si continúa el aumento de la superficie cultivable y como medida de mitigación al cambio climático.

Con la agricultura de conservación se puede fijar mayor cantidad de carbono cada año que con la agricultura tradicional, así el sumidero de carbono en el suelo es un efecto promovido por la agricultura de conservación. Se considera que la labranza mínima obtiene un coeficiente de fijación de carbono superior al de siembra directa debido a que son tierras que se encuentran en transición y se incluye durante la siembra la retención de residuos.

La aplicación de agricultura de conservación es una herramienta que ayuda a incentivar a los productores a adoptar estas técnicas de producción por sus múltiples beneficios y al Gobierno de México a emitir nuevas políticas públicas que beneficie a la producción agrícola sostenible. Debido a la influencia de las características del suelo, profundidad, al período de tiempo con labores conservacionistas y del clima con potencial para fijación de carbono. La aplicación de agricultura de conservación debe ser integral, en estricto sentido de seguir las prácticas de siembra directa y labranza mínima.

Los factores de abandono están relacionados principalmente con la falta de acompañamiento técnico y la incertidumbre sobre el uso de la parcela.

La falta de maquinaria apropiada para la agricultura de conservación, como son las sembradoras, se convierte en una limitante para la adopción del sistema, pero no es la causa principal del abandono. Para facilitar la adopción de agricultura de conservación, es recomendable incluir a las autoridades locales en el proceso de la innovación tecnológica para tener un respaldo local.

El uso del rastrojo como alimento principal para el ganado es una causa importante de abandono del sistema de Agricultura de Conservación.

Se requieren más estudios e investigaciones en Agricultura de Conservación. Por lo que es necesario continuar con el Meta análisis de trabajos recién publicados.

Analizar la factibilidad de que la comunidad científica y los tomadores de decisiones realicen una política pública favorable al medio ambiente y a la mejor toma de decisiones en temas relacionados con la mitigación al Cambio Climático.

En México es necesario lanzar programas gubernamentales, políticas públicas en el sector primario como el pago por captura de carbono a través de la agricultura de conservación para que incentiven, revaloricen; se aumente la superficie cultivable conservacionista, y se mitigue el calentamiento global.

LITERATURA CITADA

Las referencias marcadas con un asterisco indican que son artículos incluidos en el meta-análisis de captura de carbón atmosférico a través de la agricultura de conservación en México.

- *Báez A., Etchevers J.D., Hidalgo C., Prat C., Ordaz V., Núñez R., (2002). C orgánico y P-Olsen en tepetates cultivados de México. *Agrociencia* 36: 643–653.
- *Covaleda Sara Pajares, Silvia Gallardo, Juan F. Padilla, Aurelio; Etchevers Jorge D. (2009). Effect of different agricultural management systems on chemical fertility in cultivated tepetates of the Mexican transvolcanic belt. *Agriculture, Ecosystems and Environment*. Vol. 129, Edición 4. Pp. 422-427
- *Dendooven L.; Gutiérrez-Oliva V.F.; Patiño-Zuñiga L.; and Govaerts B. (2012). Greenhouse gas emissions under conservation agriculture compared to traditional cultivation of maize in the central highlands of Mexico. *Science of the Total Environment* 431: 237–244.
- *Farina R., Seddaiu G., Orsini R., Steglich E., Roggero P.P., Francaviglia R. (2011). Soil carbon dynamics and crop productivity as influenced by climate change in a rainfed cereal system under contrasting tillage using EPIC. *Soil Till. Res.* 112 (1), 36–46.
- *Follett Ronald F., Castellanos Javier Z., Buenger Edward D. (2005). Carbon dynamics and sequestration in an irrigated Vertisol in Central Mexico. *Soil Till Res:* 83:148-158.
- *Fuentes M.; Govaerts B.; De León F.; Hidalgo C.; Dendooven L. and Etchevers J. (2009). Fourteen years of applying zero and conventional tillage, crop rotation and residue management systems and its effect on physical and chemical soil quality. *European Journal of Agronomy* 30:228-237.
- *Fuentes M.; Govaerts B.; Hidalgo C.; Etchevers J.; Sayre K.D.; Dendooven L. (2010). Organic carbon and stable ¹³C isotope in conservation agriculture and conventional systems. *Soil Biol Biochem* 42:551–557.
- *Govaerts B.; Sayre K.D.; Ceballos-Ramírez J.M.; Limón-Ortega A. and Dendooven L. (2006). Conventionally tilled and permanent raised beds with different crop residue management: Effects on soil C and N dynamics. *Plant and Soil* 280:143–155.
- *Govaerts B.; Sayre K.D.; Lichter K.; Dendooven L.; Deckers J. (2007). Influence of permanent raised bed planting and residue management on physical and chemical soil quality in rain fed maize/wheat systems. *Plant Soil* 291:39–54.
- *Lichter K, Govaerts B, Six J, Sayre KD, Deckers J, Dendooven L. (2008). Aggregation and C and N contents of soil organic matter fractions in the permanent raised-bed planting system in the Highlands of Central Mexico. *Plant Soil* 305:237–252

- *Monneveux P., E. Quillerou C. Sanchez¹ and J. Lopez-Cesati. (2006). Effect of zero tillage and residues conservation on continuous maize cropping in a subtropical environment (México), *Plant and Soil* 279: 95-105.
- *Mora Gutiérrez M. (2014). Evaluación de 12 variedades de maíz en labranza de conservación en el módulo demostrativo Regina. INIFAP-SAGARPA-Fundación PRODUCE Querétaro y Secretaria de Desarrollo Agropecuario, Querétaro. Despegable Informativo Núm. 3
- *Patiño-Zúñiga L.; Ceja-Navarro J.A.; Govaerts B.; Luna-Guido M. and Dendooven L. (2009). The effect of different tillage and residue management practices on soil characteristics, inorganic N dynamics and emissions of N₂O, CO₂ and CH₄ in the central highlands of Mexico: a laboratory study. *Plant and Soil* 314: 231-241.
- *Roldán A., Caravaca F., Hernández M.T., García C., Sánchez- Brito C., Tiscareño M., (2003). No-tillage, crop residue additions, and legume cover cropping effects on soil quality characteristics under maize in Patzcuaro watershed (Mexico). *Soil Till. Res.* 72, 65–73.
- *Roldán A.; Salinas-García J.R.; Alguacil M.M. and Caravaca F. (2005). Changes in soil enzyme activity, fertility, aggregation and C sequestration mediated by conservation tillage practices and water regime in a maize field. *Applied Soil Ecology* 30: 11–20.
- *Roldán A.; Salinas-García J.R.; Alguacil M.M.; Díaz, E. and Caravaca F. (2006). Soil enzyme activities suggest advantages of conservation tillage practices in sorghum cultivation under subtropical conditions. *Geoderma* 129: 178– 185.
- *Salinas-García J.; Báez-González A.D; Tiscareño-López M.; Rosales-Robles E.(2001). Residue removal and tillage interaction effects on soil properties under rain-fed corn production in Central Mexico. *Soil Till Res.* 59: 67-79.
- Albaladejo, J., M. Martínez-Mena, A. Roldan, and V. Castillo. (1998). Soil degradation and desertification induced by vegetation removal in a semiarid environment. *Soil Use Manage.* 14:1–5.
- Alexandratos, N. y Bruinsma, J. (2012). World agricultura towards 2030/2050: the 2012 revisión. Roma, FAO.*
- Alvaro-Fuentes, J.; Cantero-Martinez, R.; Lopez, M. V.; Arrue, J. L. (2007). Soil carbon dioxide fluxes following tillage in semiarid Mediterranean agroecosystems *Soil and Tillage Research* 96: 331-341.
- Balbotín, C; Cruz, C y Etchevers, F. (2009). Soil Carbon Sequestration in Different Ecoregions of Mexico. In SSSA Special Publication 57 Copyright © 2009. ASA–CSSA–SSSA, 677 S. Segoe Rd. (Ed.), *Soil Carbon Sequestration and the Greenhouse Effect* (pp. 71 -96). WI 53711, USA.
- Basch, G. (2005).Justificación socioeconómica y política para invertir en la Agricultura de Conservación. 2005. Agricultura de conservación: AC, nº1, pp 11-16

- Braun, J. v., & Díaz-Bonilla, E. (2008). *Los pobres y la globalización de los alimentos y la agricultura*. Washington dc: cgjar.
- Brown, L., Donaldson, G.V., Jordan, V.W.L. y Thornes, J.B. (1996). "Effects and interactions of rotation, cultivation and agrochemical input levels on soil erosion and nutrient emissions". *Aspect of Applied Biology* 47, Rotations and Cropping Systems, 409-412.
- Cantero-Martínez, C., Ojeda, J., Angás, P. Y Santiveri, P. (2004). "Efectos sobre las poblaciones de lombrices: Técnicas de laboreo en suelo en zonas de secano semiárido". *Agricultura*. 866: 724/728.
- Chappell, A., Baldock, J. y Sanderman, J. (2016). The global significance of omitting soil erosion from soil organic carbon cycling schemes. *Nature Climate Change*, 6: 187–191.
- Childe, G. (1992). *Los orígenes de la civilización*. Argentina: Fondo de Cultura Económica.
- Chomitz, K. (2007). Expansión agrícola, reducción de la pobreza y medio ambiente en los bosques tropicales. *Informe del Banco Mundial sobre investigaciones relativas a las políticas de desarrollo*. Washington, D.C.: Banco Mundial.
- Christensen, B., Montgomery, J.M., Fawcett, R.S. y Tierney, D. (1995). "Best management practices for water quality". Conservation Technology Information Center, West Lafayette, Indiana, USA, 3 pg.
- Claridades Agropecuarias (2011). Agricultura de conservación. Elemento clave para la producción sustentable de alimentos en el futuro. Claridades Agropecuarias No. 220. Consultado en: www.infoaserca.gob.mx/claridades/revistas/220/ca220-42.pdf (Agosto 2017).
- CONAZA. (1994). *Plan de acción para combatir la desertificación en México*. Saltillo: CONAZA.
- Conservation International (2007). New Study Finds Biodiversity Conservation Secures Ecosystem Services For People. *ScienceDaily*. Retrieved from (<http://www.sciencedaily.com/releases/2007/12/071205131149.htm>) (08 de diciembre, 2016)
- Dabney SM, Wilson GV, McGregor KC, Foster GR. (2004). History, residue, and tillage effects on erosion of loessial soil. *Trans Am Soc Agric Eng* 47:676–775.
- Derpsch, R.; Friedrich, T. (2009). Development and Current Status of No-till Adoption in the World. Proceedings on CD, 18th Triennial Conference of the International Soil Tillage Research Organization (ISTRO), June 15-19, 2009, Izmir, Turkey.
- Diario Oficial de la Federación. (2013). México. Consultado en: <http://www.dof.gob.mx/index.php?year=2013&month=01&day=10> (julio 2016).

- ECAF. (1999). *“Agricultura de Conservación en Europa Aspectos Ambientales, Económicos y Políticos de la UE”*. DL: CO-1307-1999.
- Erenstein, Olaf, Ken Sayre, Patrick Wall, Jon Hellin, and Jon Dixon. 2012. Conservation Agriculture in Maize- and Wheat-Based Systems in the (Sub)tropics: Lessons from Adaptation Initiatives in South Asia, Mexico, and Southern Africa. *Journal of Sustainable Agriculture*. Vol. 36, Núm. 2, May 2012.
- FAO (2004). recomienda políticas que integren cambio climático y seguridad alimentaria. ONU, Centro de noticias. Consultado en: [http://www.un.org/spanish/News/fullstorynews.asp?newsID=17170&criteria1=c lima \(01 de sept 2017\)](http://www.un.org/spanish/News/fullstorynews.asp?newsID=17170&criteria1=c lima (01 de sept 2017))
- FAO y GTIS (Grupo técnico intergubernamental sobre los suelos). (2015). *Status of the World's Soil Resources (SWSR) – Main Report*. Roma.
- FAO, (2016). El estado mundial de la Agricultura y la alimentación 2016. Cambio climático, agricultura y seguridad alimentaria. Roma.
- FAO, Comité de agricultura. (2007). *La agricultura y la escasez de agua: enfoque programático de la eficiencia en el uso del agua y la productividad agrícola*. Roma: Autor.
- FAO (2009). Recomendación políticas que integren cambio climático y seguridad alimentaria. ONU, Centro de noticias. (17 de febrero de 2017)
- FAO. (2002). *Agricultura mundial: hacia los años 2015/2030. Reporte resumido*. Roma, Italia: Autor.
- FAO. (2011). Agricultura mundial: hacia los años 2015/2030. Consultado en: <http://www.fao.org/docrep/004/y3557s/y3557s11.htm> (13 de marzo 2017).
- FAO. (2012). *El estado mundial de la pesca y la acuicultura 2012*. Roma.
- FAO. (2012). FAOSTAT. Estadísticas FAO. Consultado en: <http://www.fao.org/faostat/en/#home> (13 de marzo de 2017).
- FAO. (2013). *Directrices sobre el cambio climático para los gestores forestales*. Estudio FAO Montes 172. Roma.
- FAO. (2002). Boletín de Suelos de la FAO No.78. Agricultura de Conservación. Estudio de Casos en América Latina y África. Organización de las naciones unidas para la agricultura y la alimentación. Roma. Consultado en: <http://www.fao.org/ag/ca/6c.html> (julio 2016).
- FAOSTAT (The Food and Agriculture Organization Corporate Statistical Database). (2014). Consultada en: <http://faostat3.fao.org/home/E>. (julio 21, 2016).
- Foley, J. A., N. Ramankutty, K. A. Brauman, E. S. Cassidy, J. S. Gerber, M. Johnston, N. D...and D. P. M. Zaks. (2014). Solutions for a cultivated planet. 2011. *Nature* 478: 337-342.

- Foster, J. B. & Magdoff, F. (2010). Lo que todo ambientalista necesita saber sobre capitalismo. *Monthly Review*. 61(10), 1-23. Consultado en <http://www.vientosur.info/documentos/Medioambiente.pdf> (22 de julio 2017).
- Friedrich, T. and Kassam, A. (2011). Mechanization and the Global Development of Conservation Agriculture. Conservation Agriculture 2011, 23rd Annual SSCA Conference, Saskatoon, January 13, 2011. Consultado en: http://www.fao.org/ag/ca/CAPublications/SSCA_conference_2011.pdf (15 de marzo 2017)
- Friedrich, T. (2007). El papel de la ingeniería agrícola en el desarrollo de la agricultura de conservación. *IV Seminario Internacional de Ingeniería Agrícola de la Universidad Técnica de Manabí*, Portoviejo/Ecuador, 20-22/06/2007. Consultado en: http://www.fao.org/ag/ca/CA-Publications/Ingenieria_y_AC_2007.pdf (22 de marzo 2017)
- Gil R., J.A.; González S., E. J.; Veroz G., O.; Gómez A., M. y Sánchez R., F. (2017). Beneficios de la agricultura de conservación en un entorno de cambio climático. Asociación Española Agricultura de Conservación Suelos Vivos (AEACSV), Córdoba, España.
- Gil Ribes J. A., y Blanco Roldán G. L. (2004). Maquinaria utilizada en Agricultura de Conservación: Cultivos Herbáceos. En B. R. Gil Ribes (Ed.), *Tecnología y Sistemas en Agricultura de Conservación* (págs. 22.1-22.16). Córdoba, España: A.E.A.C.-S.V.
- Giller, Ken E., Ernst Witter, Marc Corbeels, and Pablo Tittonell. 2009. Conservation agriculture and smallholder farming in Africa: The heretics' view. *Field Crops Research*. Vol. 114, Núm. 1, June 2009.
- Giráldez, J.V. (2003). "*Evolución de las propiedades físicas del suelo y agricultura de conservación*". En: Gil, J.A. y De Prado, J.L. (Ed). *Agricultura de Conservación y Medidas Agroambientales*. Asociación Española Agricultura de Conservación/Suelos Vivos. Córdoba, 2: 9-14.
- Gleick, P. H., H. Cooley, and M. Morikawa. (2010). *The world's water 2008-2009: The biennial report on freshwater resources*. Island Press. Washington, DC, USA.
- González Sánchez, E. J., and Rodríguez Lizana, A. (2004). Agricultura de Conservación y medio ambiente. En Gil Ribes J.A, Blanco Roldán G.L, Rodríguez Lizana, A. (Eds.) *Tecnología y Sistemas en Agricultura de Conservación* (Primera ed., págs. 1.1-1.11). Córdoba, España: Asociación Española de Agricultura de Conservación- Suelos Vivos. A.E.A.C-A.V.
- González-Sánchez E.J., Ordóñez-Fernández R., Carbonell-Bojollo R., Veroz-González O. and Gil-Ribes J.A. (2012). Meta-analysis on atmospheric carbon capture in Spain through the use of conservation agriculture. *Soil Till.Res.* 122, 52-60.
- González-Sánchez E.J., Veroz-González O., Blanco-Roldán G.L., Carbonell-Bojollo R. (2015). A renewed view of conservation agriculture and its evolution over

- the last decade in Spain. *Soil and Tillage Research*. Volume 146, Part B, pp. 204–212
- Govaerts, Bram, Ken Sayre and Jozef Deckers. 2005. Stable high yields with zero tillage and permanent bed planting. *Field Crops Research* Vol. 94, Núm. 1, April 2004.
- Govaerts, Bram, Ken D. Sayre, Bart Goudeseune, Pieter De Corte, Kelly Lichter, Luc Dendooven, and Jozef Deckers. 2009. Conservation agriculture as a sustainable option for the central Mexican highlands.
- Govaerts B.; Verhulst N.; Castellanos-Navarrete A.; Sayre K.D.; Dixon J.; Dendooven L. (2009a). Conservation agriculture and soil carbon sequestration; between myth and farmer reality. *Crit Rev Plant Sci* 28:97–122
- Grupo Intergubernamental De Expertos Sobre El Cambio Climático, (2014): *Grupo de Trabajo II, Quinto informe*. Consultado en: https://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar5/wg2/ar5_wgII_spm_es.pdf (10 de septiembre de 2017).
- GTIS (Grupo técnico intergubernamental sobre los suelos). (2015). *Status of the World's Soil Resources (SWSR) – Main Report*. Roma.
- Houghton, R.A. (2012). Historic changes in terrestrial carbon storage. *En: R. Lal, K. Lorenz, R.F. Hüttl, B.U. Schneider, J. von Braun, eds. Recarbonization of the biosphere: ecosystems and the global carbon cycle*, pp. 59–82. Springer
- <http://cambioclimaticoglobal.com/> (Consulta: enero 2016).
- http://www.conevyt.org.mx/cursos/cursos/cnaturales_v2/interface/main/recursos/antologia/cnant_4_13.htm. (Consulta: abril 2016).
- INEGI, (2014). Encuesta Nacional Agropecuaria. (ENA) Web. http://www.inegi.org.mx/saladeprensa/boletines/2015/especiales/especiales_2015_08_8.pdf (Consulta: julio 2016).
- INEGI. (2011). *Cuentame de México*. *En línea*: http://cuentame.inegi.org.mx/hipertexto/tipos_agua.htm (14 de febrero 2017).
- INEGI. (2013). *Aspectos Normativos y Metodológicos*. Consultado en: www.inegi.org.mx (11 de enero 2017).
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). (2013). Climate change 2013: The physical science basis. Contribution of working group I to the fifth assessment report of the intergovernmental panel on climate change. In Stocker, T. F., D. Qin, G. K. Plattner, M. Tignor, S. K. Allen, J. Boschung, A...and P.M. Midgley (eds.). Cambridge University Press. Cambridge, UK.
- Jácome, A. G., & del Almo Rodríguez, S. (1999). *Agricultura y Sociedad en México: diversidad, enfoques, estudios de caso*. México: Progreso.
- Jiménez González Carlos A, Maciel Pérez L. H., and Alfonso. (2004). Principios y fundamentos de labranza de conservación: Guía para su implementación. México: Folleto Técnico Núm. 24. Instituto Nacional De Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias, Campo Experimental Pabellón.

- Kassam, Amir, Friedrich T., Shaxson F., and Jules. (2009). The spread of Conservation Agriculture: justification, sustainability and uptake. *International Journal of Agricultural Sustainability*, 195-214.
- Kasting, J. F. (2004). Cuando el metano regulaba al clima. *Investigación y ciencia*.2 (26), 50-57.
- Knowler, Duncan, and Ben Bradshaw. 2007. Farmers' adoption of conservation agriculture: A review and synthesis of recent research. *Food Policy*. Vol. 32, Núm. 1, January 2006.
- Lal R. (2004). Soil carbon sequestration impacts on global climate change and food security. *Science* 304:1623– 1627
- Lal, R. (2003). Global potential of soil carbon sequestration to mitigate the greenhouse effect. *Crit. Rev. Plant Sci.* 22: 151-184.
- Lal, R. (2003). Of setting global CO₂ emissions by restoration of degraded soils and intensification of world agriculture and forestry. *Land Degrad. Develop.* 14: 309-322.
- Lal, R. (2010). Enhancing eco-efficiency in agro-ecosystems through soil carbon sequestration. *Crop science*, 50 (Suplemento 1), S: 120.
- Marenya, P. P., and C. B. Barrett. 2007. Household-level determinants of adoption of improved natural resources management practices among smallholder farmers in western Kenya. *Food Policy*. Vol. 32, Núm. 4, 2007
- Márquez, F., Giráldez, J.V., Repullo, M.A., Ordóñez, R., Espejo, A.J. Y Rodríguez, A. (2008). "Eficiencia de las cubiertas vegetales como método de conservación de suelo y agua en olivar". *VII Simposio del Agua en Andalucía. Baeza (España)*. pp. 631-641.
- Martínez Raya, A. (2005). Influencia del manejo de los suelos agrícolas en clima mediterráneo en el control de la erosión y en la disponibilidad de agua para las plantas. *Control de degradación de suelos*. ISBN 84-689-2620-5: 53-72.
- Montzka, S. A., E. J. Dlugokencky, and J. H. Butler. (2011). Non-CO₂ greenhouse gases and climate change. *Nature* 476: 43-50.
- Morales, J. S. (2003). *Problemas económicos de México*. México: McGraw-Hill.
- Naciones Unidas, (1992). *Convención Marco sobre Cambio Climático*. p.3 y 4.
- Ordóñez-Fernández, R, González-Fernández, P., Giráldez Cervera, J.V. y Perea-Torres, F. (2007). "Soil properties and crop yields after 21 years of direct drilling trials in southern Spain". *Soil and Tillage Research* 94: 47-54.
- Paustian, K., Babcock, B.A., Hatfield, J., Kling, C.L., Lal, R., McCarl, B.A...y Robertson, G.P. (2004). *Climate change and greenhouse gas mitigation: challenges and opportunities for agriculture*. Council on Agricultural Science and Technology. CAST.
- Paustian, K., Lehmann, J., Ogle, S., Reay, D., Robertson, G.P. y Smith, P. (2016). Climate-smart soils. *Nature*, 532, 49–57.

- PNUD. (2007). *Informe sobre Desarrollo Humano 2007-2008. La lucha contra el cambio climático: solidaridad frente a un mundo dividido*. Madrid: Autor.
- PNUMA. (1999). *Perspectivas del Medio Ambiente Mundial 2000; Panorama General*. Nairobi, Kenya: Autor.
- Porter, J.R., Xie, L., Challinor, A.J., Cochrane, K., Howden, S.M., Iqbal, M.M...y Travasso, M.I. (2014). Food security and food production systems. *In: C.B. Field, V.R. Barros, D.J. Dokken, K.J. Mach, M.D. Mastrandrea, T.E. Bilir, M...y L.L. White, (eds). Climate Change 2014. Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part A: Global and Sectoral Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge, Reino Unido y Nueva York, NY, EEUU, University Press.
- Prior, S. A.; Reicosky, D. C.; Reeves, D. W.; Runion, G. B.; Raper, R. L. (2000). Residue and tillage effects on planting implement- induced short-term CO₂ and water loss from a loamy sand soil in Alabama. *Soil and Tillage Research* 54:197-9.
- Programa De Las Naciones Unidas Para El Medio Ambiente, (2009). *Tratados Internacionales para la Protección de la Capa de Ozono*. Consultado en: <http://www.pnuma.org/ozono/Documentos/DiaOzono/tratados%20internacionales%20ozono.pdf> (12 de septiembre de 2017).
- R. Carbonell-Bojollo, R.; Gonzalez-Sanchez, E. J.; Veroz-Gonzalez, O.; Ordonez-Fernandez, R. (2011). Soil management systems and short term CO₂ emissions in a clayey soil in southern Spain. *Science of the Total Environment* 409: 2929-2935.
- Ramírez-López, Alejandro; Beuchelt, Tina Désirée; Velasco-Misael, Melchor; (2013). Factores de adopción y abandono del sistema de agricultura de conservación en los Valles Altos de México. *Agricultura, Sociedad y Desarrollo*, num. Abril-Junio, pp. 195-214
- Reicosky, D. C. and Archer, D. W. (2007). Moldboard plow tillage depth and short-term carbon dioxide release. *Soil and Tillage Research*. 94: 109-121.
- Robertson, P. (2004). Abatement of nitrous oxide, methane, and other non-CO₂ greenhouse gases: The need for a system approach. pp. 493-506. *In: C. R. Field and M. R. Raupach. (eds.). The Global Carbon Cycle Integrating Humans, Climate, and the Nature World*. Scope 62. Island Press. Washington, DC, USA.
- SAGARPA. (2007). *Programa Sectorial de desarrollo Agropecuario y Pesquero 2007-2012*. México: SAGARPA.
- SAGARPA. (2008). *Sistema de información agropecuaria de consulta 1980-2008*. México.
- Santoyo Cuevas E. (2014). *Agricultura de Conservación, tecnología con futuro en el Estado de México*. México: Secretaria de Desarrollo Agropecuario. SEDAGRO_ICAMEX.

- Saynes S., V., J. D. Etchevers B., F. Paz P y L. O. Alvarado C. (2016). Emisiones de gases de efecto invernadero en sistemas agrícolas de México. *Terra Latinoamericana* 34: 83-96.
- Scharlemann, J.P., Tanner, E.V., Hiederer, R. y Kapos, V. (2014). Global soil carbon: understanding and managing the largest terrestrial carbon pool. *Carbon Management*, 5: 81-91.
- Smith, P., Martino, D., Cai, Z., Gwary, D., Janzen, H., Kumar, P...y Smith, J. (2008). Greenhouse gas mitigation in agriculture, *Philosophical Transactions of the Royal Society. R. Soc. B*, 363: 789–813.
- Soil Survey Staff, (1999). Soil Taxonomy. A Basic System of Soil Classification for Making and Interpreting Soil Surveys. USDA-NRCS, Washington, DC.
- Solomon S, Quin D, Manning M, Chen Z, Marquis M, Averyt K, et al. (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
- Sommer, Bossio, D. (2014). Dynamics and climate change mitigation potential of soil organic carbon sequestration. *Journal of Environmental Management*, 144: 83-87.
- Stewart C, Plante A, Paustian K, Conant R, Six J. (2008). Soil Carbon Saturation: Linking concept and measurable carbon pools. *SSSAJ* 72:379–392.
- Taylor, J. E. (2012). *Farm Foundation*. Consultada en: <http://www.farmfoundation.org/naamic/cancun/taylor.pdf> (04 de marzo 2017)
- Tommasino, H., Foladori, G., & Taks, J. (2005). La crisis ambiental contemporánea. En Foladori, G. & Pierri, N. (Ed.), *¿Sustentabilidad? Desacuerdos sobre el desarrollo sustentable* (pp. 9-26). México: Universidad Autónoma de Zacatecas - Porrúa.
- Towery, D. (1998). "No-till's impact on water quality, p-17- 26". In 6th Argentine National Congress of Direct Drilling (Aapresid), Mar de Plata, Argentina, p.17-26.
- Vitousek, P. M.; Mooney; H. A.; Lubchenko, J.; Mellillo, J. M. (1997). Human domination of Earth's ecosystems. *Science, New Series*, Vol. 277, No. 5325 (Jul 25, 1997), 494-499,
- Wall, P. C., 2007. Tailoring conservation agriculture to the needs of small farmers in developing countries: An analysis of issues. *Journal of Crop Improvement*. Vol. 19, Núm. 1-2, 137–155.
- Wise, T. A., & Nadal, A. (2010). *Los costos ambientales de la liberalización agrícola: El comercio entre México y Estados Unidos en el marco del NAFTA*, de Globalización y medio Ambiente: Los costos desde las Américas. Consultado en: <http://ase.tufts.edu/gdae/pubs/rp/wg/NadalyWise.pdf> (04 de marzo 2017).