



BENEMÉRITA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE PUEBLA

---

ESCUELA DE BIOLOGÍA

“Evaluación de los servicios de agrobiodiversidad y carbono almacenado de los sistemas agroforestales de la zona Iztaccíhuatl-Popocatepetl”

Tesis que para obtener el título de  
BIÓLOGO

PRESENTA:

Julio Cesar Flores Cesareo

TUTOR: Angel Bustamante González



Diciembre 2014

# ÍNDICE

<b>RESUMEN</b> .....	1
<b>I. INTRODUCCIÓN</b> .....	2
1.1 REVISIÓN DE LITERATURA.....	6
1.1.1 Sistemas agroforestales, una alternativa en el cuidado ambiental.....	6
1.1.2 Los servicios ambientales como estrategia de conservación.....	9
1.1.2.1 La captura y secuestro de carbono como servicio ambiental .....	11
1.1.2.2 Los sistemas agroforestales como estrategia actual en la reducción de emisiones de carbono .....	14
1.1.2.3 Un servicio ambiental poco valorado, biodiversidad.....	15
1.1.2.4 La agrobiodiversidad, un caso especial de diversidad biológica .....	18
1.1.3 Incorporación de los servicios ambientales en las políticas de conservación.....	21
1.1.3.1 Captura y almacenamiento de carbono, el pago por servicio ambiental más reconocido en sistemas agroforestales.....	24
1.1.3.2 Agrobiodiversidad, el servicio ambiental menos reconocido en el esquema de PSA .....	26
1.1.4 Cómo calcular carbono almacenado en sistemas agroforestales .....	27
1.1.5 Cómo evaluar biodiversidad, y su aplicación para agrobiodiversidad.....	30
1.2 Antecedentes.....	33
1.2.1 Estudios sobre servicios de captura de carbono.....	33
1.2.2 Estudios sobre servicios de agrobiodiversidad .....	36
<b>II. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA</b> .....	38
<b>III. PREDICCIÓN Y OBJETIVOS</b> .....	41
3.1 Objetivos .....	41
3.2 Predicción .....	41
<b>IV. MATERIAL Y MÉTODOS</b> .....	42
4.1 Descripción del área de estudio.....	42
4.2 Metodología .....	48
<b>V. RESULTADOS Y DISCUSIÓN</b> .....	53
5.1 Superficie con sistemas agroforestales .....	53

5.2 Carbono almacenado .....	55
5.3 Agrobiodiversidad .....	61
VI. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....	68
VII. LITERATURA CITADA .....	69
VIII. ANEXOS.....	77

## ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 1. CLASIFICACIÓN DEL SISTEMA AGROFORESTAL .....	7
FIGURA 2. COMPONENTES, FUNCIONES Y ESTRATEGIAS DE MEJORAMIENTO DE LA BIODIVERSIDAD EN AGROECOSISTEMAS .....	20
FIGURA 3. ESQUEMA DONDE SE MUESTRA LA DINÁMICA DE PAGO POR SERVICIOS AMBIENTALES ..	22
FIGURA 4. ESQUEMA DE LA CLASIFICACIÓN DE LOS MÉTODOS PARA MEDIR ALFA-DIVERSIDAD .....	31
FIGURA 5. ESQUEMA DE LA CLASIFICACIÓN DE LOS MÉTODOS PARA MEDIR BETA-DIVERSIDAD .....	31
FIGURA 6. ZONA IZTACCÍHUATL-POPOCATÉPETL EN EL ESTADO PUEBLA (ELABORACIÓN PROPIA).	42
FIGURA 7. MUNICIPIOS DE LA ZONA IZTACCÍHUATL-POPOCATÉPETL (ELABORACIÓN PROPIA). .....	43
FIGURA 8. TIPO DE CLIMA PRESENTE EN LA ZONA DE ESTUDIO (ELABORACIÓN PROPIA). .....	43
FIGURA 9. TEMPERATURA MÍNIMA DE LA ZONA DE ESTUDIO (ELABORACIÓN PROPIA). .....	44
FIGURA 10. TEMPERATURA MÁXIMA DE LA ZONA DE ESTUDIO (ELABORACIÓN PROPIA). .....	44
FIGURA 11. TEMPERATURA MEDIA DE LA ZONA DE ESTUDIO (ELABORACIÓN PROPIA). .....	45
FIGURA 12. RANGOS DE PRECIPITACIÓN TOTAL PARA LA ZONA DE ESTUDIO (ELABORACIÓN PROPIA). .....	45
FIGURA 13. PRECIPITACIÓN MEDIA PARA LA ZONA DE ESTUDIO (ELABORACIÓN PROPIA).....	46
FIGURA 14. TEXTURA DE SUELO PARA LA ZONA DE ESTUDIO (ELABORACIÓN PROPIA). .....	46
FIGURA 15. TIPO DE SUELO DE LA ZONA DE ESTUDIO (ELABORACIÓN PROPIA). .....	47
FIGURA 16. USO DE SUELO EN SAN NICOLÁS DE LOS RANCHOS (ELABORACIÓN PROPIA).....	47
FIGURA 17. SITIOS DE MUESTREO EN EL MUNICIPIO DE SAN NICOLÁS DE LOS RANCHOS (ELABORACIÓN PROPIA).....	49
FIGURA 18. FORMA Y TAMAÑO DE LA PARCELA DE MUESTREO.....	52
FIGURA 19. UBICACIÓN DE LOS SISTEMAS AGROFORESTALES EN LA ZONA IZTACCÍHUATL- POPOCATÉPETL (ELABORACIÓN PROPIA) .....	53
FIGURA 20. UBICACIÓN DE LOS SISTEMAS AGROFORESTALES DE LA SUBZONA 1 (ELABORACIÓN PROPIA) .....	54
FIGURA 21. UBICACIÓN DE LOS SISTEMAS EN LA SUBZONA 2 (ELABORACIÓN PROPIA) .....	54
FIGURA 22. ESPECIES Y NÚMERO DE INDIVIDUOS DE FRUTALES .....	62
FIGURA 23. NÚMERO DE INDIVIDUOS POR SITIO DE MUESTREO.....	63
FIGURA 24. NÚMERO DE ESPECIES POR CADA SITIO DE MUESTREO .....	64

## ÍNDICE DE TABLAS

TABLA 1. DESCRIPCIÓN DEL SITIO DE MUESTREO .....	48
TABLA 2. ECUACIONES ALOMÉTRICAS USADAS.....	51
TABLA 3. CARBONO ALMACENADO (T/HA) EN LOS SITIOS .....	58
TABLA 4. CARBONO ALMACENADO ESTIMADO PARA LOS SISTEMAS AGROFORESTALES DE FRUTALES EN LA REGIÓN IZTACCÍHUATL-POPOCATÉPETL.....	59
TABLA 5. VALOR DE MERCADO DEL CARBONO ALMACENADO EN LOS SISTEMAS AGROFORESTALES DE LA REGIÓN IZTACCÍHUATL-POPOCATÉPETL.....	60
TABLA 6. ESPECIES DE ÁRBOLES FRUTALES ENCONTRADOS.....	62
TABLA 7. ÍNDICES DE DIVERSIDAD DE LAS ESPECIES DE ÁRBOLES FRUTALES .....	65
TABLA 8. VALORES DE LOS ÍNDICES DE DIVERSIDAD CALCULADOS PARA LA ZONA.....	66

## ANEXOS

ANEXO 1. CARBONO ESTIMADO (T) POR LOS MODELOS POR PARCELA DE MUESTREO (500 M <sup>2</sup> ) .....	77
ANEXO 2. CARBONO ESTIMADO AJUSTADO CON ESTIMACIONES DE DIÁMETROS MENORES DE 10 CM POR PARCELA DE 500 M <sup>2</sup> .....	78
ANEXO 3. NÚMERO DE INDIVIDUOS Y ESPECIES POR PUNTO DE MUESTREO, ADEMÁS DE LA CANTIDAD DE INDIVIDUOS POR HECTÁREA .....	79

## RESUMEN

La presente investigación tuvo como objetivo evaluar los servicios ambientales de captura de carbono y agrobiodiversidad de los sistemas agroforestales de la zona Iztaccíhuatl-Popocatépetl, en el estado de Puebla, México. Se estimó la biomasa aérea utilizando cinco ecuaciones alométricas, a partir del diámetro a la altura de pecho (DAP); una de ellas se utilizó para diámetros menores de 10 cm. El carbono almacenado se estimó como el 49.5% de la biomasa. La biodiversidad se evaluó a través de índices de diversidad de las especies arbóreas frutales (agrobiodiversidad). Se utilizaron parcelas de 500 m<sup>2</sup> para la toma de datos de DAP y para identificar las especies y números de individuos (árboles frutales) presentes. Se estimó un promedio de carbono almacenado en el componente arbóreo de 53.91 t/ha a 106.87 t/ha. Los índices de diversidad promedio obtenidos para los árboles frutales fueron: riqueza de especies de 8, índice de Simpson de 0.184, inverso de Simpson de 0.816, índice de Shannon-Wiener de 1.811 y equidad de Pielou de 0.871. Se concluyó que la zona tiene niveles importantes de carbono almacenado, encontrándose en los rangos reportados para otros sistemas agroforestales, y debe ser mantenido como sumidero y proveedor importante de este servicio. La diversidad de árboles frutales fue baja, comparado con lo reportado para sistemas agroforestales similares en otras partes del mundo.

## I. INTRODUCCIÓN

Actualmente, la tierra sufre grandes presiones por la alta demanda de sus recursos, el cambio en el uso de suelo, contaminación de agua, aire y suelo, fragmentación del paisaje, urbanización e industrialización y la introducción de especies no autóctonas de la región. Dichas presiones se combinan con las generadas de manera natural en cada ecosistema y a lo que se le ha nombrado como “cambios mundiales” (IPCC, 2002).

Los llamados servicios ambientales (SA) han surgido como una estrategia para mitigar el impacto por dichos cambios mundiales. Myers (1996) los define como: “Cualquier atributo funcional de los ecosistemas naturales; los cuales son de gran beneficio para toda la humanidad”. A pesar de ello, desde hace varios años la pérdida de ecosistemas es muy alta y acelerada, llevando a que casi dos terceras partes de los ecosistemas en el mundo se encuentran amenazados y con ello los servicios ambientales que pueden ofrecer (Millennium Ecosystem Assessment, 2005).

Ruiz *et al.* (2007) reconocen cuatro principales servicios ambientales: 1) biodiversidad, 2) fijación de carbono, 3) ciclos hidrológicos y 4) educación/ocio. Sin embargo, dependiendo del país, los servicios ambientales que se reconozcan serán diferentes. A partir del momento en que se reconocen estos servicios como estrategia para el cuidado ambiental, se crea el pago por servicios ambientales (PSA), buscando recompensar económicamente a los dueños de los terrenos donde se desarrollen estos servicios. Se requiere considerar cuatro puntos básicos para un programa de pago de servicios ambientales (Mayrand y Paquin, 2004; Wunder, 2006; Ruiz *et al.*, 2007; Wunder *et al.*, 2007; CONAFOR, 2011):

- La transacción debe ser de manera voluntaria.
- Que esté definido el bien que se ofrece.
- Que exista un comprador y a su vez un proveedor.

- Que ese proveedor se comprometa a seguir proveyendo de ese bien.

Los sistemas forestales fueron los primeros en donde se desarrollaron este tipo de esquemas y estimaciones, debido al interés por la conservación de los sistemas naturales. Sin embargo, sistemas de producción como los agroforestales también pueden brindar este tipo de servicios. Un sistema agroforestal está bien definido porque se reconoce como un sistema de manejo y aprovechamiento del ecosistema, en donde son utilizadas especies leñosas en asociación con cultivos agrícolas o animales en el mismo territorio, de manera simultánea o en una secuencia temporal (López y Vargas, 1998; Navia *et al.*, 2003; Ospina, 2004; Espinoza *et al.*, 2012).

El servicio de captura y almacenamiento de carbono ha sido ampliamente estudiado en los sistemas agroforestales por el papel que tiene el componente arbóreo. Una forma de evaluar ese carbono almacenado es por medio de métodos indirectos: los cuales implican el uso de algunos tipos de modelos de biomasa y carbón (Ortiz y Riascos, 2006; Sanquetta, 2013).

La Secretaría del Convenio sobre la Diversidad Biológica (2010) define la biodiversidad como: “la variabilidad de organismos vivos de cualquier fuente, incluidos, entre otras cosas, los ecosistemas terrestres y marinos, otros ecosistemas acuáticos y los complejos ecológicos de los que forman parte. Además, comprende la diversidad dentro de cada especie, entre las especies y los ecosistemas”. En el caso de los sistemas agroforestales, la biodiversidad es llamada agrobiodiversidad. Ocampo (2012) la define como: “el vínculo entre el sector agrícola productivo con el tema de biodiversidad, en todos sus niveles“. La conservación de la diversidad biológica agrícola es importante porque el mercado demanda pocas especies, causando la pérdida de la diversidad generada en el campo durante miles de años. Además, la producción agrícola actual provoca el deterioro del suelo, contribuyendo a la liberación de carbono a la atmosfera. La biodiversidad de estos sistemas muestra una alta presencia de insectos, y por lo tanto es un reflejo de la importancia de este servicio ambiental. Altieri y Nicholls (2009) estudiaron dichos beneficios,



resaltando la importancia que tienen las interacciones entre los insectos para el control de plagas. Altieri (1999) sugiere los puntos que deben tomarse al momento de establecer un sistema agroforestal, en especial si se quiere tener altos niveles de diversidad de insectos. Sin embargo, también reconoce que deben de tomarse en cuenta las características de cada región, como lo son el clima, la geografía, los cultivos y la vegetación local.

Las técnicas y métodos utilizados para el estudio de la agrobiodiversidad pueden ser los métodos desarrollados para sistemas naturales, los cuales se han utilizado desde hace mucho tiempo, como la riqueza de especies, el índice de Simpson, el índice de Shannon-Wiener y el índice de equidad de Pielou (Moreno, 2001). Por otro lado, Leyva y Lores (2012) sugieren un nuevo método que mide las propiedades de un sistema de producción; considerando el valor utilitario, el aporte a la alimentación humana y animal, y del recurso suelo, método aún no validado, debido a su reciente creación. Sin embargo, hacen falta ecuaciones específicas para los sistemas agroforestales, pues las existentes son para el componente forestal y no el agrícola (CITA, 2008).

Nuevas estrategias, como el desarrollo de sistemas agroforestales, pueden contribuir también a la mitigación de impactos globales, como es el cambio climático. Abdi (2009) abordó el estudio del impacto que tiene el cambio climático sobre la agrobiodiversidad en las regiones semiáridas de Etiopía. Encontró que la agricultura tradicional, con su gran diversidad, contribuía a las estrategias de adaptación ante el aumento en la sequía, gracias a que los agricultores también cambiaron sus estrategias de cultivo. Como resultado, el gobierno creó un enfoque de conservación de recursos fitogenéticos en Etiopía, basado en una dinámica con los agricultores. Actualmente, es uno de los mejores modelos en África, basados en la comunidad, para la conservación *in situ* y combate contra el cambio climático.

La región Iztaccíhuatl-Popocatepetl, en el estado de Puebla, aún mantiene la tradición de producción intercalada de árboles frutales y cultivos anuales. Sin embargo, no se conoce con precisión qué tanto contribuyen estos sistemas en la conservación de la agrobiodiversidad de los agroecosistemas templados-fríos. Tampoco se tiene claro qué tanto contribuyen a la captura y almacenamiento de carbono, a través de su componente arbóreo, principalmente por la falta de investigaciones realizadas o publicadas para la zona. Por ello, en este estudio se realiza el cálculo y aportación los servicios de agrobiodiversidad y almacenamiento de carbono de los sistemas agroforestales de la región Iztaccíhuatl-Popocatepetl.

## 1.1 REVISIÓN DE LITERATURA

### 1.1.1 Sistemas agroforestales, una alternativa en el cuidado ambiental

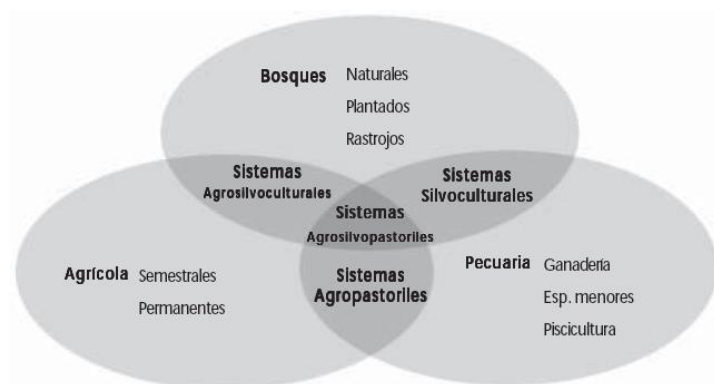
Un sistema agroforestal es un sistema de manejo y aprovechamiento del ecosistema. En él se utilizan especies leñosas asociadas con cultivos agrícolas o animales en el mismo territorio, de manera simultánea o en una secuencia temporal (López y Vargas, 1998; Navia *et al*, 2003; Ospina, 2004; Espinoza *et al.*, 2012). El término de agroforestería no se conocía antes de 1977 (Ospina, 2004). Sin embargo, se han rastreado sistemas con características agroforestales desde la edad media en Europa, donde se acostumbraba tumbar el bosque para establecer cultivos y se sembraban especies arbóreas antes, después o durante el periodo de los cultivos. Es a partir de 1977 que se desarrollaron líneas de investigación sobre la agroforestería, tales como asociación de árboles con cultivos alimenticios y árboles maderables fijadores de nitrógeno en pasturas (Mendieta y Rocha, 2007).

Los sistemas agroforestales deben abordarse desde un punto de vista biofísico, económico, social, cultural, ambiental, institucional y político. Por esto, se considera que la agroforestería es de carácter multidisciplinario. Además, este sistema es complejo al incorporar más de un componente en su estructura, con la particularidad de que siempre se presentará la cobertura arbórea, sea cual sea la combinación (Escobar *et al.*, 2007).

Los sistemas agroforestales se clasifican (Figura 1) de acuerdo a la combinación de sus componentes como:

- 1) Sistemas agrosilvoculturales. Es la combinación entre árboles y cultivos temporales. Principalmente se logra el aumento en la producción, con ayuda de interacciones con el componente arbóreo.

- 2) Sistema agrosilvopastoriles. Es la combinación de árboles, cultivos y ganadería. Se encuentra en áreas de pequeños productores. Además, se considera fundamental para la seguridad alimentaria.
- 3) Sistemas silvoculturales. Es la combinación de árboles y ganado.
- 4) Sistemas agropastoriles. Es la combinación de cultivos y ganado (Navia *et al.*, 2003).



Fuente: Navia *et al.* (2003)

**Figura 1. Clasificación del sistema agroforestal**

Por otro lado, Ospina (2004) propuso una clasificación de los sistemas agroforestales de acuerdo a los cuatro criterios siguientes:

- 1) Estructurales: los cuales hacen referencia a la naturaleza y al acomodo espacio-temporal de los componentes de las tecnologías agroforestales.
- 2) Funcional: según los productos y servicios principales de las tecnologías agroforestales.
- 3) Ambiental: se refieren a la selección de las tecnologías agroforestales de acuerdo con los principios de conservación local o regional.
- 4) Criterio socioeconómico: considerando el nivel tecnológico y de producción de cada tecnología agroforestal.

También se debe de considerar sea cual sea la clasificación, los siguientes criterios:

- 1) la elección de especies, puesto que algunos requieren mayor labor de cosecha y genera una perturbación más alta del suelo y 2) la densidad de las plantaciones de

los árboles, debido a que de esto depende el número de rotación de cultivos (Mendieta y Rocha, 2007).

Estos sistemas de producción son considerados como alternativas para promover la conservación. Se han estudiado las ventajas y aportes que estos producen a la causa del cuidado del ambiente. Según Rolón (2009), ellos contribuyen a:

- 1) La fijación simbiótica de nitrógeno a través de nódulos formados por asociación con bacterias; especialmente del genero *Rhizobium*.
- 2) La protección contra la erosión; utilizando la copa, la hojarasca y el sistema radicular.
- 3) La modificación de los microclimas; en cuanto a luz, temperatura, humedad, lluvia y viento.
- 4) El uso complementario de recursos por los diferentes componentes del sistema.
- 5) La incidencia y el control de plagas.

Es por esto, que cada día se reconoce más la importancia de los sistemas agroforestales como una alternativa para el cuidado ambiental. Sin embargo, aún no se le ha prestado la atención suficiente y los trabajos encaminados a la evaluación de los servicios ambientales que brindan son muy limitados. En especial, faltan más estudios sobre sus métodos (CITA, 2008).

Los árboles forman parte central dentro de los sistemas agroforestales, y junto con el resto de sus componentes obtenemos beneficios ecológicos (SA) como: reciclaje de nutrientes, regulación de microclima y procesos locales hidrológicos, desintoxicación de productos químicos y evita la presencia de organismos indeseables (Altieri, 1999). Estos sistemas se han convertido en el foco de atención en la búsqueda de alternativas racionales, autosustentables y compatibles con el medio ambiente. Salmón *et al.* (2012) destacan que los campesinos han logrado conservar y potenciar los agroecosistemas diversificándolos, integrados y sustentables; manejándolos con recursos locales, fuentes alternativas de energía y una utilización mínima de insumos.

Un caso especial de los sistemas agroforestales son los huertos, donde el componente arbóreo está constituido casi siempre por especies frutales. Navia *et al.* (2003) clasifican los huertos como un sistema agroforestal de tipo agrosilvopastoril, combinando árboles con cultivos y ganadería. Son clasificados de tipo agrosilvocultural por Mendieta y Rocha (2007). Los huertos obedecen a la satisfacción de las demandas del hogar antes que el de la venta y cuenta con los beneficios de menor obra de mano (cuando se utiliza es familiar). Económicamente resisten las fluctuaciones del mercado y ecológicamente por su alta diversidad son muy parecidos a los sistemas naturales, considerándose como uno de los sistemas más importantes y completos. Esta importancia fue estudiada y comprobada por Trinh *et al.* (2003), quienes observaron que los huertos familiares son utilizados principalmente para la seguridad alimentaria familiar, contribuyendo a la conservación de especies nativas y de uso cultural.

### **1.1.2 Los servicios ambientales como estrategia de conservación**

Baggethun *et al.* (2010) hicieron una revisión histórica del concepto de servicios ambientales. Encontraron que en 1970 se reconocieron los beneficios que ofrecen los ecosistemas agroforestales junto con un incremento del interés público. En 1990 comienzan las investigaciones de los métodos para su estimación, y como consecuencia, su aparición en la literatura. Myers (1996) por ejemplo, definió los servicios ambientales como: “Cualquier atributo funcional de los ecosistemas naturales, los cuales son de gran beneficio para toda la humanidad”. Sin embargo, nunca se estableció una única definición y a lo largo de su historia se han creado otras. Por ejemplo, también se definen los servicios ambientales como “todos aquellos beneficios que directa o indirectamente el hombre obtiene de los ecosistemas para su bienestar y desarrollo; esto incluye a los habitantes de las ciudades” (Challenger, 2009).

Los servicios ambientales son muy importantes para el desarrollo de una mejor calidad de vida. Esto incluso se verá reflejado en los habitantes de las grandes

ciudades, donde muy difícilmente podemos encontrar alguno de estos servicios. A pesar de ello, casi dos terceras partes de los sistemas naturales en el mundo se encuentran amenazados, y con ellos los servicios que estos pueden ofrecer (Millennium Ecosystem Assessment, 2005). Es por eso que Challenger (2009) señala que un mundo sin sistemas naturales será un mundo sin servicios ambientales.

Existen cuatro principales servicios, que son los que han recibido más atención y han tenido más desarrollo en materia de mediadas para su conservación. Estos son:

- 1) Biodiversidad.
- 2) Fijación de carbono.
- 3) Ciclos hidrológicos.
- 4) Educación/Ocio (Ruiz *et al.*, 2007).

Mayrand y Paquin (2004) reconocen el servicio de belleza paisajística (sustituyendo el de educación/ocio), el cual tiene un menor desarrollo, pero, que en el ámbito nacional como internacional tienen demanda, en especial para la industria del ecoturismo. Existen paquetes de servicios ambientales, los cuales se dan cuando en una zona convergen más de un servicio, lo cual lo hacen de mayor facilidad en su gestión y menor costo de transacción en el esquema de pago por servicios ambientales.

Millennium Ecosystem Assessment (2005) propone otra clasificación: 1) servicios de soporte, que hacen referencia a los servicios necesarios para la producción de los demás servicios ambientales (formación del suelo, ciclos biogeoquímicos y producción primaria); 2) servicios de regulación que son los beneficios de la regulación de los procesos de los ecosistemas (regulación del clima, control de enfermedades y regulación del agua); 3) servicios de suministro que son productos de los ecosistemas (alimento, agua, combustible y fibras), y 4) servicios culturales que se refieren a beneficios no materiales obtenidos de los ecosistemas (espirituales y religiosos, recreación y ecoturismo, estéticos y educativos). Sin embargo, las

clasificaciones de Mayrand y Paquin (2004) y Ruiz *et al.* (2007) son las más comunes debido a su mayor facilidad para su comercialización.

El reconocimiento de los servicios ambientales depende de la legislación de cada país. Aunque se reconozcan cuatro a nivel mundial, en México específicamente se reconoce que los principales servicios son:

- 1) Captación, infiltración y provisión de agua de calidad y en la cantidad suficiente.
- 2) Conservación de la biodiversidad.
- 3) Mitigación de los efectos del cambio climático mediante la captura y almacenamiento de carbono.
- 4) Retención y formación de suelo.
- 5) Belleza escénica (CONAFOR, 2011).

#### **1.1.2.1 La captura y secuestro de carbono como servicio ambiental**

El efecto invernadero es un proceso que se da de forma natural. Sin embargo, el hombre ha acelerado y roto el equilibrio que existe en él, provocando el aumento en el calentamiento global por medio de los gases de efecto invernadero (GEI), los cuales retienen la radiación térmica, producto de la radiación solar que entra hasta la tierra y la calienta. El dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) es uno de esos gases, donde el carbono tiene un papel importante. Se calcula que la mayor emisión de dióxido de carbono a nivel mundial es producida por el uso de combustibles fósiles. Aunque alrededor del 20 – 25 % proviene de la agricultura, la explotación comercial del bosque y el incremento en la oxidación de la materia orgánica en los suelos (Ortiz y Riascos, 2006). También, el carbono es liberado por cambio de uso de tierra e incendios forestales, los cuales son producto de procesos naturales y la actividad humana (Bonilla, 2009).



A nivel mundial se encuentran depósitos de dicho gas los cuales se encuentran manteniendo una relación de flujo entre ellos. Cualquier desequilibrio inmediatamente se reflejara en el CO<sub>2</sub> atmosférico. Los depósitos de carbono son:

- 1) Los océanos con 38,000 Gt (mil millones de toneladas).
- 2) El suelo con 1,500 Gt.
- 3) La atmosfera con 750 Gt.
- 4) Las plantas con 560 Gt (Casanova *et al.*, 2011).

Aristizabal y Guerra (2002) hacen notar que estas estimaciones no son exactas, pues no se ha llegado a tener un consenso en las cantidades. Sin embargo, se especula que el océano tiene 50 veces más concentración de carbono que la atmosfera. La vegetación y el suelo tienen tres veces y media más que la atmosfera; aunque la del suelo cuenta con una concentración mayor que la vegetación. La vegetación tiene las concentraciones más bajas en la captura de carbono. Sin embargo, es importante debido a la gran rapidez con la que se pierde la cobertura vegetal en el planeta y a la relación que lleva está pérdida con el deterioro del suelo y la liberación de sus depósitos. La capacidad que tenga un sistema forestal de secuestrar carbono depende de dos componentes: el área total de esos ecosistemas y el número de árboles por unidad de área. Además, la cantidad que ya tenga almacenada depende de la edad de los sistemas (Roncal *et al.*, 2008). La reserva de carbono en bosques ha decrecido en 1.1 Gt anualmente, debido a la deforestación principalmente. En México, se reconoce que entre 2000 y 2005 la deforestación fue del 0.4% según datos de la FAO (Pérez *et al.*, 2009), lo que contribuye a la emisión de gases de efecto invernadero. La política ambiental es un área de oportunidad para generar incentivos a personas de áreas rurales y reducir las fuentes de emisiones de gases de CO<sub>2</sub> (Kindermann *et al.*, 2006).

México se encuentra dentro de los 15 países con mayores emisiones de gases de efecto invernadero a nivel mundial. Aporta 444 millones de toneladas, lo cual representa el 2% de la emisión mundial (Casanova *et al.*, 2011). Hernández *et al.*

(2012) explicaron que los primeros intentos por mitigar este impacto iniciaron en 1988. En ese año, se creó el IPCC (Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático) para evaluar la información científica sobre el tema. Para 1990, este organismo creó el protocolo de Montreal, donde se estipularon los lineamientos para la mitigación de gases de efecto invernadero. Para 1992 se adoptó la UNFCCC (Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático) que entró en vigor hasta 1994. Los países involucrados se reúnen cada año para tratar el tema. En 2005 se creó el protocolo de Kioto.

Los países industrializados se comprometieron a reducir sus emisiones de gases de efecto invernadero siguiendo los lineamientos en el protocolo de Kioto. Propusieron reducir las emisiones en un 5.2 %, en relación a sus emisiones de 1990 y realizar una evaluación en 2008 - 2012. Los mecanismos para lograrlo son (Ortiz y Riascos, 2006):

- 1) Comercio de emisiones (CE), refiriéndose a la transferencia de reducciones de carbono no usadas. Esta transferencia se da entre países industrializados que estén por debajo de lo permitido con países industrializados que han excedido lo permitido.
- 2) Implementación conjunta (IC), donde dos países se unen para no sobrepasar el límite en conjunto. Un país podrá tener más de su límite pero el otro tendrá menos, de forma que al unirse no sobrepasan la suma de los dos límites.
- 3) El mecanismo de desarrollo limpio (MDL), que permite proyectos encaminados a fijar, reducir o evitar emisiones de gases de efecto invernadero. Los países en desarrollo obtienen beneficios adicionales a través de la venta de certificados de emisiones reducidas (CER's).

El mecanismo de desarrollo limpio (MDL) es uno al cual puede acceder América Latina. En el de reforestación, la tierra deberá ser considerada sin bosque antes de 1990 y la actividad a implementar debe generar un bosque. A pesar de ello, este bosque debe de cumplir con una cobertura mínima de copa de 10-30%, una

superficie de 0.5 a 1 hectárea y una altura de entre 2 a 5 metros (Ordoñez *et al.*, 2011).

Otro programa para la mitigación de las emisiones de carbono es el denominado REDD+ (Reducción de Emisiones por Deforestación y Degradación Forestal). Dicho programa contribuye a la conservación, el manejo sustentable de bosques y al almacenamiento de reservas de carbono. Su éxito se basa en ser económicamente viable y que el pago sea suficiente para cubrir el costo de oportunidad y costo de transacción (Barbier y Tesfaw, 2012).

#### **1.1.2.2 Los sistemas agroforestales como estrategia actual en la reducción de emisiones de carbono**

La incorporación del componente arbóreo le da estabilidad a estos sistemas de producción y se ha establecido como eje principal en su estructura. Los árboles cumplen la función de la captación y almacenamiento del carbono por medio de la fotosíntesis. Debido al papel que juega el dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) en el calentamiento global, las estrategias deben ir orientadas al mantenimiento y establecimiento de sistemas que cumplan esta función. También se deben buscar alternativas que reduzcan el impacto en las emisiones por cambio en uso de suelo, en especial en las zonas forestales, donde se está dando un cambio al uso agrícola. Chiroleu y Roussel (2013) proponen que la concentración de carbono puede aumentarse por medio de nuevos cultivos y nuevas prácticas de manejo.

Desde 1988, se inició la práctica de poner plantaciones forestales para la captura de carbono. La razón fue que una planta termoeléctrica produciría 14.1 millones métricos de toneladas de carbono en 40 años, por lo tanto, la CARE (organización no gubernamental que efectúa proyectos de carácter social en países pobres) desarrolló un megaproyecto que fijaría 11.2 millones de toneladas de ese carbono durante el mismo periodo (Aristizabal y Guerra, 2002). En 1994, en Chiapas (México) se llevó a cabo un proyecto para establecer sistemas agroforestales para la captura de

carbono, llamado Scolel'te (Roncal *et al.*, 2008). En dicho proyecto se estimó que en 25 años se capturaría 183 y 194 Mg C por ha<sup>-1</sup>. Después de ese proyecto se crearon otros como el de silvicultura comunitaria en la sierra norte de Oaxaca; que se basó en programas de forestación natural y mejoramiento comunitario. Mundialmente estos proyectos se reconocen como pioneros en cuanto a fijación de carbono.

El carbono capturado y almacenado en los sistemas agroforestales aún no es valorado en México. Tampoco existe un precio de mercado asignado al carbono fijado. Se especula que ese precio debe ser dado en base al costo de oportunidad del terreno utilizado. En estos sistemas es complicado, puesto que el cambio de una actividad productiva a otra muchas veces no puede cumplirse (Aristizabal y Guerra, 2002).

### **1.1.2.3 Un servicio ambiental poco valorado, biodiversidad**

La biodiversidad es resultado de patrones y procesos ecológicos en conjunto con el proceso evolutivo. Históricamente se explica por los procesos tales como: la diversificación genética y de especies, la extinción, la dinámica de los ecosistemas y las comunidades (Núñez *et al.*, 2003).

La Secretaria del Convenio sobre la Diversidad Biológica (2010) calculó que el bosque ocupa el 31% de la superficie terrestre. Además de que albergan más de la mitad de especies animales y vegetales, y se genera más de dos tercios de la producción primaria neta terrestre (transformación de energía solar a materia vegetal).

México está considerado como un país mega diverso, y junto con otros 16 concentran el 75% de las especies de plantas vasculares y animales terrestres (CONABIO, 2000). Esta diversidad se explica por la convergencia de dos grandes regiones biogeográficas: la Neártica y la Neotropical. Además, su ubicación geográfica, complejidad orográfica y geológica hacen que el 70.2 % del territorio

pueda presentar casi todos los tipos de vegetación natural terrestre (CONAFOR, 2011).

La diversidad biológica se ha clasificado en tres niveles (CONABIO, 2000; PNUMA, 2005):

- 1) Diversidad genética: que se refiere a la cantidad total de información y variación genética dentro de cada especie, se da entre especies y poblaciones.
- 2) Diversidad de especies: se reconoce como riqueza de especies y es la variedad existente entre los organismos vivos de un ecosistema.
- 3) Diversidad de ecosistemas: que se entiende como la diversidad de comunidades bióticas y los procesos ecológicos que suceden a este nivel.

Ñique (2010) reconoce esta misma clasificación, además de considerar una cuarta llamada diversidad funcional, que depende del papel o función que desempeñen y una quinta que se refiere a la diversidad cultural, la cual hace referencia a culturas humanas o étnicas. Al mismo tiempo, propuso otra clasificación que está estrechamente relacionada con las propiedades intrínsecas que pueden ser medidas:

- 1) Geográfico o biogeográfico (diversidad gamma que es la diversidad en un espacio regional).
- 2) Ecológico (diversidad alfa se refiere a la diversidad dentro de un área, diversidad beta es la determinación del cambio en la composición de especies a través de un gradiente fisiográfico).
- 3) Poblacional (diversidad intraespecífica, que es la variabilidad genotípica y fenotípica de los individuos).

El cambio climático afecta a la biodiversidad. El IPCC (2002) señaló que las principales consecuencias han sido: a) en las funciones de organismos individuales, su crecimiento y comportamiento, b) se han modificado las poblaciones en su tamaño y estructura y c) afecta la estructura y función de los ecosistemas como la

descomposición, ciclo de los nutrientes, flujo de agua, composición de la especie e interacción de las especies, y la distribución de los ecosistemas en el paisaje.

Los convenios de Río, derivados de las conferencias de las Naciones Unidas sobre el Medio Ambiente y el Desarrollo, fueron los primeros intentos para detener este desequilibrio y pérdida de la diversidad biológica. Comúnmente, se conoce como la Cumbre para la Tierra de Rio de Janeiro 1992 y entró en vigor en 1993. Este convenio lo reconocen 192 países y la Unión Europea. Dichos países, se comprometieron en 2002 para lograr en el 2010 una reducción significativa en la pérdida de la biodiversidad a nivel mundial, nacional y regional. Esperando contribuir en la reducción de la pobreza y en beneficio de todas las formas de vida en la tierra (Secretaría del Convenio sobre la Diversidad Biológica, 2010). La Convención para la Protección de la Fauna, Flora y Bellezas Escénica de los países de América (Washington, D.C 1940), el Convenio Internacional de las Maderas Tropicales (1983, reformado en Ginebra, Suiza, en enero de 1994), el Convenio de las Naciones Unidas sobre la Ley del Mar (Montego, Bay, 1982), la Convención sobre la Prevención de la Contaminación Marina por la Descarga de Desperdicios y otras Materias (Londres, D.F., Moscú y Washington, D.C, 1972) y el Tratado de Cooperación Amazónico (Manaos, Brasil, 1992) son otros ejemplos de las estrategias e intentos que se implementaron para la protección de la biodiversidad (PNUMA, 2005).

CONABIO (2000) explica la estrategia que adopta México respecto a la conservación. Dicho proyecto es nombrado como: “la estrategia nacional sobre biodiversidad en México” y el cual se basa en el cumplimiento de los objetivos acordados en el CDB (Convenio de las Naciones Unidas sobre la Diversidad Biológica). Para alcanzar los objetivos del proyecto se desarrollaron cuatro líneas: 1) protección y conservación; 2) valoración de la biodiversidad; 3) conocimiento y manejo de la información y 4) diversificación del uso.

#### **1.1.2.4 La agrobiodiversidad, un caso especial de diversidad biológica**

El hombre, al intervenir en ecosistemas con una estructura horizontal, vertical y con un equilibrio energético, los disminuye, al eliminar componentes del ecosistema original e interrumpir las relaciones energéticas que los mantenían (Vargas *et al.*, 2009). A pesar de ello, se considera que los sistemas agroforestales establecen relaciones entre cada uno de sus componentes, formando así una alternativa al cuidado de los recursos naturales y un sistema potencial para la implementación de estos esquemas de PSA.

El término de diversidad biológica agrícola se refiere específicamente a los sistemas de producción humano. Ocampo (2012) definió a la agrobiodiversidad como: “El vínculo entre el sector agrícola productivo con el tema de biodiversidad, en todos sus niveles“. La biodiversidad de estos sistemas se compone de diversidad de animales, diversidad de cultivos y sus respectivas variedades, y diversidad de microorganismos (Nodari y Tomás, 2011)

Nodari y Tomás (2011) notaron que la variedad de los cultivos, en especial en lugares con una mayor antigüedad, han formado los llamados centro de diversidad, y que se combinan con aspectos históricos, ecológicos y genéticos. Se consideran puntos importantes para la adaptación de nuevas variedades ante las nuevas condiciones climáticas. Sin embargo, durante las últimas décadas, el mercado de la agricultura se ha centrado únicamente en algunas pocas especies y variedades, llevando así, a la pérdida de la diversidad que se había estado generando a lo largo de muchos años. Con los avances tecnológicos y científicos, también se ha introducido al mercado los llamados transgénicos, y que están llevando a la pérdida y contaminación de semillas criollas.

La revolución verde, por ejemplo, llevó al establecimiento de monocultivos y la utilización de supervariedades, pero que requieren de grandes paquetes tecnológicos e insumos para mantener su producción, acciones que al final llevan a una

inestabilidad alimentaria de los sistemas productivos (Vargas *et al.*, 2009). Actualmente, se empieza a reconocer que es necesario reorientar el enfoque productivo hacia uno que busque alcanzar una agricultura sostenible, promoviendo la reintegración de la diversidad en el escenario de la agricultura. Esto parece llevar la contra a los sistemas convencionales, surgidos a partir de la revolución verde; los cuales no valoran la diversidad agrícola.

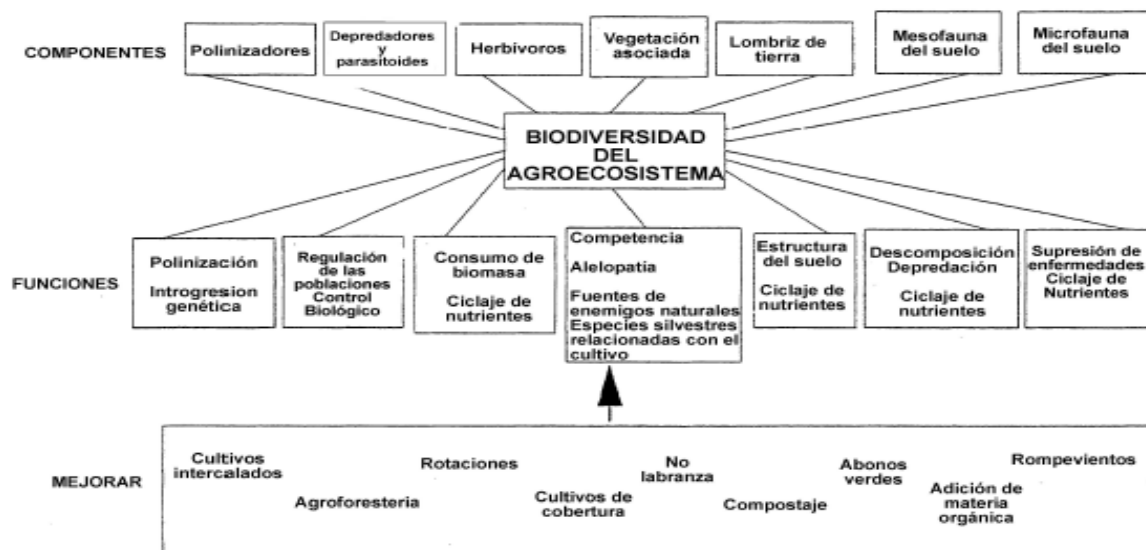
Sin embargo, autores como Gliessman (2002) han estudiado algunos de los beneficios de un esquema basado en la incorporación de la diversidad, haciendo notar que:

- 1) Con una diversidad alta, la diferenciación de hábitats aumenta; lo que permite, que las especies se vuelvan especialistas del hábitat, creciendo en ambientes exclusivos que satisfagan sus necesidades.
- 2) Con diversidad alta, aumenta las oportunidades de coexistencia y la interferencia entre especies, aumentando la sostenibilidad del sistema; por ejemplo, las bacterias fijadoras de nitrógeno y las leguminosas.
- 3) Alta diversidad hace posible varios tipos de dinámica de poblaciones, como la de herbívoros y sus depredadores, beneficiando así a evitar la proliferación de plagas.
- 4) Mayor eficiencia en el uso de los recursos, generando nichos que se complementarían o traslapan, pero que ayudan a que se use la mayor cantidad posible.
- 5) La diversidad de cultivos puede generar microclimas, que son benéficos para la proliferación de organismos y no cultivos, y que ayudan a que se mantenga la dinámica en el sistema.
- 6) La diversidad que se da, especialmente en la parte de suelo, proporciona servicios ecológicos, tales como el ciclo de nutrientes, la regulación de procesos hidrológicos y la desintoxicación de productos nocivos.

Altieri y Nicholls (2009), más recientemente, estudiaron los servicios ecológicos que nos proveen los agroecosistemas. Señalan que la clave está en: a) identificar el tipo



de biodiversidad que se desea mantener y b) determinar las mejores prácticas que favorezcan esta biodiversidad. Puesto que existen muchas prácticas y diseños agrícolas, se puede estimular potencialmente el sistema o afectarlo igualmente. Es por eso que en los sistemas agroforestales debemos buscar la correcta interacción de todos sus componentes. Árboles, cultivos y animales deben de tener arreglos espaciales y temporales que ayuden a explotar la complementariedad y sinergia que resulta con este arreglo estructural. En la Figura 2 se muestran la diversidad que pueden brindar distintos servicios ecológicos, sus funciones y los manejos agrícolas que se pueden implementar.



Fuente: Altieri y Nicholls (2009)

**Figura 2. Componentes, funciones y estrategias de mejoramiento de la biodiversidad en agroecosistemas**

Actualmente, los esfuerzos tanto nacionales como internacionales han implementado la estrategia del banco de germoplasma. La conservación *ex situ* de los recursos genéticos ayuda a mantener la variabilidad de especies silvestres y la de los cultivos; manteniendo la semilla ortodoxa seca y almacenada a - 20°C y una humedad del 5 - 7 %, dependiendo de la especie. Igualmente, la diversidad *ex situ* no es suficiente, debido a que no es posible conservar de este modo componentes clave como los polinizadores, ni tampoco capta la variación que surge por las fuerzas ambientales naturales. Sugiriendo así, que la estrategia más adecuada sigue siendo la de la

conservación *in situ*, asegurando la evolución de los sistemas de cultivos. A esta estrategia se le conoce como la conservación en la explotación (Nodari y Tomás, 2011).

Brush (2000) propuso que la conservación en la explotación debe ser promovida debido a:

- 1) Elementos clave de los recursos genéticos no se pueden conservar fuera del cultivo.
- 2) Se generan nuevos recursos genéticos en estos ecosistemas.
- 3) Aunque se tenga guardada la semilla en el banco de germoplasma, es necesario tenerlo también en el campo.
- 4) Los agroecosistemas, como centros de evolución y alta diversidad, forman laboratorios naturales que ayuda a la investigación

La diversidad de los agroecosistemas forma relaciones importantes entre sí y deben de conservarse, no solo por la importancia ecológica, si no por el papel importante que juega este sistema en la soberanía alimentaria. Existen lugares en todo el mundo donde se conserva la tradición de la comunidad, especialmente en los huertos familiares. En estos lugares aún se siguen conservando importantes recursos genéticos. En Vietnam, los huertos familiares tienen cultivos que son importantes para sus festividades, otras por sus creencias y unas más por sus propiedades medicinales (Trinh *et al.*, 2003). Así, la conservación en campo no solo contribuye a la perpetuidad de cultivos que van más allá de la importancia comercial, sino, a toda la riqueza cultural.

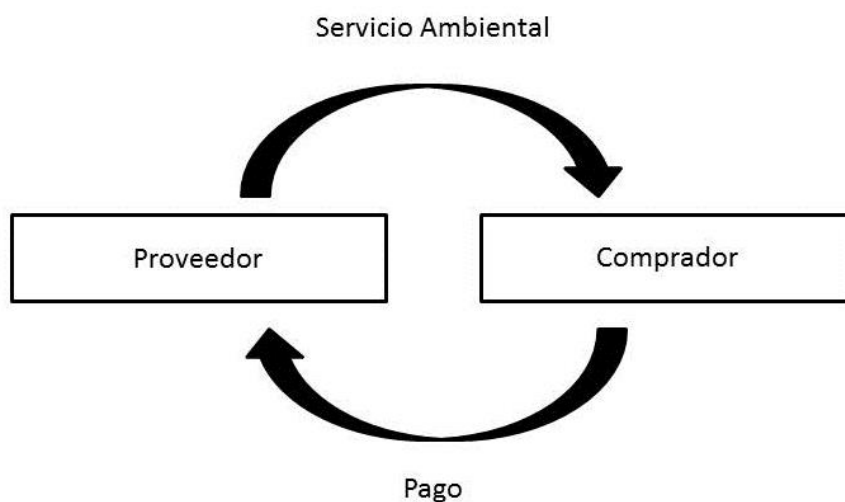
### **1.1.3 Incorporación de los servicios ambientales en las políticas de conservación**

Actualmente, el mundo se da cuenta de la pérdida acelerada de sus ecosistemas, los servicios que estos pueden brindar y el impacto positivo que tienen para la vida en general. Sin embargo, por el desconocimiento de esto, no se había generado una

estrategia adecuada para el mantenimiento de estos servicios. Por lo tanto, se han creado el PSA, que tiene como objetivo el compensar económicamente a los dueños de los terrenos forestales donde se crean dichos procesos, compensándolos económicamente por los costos de conservación y los gastos por realizar esta práctica de buen manejo del territorio (CONAFOR, 2011).

Los pagos por servicios ambientales tienen que cumplir principalmente cuatro puntos (Figura 3), lo cuales son (Mayrand y Paquin, 2004; Wunder, 2006; Ruiz *et al.*, 2007; Wunder *et al.*, 2007; CONAFOR 2011):

- La transacción debe ser de manera voluntaria.
- Que este bien definido el servicio que se está ofreciendo.
- Que exista un comprador y a su vez un proveedor.
- Finalmente, que ese proveedor se comprometa a seguir proveyendo de ese bien.



**Figura 3. Esquema donde se muestra la dinámica de pago por servicios ambientales**

Las fuentes dispuestas a pagar por ellos son las estructuras de gobiernos de cada país y la inversión privada. Casas y Martínez (2008) realizaron una evaluación de los sistemas de pago en América Latina, señalando que países como Bolivia no ha

desarrollado un esquema de PSA, aunque reconocen los servicios que ofrecen las áreas protegidas. Lo mismo pasa en Chile, donde se tienen planes de prevención y descontaminación. Colombia no tiene una legislación específica, aunque tiene algunas normas que compensan a los proveedores de estos servicios. Caso similar es Panamá, donde solo se reconocen algunos servicios especificados en algunas normas. República Dominicana cuenta con una legislación de PSA y reconoce los servicios que prestan los bosques, las fuentes de agua y las áreas protegidas. Ecuador tiene PSA y compensa a quienes realicen acciones de conservación. Perú ya legisló el PSA. Costa Rica es el más adelantado en materia de PSA, ya que desde hace 15 años legisló este esquema de pago.

En México existían dos programas dirigidos a estos pagos, pero en 2006 se fusionaron para formar parte del programa ProÁrbol. También se han creado programas para apoyar los mecanismo de conservación, como el Fondo Patrimonial de Biodiversidad, y la nueva estrategia denominada REDD+; que básicamente va dirigido al cuidado forestal, por el calentamiento global a causa de las emisiones de carbono (CONAFOR, 2011).

Wunder (2006) explica que a pesar de ser buena idea dar un pago a los proveedores por seguir manteniendo estos servicios, esto no se podría aplicar a sistemas en los cuales la ganancia por la actividad, supere a lo ofrecido por cambiar a una actividad más amigable con el ambiente. En sistemas en donde la rentabilidad es más bajo, será mucho más fácil introducir el esquema de PSA y lograr el cambio en el uso del suelo. Sin embargo, donde la rentabilidad es mayor, el cambio no se lograría, e incluso no debe intentarse, porque la transacción será mucho más cara para lograr el cambio en el uso de suelo. Otros programas como los Proyectos Integrales de Conservación y Desarrollo (PICD), pretendieron conseguir su objetivo con base en el cambio de los sistemas productivos y el mejoramiento de las condiciones de vida de los propietarios rurales. Así mismo, el Manejo Forestal Sostenible (MFS) pretendió mejorar de manera duradera los ingresos obtenidos del bosque. Sin embargo todos fueron poco eficientes (Wunder *et al.*, 2007).

Villavicencio (2009) también hace resaltar que debemos estar conscientes de las limitantes que el esquema de PSA tiene, como por ejemplo:

1. Identifica que no se realizan estudios previos y que se debe iniciar con la definición del marco regulatorio entre proveedores y compradores.
2. Una vez que se realizan los pagos y acciones de conservación o cambio de uso de suelo, no es posible verificar la producción de servicios o su impacto por la falta de estudios previos.
3. Los mercados están poco desarrollados; incluso los mercados internacionales.
4. Cuando los pagos son desarrollados por el gobierno, surge el riesgo de la discontinuidad en el pago y puede dificultar la promoción al acceso a mayores satisfactores económicos y sociales a la población con niveles de pobreza altos.
5. Se cuestiona su pertinencia como gestión ambiental.

#### **1.1.3.1 Captura y almacenamiento de carbono, el pago por servicio ambiental más reconocido en sistemas agroforestales**

Es difícil que los sistemas agroforestales puedan cambiar a otro uso del suelo. Por lo tanto, el esquema de pago de servicios ambientales puede ser viable para estos sistemas. Para ello, debe empezarse por reconocer el valor que tienen como proveedores de servicios ambientales. La cuantificación de estos servicios puede ayudar a esta revaloración (Ávila *et al.*, 2001).

A nivel mundial, un programa para mitigar las emisiones de carbono y conservar los ecosistemas es el denominado REDD+. Barbier y Tesfaw (2012) evaluaron este programa con base en tres términos:

- Efectividad: para lograrlo, el programa debe de aplicar incentivos para la conservación de los bosques, de preferencia, los de propiedad comunal. También

debe aumentar el número de bosques comunales y reducir el de manejo gubernamental.

- Eficiencia: incluyendo a la comunidad beneficiada, pues con una estructura sólida, limpia y transparente, el pago debe llevarse a cabo y recompensar a cada participante.
- Equidad: el programa se centra en pagar a las comunidades por conservar sus bosques; sin embargo, no se centra en la reducción de la pobreza. De hecho, en el programa la equidad no es un punto importante. Aun así, se puede apoyar en la eficiencia para buscar este objetivo, buscando reducir el costo de implementación y asegurar que más beneficios lleguen a los pobres.

El esquema de pago por servicios ambientales no es específico para un sistema agroforestal, principalmente porque fue desarrollado para la conservación forestal. De hecho, se busca reducir o impedir la agricultura en este esquema; por ejemplo: un lugar boscoso con alta deforestación por agricultura, es altamente potencial para el pago, ya que sus créditos de carbono son altos. Así, el valor por los créditos de carbono debe ser mayor que los costos de oportunidad y de transacción de la tierra (Wunder, 2006; Karsenty *et al.*, 2012).

Antle *et al.* (2001) sugiere que la eficiencia económica para lograr el secuestro de carbono en suelo debe tomar en cuenta: 1) el costo por el cambio de esa práctica en el manejo de uso de suelo; 2) la tasa de carbono secuestrado, en asociación con el cambio en las prácticas de manejo y 3) el diseño de las políticas ya existentes. Ortiz y Riascos (2006) propusieron que el pago debe tomar en cuenta las condiciones naturales, sociales y económicas. Estas condiciones deben ser apropiadas para cada país y sus condiciones de mercado. Las cantidades a pagar oscilan entre 16 y 6671 dólares por hectárea por año. Otros autores como Hidalgo (2011), más recientemente consideraron un valor de US \$ 13.12/t C. Para México, Pérez *et al.* (2009) reportaron un valor que oscila entre \$50 y \$100/ton, entregando un 50 % al principio y el otro 50% al final. De igual forma reportaron que el proyecto debe ser aceptado por la CONAFOR y autorizado por el Comité Técnico Nacional.

### **1.1.3.2 Agrobiodiversidad, el servicio ambiental menos reconocido en el esquema de PSA**

El servicio ambiental por biodiversidad es uno de los que menor atención han tenido en comparación a otros y las investigaciones en México aún son pocas. Este servicio puede tener beneficios importantes. La diversidad agrícola tiene un valor económico total; dicho valor se compone de: 1) valor de uso (comercial, apropiado para el productos); 2) valor de uso indirecto (valor seguro para el productor); 3) valor de opción (para el cambio climático, por ejemplo) y 4) valor de no uso (cultural, religioso, etc.) (Soto *et al.*, 2010). El mercado no reconoce todo este potencial, por tal motivo se ha propuesto a nivel mundial el programa de Pago de Conservación de la Biodiversidad Agrícola (PACS). La finalidad del programa es ayudar a promover la conservación de las variedades de uso tradicional. El esquema de PACS se considera una subcategoría de los PSA; sin embargo, la aplicación de este esquema de pago es aún muy limitada, incluso en Estados Unidos.

Narloch *et al.* (2011) mencionan que Estados Unidos implementó dos proyectos relacionados con el PACS: 1) el pago por razas de ganado amenazadas, la cual, claramente se centró en la conservación de la diversidad ganadera y 2) el llamado proyecto GEF, fundado en Etiopia y que tiene como finalidad pagar a los agricultores por la conservación de sus variedades tradicionales; aunque, también incluye las variedades mejoradas. El efectuar este esquema de pago por agrobiodiversidad apoyar la resiliencia de agroecosistemas, mantiene tradiciones socio-culturales, identidad local y conocimiento tradicional y mantiene procesos de evolución y flujo de genes. Al mismo tiempo Narloch *et al.* (2011) reconocen cuatro puntos que debe cumplir el pago por conservación de la diversidad agrícola (PACS):

- La eficacia ecológica, la cual se basa en el mantenimiento de sistemas de semillas existentes, agricultores participantes (asegurando el conocimiento de la agricultura y tradiciones culturales) y los CBG (Grupos Basados en la Comunidad) quienes mantienen las redes de distribución de semillas. Para llegar a esa eficacia, debemos analizar cómo se comporta el nivel de servicio de conservación, con o sin el

esquema de pago y tener cuidado de no desplazar variedades amenazadas que no estén en el programa, al igual que llegar a la sostenibilidad, logrando que el esquema de pago sea por el mayor tiempo posible.

- Eficiencia económica, en donde se debe buscar implementar bajos costos por la conservación; se basa en el costo de uso de suelo, ya que el objetivo es lograr que los agricultores se mantengan en el esquema y no produciendo variedades con demanda en el mercado. A su vez, se debe asegurar que se mantengan las redes apropiadas de distribución de semilla.
- Equidad social, la cual juega un papel importante en el éxito y legitimidad de este esquema de pago. Consiguiendo primero una igualdad en la toma de decisión, donde todos los grupos interesados puedan acceder al sistema de pago. Para después asegurar una igualdad en el acceso a la semilla, donde se incluyen todos los agricultores y la gente de áreas de pobreza, lo cual se puede lograr con ayuda de instituciones para una acción colectiva. Lograr la equidad es complicado, debido a que se puede ver como justo si se compensa dependiendo del nivel de gasto en el que incurrieron por la conservación o todos son compensando del mismo modo, independientemente del fuerza y gasto.

#### **1.1.4 Cómo calcular carbono almacenado en sistemas agroforestales**

Se han desarrollado métodos adecuados para cuantificar a cuánto ascienden las cantidades de carbono almacenado en los sistemas agroforestales. Bonilla (2009) describe algunos como: 1) comparativo de cosechas, 2) foto clave, 3) método del árbol promedio, 4) método del árbol estratificado, 5) método del área del dosel y 6) método de su estimación por regresión.



De manera general se reconocen dos métodos:

- 1) Métodos directos: consiste en medir toda la biomasa y también se conocen como métodos destructivos. Para grandes escalas, este método resulta muy difícil de aplicar por el tiempo y costos de implementación.
- 2) Métodos indirectos: necesariamente implican el uso de algunos tipos de modelos de biomasa y carbono, usando factores de expansión o ecuaciones de regresión, las variables deben ser tomados en campo (Ortiz y Riascos, 2006; Sanquetta, 2013).

Como alternativa se han creado métodos nombrados semidestructivos. Sin embargo, estos métodos solo se aplican en el caso de bosques secos o árboles demasiado grandes. En el caso de bosque seco, se evita el corte debido a la rareza de la especie (Sola *et al.*, 2012).

En sistemas agroforestales debemos de implementar los métodos indirectos, principalmente por la dificultad que se tiene para tirar árboles frutales. Las ecuaciones alométricas pertenecen a este tipo de método. Se derivan de la ley de Rubner, la cual se refiere al crecimiento relativo y considera que este crecimiento es constante entre “y” y “x” (Bonilla, 2009). En el caso de los sistemas agroforestales, predice la medida de un árbol en función de otra medida; por ejemplo, su biomasa en función de su diámetro. La ecuación da resultados cuantitativos para la relación a estudiar. El método puede tener algunos inconvenientes, por ejemplo, no siempre es eficiente en precisión y produce errores más allá del umbral de tolerancia (Sanquetta, 2013).

En algunos casos las ecuaciones alométricas pueden ser generadas. Los pasos a tomar en cuenta los describen Ordoñez *et al.* (2011) y son los siguientes:

- 1) Selección aleatoria del sistema agroforestal y del árbol para generar el modelo alométrico.
- 2) Edad de los árboles y diámetro basal a una altura de 30 cm.

- 3) Tirar el árbol y dividirlo en fuste, ramas gruesas y ramas finas.
- 4) Pesaje en verde del fuste, ramas gruesas y ramas finas más hojas.

Segura y Andrade (2008) también ofrecen una guía rápida para la creación de estas ecuaciones y al mismo tiempo ya incluyen algunas en este manual. Sin embargo, si el objetivo es crear nuestras propias ecuaciones puede ser útil la Guía para la determinación de carbono en pequeñas propiedades de Rüginitz *et al.* (2009), la cual incluye ecuaciones de tipo general y particular.

En el caso de los sistemas agroforestales se conocen algunas ecuaciones para ciertas especies frutales. Por ejemplo, naranja, chirimoya, mandarina, toronja y aguacate. La ecuación generada para estas especies es (Segura y Andrade, 2008; Ordoñez *et al.*, 2011):

$$\underline{Bt=10(-1.11+2.64*\log (Dap) \text{ con un valor de } r^2 \text{ de } 0.95}$$

Para otros frutales como el manzano, peral, albaricoque, cerezo, melocotón-nectarina, ciruelo, almendro, vid y olivo se ha ajustado la ecuación (CITA, 2008):

$$\underline{M=e^{(see^{2/2})} \times e^a \times d^b}$$
, que después se multiplica por 0.4735 para calcular el contenido de carbono. Donde a, b y see son parámetros del modelo.

Callo *et al.* (2001) propusieron una ecuación general para árboles vivos y muertos en pie:

$$\underline{BA= 0.1184 DAP^{(2.53)}}$$

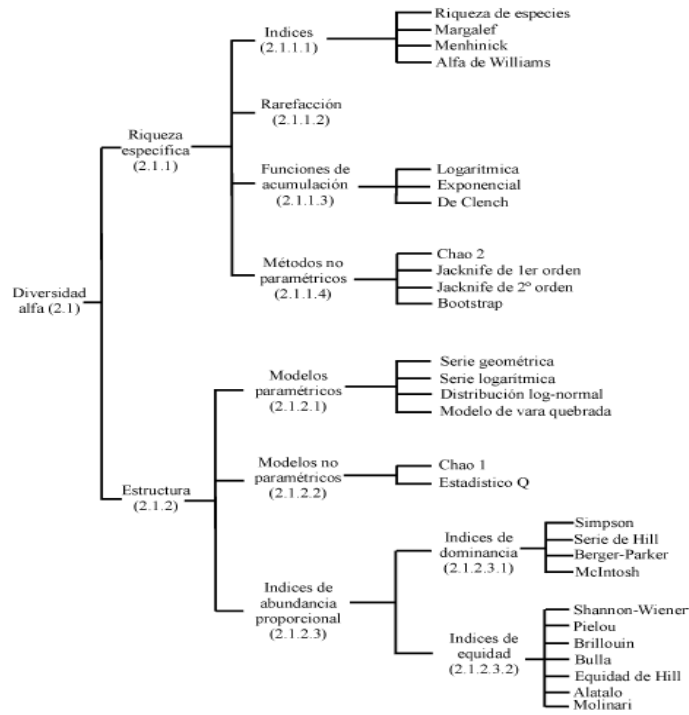
Una vez calculada la biomasa, se estima que el carbono presente es un equivalente al 50% de la biomasa. Sin embargo, Thomas y Martin (2012) proponen una reestimación de los contenidos para varios grupos vegetales. Para el caso de climas templado/boreal, el contenido se estima de 43.4% a 55.6% de la biomasa total.

### **1.1.5 Cómo evaluar biodiversidad, y su aplicación para agrobiodiversidad**

Anteriormente establecimos que la diversidad se clasifica en tres niveles: genética, especies y ecosistemas (Ñique, 2010). La diversidad a nivel genético se considera como la base fundamental de otros niveles superiores. Esta se da específicamente a nivel molecular con cambios directos en la estructura del ADN o de forma indirecta en las proteínas codificadas por genes específicos. Este nivel determina la forma en que la especie interactúa con su ambiente y otras especies. Los métodos para medirla son: a) medir el polimorfismo del ADN entre dos especies; 2) uso de secuencias (señalado con uno de los más utilizados); 3) variación en las proteínas como una variación del ADN, etc. La aplicación de estos métodos es cada vez más frecuente, aunque los reactivos tienen altos costos (Moreno, 2001).

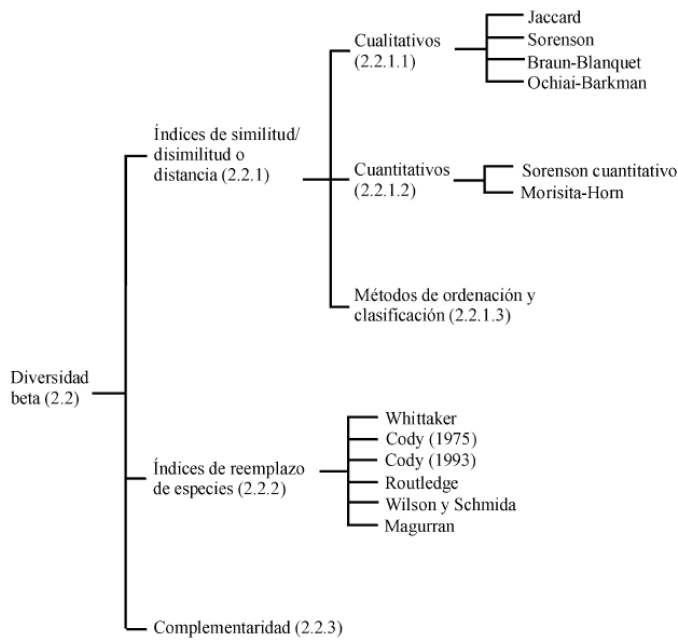
A niveles superiores la diversidad se mide en:

- 1) Alfa-diversidad, se refiere a la diversidad dentro de la comunidad. Sus métodos los agrupan en dos (Figura 4): a) métodos basados en la cuantificación del número de especies presentes (riqueza de especies); b) métodos basados en la estructura de la comunidad (distribución proporcional del valor de importancia de cada especie).
- 2) Beta-diversidad, también llamada diversidad entre hábitats; es el grado de cambio o recambio en la composición de especies en un gradiente. Esta se mide por métodos llamados de similitud, de disimilitud o distancia entre las muestras (Figura 5). Los datos para trabajar estos índices o coeficientes pueden ser cualitativos o cuantitativos.
- 3) Gamma-diversidad, es la riqueza de especies del conjunto de comunidades que integran un paisaje, resultado de la diversidad alfa y beta. Para calcularlo utiliza tres fórmulas derivadas de otros índices: 1) cálculo basado en la riqueza de especies; 2) cálculo basado en el índice de Shannon-Wiener y 3) cálculo basado en el índice de Simpson (Moreno, 2001).



Fuente: Moreno 2001

**Figura 4. Esquema de la clasificación de los métodos para medir alfa-diversidad**



Fuente: Moreno 2001

**Figura 5. Esquema de la clasificación de los métodos para medir beta-diversidad**

Cada tipo de diversidad tiene una gran variedad de índices y métodos, sin embargo cada uno tiene funciones diferentes y mide aspectos específicos de la comunidad. Es importante seleccionar el nivel al que vamos a trabajar y saber qué características debemos medir. De ese modo, no seremos redundantes en nuestros resultados y podremos ejemplificar bien la situación del sistema.

Los índices se desarrollaron para propiedades intrínsecas del sistema. Por ejemplo, a nivel alfa la riqueza, dominancia, equidad, etc., las cuales son perfectamente aplicables a cualquier sistema. Sin embargo, se ha cuestionado su funcionalidad en los sistemas agroforestales. En ellos las propiedades que se pueden medir son distintas a un sistema natural, ya que se reconocen propiedades adicionales que por la organización del sistema son diferentes. Estas propiedades son catalogadas como: a) alimentación humana; b) alimentación animal; c) alimentación del suelo y; d) otras llamadas complementarias. Recientemente se propuso un índice y subíndices que refleja la interacción de esas propiedades y que demuestra la eficiencia del sistema. Este índice lleva por nombre de “índice de agrobiodiversidad”. Sin embargo, aún no se aplica ampliamente y no se ha evaluado su utilidad (Leyva y Lores, 2012).

Además del enfoque tradicional de caracterización de la biodiversidad y agrobiodiversidad a través de índices, agroecólogos como Gliessman (2002), plantean el punto de vista de que en los sistemas naturales, la diversidad se da en dimensiones: 1) genética; 2) especies; 3) vertical (número de diferentes niveles horizontales); 4) horizontal (patrones de distribución espacial de los organismos del sistema); 5) estructural (número de localidades [nichos, papeles tróficos] en la organización del sistema); 6) funcional (la complejidad de interacciones, flujo de energía y reciclaje de material entre los componentes del sistema) y 7) temporal (grado de la heterogeneidad de cambios cíclicos en el sistema [diarios, estacionales, etc.]). Los sistemas agroforestales también tienden a niveles de diversidad parecidos a los ecosistemas naturales, aunque son sometidos a mayor presión por la necesidad de cosechar biomasa.

## 1.2 Antecedentes

### 1.2.1 Estudios sobre servicios de captura de carbono

Su aplicación se centró en sistemas naturales para evitar la deforestación por cambio en uso de suelo, mediante el programa REDD++ (Karsenty *et al.*, 2012). En los sistemas agroforestales la aplicación y atención es muy poca. Las investigaciones comenzaron con los sistemas de cafetales, donde ya se ha calculado la tasa de fijación y la cantidad de carbono que tienen dichos sistemas (Ávila *et al.*, 2001; Andrade *et al.*, 2008, Espinoza *et al.*, 2012 y Hernández *et al.*, 2012).

Aristizabal y Guerra (2002) compararon la tasa de fijación de carbono en sistemas agroforestales de nogal cafetero (*Cordia alliodora*), cacao (*Theobroma cacao* L.) y plátano (*Musa paradisiaca*). Aplicaron métodos destructivos para medir la biomasa con base en la biomasa aérea, la biomasa subterránea, carbono en el suelo y la necromasa. Además, crearon un modelo de regresión para estimar los valores en un periodo de 15 años. Concluyeron que la cantidad de carbono almacenado corresponde al 50 % de la biomasa y especularon que la acumulación de necromasa con la dinámica radicular en este sistema favorece la incorporación de una gran cantidad de carbono en el suelo.

Ortiz y Riascos (2006) modelaron la relación entre biomasa total y edad para un sistema agroforestal de cacao (*Theobroma cacao* L) y otro de laurel (*Cordia alliodora*), basándose en ecuaciones alométricas de método destructivo y en dos diferentes sitios (loma y valle). La cantidad de carbono almacenado fue de 126.4 t C ha<sup>-1</sup> en valle y 114.5 t C ha<sup>-1</sup> en loma. Con una tasa de fijación de 5.1 t C ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup> por 25 años.

Andrade *et al.* (2008) evaluaron la cantidad de carbono en cinco usos de suelo: banano con árboles, cacao con árboles, plátano en monocultivo, charrales y bosques de galería, en dos sitios (valle y loma). Usaron ecuaciones alométricas de tipo destructivo para herbáceas y no destructivo para perennes. Concluyeron que se

almacena más carbono en loma, el bosque de galería almacena más carbono y el suelo es el mayor reservorio de carbono. Además, evaluaron el costo por cambio en uso de suelo, determinando que el cultivo de banano no es factible para esta transacción, pues debería pagarse 20.8 y 50.1 US\$ / t C<sup>-1</sup>.

Roncal *et al.* (2008) evaluaron la edad y complejidad de los sistemas para almacenar carbono en los reservorios de biomasa muerta, materia orgánica muerta y materia orgánica del suelo. Los sistemas fueron de milpa con árboles, barbecho natural, y dos sistemas agroforestales (SAF) (Taungya y barbecho enriquecido). Para la caracterización de los sistemas utilizaron índices de: complejidad de Holdridge, valor de importancia y de intensidad de uso. Para la estimación de carbono utilizaron ecuaciones alométricas basadas en altura y diámetro a altura de pecho, encontraron que la materia orgánica del suelo contenía el 70 % de C y que los SAF incrementan el contenido de carbono con la edad.

Bonilla (2009) determinó, con métodos destructivos, el contenido de carbono en *Pinus montezumae* Lamb. Concluyó que el 50.62% de la biomasa es el equivalente a carbono. Además, midió la concentración de carbono por componentes y concluyó que el fuste tiene la mayor cantidad con 79.25 %, las ramas el 10.65 % y el follaje el 10.1 %.

Méndez *et al.* (2011) calcularon biomasa, carbono y carbono equivalente en una plantación mixta de *Pinus devoniana* Lindl. y *P. pseudostrobus* Lindl., utilizando ecuaciones alométricas de tipo destructivas. El cálculo de carbono almacenado se obtuvo al multiplicar la biomasa por 0.5 y el carbono equivalente de acuerdo a Raev *et al.* (1997) y Pacheco *et al.* (2007). También calcularon el incremento de estas variables por año, utilizando el modelo de Schumacher y análisis de troncales, encontrando que la mayor biomasa se encuentra en el fuste.

Hidalgo (2011) estimó el carbono en la selva alta de Tingo María, con ecuaciones alométricas del manual “determinación de las reservas totales de carbono en los diferentes sistemas de uso de la tierra en Perú”. Estimó que el carbono almacenado representa el 43.38% de la biomasa total. Concluyó que se almacena 94.383 t C/ha en la biomasa vegetal y 123.181 t C/ha en el suelo. Además, calculó que esta cantidad tendría un valor en el mercado de US \$150, 847,932.68 /año.

Espinoza *et al.* (2012) estudiaron el sistema de cafetales bajo sombra en el estado de Veracruz. Para la toma de muestras para el contenido de carbono en la parte aérea, mantillo y suelo utilizaron cuadrantes de 4 x 25 m, utilizaron ecuaciones alométricas, principalmente la ecuación generales de Brown *et al.* (1989). Además, tomaron muestras de un potrero y un bosque primario. El sistema agroforestal de la región almacenó en promedio 102 Mg C ha<sup>-1</sup>. El potrero tuvo la menor cantidad de carbono, con 52 Mg C ha<sup>-1</sup>. Mientras que el de mayor contenido fue el bosque primario con 355 Mg C ha<sup>-1</sup>.



### 1.2.2 Estudios sobre servicios de agrobiodiversidad

Trinh *et al.* (2003) estudiaron la agrobiodiversidad de los huertos vietnamitas ubicados en cuatro provincias. Encontraron que la estructura de los huertos se ve influenciada por los factores agroecológicos, fuerza del mercado, geografía y tradiciones culturales de cada región. La estructura dependió de si la familia, tenía como objetivo la seguridad alimenticia o la generación de ingresos. El factor cultural fue importante, ya que cualquiera que sea el enfoque siempre se tendrá cultivos que se utilizan en sus rituales y ceremonias tradicionales.

Stupino *et al.* (2007) realizaron la evaluación vegetal en sistemas hortícolas convencional y orgánico en dos fincas en Argentina. Realizaron muestreos estratificados al azar y calcularon índices de Shannon, Whitaker y diversidad gamma. Encontraron una mayor riqueza en la finca de manejo orgánico (especies, géneros y familias) y una diversidad beta superior en fincas orgánicas para verano.

Baco *et al.* (2007) realizaron un estudio en Benin, para los cultivos de ñame (*Dioscorea sp.*). Realizaron curvas de acumulación de especies y aplicaron índices de riqueza de Chao 2 y semejanza de Chao-Sorensen. Concluyeron que el cultivo tenía 182 variedades en toda la región y no hubo diferencia significativa en su distribución en las ocho localidades. En promedio hubo 30 cultivos, aunque el registro más alto fue de 95. Para el índice de similitud, solo una aldea se desvió del resto.

Pino (2008) evaluó la diversidad de árboles frutales en 27 fincas de Ginebra, Holguín. Estimó los índices de Margalef, riqueza de especies, Simpson y de equidad, por medio de inventarios de cada una de las fincas muestreadas. Encontró que la riqueza va desde 1 a 23 especies, coincidiendo con el índice de Margalef que va de 0 a 4.17, aunque dicha relación no se reflejó con la dominancia y equidad.

Vargas *et al.* (2009) realizaron una evaluación en fincas de Cuba, además del manejo que tienen los productores respecto con los agroquímicos. Para cuantificar la diversidad se trazaron bloques de 1 x 1 m<sup>2</sup> y se utilizaron los índices de Shannon-Weaver y Margalef y para el uso de los agroquímicos implementaron encuestas semiestructuradas. Encontraron que las emisiones de óxido nítrico dependen de la cantidad de fertilizante utilizado, para la diversidad, se encontró que la zona es muy variada, pues hubo fincas con monocultivos y otras con policultivos.

Torrice (2010) realizó la evaluación los sistemas de producción en Rio de Janeiro y su relación con la fragmentación. Estimó los índices de Shannon, Simpson y dominancia. Encontró que el sistema de cría de ganado abarcó el 74% de la superficie de agricultura en el país. El sistema de cría de ganado tuvo los valores más bajos de los índices de diversidad, riqueza y dominancia; mientras que el mayor valor fue para el sistema ecológico. Sin embargo, esta variedad de sistemas es la que ha llevado a la fragmentación del paisaje en esta zona.

Behbahani *et al.* (2012) estudiaron la agrobiodiversidad de huertos familiares de ocho pueblos de la parte este de Irán. Aplicaron los índices de riqueza y de Shannon-Wiener, además de aplicar encuestas. Encontraron que los índices, a pesar de parecer altos, muestran valores bajos en comparación con la parte oeste de la misma región. También, concluyeron que la participación de las mujeres incrementa la diversidad en los huertos y los ingresos familiares.

## II. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

La pérdida de los ecosistemas, con las implicaciones socio-ambientales que generan, es parte de la agenda de los gobiernos nacionales y de los organismos internacionales. La pérdida de los recursos naturales, de los servicios ambientales, los problemas de contaminación y los efectos del cambio climático son parte de estas preocupaciones. Particularmente, la pérdida de los servicios ambientales de los ecosistemas es un problema relevante en el contexto nacional y mundial. Dentro de éstos, la captura y almacenamiento de carbono y la conservación de la biodiversidad son dos servicios prioritarios. El primero, porque es un elemento de mitigación del cambio climático. El segundo, porque se asocia a la futura seguridad alimentaria y con la supervivencia de la vida misma en nuestro planeta.

Tanto la captura y almacenamiento de carbono, como la conservación de la biodiversidad se ha centrado en los ecosistemas relativamente poco alterados, de bosques y selvas, principalmente. Sin embargo, cada día los ecosistemas son alterados por la acción del hombre, quedando pocos donde la condición sea prístina o “natural”. En el medio rural, predominan los agroecosistemas bajo varias modalidades de producción. A estos agroecosistemas se les percibe generalmente como indeseables desde el punto de vista ecológico o ambiental, creando la idea de incompatibilidad entre la producción de alimentos y la conservación. Recientemente, se empieza a reconocer que existe una diversidad de agroecosistemas y que el grado de alteración ambiental o ecológica depende de cómo el hombre se relacione con el ecosistema. Hay también una tendencia a reconocer que los agroecosistemas son importantes proveedores de servicios ambientales, tales como recarga hídrica, captura de carbono, biodiversidad y paisajísticos. En qué medida se comparan con los ecosistemas donde no se realizan actividades agropecuarias es un tema aún en discusión, debido a que los estudios de los servicios ambientales de los agroecosistemas aún son limitados, comparados con los ecosistemas de bosques y selvas.

Los ecosistemas agroforestales tienen la particularidad de que combinan elementos forestales con elementos agropecuarios. Esto los hace importantes para el mantenimiento y provisión de servicios ambientales. El componente arbóreo para la captura y la fijación de carbono, así como, el componente de cultivos anuales, puede contribuir a la conservación genética y de especies (agrobiodiversidad). Otro rasgo importante de estos sistemas es que lo usan predominantemente productores agrícolas no empresariales en predios no muy extensos. El componente arbóreo es utilizado en algunas regiones para producir leña o forraje, mientras que en otras, principalmente en climas templados, se establecen árboles frutales. En términos generales, son pocos los estudios de estos sistemas en México, principalmente en clima templado – frío.

Para revalorar los sistemas agroforestales como proveedores de servicios ambientales es necesario cuantificar estos servicios. Esto ayudará a concientizar, tanto a los productores rurales como a los tomadores de decisiones gubernamentales, sobre la importancia de mantener y promover su establecimiento en predios con monocultivo. Un aliciente para motivar a los productores es el establecimiento de un sistema de pagos de servicios ambientales para estos sistemas, similar al que ya existe para ecosistemas forestales.

Una de las regiones templadas – frías de México donde se tiene una superficie importante de sistemas agroforestales con árboles frutales es la región conocida como Iztaccíhuatl-Popocatepetl. Por generaciones se han producido frutales y cultivos anuales, como el maíz, el frijol, la calabaza y el haba. Algunos problemas técnicos y económicos han desmotivado a los productores en algunos lugares para seguir produciendo en estos sistemas, dejando de cultivar totalmente los terrenos. Si los costos de producción son altos y los precios de venta de lo cosechado son bajos, poco interés tendrán en seguir cultivando la tierra. La valoración y retribución a los productores, mediante un pago por los servicios ambientales que estos sistemas proveen puede ayudar a que estos sistemas se conserven o incluso se extiendan, aumentando el beneficio social y ambiental local.

En este estudio se estableció como problema de investigación la cuantificación de los servicios de almacenamiento de carbono y agrobiodiversidad de los sistemas agroforestales de la región Iztaccíhuatl-Popocatepetl.

### **III. PREDICCIÓN Y OBJETIVOS**

#### **3.1 Objetivos**

##### **Objetivo general**

Cuantificar los servicios ambientales de biodiversidad y almacenamiento de carbono de los sistemas agroforestales de la zona Iztaccíhuatl-Popocatépetl.

##### **Objetivos particulares**

- Delimitar espacialmente los sistemas agroforestales de la región Iztaccíhuatl-Popocatépetl.
- Estimar la diversidad alfa del componente arbóreo de los sistemas agroforestales de la región Iztaccíhuatl-Popocatépetl.
- Estimar el carbono almacenado en el componente arbóreo frutal de los sistemas agroforestales de la región Iztaccíhuatl-Popocatépetl.

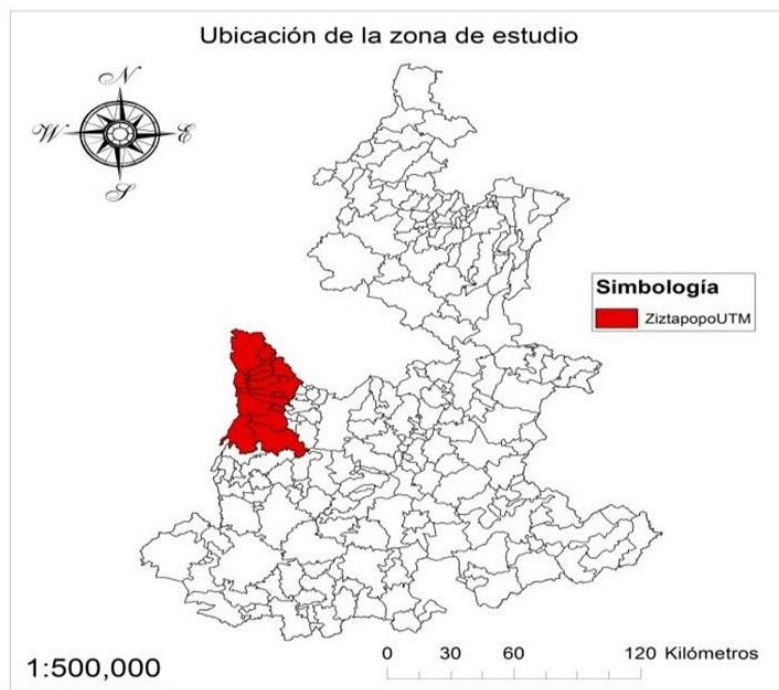
#### **3.2 Predicción**

El componente arbóreo frutal de los sistemas agroforestales de la zona Iztaccíhuatl-Popocatépetl posee altos niveles de diversidad alfa y carbono almacenado, por lo que son un almacén importante de carbono y un proveedor importante de biodiversidad.

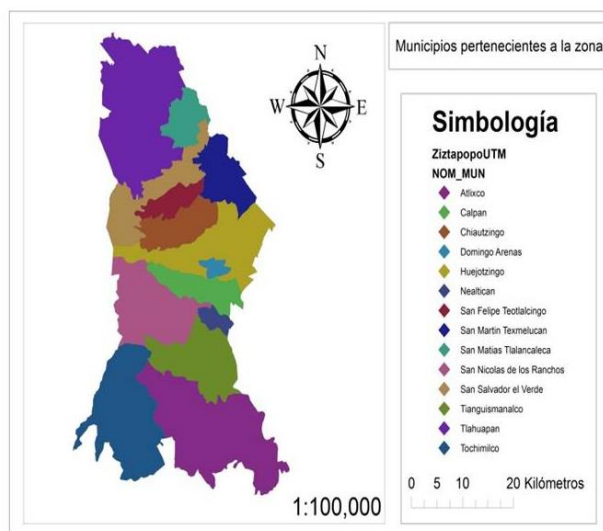
## IV. MATERIAL Y MÉTODOS

### 4.1 Descripción del área de estudio

La zona comprendida como Iztaccíhuatl-Popocatepetl se encuentra localizada en el eje Neovolcánico, colindando con los estados de México, Puebla y Morelos. Para el estado de Puebla (Figura 6), comprende los municipios de Tlahuapan, San Matías Tlalancaleca, San Salvador el verde, San Martín Texmelucan, San Felipe Teotlalcingo, Chiautzingo, Huejotzingo, San Nicolás de los Ranchos, Domingo Arenas, Calpan, Nealtican, Tianguismanalco, Tochimilco y Atlixco (Figura 7).



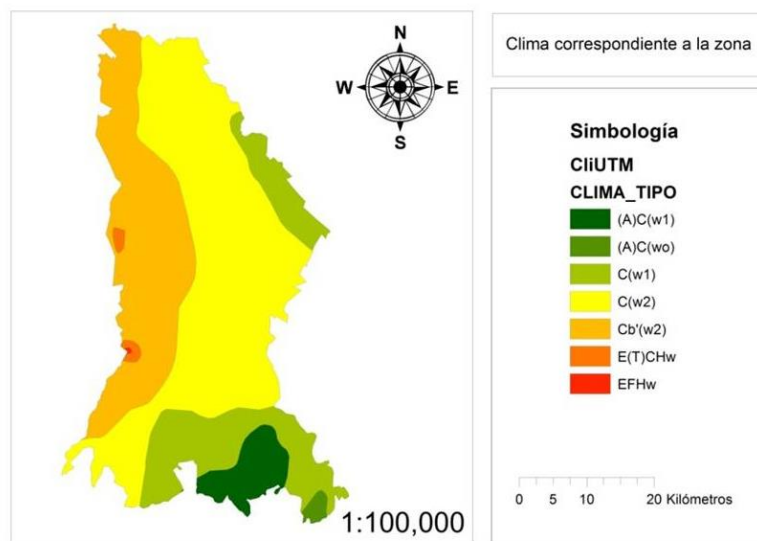
**Figura 6. Zona Iztaccíhuatl-Popocatepetl en el estado Puebla (elaboración propia).**



**Figura 7. Municipios de la zona Iztaccíhuatl-Popocatepetl (elaboración propia).**

### Clima

Se clasifica como de tipo “C”, lo que indica que es templado para la mayoría de la zona. El clima, según la temperatura, varía de semicálido subhúmedo, con temperatura media anual de 18 °C, a templado, con temperatura media anual de 12 °C a 18 °C. Para la parte montañosa, se tiene un clima semifrío subhúmedo con temperatura media anual de 5 °C a 12 °C y, de tipo frío y muy frío para las partes más altas con temperatura media anual de 5 °C a 0°C (Figura 8).



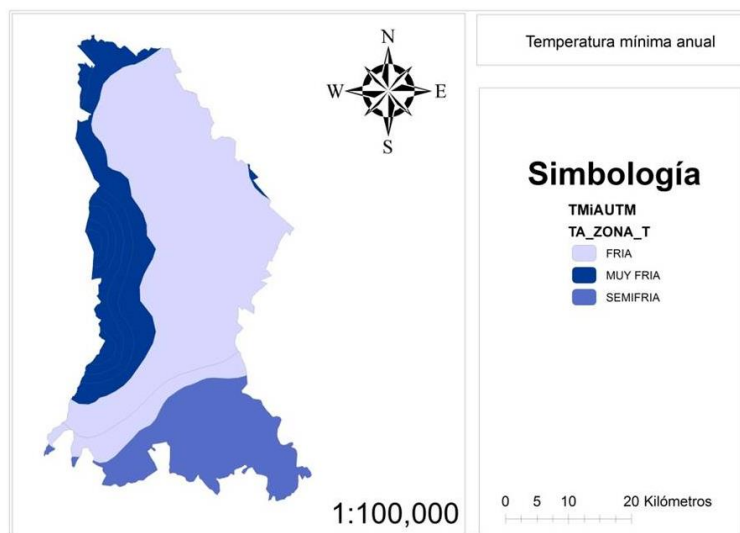
Fuente: CONABIO

**Figura 8. Tipo de clima presente en la zona de estudio (elaboración propia).**



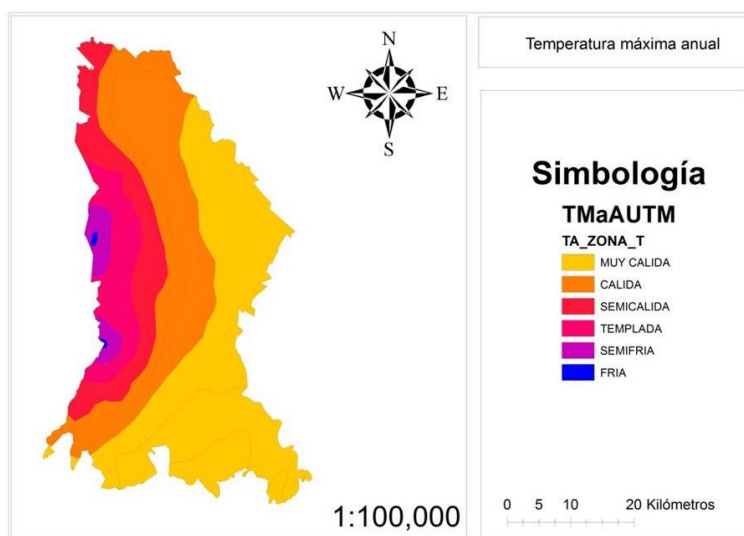
## Temperatura

En general, la zona tiene una temperatura mínima que va de semifrío, hasta muy frío, con un rango que va de 10 °C a - 8 °C. En contraste, la temperatura máxima va desde fría en la parte alta, hasta muy cálida en la parte más lejana, variando de 5 °C a 32 °C. En general para la mayoría de la zona es de tipo templado (Figuras 9, 10 y 11).



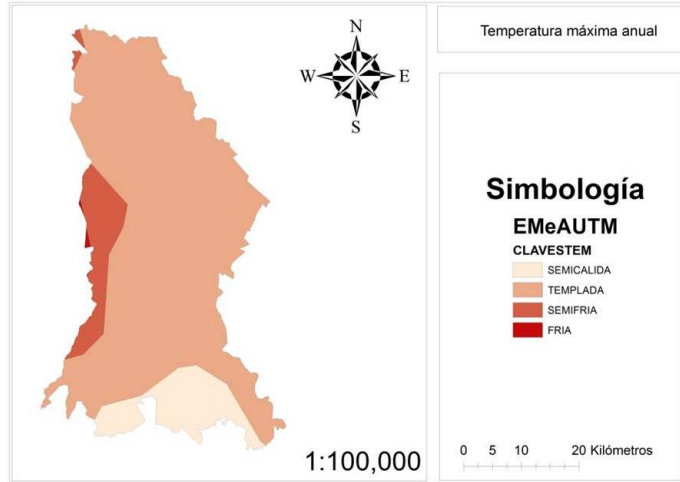
Fuente: CONABIO

**Figura 9. Temperatura mínima de la zona de estudio (elaboración propia).**



Fuente: CONABIO

**Figura 10. Temperatura máxima de la zona de estudio (elaboración propia).**

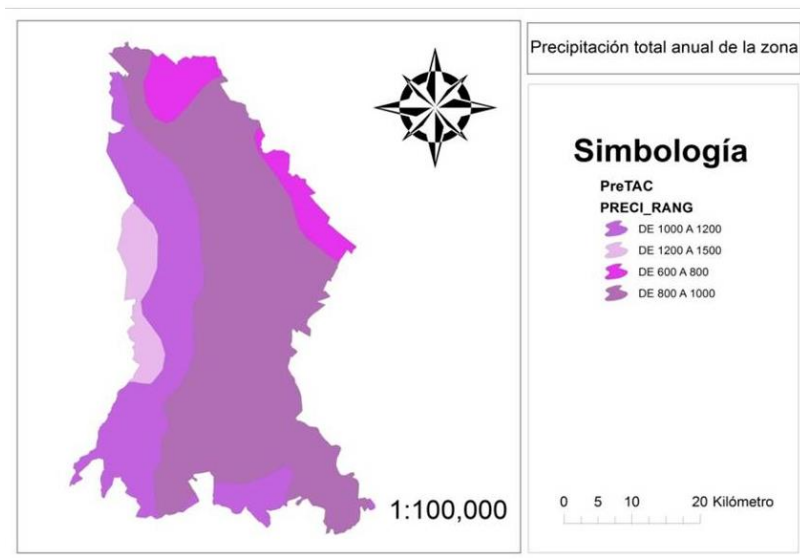


Fuente: CONABIO

**Figura 11. Temperatura media de la zona de estudio (elaboración propia).**

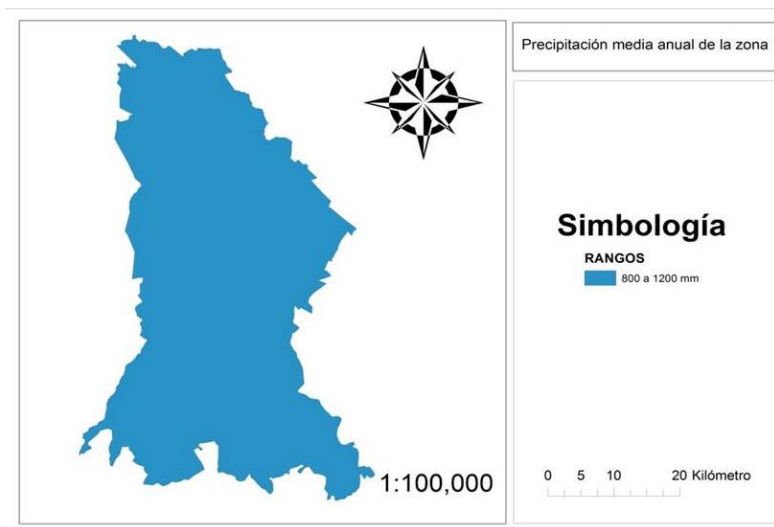
### Precipitación

La precipitación total anual va de 600 mm a 1500 mm. La precipitación más alta se presenta en las partes altas, de la zona montañosa. La precipitación media anual tiene un rango de 800 mm a 1200mm (Figuras 12 y 13).



Fuente: CONABIO

**Figura 12. Rangos de precipitación total para la zona de estudio (elaboración propia).**

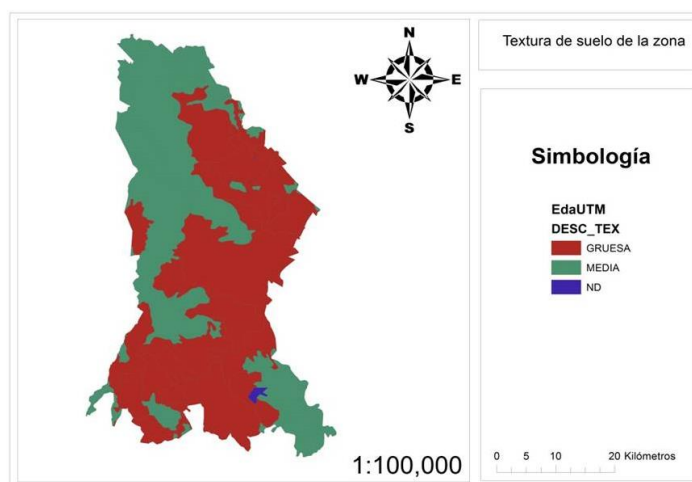


Fuente: CONABIO

**Figura 13. Precipitación media para la zona de estudio (elaboración propia).**

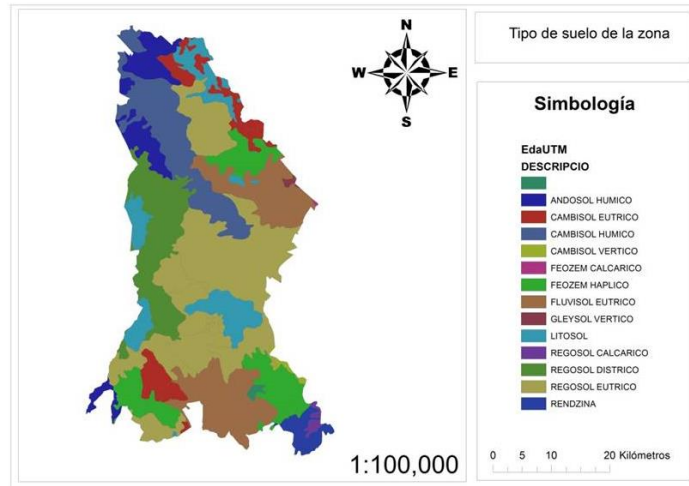
#### Tipo de suelo

En la zona de estudio se encuentran diversos tipos de suelo. Predominan los de textura media a gruesa (Figura 14). Algunos de los tipos de suelo predominante son el Regosol Eútrico, el cual se clasifica como de textura gruesa; el Fluvisol Eútrico, también de textura gruesa; el Cambisol Húmico, que es de textura media, y el Regosol Dístrico (Figura 15).



Fuente: CONABIO

**Figura 14. Textura de suelo para la zona de estudio (elaboración propia).**

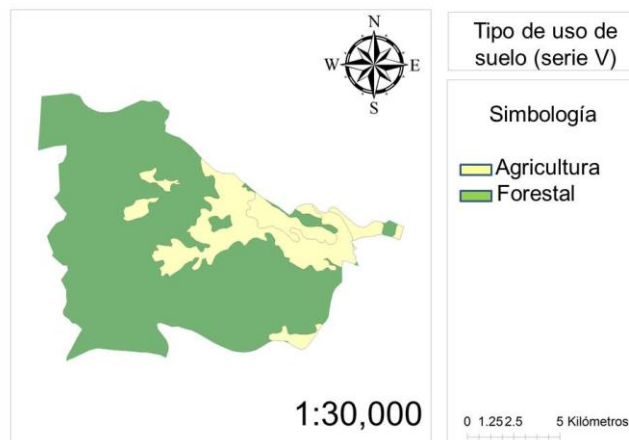


Fuente: CONABIO

**Figura 15. Tipo de suelo de la zona de estudio (elaboración propia).**

### Tipo de uso y vegetación del sitio de muestreo

La zona de muestreo cuenta aún con una gran extensión de zona forestal, en el cual podemos identificar bosque de encino, bosque de encino-pino, bosque de oyamel, bosque de pino, bosque de pino encino, pastizal inducido y pradera de alta montaña. Mientras que la zona agrícola es más pequeña y se encuentra cerca de la zona poblada (Figura 16).



Fuente INEGI

**Figura 16. Uso de suelo en San Nicolás de los Ranchos (elaboración propia).**

**Tabla 1. Descripción del sitio de muestreo**

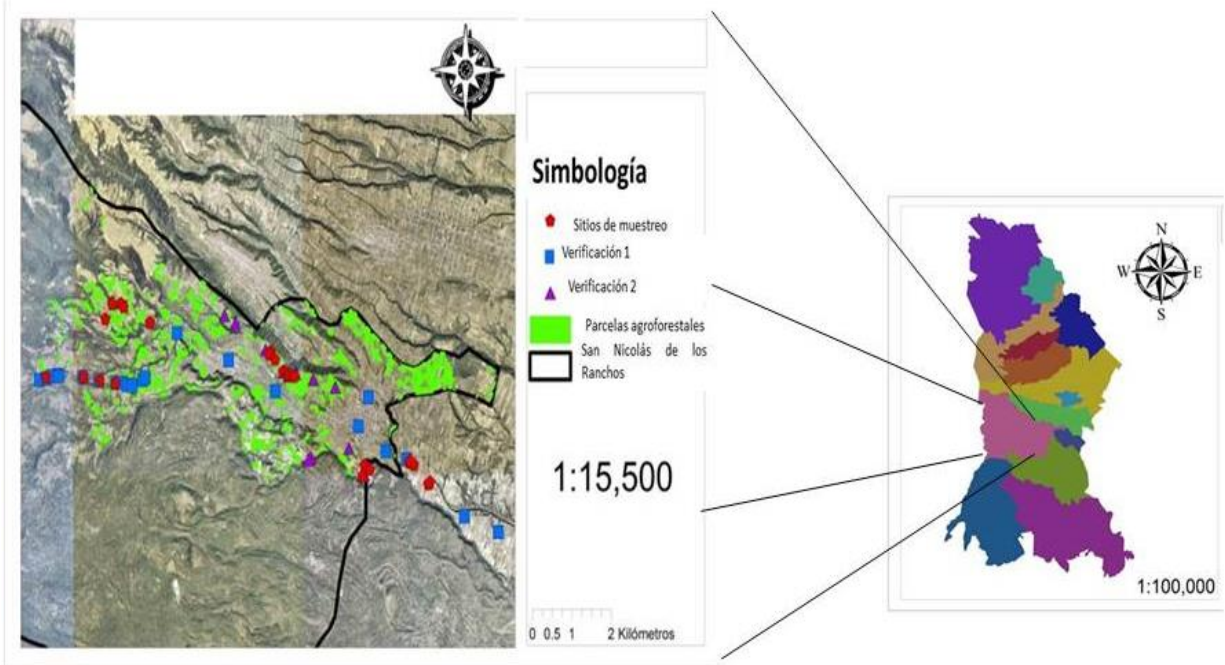
San Nicolás de los Ranchos	
Clima	C (templado, subhúmedo) y Cb' (semifrío, subhúmedo)
Temperatura media anual	templado – semifrío
Temperatura mínima	fría – muy fría
Temperatura máxima	semifrío – cálido
Precipitación media anual	800 - 1200 mm
Precipitación total anual	800 – 1500 mm
Tipo de suelo	regosol districo y regosol eutrico
Textura del suelo	media y gruesa

## 4.2 Metodología

Se utilizaron los programas ArcGis 10.1 y Google Earth para manejar la información en un sistema de información geográfica. Se obtuvo cartografía digital de suelos, clima y vegetación de la página oficial de la CONABIO. En las oficinas del Instituto Nacional de Estadística y Geografía se obtuvieron ortofotos con una escala 1:20,000.

Con ArcGis 10.1 se recortó el estado de Puebla. A partir del mapa nacional escala 1:250,000 obtenido de la página de CONABIO. Se transformaron todos los recortes obtenidos a coordenadas UTM para poder sobreponerlos con las ortofotos. Con esto, se identificaron los municipios que comprenden la zona Iztaccíhuatl-Popocatepetl. Posteriormente, a partir de las ortofotos, se digitalizaron todas las parcelas agroforestales de la región Iztaccíhuatl-Popocatepetl; a una escala de 1:5,000 con el programa ArcGis 10.1.

La toma de datos se realizó en el municipio de San Nicolás de los Ranchos (19° 04'00"N y 98°29'00"O), gracias a las facilidades prestadas y pronta respuesta por parte de las autoridades del lugar. Con recorridos de campo se verificaron y se precisó qué parcelas agroforestales son de árboles frutales y cultivos anuales. Mediante el uso de transectos se seleccionaron los predios para el muestreo de carbono y agrobiodiversidad de frutales. Para el tamaño de la parcela de muestreo se consideró la metodología UTCUTS (uso de tierra, cambio de uso de la tierra y silvicultura) que varía desde 100 m<sup>2</sup> a 600 m<sup>2</sup> según la densidad de plantación que se tenga (IPCC, 2003; MINAM, 2009; Rüginitz *et al.*, 2009). Se seleccionó un tamaño de parcela de 25 m x 20 m, cubriendo un área de 500 m<sup>2</sup> (Figura 17), como lo sugiere Andrade *et al.* (2008). En la figura 16 se muestran los puntos visitados durante las salidas exploratoria, donde los puntos rojos indican los sitios de ubicación para las 30 parcelas de muestreo.



**Figura 17. Sitios de muestreo en el municipio de San Nicolás de los Ranchos (elaboración propia)**

Para evaluar la agrobiodiversidad existente se utilizó la metodología propuesta por Moreno (2001). Los métodos para determinación de diversidad alfa usados fueron:

- Riqueza específica:

$$S = \text{número total de especies encontradas}$$

- Índice de Simpson:

$$\lambda = \sum pi^2$$

- Índice de Shannon-Wiener:

$$H' = - \sum pi \ln pi$$

- Equidad de Pielou:

$$J' = \frac{H'}{H'_{max}}$$

Donde “pi” significa la abundancia proporcional de la especie “i”, se calcula dividiendo el número de individuos de la especie “i” entre el número total de individuos en la muestra.

El índice de Simpson se centra en la posibilidad de que dos individuos tomados al azar sean de la misma especie, y valores altos reflejan una dominancia por alguna de las especies encontradas (Moreno, 2001)

El índice de Shannon-Wiener calcula diversidad con base en la teoría de la información, midiendo el nivel de incertidumbre para predecir a que especie pertenecerá un individuo escogido al azar dentro de la muestra (Moreno, 2001).

El índice de equidad de Pielou refleja la proporción de la diversidad observada con relación a la máxima esperada; valores altos representan una distribución similar entre las especies (Moreno, 2001).

Para la determinación de carbono almacenado se utilizaron las ecuaciones alométricas para métodos de tipo no destructivo. Para las ecuaciones, se tomó el diámetro a la altura de pecho (DAP). Para los árboles que contaron con ramificaciones a la altura de pecho, se les tomó esta medida en cada una de las ramificaciones para finalmente sumarlas. Si los ejemplares eran muy pequeños, solo se contaron para el cálculo de agrobiodiversidad. Para convertir la biomasa en carbono almacenado se utilizaron los valores recientemente propuestos por Thomas y Martin (2012).

Las ecuaciones utilizadas para las especies frutales (Tabla 2) fueron tomadas de diversos autores como: IPCC (2003); CITA (2008); Andrade *et al.*, (2008); MINAM (2009); Espinoza *et al.* (2012) e Hidalgo (2011). El modelo 5 se utilizó para estimar el carbono de los árboles con diámetro menor de 10 cm, cuando éstos estuvieron presentes en la parcela. Su resultado se sumó a la biomasa estimada por cada uno de los otros cuatro modelos (utilizados para árboles con diámetro mayor de 10 cm) para estimar la biomasa total de la parcela.

**Tabla 2. Ecuaciones alométricas usadas**

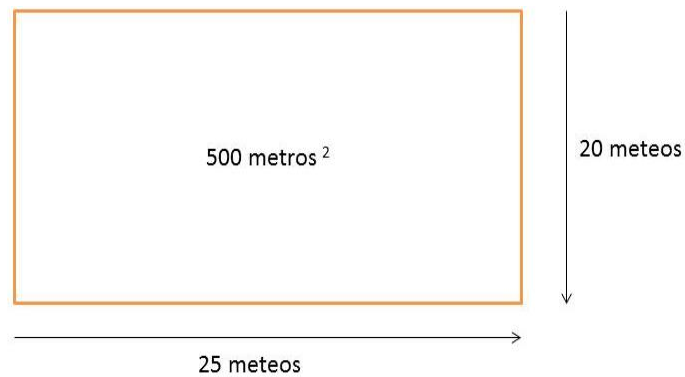
Modelo	Ecuaciones	Fuente
1 Frutales caducifolios (b)	$BM = e^{(0.014718 \cdot D^2/2)} e^{-1.8751} d^{2.29843}$	CITA (2008)
2 Frutales tropicales	$Bt = 10^{(-1.11 + 2.64 \cdot \log(\text{dap}))}$	Andrade <i>et al.</i> (2008)
3 Biomasa arbórea (Fórmula de Brown)	$Y = 0.1184 D^{2.53}$	MINAM (2009)
4 Componente leñoso en climas secos (< de 1500 mm/año)	$Y = 34.4703 - 8.0671 D + 0.6589 D^2$	Espinoza <i>et al.</i> (2012)
5 Diámetro <10 cm	$Bt = 10^{(-1.27 + 2.20 \cdot \log(\text{dap}))}$	Andrade <i>et al.</i> (2008)

Bt, BM ó Y= biomasa en kg, Log= logaritmo base 10, DAP o D= diámetro a altura de pecho (cm), d= diámetro del fuste; (b) Manzano, peral, albaricoque, cerezo, melocotón, ciruelo, almendro, vid



Para estimar el contenido de carbono se consideró el 49.5% de la biomasa total. Comúnmente se utiliza el 50 % (Aristizabal y Guerra, 2002 y Espinoza *et al.*, 2012). Sin embargo, Thomas y Martin (2012) realizaron una recopilación de todos los valores propuestos en diferentes trabajos, reportando para bosque templado un valor de 43.4% a 55.6%, de lo cual tomamos el valor promedio.

### Caracterización de la parcela agroforestal



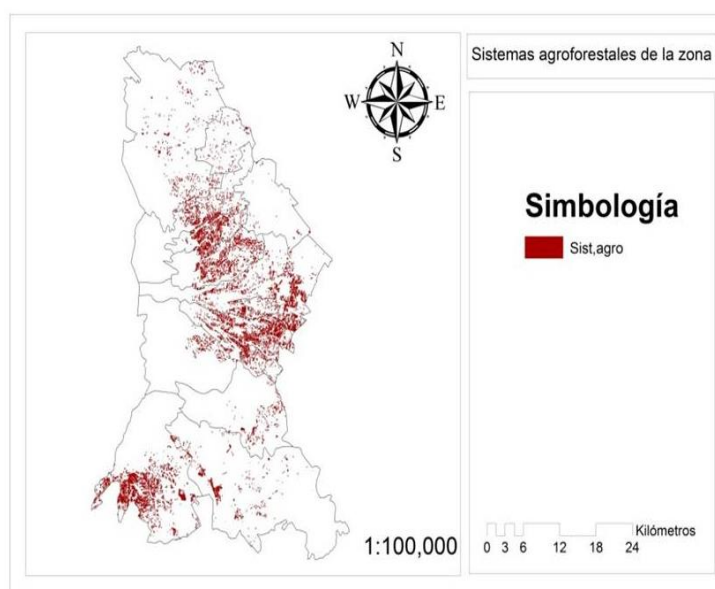
**Figura 18. Forma y tamaño de la parcela de muestreo**

Mediciones: número de especies de árboles frutales y número de individuos por especie, diámetro a la altura de pecho de los árboles frutales, especies de cultivos anuales intercalados presentes.

## V. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

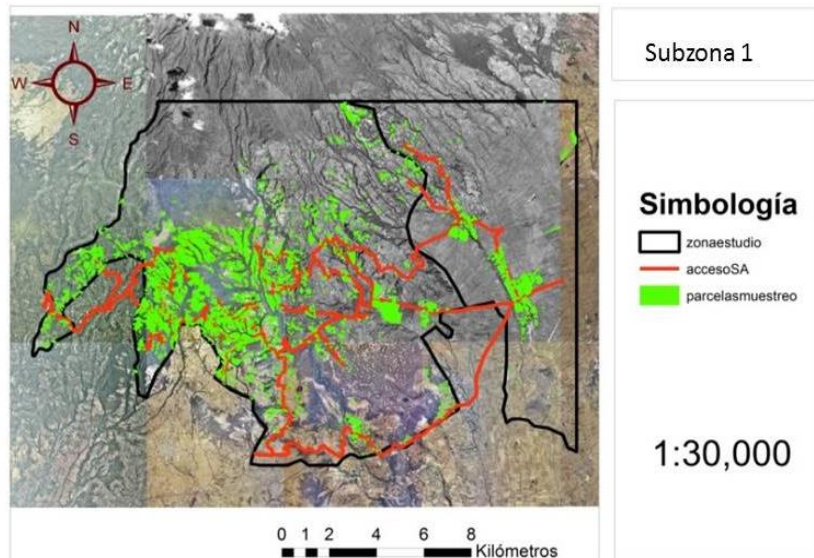
### 5.1 Superficie con sistemas agroforestales

La zona Iztaccíhuatl-Popocatépetl, localizada en el oeste del estado de Puebla, tiene una extensión de 1757.8 km<sup>2</sup>. Se delimitaron 8362 parcelas con sistemas agroforestales con una superficie total de 116.6 km<sup>2</sup> (11, 663.66 ha). La distribución de las parcelas en toda la zona se ve representada en la figura 18.

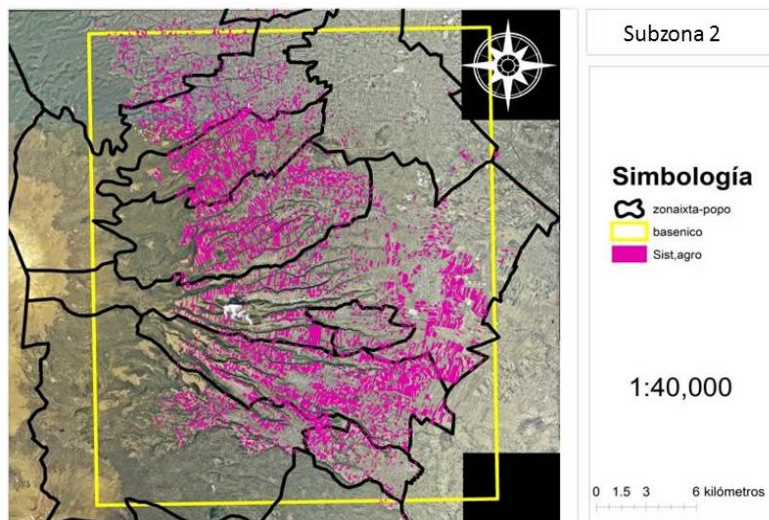


**Figura 19. Ubicación de los sistemas agroforestales en la zona Iztaccíhuatl-Popocatépetl (elaboración propia)**

La mayoría de las parcelas con sistemas agroforestales se concentran en dos subzonas. La subzona 1, en la parte sur, pertenece a los municipios de Tochimilco y Atlixco (Figura 19). La subzona 2 se encuentra en el centro del área de estudio; en los municipios de San Nicolás de los Ranchos, Nealtican, Calpan, Domingo Arenas, Huejotzingo, Chiautzingo, San Felipe Teotlalcingo y San Salvador el Verde (Figura 20). Los municipios de Atlixco, San Martín Texmelucan, San Matías Tlalancaleca y Tlahuapan tienen un menor número de sistemas agroforestales identificados y tienen más monocultivos.



**Figura 20. Ubicación de los sistemas agroforestales de la subzona 1 (elaboración propia)**



**Figura 21. Ubicación de los sistemas en la subzona 2 (elaboración propia)**

En la subzona 1 los huertos son plantaciones con un gran periodo de tiempo, y la presencia de cultivos se ve muy reducida o es casi escasa. También son menos propensos a un cambio de uso de suelo drástico, ya que el establecimiento de huertos obedece a una tradición cultural antes que una comercial.

En la subzona 2 se encuentran parcelas con sistemas agroforestales de mayor extensión que los huertos de la subzona 1, haciéndolos más susceptibles a un cambio de uso de suelo y un manejo menos amigable con el ambiente. Los principales arreglos que se encuentran en la subzona 2 son árboles en asociación con cultivos transitorios y árboles en asociación con cultivos anuales. Escobar *et al.* (2007), los consideran como árboles en cultivos y cultivos en callejón respectivamente.

## 5.2 Carbono almacenado

El carbono almacenado por parcela estimado con los modelos varió de 54.21 t/ha a 106.87 t/ha (Tabla 3). La desviación estándar del carbono estimado para las parcelas fue alta, lo que indica la alta variabilidad del carbono almacenado en las parcelas. La ecuación para estimar biomasa en el componente leñoso en climas con precipitaciones menores de 1500 mm (Espinoza *et al.*, 2012) dio una estimación similar a la de la ecuación para frutales caducifolios (CITA, 2008). Estos modelos dieron una estimación promedio de carbono almacenado de 53.91 t/ha y 54.21 t/ha, respectivamente, y son los que mejor se ajustan a las condiciones presentadas en el sitio de muestreo. El modelo de Brown calcula casi el doble que estos dos modelos, probablemente este último modelo sobrestima el carbono almacenado en los sistemas agroforestales, ya que aunque se han utilizado para frutales caducifolios, se generó para árboles forestales, sin embargo es una de las primeras ecuaciones generadas para realizar estos cálculos, por lo que se considera de uso general. El modelo 2 (para frutales tropicales) muestra una sobre estimación como lo hace la fórmula de Brown, sin embargo solo se calculó para comparar con sistemas agroforestales de ese clima.

Todos los valores promedio por hectárea son más altos que los reportados por Ávila *et al.* (2001) en diferentes sistemas agroforestales y monocultivos de Costa Rica. La cantidad total que reportó para estos sistemas fue de 68.2 a 195 t/ha; sin embargo, la cantidad correspondiente al componente arbóreo fue de 0.12 a 12.5 t/ha, la cual es

menor a nuestros dos valores más adecuados para nuestra zona (modelo 1 y 4). La estimación con el modelo 4, de Espinoza *et al.* (2012), es mayor a lo que reportan estos autores para sistemas agroforestales de café en Veracruz, (México), con valores de 28 a 35 t/ha, solo por debajo de un sistema de café-cedro rosado con 114 t/ha.

La cantidad de carbono almacenado estimado con la fórmula de Brown (104.84 t/ha) es mayor a los reportados por Callo *et al.* (2001) en la amazonia del Perú, quienes realizaron la estimación en diferentes sistemas agroforestales con la misma fórmula. La cantidad estimada en este estudio supera a los reportados por ellos para bosque secundario (67.9 t/ha) y huertos familiares (77.4 t/ha), solo por detrás de un bosque primario con 196.1 (t/ha). Hidalgo (2011), quien utilizó la misma ecuación de Brown, realizó la estimación de carbono en sistemas agroforestales del banco de germoplasma de cacao en Tingo María (Perú) y calculó los componentes de biomasa arbórea, arbustiva, herbácea, hojarasca y subterránea; obtuvo un valor promedio de 66.60 t/ha para la parte arbórea aérea y de 217.56 t/ha para todo el sistema, lo que es menor que lo estimado para el componente arbóreo en esta investigación.

La ecuación número 2 para árboles frutales tropicales (Andrade *et al.*, 2008), estimó en promedio 106.87 t/ha. Este valor es mayor al carbono de la biomasa aérea estimado por estos autores para el componente frutal de un sistema agroforestal de cacao con árboles en loma ( $50.3 \pm 20.0$  t/ha) y valle ( $33.9 \pm 16.7$ ), y muy similar a un bosque de galería que almacenó 53.3 – 105 t/ha.

Sin embargo, el contraste se realizó entre un clima tropical con un clima templado, sí la comparación se realiza con base en las ecuaciones 1 y 4 (las de mejor ajuste para este tipo de clima), las cantidades de carbono almacenado se encuentran dentro del rango que reporta la literatura.

En climas templados, González (2013) reportó un valor de 356 t/ha para bosques conservados del estado de Hidalgo, aunque para plantaciones de *Pinus patula* de 30 años reportó 59.9 t/ha, cantidad cercana a lo reportado con las ecuaciones 1 y 4 para clima templado. Figueroa (2001) por su parte, reportó que un bosque de pino y uno de encino conservado almacenan de 72 a 180 t/ha, mientras que en proceso de reforestación estos van de 50 a 126 t/ha respectivamente, valores en los cuales entra lo encontrado en esta investigación. Otro estudio en clima templado, lo realizaron Romero y García (2013) en los bosques del Distrito Federal, y quienes reportaron un valor de 47.14 a 80.76 t/ha; siendo el *Quercus* el árbol más dominante en la zona.

Para el estado de Puebla, Mendoza *et al.* (2013) calcularon que los bosques ubicados en la sierra norte del estado, tienen un contenido promedio de 131.59 t/ha y crecen a un ritmo de 2.36 t/ha al año.

Los promedios estimados de las toneladas de carbono por hectárea son similares con los reportados por Callo *et al.* 2001, quienes proporcionan diversos valores para varios sistemas naturales y de producción, en donde los valores de los modelos 1 y 4 son similares a los reportados para pasturas, campos de yuca, plantaciones de árboles, campos de maíz, rotaciones, sistemas agroforestales, campo de plátano y muy cerca de un bosque secundario de 3 años (todos estos sistemas con un rango de 36.3 a 57 t/ha). Por otro lado, nuestros valores más altos, estimados con los modelos 2 y 3, se comparan con un bosque recientemente quemado y bosque maderable (96.52 t/ha y 100 t/ha, respectivamente).

**Tabla 3. Carbono almacenado (t/ha) en los sitios**

Sitio	Modelo			
	1	2	3	4
1	6.54	9.03	9.96	5.75
2	0.25	0.25	0.25	0.25
3	6.76	9.05	10.04	5.79
4	52.00	89.31	91.77	52.67
5	230.12	490.87	470.25	229.33
6	66.46	131.25	128.90	67.46
7	31.26	49.60	52.32	31.00
8	32.40	47.29	51.19	29.76
9	77.05	131.08	135.12	77.37
10	80.57	155.28	153.61	80.80
11	84.50	180.01	172.59	84.36
12	18.17	30.39	31.49	18.18
13	117.30	251.15	240.42	117.63
14	52.31	104.94	102.50	52.45
15	42.68	79.56	79.58	43.11
16	117.59	268.21	251.56	115.38
17	38.96	79.47	76.88	37.66
18	57.89	117.29	114.14	57.59
19	49.09	95.29	94.04	49.28
20	154.50	350.85	329.81	152.77
21	23.84	41.45	42.33	23.31
22	5.73	7.39	8.22	4.85
23	47.04	90.21	89.54	48.41
24	10.72	15.62	16.92	9.91
25	39.76	70.88	71.88	39.86
26	17.06	25.27	27.15	16.05
27	36.67	68.94	68.81	37.23
28	79.63	140.22	143.11	82.11
29	17.87	26.98	28.88	16.89
30	31.51	49.08	51.92	30.22
Promedio	54.21	106.87	104.84	53.91

Modelo 1 = frutales caducifolios (CITA, 2008); Modelo 2 = frutales tropicales (Andrade *et al.*, 2008); Modelo 3 = Fórmula de Brown (MINAM, 2009); Modelo 4 = componente leñoso precipitaciones menores de 1500 mm (Espinoza *et al.*, 2012). Se ajustó la estimación sumando lo estimado en el modelo 5 (diámetros menores de 10 cm) a la estimación de los otros modelos (Anexo 1).

Todas las estimaciones se hicieron para la biomasa aérea de los árboles frutales. Sin embargo, en un sistema agroforestal, los sumideros de carbono también corresponden al suelo, arbustos, árboles muertos, hojarasca, raíces y cultivos asociados (Ávila, 2001; Callo *et al.*, 2001; Andrade *at al.*, 2008; Hidalgo, 2011 y Espinoza *et al.*, 2012). Por eso, a la cantidad estimada en este estudio de carbono almacenado, falta estimar el carbono almacenado en hojarasca y en el suelo para obtener una estimación total.

La variabilidad en el carbono almacenado observado a nivel de parcelas o sitios se explica por variables ambientales y socioeconómicas. Aunque un sistema agroforestal esté caracterizado por la combinación de árboles, cultivos y ganado, la combinación de diferentes especies arbóreas será quien determine el resultado (Navia *et al.*, 2003), pues no todas ellas guardan la misma cantidad de carbono en el mismo tiempo. Autores como Casanova *et al.* (2011) reportan que los sistemas agroforestales puede almacenar un total de 7 Gt en 50 años.

Con base en el contenido de carbono estimado en las parcelas de muestreo, se estimó que en la zona, en las 11,663.66 ha de sistemas agroforestales, se tiene un reservorio importante de carbono almacenado en el componente arbóreo de los sistemas agroforestales. La cantidad estimada varía de 628,787.91 t a 1, 246, 495.34 t (Tabla 4), dependiendo del modelo seleccionado para estimar la biomasa aérea.

**Tabla 4. Carbono almacenado estimado para los sistemas agroforestales de frutales en la región Iztaccíhuatl-Popocatépetl**

Carbono almacenado	Modelo			
	1	2	3	4
Carbono promedio t/ha en San Nicolás de los Ranchos	54.21	106.87	104.84	53.91
Carbono total (t) en la región Iztaccíhuatl-Popocatépetl	632, 287.01	1,246, 495.34	1,222, 818.11	628, 787.91

El cálculo se realizó multiplicando el valor promedio por hectárea de San Nicolás de los Ranchos, multiplicado por la superficie total en hectáreas de los sistemas agroforestales de la región.



El valor en el mercado del carbono almacenado en el componente arbóreo de los sistemas agroforestales de la zona Iztaccíhuatl-Popocatépetl es relevante. En México, el precio para la captura de carbono es de \$50 a \$100 (US \$3.7 - \$7.4) por tonelada, cumpliendo criterios tanto ambientales como sociales (Pérez *et al.*, 2009). Dependiendo del precio de mercado, se estimó que en pesos mexicanos es de \$31,442, 280.76 a \$124,653, 920.94 (Tabla 5). Esto sugiere la posibilidad de que sea factible un programa de pago de servicio ambiental por captura y fijación de carbono en la zona de estudio. Esto no solo ayudaría a mantener la reserva de carbono en el componente arbóreo, sino también posiblemente induciría a su aumento, por la motivación de los productores a incorporar más árboles. Lo anterior se basa en el hecho de que la cantidad de carbono almacenado igualmente responde a los insumos proporcionados por los gobiernos en forma de pagos por captura de carbono. Kindermann *et al.* (2006) demostraron mediante un modelo a 100 años, el impacto que tienen los esquemas de pago generados por los gobiernos, pues sin una estrategia de pago, se liberarían 45 Gt de carbono, pero un incentivo de 6 dólares por tonelada de carbono puede disminuir las emisiones de esta molécula en un 50 %, o en caso contrario, un impuesto de 12 dólares por tonelada de carbono liberada puede lograr lo mismo.

**Tabla 5. Valor de mercado del carbono almacenado en los sistemas agroforestales de la región Iztaccíhuatl-Popocatépetl**

Precio	Modelo			
	1	2	3	4
100 pesos MN/t	63,226, 186.64	124,653, 920.94	122,281, 201.97	62,884, 561.51
50 pesos MN/t	31,613, 093.32	62,326, 960.47	61,140, 600.99	31,442, 280.76
7.46 US dólares/t	4,716, 673.523	9,299, 182.50	9,122, 177.67	4,691, 188.29
3.73 US dólares/t	2,358, 336.76	4,649, 591.25	4,561, 088.83	2,345, 594.14

La falta de ecuaciones alométricas generadas en la región de estudio para estimar biomasa de las especies de árboles frutales limita la evaluación precisa de las reservas de carbono del componente arbóreo de los sistemas agroforestales de la

región Iztaccíhuatl-Popocatépetl. Los resultados del estudio son una aproximación de la estimación de estas reservas. Por la similitud de condiciones en las que fueron generadas, se considera que las ecuaciones de frutales caducifolios (modelo 1) y la generada para componente leñoso con precipitación menor a 1500 mm (modelo 4) pueden darnos una mejor aproximación que las otras dos ecuaciones usadas en este estudio.

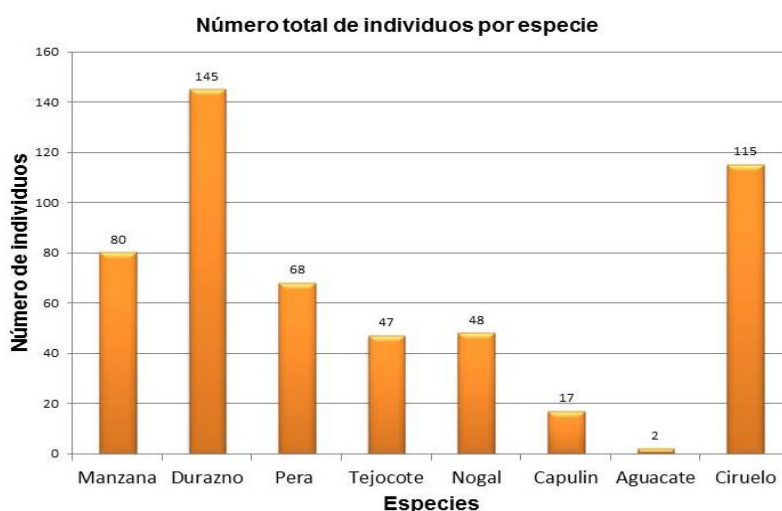
Para lograr estimaciones precisas, debemos realizar ecuaciones alométricas por método destructivo. Aristizabal *et al.* (2002) lo hicieron para Nogal cafetero (*Cordia alliodora*) y Cacao (*Theobroma cacao L.*), Méndez *et al.* (2011) lo hicieron para plantaciones de *Pinus* en Guanajuato, México. Trabajos como “¿Cómo hacer modelos alométricos de volumen, biomasa o carbono de especies leñosas perennes?” (Segura y Andrade, 2008); “Guía para la determinación de carbono en pequeñas propiedades rurales” (Rügnitz *et al.* 2009); y “Resumen del manual de construcción de ecuaciones alométricas para estimar el volumen de la biomasa de los árboles” (Sola *et al.* 2012), proveen de las herramientas necesarias para realizar dichas ecuaciones. Sin embargo, es casi imposible hacer estimaciones directas para frutales en terrenos de los productores, porque no aceptarían que se cortaran los árboles de sus parcelas.

### **5.3 Agrobiodiversidad**

En las parcelas agroforestales muestreadas se identificaron siete especies árboles frutales (tabla 6). El mayor número de individuos fue de durazno (145) y de ciruelo (115). La especie con menor número de individuos fue de capulín (17), seguido de aguacate (2) (Figura 21).

**Tabla 6. Especies de árboles frutales encontrados**

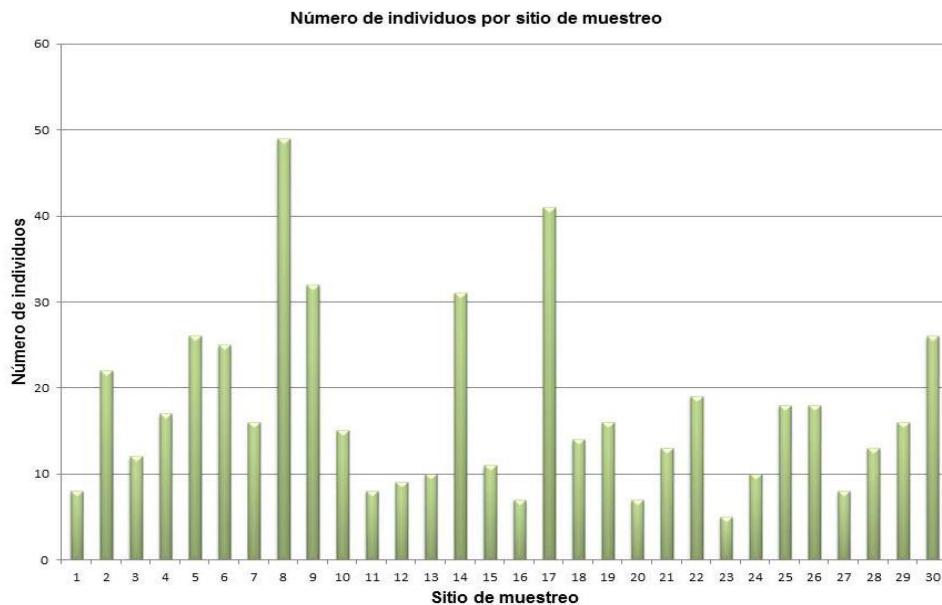
Árboles frutales	
Nombre común	Nombre científico
Manzana	<i>malus domestica</i>
Durazno	<i>prunus persica</i>
Pera	<i>Pyrus communis</i>
Tejocote	<i>Crataegus mexicana</i>
Nogal	<i>Juglans regia</i>
Capulín	<i>Prunus virginiana</i>
Aguacate	<i>Persea americana</i>
Ciruelo	<i>Prunus doestica</i>



**Figura 22. Especies y número de individuos de frutales**

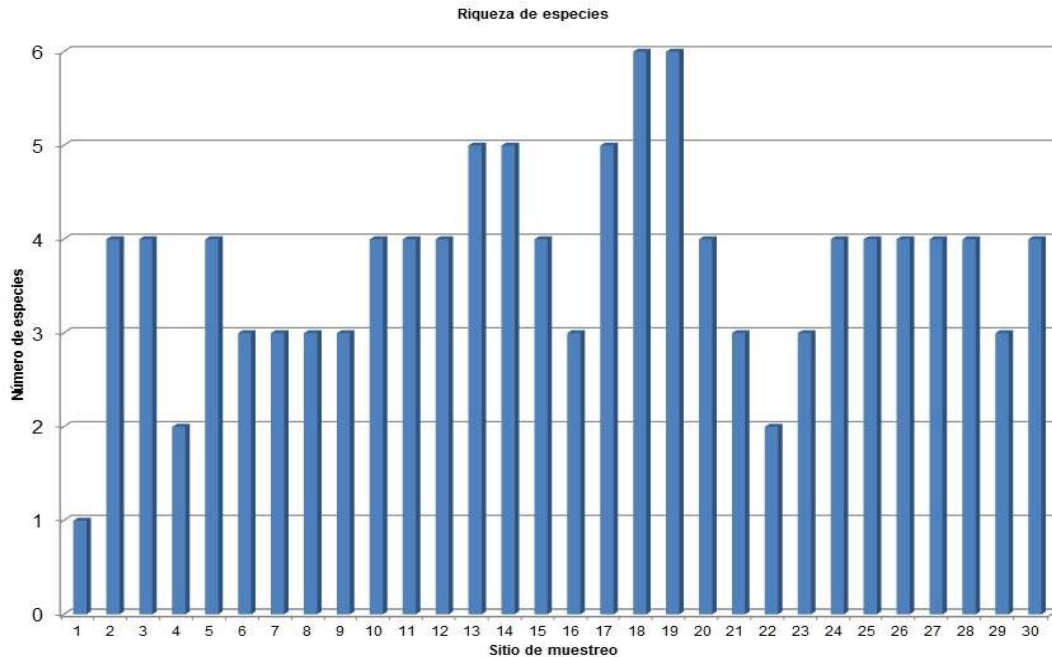
El número de individuos por sitio de muestreo (Figura 22) refleja una heterogeneidad muy alta. El sitio número 8 registró 49 individuos, mientras que en el sitio número 23 solo hubo 5 individuos. La densidad de árboles por hectárea varía entre 100 individuos como mínimo y 820 individuos como máximo, resultando en un promedio de 348 árboles/ha., lo cual es mayor que lo reportado por Salmón *et al.* (2012), quienes encuentran en la finca “Las Palmitas” (Las Tunas, Cuba) una densidad de 115 árboles/ha. La cantidad de árboles sembrados por hectárea refleja la intervención humana. Los productores seleccionan la especie a plantar de acuerdo a su interés u objetivo, por lo que ciertas parcelas pueden mostrar una alta concentración de árboles de unas pocas especies o en su defecto alta presencia de

especies. También influye el requerimiento del árbol para crecer, pues debido al tamaño de copa requieren un espacio mayor dentro de la parcela.



**Figura 23. Número de individuos por sitio de muestreo**

El número de especies presentes por sitio de muestreo (Figura 23) es más homogéneo que el de número de individuos, registrándose un promedio de cuatro especies para la zona. La riqueza de especies es de ocho, lo que es mucho menor que la reportada por Pino (2008) en fincas de Cuba, quien encontró 29 diferentes especies. Behbahani *et al.* (2012), por su parte, trabajaron en huertos de Irán, donde encontrando 23 especies, lo que resulta ser más cercano a lo reportado por Pino (2008) que los encontrados en la zona de estudio. La diversidad de los ecosistemas depende de factores bióticos y abióticos, mientras que en sistemas de producción también influye el manejo que tenga el productor.



**Figura 24. Número de especies por cada sitio de muestreo**

El sitio uno tuvo el valor más alto del índice de Simpson (Tabla 7), debido a que en este sitio solo hubo una especie (manzano). El índice de Simpson calcula la “dominancia”. Esto explica por qué en el sitio 22 se tuvo un índice de Simpson alto (0.90), ya que a pesar de que se contabilizaron varios individuos, sólo se registraron dos especies. En los sitios 12, 13, 14, 18 y 19 los valores de este índice (0.203 a 0.260) indican heterogeneidad en la distribución y presencia de especies. El valor general del índice de Simpson para el sitio de muestreo es 0.184 (Tabla 8). Pino (2008) reportó de manera general que un valor de Simpson menor que 0.12, representa una alta diversidad para sistemas agroforestales, mientras que valores mayores a 0.5 reflejan una alta dominancia. Esto indica que nuestra zona tiene valores bajos de dominancia; existiendo pocas especies que predominan sobre el resto, con mayor cantidad de individuos. El inverso de Simpson refleja el nivel de heterogeneidad en la muestra, mientras más alto sea, menor dominancia existe. En nuestra zona el inverso de Simpson fue 0.816, demostrando poca dominancia como lo indica el índice de Simpson.

**Tabla 7. Índices de diversidad de las especies de árboles frutales**

Sitio	Simpson	Inverso Simpson	Shannon-Wiener	Pielou	Riqueza específica (S)
1	1	0	0	0	1
2	0.326	0.674	1.223	0.882	4
3	0.361	0.639	1.144	0.825	4
4	0.543	0.457	0.649	0.937	2
5	0.361	0.639	1.142	0.824	4
6	0.411	0.589	0.989	0.900	3
7	0.492	0.508	0.831	1.198	3
8	0.417	0.583	0.948	0.863	3
9	0.522	0.479	0.838	0.763	3
10	0.493	0.507	0.953	0.688	4
11	0.313	0.688	1.256	0.906	4
12	0.259	0.741	1.369	0.988	4
13	0.260	0.740	1.471	0.914	5
14	0.234	0.766	1.523	0.946	5
15	0.306	0.694	1.288	0.929	4
16	0.347	0.653	1.079	0.982	3
17	0.304	0.696	1.208	0.751	5
18	0.245	0.755	1.569	0.876	6
19	0.203	0.797	1.668	0.931	6
20	0.388	0.612	1.154	0.832	4
21	0.396	0.604	1.010	0.919	3
22	0.900	0.100	0.206	0.298	2
23	0.360	0.640	1.055	0.960	3
24	0.300	0.700	1.280	0.923	4
25	0.457	0.543	0.978	0.705	4
26	0.438	0.562	1.040	0.750	4
27	0.344	0.656	1.213	0.875	4
28	0.361	0.639	1.197	0.864	4
29	0.539	0.461	0.778	0.708	3
30	0.405	0.595	1.102	0.795	4

**Tabla 8. Valores de los índices de diversidad calculados para la zona**

Índice	Valor
Simpson	0.184
Inverso Simpson	0.816
Shannon	1.811
Pielou	0.871

El índice de Shannon-Wiener calcula el nivel de diversidad, en los sitios muestreados tres de ellos (sitios 14, 18 y 19) tuvieron valor mayor de 1.5 y el 1 y 22 tuvieron los valores más bajos (0 y 0.206). Para la zona tenemos un valor general de Shannon-Wiener de 1.811 (Tabla 8), el cual se encuentra por debajo de lo reportado por Salmón *et al.* (2012) para árboles frutales en sistemas de producción en Cuba, quienes calcularon un valor de 2.5 y el cual se considera como bueno, pues en sistemas naturales se encuentra entre 3 y 4. Los valores registrados para la zona son bajos comparados con otros estudios de sistemas agroforestales; Salgado *et al.* (2007) calcularon un valor para Shannon-Wiener en cuatro municipios de Chiapas (México), la diversidad de árboles en sistemas de cacaotales fue de 2.74 a 2.99.

Los valores encontrados también son menores a los reportados para zonas templadas, como lo registrado para sistemas agroforestales del estado de Tlaxcala (México), donde Magdaleno *et al.* (2005) indican que se calcularon valores de Shannon-Wiener que van de 3.5 a 3.9, aunque, la evaluación contempló los componente de árboles, arbustos y herbáceas, lo que explica los valores altos. Zarcos *et al.* (2010) reportan, por su parte, para el parque estatal “Agua blanca” en Tabasco (México), un índice de Shannon-Wiener para cuatro sitios de muestreo de 2.12 a 2.83; ellos los consideran bajos para este tipo de ecosistemas, pero son mayores a los registrados en esta investigación. Se observa que los sistemas agroforestales de la zona Iztaccíhuatl-Popocatépetl, en el aspecto de diversidad de especies frutales, tiene valores bajos respecto a otros sistemas de producción, sin embargo también podría evaluarse a nivel de variedades.

El valor de riqueza de especies en la zona de estudio fue ocho, mucho menor a la reportada en sistemas agroforestales de climas tropicales, como la reportada por Salgado *et al.* (2007), quienes reportaron niveles de riqueza de especies de 22 a 27 en sistemas de cacaotales. El índice general de equidad de Pielou fue 0.871 (Tabla 8), lo que indica que todas las especies son casi igualmente abundantes, teniendo una distribución similar dentro de la muestra.

En la zona Iztaccíhuatl-Popocatépetl se han establecido pocas especies de árboles frutales, reduciendo el potencial de agrobiodiversidad de los sistemas agroforestales. Tanto los productores locales como las instituciones gubernamentales no han puesto atención en lo importante que es mantener o más aun mejorar los servicios ambientales de estos sistemas. En otros países, se empieza a revalorar esto; Etiopia por ejemplo, con sus altos nivel de diversidad ha logrado mitigar el impacto del cambio climático, con un programa que relacionó al productor con el gobierno (Abdy, 2009). La participación, orientación y fuerza cultural son factores claves en el nivel de diversidad agrícola que pueda presentar un sistema (Trinh, 2003 y Abdy, 2009).

Un punto a considerar en futuras investigaciones es que la diversidad de los sistemas agroforestales no solo incluye en el componente arbóreo, sino que también considera todas las especies de uso agrícola (Vargas *et al.*, 2009). En este sentido, Leyva y Ilores (2012) menciona que los índices de diversidad biológica no son suficientes para caracterizar la diversidad en estos sistemas. Estos, al ser intervenidos por el hombre, adoptan propiedades que los hacen diferentes a un sistema natural, valores utilitarios y aportes medibles para la alimentación humana, de los animales y del recurso suelo, son un ejemplo. Por tal motivo, crean el índice de agrobiodiversidad (IDA) como una nueva propuesta metodológica para el cálculo de todos los beneficios que brindan los sistemas agroforestales. Los resultados de este estudio, sugieren que es conveniente analizar índices alternativos, como el IDA, para evaluar la diversidad de los sistemas agroforestales, ya que son agroecosistemas con alta intervención de los productores rurales de la zona.



## **VI. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

### **Conclusiones**

El componente arbóreo aéreo de los sistemas agroforestales de la región Iztaccíhuatl-Popocatépetl es un reservorio importante de carbono, ya que se estimó un promedio de carbono almacenado de 53.91 t/ha a 106.87 t/ha, ubicándolo dentro del rango reportado en la literatura por diferentes estudios, para diferentes sistemas agroforestales y diferentes tipos de clima, convirtiendo a la zona como sumidero y proveedor importante para el servicio ambiental de captura de carbono; su valor comercial también es alto.

La agrobiodiversidad de especies de árboles frutales de los sistemas agroforestales de la región fue baja, menor que la reportada en investigaciones de sistemas similares; con base en los valores de riqueza de especies e índice de Shannon-Wiener. Aunque el índice de Simpson, inverso de Simpson y equidad de Pielou tiene valores altos, estos no son un reflejo del nivel de diversidad de la zona. Esto se asocia a la selección de especies de frutales que los productores hacen, motivados probablemente por su demanda en el mercado.

### **Recomendaciones**

Extender los muestreos en toda la zona, tanto para hacer estimaciones de carbono almacenado como evaluaciones de la agrobiodiversidad.

Si es posible, desarrollar ecuaciones alométricas específicas para las especies frutales, mediante métodos destructivos. Se debe considerar el pago a los productores de los árboles a derribar.

Aplicar encuestas a los productores para conocer la actitud que tienen ante la introducción de nuevas especies frutales y sobre la conservación misma de los sistemas agroforestales.

## VII. LITERATURA CITADA

- Abdy, A. (2009). Agro-biodiversity as an adaptive component to climate change: the case of plant genetic resources in semi-arid regions of Ethiopia. 'IAIA09 Conference Proceedings', Impact Assessment and Human Well-Being 29th Annual Conference of the International Association for Impact Assessment, 16-22 May 2009, Accra International Conference Center, Accra, Ghana.
- Altieri, M.A. (1999). The ecological role of biodiversity in agroecosystems. *Agriculture, Ecosystem and Environment*, 74, 19-31.
- Altieri, M.A. y Nicholls, C.I. (2009). *Biodiversidad y manejo de plagas en agroecosistemas*. Barcelona, España: Icaria Editorial.
- Andrade, H.J.; Segura, M.; Somarriba, E. y Villalobos, M. (2008). Valoración biofísica y financiera de la fijación de carbono por uso de suelo en fincas cacaoteras indígenas de Talamanca, Costa Rica. *Agroforestería en las Américas*, 46, 45-50.
- Antle, J.M.; Capalbo, S.M.; Mooney, S.; Elliot, E.T. y Paustian, K.H. (2001). Economic analysis of agricultural soil carbon sequestration: an integrated assessment approach. *Journal of Agricultural and Resource Economics*, 26 (2), 344- 367.
- Aristizabal, J. y Guerra, A. (2002). *Estimación de la tasa de fijación de carbono en el sistema agroforestal Nogal cafetero (Cordia alliodora)-Cacao (Theobroma cacao L.)- Plátano (Musa paradisiaca)*. Tesis de licenciatura, Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Bogotá, Colombia.
- Ávila, G.; Jiménez, F.; Beer, J.; Gómez, M. e Ibrahim, M. (2001). Almacenamiento, fijación de carbono y valoración de servicios ambientales en sistemas agroforestales en Costa Rica. *Agroforestería en las Américas*, 8 (30), 32-35.
- Baco, M.N.; Biaou, G. y Lescure, J.P. (2007). Complementarity between geographical and Social Patterns in the Preservation of Yam (*Dioscorea* sp.) Diversity in Northern Benin. *Economic Botany*, 61 (4), 385-393. Recuperado de: [http://www.bibliocatalogo.buap.mx:2614/doi/full/10.1663/0013-0001\(2007\)61%5B385:CBGASP%5D2.0.CO;2](http://www.bibliocatalogo.buap.mx:2614/doi/full/10.1663/0013-0001(2007)61%5B385:CBGASP%5D2.0.CO;2)

- Baggethun, E.G.; Groot, R.; Lomas, P.L. y Montes, C. (2010). The history of ecosystem service in economic theory and practice: from early notion to market and payment schemes. *Ecological Economics*, 62, 1209-1218.
- Barbier, E. B. y Tesfaw, A. T. (2012). Can REDD+ save the forest? The role of payments and tenure. *Forests*, 3, 881-895.
- Behbahani, A. G.; Khoshbakht, K.; Davari, A.; Tabrizi, L.; Veisi, H. y Alipour A. (2012). Assessing the effect of socio-economic factors of agrobiodiversity in homegardens of Jajrood and Jamabrood in Tehran province (Iran). *Advances in Environmental Biology*, 6 (5), 1708- 1715.
- Bonilla, E. (2009). *Uso de ecuaciones alométricas para estimar biomasa y carbono en Pinus montezumae Lamb.* Tesis de ingeniería. Universidad autónoma de Chapingo, Estado de México, México.
- Brush, S.B. (2000). *Genes in the field. On-farm conservation of crops diversity.* Canadá, U.S.A, Italia: IPGRI, IDRC and L.P.
- Callo, D.; Krishnamurthy, L. y Alegre J., (2001, 18 al 20 de octubre). *Cuantificación del carbono secuestrado por algunos SAF's y testigo, es tres pisos ecológicos de la amazonia de Perú.* Trabajo presentado en el simposio internacional medición y monitoreo de la captura de carbono en ecosistemas forestales, Chile.
- Casanova, F.; Petit, J. y Solorio, J. (2011). Los sistemas agroforestales como alternativa a la captura de carbono en el trópico mexicano. *Revista Chapingo serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, 17(1), 133-143.
- Casas, A. y Martínez, R. (2008). *Marcos legales para el pago de servicios ambientales en América latina y el caribe: análisis de ocho países.* Washington, E.U: Departamento de desarrollo sostenible.
- Challenger, A. (2009). Introducción a los servicios ambientales. Instituto Nacional de Ecología. Recuperado de: [http://www.inecc.gob.mx/descargas/con\\_eco/2009\\_sem\\_ser\\_amb\\_pres\\_01\\_achallenger.pdf](http://www.inecc.gob.mx/descargas/con_eco/2009_sem_ser_amb_pres_01_achallenger.pdf)
- Chiroleu, M. y Roussel, S. (2013). Payments for carbon sequestration in agricultural soils: incentives for the future and the rewards for the past.1-9.

- CITA (2008). Estudio sobre la funcionalidad de la vegetación leñosa de Aragón como sumidero de CO<sub>2</sub>: existencias y potencialidades (estimaciones cuantitativas y predicciones de fijación). *Informe final*. España: Centro de investigación y tecnología agroalimentaria de Aragón.
- CONABIO, (2000). *Estrategia nacional sobre biodiversidad de México*. México: CONABIO.
- CONAFOR (2011). *Servicios ambientales y cambio climático*. México: CONAFOR.
- Escobar, M.L.; Díaz, A.; Leal, A. y Angarita, M., (2007). *Principales sistemas agroforestales y avances en la protección fitosanitaria en el departamento de Santander, Colombia*. Bucaramanga, Colombia: ICA y CDMB.
- Espinoza, W.; Krishnamurthy, L.; Vasquez, A. y Torres, A., (2012). Almacén de carbono en sistemas agroforestales de café. *Revista Chapingo serie ciencias forestales y de ambiente*, 18 (1), 57-70.
- Figueroa, C. M. (2001). *Comparación de la concentración de carbono en diferentes tipos de vegetación de la sierra norte de Oaxaca*. Tesis de ingeniería. Universidad Autónoma Chapingo. Estado de México, México
- Gliessman, S.R. (2002). *Agroecología: Procesos ecológicos en agricultura sostenible*. Turrialba, Costa Rica: LITOCAT.
- González, E. (2013). *Manejo forestal y servicios ambientales en Mineral del Monte, estado de Hidalgo*. Tesis de licenciatura. Universidad Nacional Autónoma de México.
- Hernández, E.; Virginia, G.; Campos, G.V.; Enríquez, J.R.; Rodríguez, G. y Velasco, V.A. (2012). Captura de carbono por inga jinicuil Schltld. En un sistema agroforestal de café bajo sombra. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 9 (3), 11-21.
- Hidalgo, P. (2011). Determinación de las reservas de carbono en un sistema agroforestal de la selva alta de Tingo María. *Revista aportes santiaguino*, 4(1), 87-92.
- Instituto tecnológico de sonora. *Como citar formato APA*. Consultado el 5 de julio de 2014 en: [http://biblioteca.itson.mx/oa/educacion/oa11/formato\\_apa/p9.htm](http://biblioteca.itson.mx/oa/educacion/oa11/formato_apa/p9.htm)
- IPCC, (2002). Cambio climático y biodiversidad. *Informe técnico V*. SBSTTA.

- IPCC, (2003). Métodos complementarios y orientación sobre las buenas practicas que emanan del protocolo de Kioto. En IPCC (Ed.) *Orientación del IPCC sobre las buenas practicas del UTCUTS* (pp.4.1-4.124). Ginebra, Suiza: IPCC.
- Karsenty, A.; Vogel, A. y Castell, F. (2012). "Carbon rights", REDD+ and payments for environmental services. *Environmental science & Policy*, 1-14.
- Kindermann, G.; Obersteiner, M.; Rametsteiner, E. y McCallum, I. (2006). Predicting the deforestation-trend under different carbon-prices. *Carbon Balance and Management*, 1 (15), 1-17.
- Leyva, A. y Lores, A. (2012). Nuevo índice para evaluar agrobiodiversidad. *Agroecología*, 7, 109-115.
- López, O. y Vargas, M.C. (1998). *Sistemas agroforestales*. Departamento de Caqueta, Colombia: Unión grafica Lida.
- Magdaleno, L.; García, E.; Valdez, J.I. y De la cruz, V. (2005). Evaluación de los sistemas agroforestales "Árboles en terrenos de cultivo", en Vicente Guerreo, Tlaxcala, México. *Rev. Fitotec. Mex.*, 28 (3), 203-212.
- Mayrand, K. y Paquin, M. (2004). *Pago por servicios ambientales: Estudio y evaluación de esquemas vigentes*. Montreal, Canadá: UNISFÉRA.
- Méndez, J.; Lockie, S.L.; Capó, M.Á. y Nájera, J.A. (2011). Ecuaciones alométricas y estimación de incrementos en biomasa aérea y carbono en una plantación mixta de *Pinus devoniana* Lindl. y *P. pseudostrobus* Lindl., en Guanajuato, México. *Agrociencia*, 45, 479-491.
- Mendieta, M. y Rocha, L.R. (2007). *Sistemas agroforestales*. Managua, Nicaragua: Universidad nacional agraria.
- Mendoza, A.; Romero, A y Posadas, H. (2013). Inventarios, flujos de carbono y efectos de manejo en bosques templados de la sierra norte de Puebla. En Paz, F.; Wong, J.; Bazan, M. y Saynes, V., (Ed.). *Estado actual del conocimiento del ciclo del carbono y sus interacciones en México: Síntesis a 2013*. Estado de México, México: Programa Mexicano del Carbono (PMC).
- Millennium Ecosystem Assessment (2005). *Ecosystems and Human Well-being: Synthesis*. Washington, E.U: Island Press.

- MINAM, (2009). *Identificación de metodologías existentes para determinar stock de carbono en ecosistemas forestales*. Perú: MINAM.
- Moreno, C.E., (2001). *Métodos para medir la biodiversidad. M & T- manuales y tesis SEA, volumen 1*. Zaragoza, España: GORFI.
- Myers, N. (1996). Environmental Service of Biodiversity. *Ecology*, 93 (7), 2764-2769.
- Narloch, U.; Drucker, A.G. y Pascual, U. (2011). Payments for agrobiodiversity conservation service for sustained on-farm utilization of plant and animal genetic resources. *Ecological Economics*, 23, 1-35.
- Navia, J. F.; Restrepo, J.M.; Villada, D.E. y Ojeda, P.A. (2003). *Agroforestería: opciones tecnológicas para el manejo de suelos en zonas de ladera*. Santiago de Cali, Colombia: FIDAR.
- Nodari, R.O y Tomás, D.F. (2011). Agrodiversidad y desarrollo sostenible: la conservación *in situ* puede asegurar la seguridad alimentaria. *Biocenosis*, 24 (1-2), 21-29.
- Núñez, I.; González, É. y Barahona, A. (2003). La biodiversidad: historia y contexto de un concepto. *Interciencia*, 28 (7), 387-393.
- Ñique, M. (2010). *Biodiversidad: clasificación y cuantificación*. Tingo María, Perú: Universidad nacional agraria de la selva.
- Ocampo, D. (2012). Agrodiversidad: conservación y uso como respuesta adaptativa al cambio climático. *Éxito empresarial*, 176, 1-3.
- Ordoñez, L.; Gavilánez, C y Salazar, A. (2011). *Secuestro de carbono en biomasa aérea en sistemas agroforestales de Cacao y Café ubicados en la reserva de la biosfera Sumaco*. Quito, Ecuador: Noción imprenta.
- Ortiz, A.M. y Riascos, L.D. (2006). *Almacenamiento y fijación de carbono del sistema agroforestal Cacao *Theobroma cacao* L y Laurel *Cordia alliodora* (Ruiz & Pavón) Oken en la reserva indígena de Talamanca, Costa Rica*. Tesis de ingeniería, Universidad de Nariño, San Juan de Pasto, Colombia.
- Ospina, A. (2004). Clasificación y caracterización de tecnologías agroforestales. En Delgado, F.; Serrano, E. y Bilbao, J., (Ed.). *Agroforestería en Latinoamérica: Experiencias locales*. Buga, Bolivia: MAELA.

- Pérez, N.; Rueda, M.; Rojo, G.E; Martínez, R.; Ramírez, B. y Juárez, J.P. (2009). El bambú (*Bambusa spp.*) como sistema agroforestal; una alternativa del desarrollo mediante el pago por servicios ambientales en la sierra nororiental del estado de Puebla. *RA Ximhai*, 5 (3), 335-346.
- Pino, M.A. (2008). Diversidad agrícola de especies de frutales en el agroecosistema campesino de la comunidad las Caobas, Ginebra, Holguín. *Cultivos tropicales*, 29 (2), 5-10.
- PNUMA (2005). *Diversidad biológica. Proyecto ciudadanía ambiental global*. México: PNUMA.
- Rolón, G.M.A. (2009). *Beneficios económicos de los sistemas agroforestales en las comunidades Pindoy y Zanja Cora, del distrito de San Juan Nipomuceno, departamento de Caazapa, Paraguay*. Tesis de licenciatura, Universidad Nacional de Asunción, San Lorenzo, Paraguay.
- Romero A. y García F. (2013). Estimación del contenido de carbono en la zona ecológica y cultura Bosque de Tlalpan, Distrito Federal. En Paz, F.; Wong, J.; Bazan, M. y Saynes, V., (Ed.). *Estado actual del conocimiento del ciclo del carbono y sus interacciones en México: Síntesis a 2013*. Estado de México, México: Programa Mexicano del Carbono (PMC).
- Roncal, S.; Soto, L. y Castellanos, J.; Ramírez, N y Jong, B. (2008). Sistemas agroforestales y almacenamiento de carbono en comunidades indígenas de Chiapas, México. *Interciencia*, 33 (3), 200-2006.
- Rügnitz, M.; Chacón, M. y Porro, R., (2009). *Guía para la determinación de carbono en pequeñas propiedades rurales*. Lima, Perú: Centro mundial agroforestal (ICRAF)/ consorcio iniciativa amazónica (IA).
- Ruiz, M.; García, C y Sayer, J.A. (2007). Los servicios ambientales de los bosques. *Ecosistemas*, 16(3), 81-90.
- Salgado, M.G.; Ibarra, G.; Macías, J.E; López, O. (2007). Diversidad arbórea en cacaotales del soconusco, Chiapas, México. *Interciencia*, 32 (11), 763-768.
- Salgado, G. (2012). *Guía para elaborar citas y referencias en formato APA*. Costa Rica: ULACIT.

- Salmón, Y.; Funes, F.R.; Martín, O.M. (2012). Evaluación de los componentes de la biodiversidad en la finca agroecológica "Las Palmitas" del municipio Las Tunas. *Pastos y Forrajes*, 35 (3), 321-332.
- Sanquetta, C.R.; Wojciechowski, J.; Dalla, A.P.; Lourenco, A y Benedet, G.C. (2013). On the use of data mining for estimating carbon storage in the trees. *Carbon balance and management*, 8, 1-9.
- Secretaría del convenio sobre la diversidad biológica, (2010). *Perspectiva mundial sobre la diversidad biológica*. Montreal, Canadá: Secretaría del convenio de la diversidad biológica.
- Segura, M. y Andrade, H.J. (2008). ¿Cómo construir modelos alométricos de volumen, biomasa o carbono de especies leñosas perennes?. *Agroforestería en las Américas*, 46, 89-96.
- Sola, G.; Picard, N.; Saint, L. y Henry, M. (2012). *Resumen del manual de construcción de ecuaciones alométricas para estimar el volumen y la biomasa de los árboles: del trabajo de campo a la predicción*. Montpellier, Francia: FAO y CIRAD.
- Soto, J.L.; Valdivia, E.; Drucker, A.; Narloch, U.; Pascual, U. y Pinto, M., (2010). Pago por servicios de conservación de la biodiversidad y sus implicancias para la acción colectiva y los derechos de propiedad (Caso: quinua). *CienciAgro*, 2 (1), 208-220.
- Stupino, S. A.; Ferreira, A. C.; Frangi, J. y Sarandón, S.J. (2008). Plant diversity in two horticultural farms under organic and conventional management in La Plata, Argentina: a case study. *Revista Brasileira de Agroecologia*, 3 (3), 24-35.
- Thomas, S. C. y Martin, A. R. (2012). Carbon content of tree tissues: a synthesis. *Forest*, 3, 332-352.
- Torrice, J.C. (2010). Agrobiodiversity assessment in the Atlantic rainforest region of Rio de Janeiro. *CienciAgro*, 2 (1), 228-236.
- Trinh, L.N.; Watson, J.W.; Hue, N.N.; De, N.N.; Minh, N.V.; Chu, P.; Sthapit, B.R. y Eyzaguirre, P.B. (2003). Agrobiodiversity conservation and development in



- Vietnamese home gardens. *Agriculture, ecosystems and environment*, 97, 317-344.
- Vargas, D.; Miranda, S.; Marentes, F.L.; Rodríguez, J. y Rodríguez, P. (2009). Comunicación corta. Estudio de diversidad agrícola en fincas de la abana. *Cultivos tropicales*, 30 (2), 5-9.
- Villavicencio, A. A. (2009). Propuesta metodológica para un sistema de pago por servicios ambientales en el estado de México. *Cuadernos geográficos*, 44, 29-49.
- Wunder, S. (2006). *Pago por servicios ambientales: Principios básicos y esenciales*. CIFOR.
- Wunder, S.; Wertz, S. y Moreno, R. (2007). Pago por servicios ambientales: una nueva forma de conservar la biodiversidad. *Gaceta ecológica*, 84-85, 39-52.
- Zarco, V.M; Valdez, JL; Pérez, G.Á y Catillo, O. (2010). Estructura y diversidad de la vegetación arbórea del parque estatal Agua Blanca, Macuspana, Tabasco. *Universidad y Ciencia*, 26 (1), 1-17.

## VIII. ANEXOS

### Anexo 1. Carbono estimado (t) por los modelos por parcela de muestreo (500 m<sup>2</sup>)

Parcela	Modelo				
	1	2	3	4	5
1	0.33	0.45	0.50	0.29	0.001
2	0.00	0.00	0.00	0.00	0.013
3	0.33	0.44	0.49	0.28	0.009
4	2.59	4.46	4.58	2.62	0.009
5	11.50	24.54	23.51	11.46	0.005
6	3.31	6.55	6.43	3.36	0.017
7	1.56	2.48	2.61	1.55	0.002
8	1.61	2.36	2.55	1.48	0.006
9	3.85	6.55	6.76	3.87	0.000
10	4.03	7.76	7.68	4.04	0.000
11	4.22	9.00	8.63	4.22	0.000
12	0.91	1.52	1.57	0.91	0.003
13	5.86	12.56	12.02	5.88	0.000
14	2.61	5.24	5.12	2.62	0.007
15	2.13	3.98	3.98	2.16	0.000
16	5.88	13.41	12.58	5.77	0.000
17	1.91	3.94	3.81	1.85	0.034
18	2.89	5.86	5.71	2.88	0.000
19	2.45	4.76	4.69	2.46	0.008
20	7.73	17.54	16.49	7.64	0.000
21	1.19	2.07	2.11	1.16	0.005
22	0.26	0.34	0.39	0.22	0.025
23	2.35	4.51	4.48	2.42	0.000
24	0.53	0.78	0.84	0.49	0.003
25	1.98	3.54	3.59	1.98	0.009
26	0.83	1.24	1.34	0.78	0.019
27	1.83	3.45	3.44	1.86	0.000
28	3.98	7.01	7.16	4.11	0.000
29	0.89	1.34	1.44	0.84	0.005
30	1.55	2.43	2.57	1.49	0.023

Modelo 1 = frutales caducifolios (CITA, 2008); Modelo 2 = frutales tropicales (Andrade *et al.*, 2008); Modelo 3 = Fórmula de Brown (MINAM, 2009); Modelo 4 = Componente leñoso precipitaciones menores de 1500 mm (Espinoza *et al.*, 2012); Modelo 5 = diámetros menores de 10 cm (Andrade *et al.*, 2008).

**Anexo 2. Carbono estimado ajustado con estimaciones de diámetros menores de 10 cm por parcela de 500 m<sup>2</sup>**

Sitio	Modelo			
	1	2	3	4
1	0.33	0.45	0.50	0.29
2	0.01	0.01	0.01	0.01
3	0.34	0.45	0.50	0.29
4	2.60	4.47	4.59	2.63
5	11.51	24.54	23.51	11.47
6	3.32	6.56	6.44	3.37
7	1.56	2.48	2.62	1.55
8	1.62	2.36	2.56	1.49
9	3.85	6.55	6.76	3.87
10	4.03	7.76	7.68	4.04
11	4.22	9.00	8.63	4.22
12	0.91	1.52	1.57	0.91
13	5.86	12.56	12.02	5.88
14	2.62	5.25	5.13	2.62
15	2.13	3.98	3.98	2.16
16	5.88	13.41	12.58	5.77
17	1.95	3.97	3.84	1.88
18	2.89	5.86	5.71	2.88
19	2.45	4.76	4.70	2.46
20	7.73	17.54	16.49	7.64
21	1.19	2.07	2.12	1.17
22	0.29	0.37	0.41	0.24
23	2.35	4.51	4.48	2.42
24	0.54	0.78	0.85	0.50
25	1.99	3.54	3.59	1.99
26	0.85	1.26	1.36	0.80
27	1.83	3.45	3.44	1.86
28	3.98	7.01	7.16	4.11
29	0.89	1.35	1.44	0.84
30	1.58	2.45	2.60	1.51

Modelo 1 = frutales caducifolios (CITA, 2008); Modelo 2 = frutales tropicales (Andrade *et al.*, 2008); Modelo 3 = Fórmula de Brown (MINAM, 2009); Modelo 4 = Componente leñoso precipitaciones menores de 1500 mm (Espinoza *et al.*, 2012)

**Anexo 3. Número de individuos y especies por punto de muestreo, además de la cantidad de individuos por hectárea**

Sitio	No. Especies	No. Individuos	Promedio ind./ha
1	1	8	160
2	4	22	440
3	4	12	240
4	2	17	340
5	4	26	520
6	3	25	500
7	3	16	320
8	3	49	980
9	3	32	640
10	4	15	300
11	4	8	160
12	4	9	180
13	5	10	200
14	5	31	620
15	4	11	220
16	3	7	140
17	5	41	820
18	6	14	280
19	6	16	320
20	4	7	140
21	3	13	260
22	2	19	380
23	3	5	100
24	4	10	200
25	4	18	360
26	4	18	360
27	4	8	160
28	4	13	260
29	3	16	320
30	4	26	520