



COLEGIO DE POSTGRADUADOS

INSTITUCIÓN DE ENSEÑANZA E INVESTIGACIÓN EN CIENCIAS AGRÍCOLAS

CAMPUS PUEBLA

POSTGRADO EN ESTRATEGIAS PARA EL DESARROLLO AGRÍCOLA
REGIONAL

**EVALUACIÓN DEL SERVICIO AMBIENTAL DE CAPTURA DE
CARBONO COMO ALTERNATIVA DE USO DEL BOSQUE EN EL
EJIDO ZAUTLA, PUEBLA, MÉXICO**

JAIME CERVANTES PARRA

TESIS

PRESENTADA COMO REQUISITO PARCIAL
PARA OBTENER EL GRADO DE:

MAESTRO EN CIENCIAS

Puebla, Puebla

2021

La presente tesis, titulada: **Evaluación del servicio ambiental de captura de carbono como alternativa de uso del bosque en el ejido Zautla, Puebla, México**, realizada por el alumno: **Jaime Cervantes Parra**, bajo la dirección del Consejo Particular indicado, ha sido aprobada por el mismo y aceptada como requisito parcial para obtener el grado de:

MAESTRO EN CIENCIAS

ESTRATEGIAS PARA EL DESARROLLO AGRÍCOLA REGIONAL

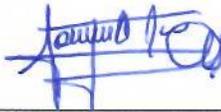
CONSEJO PARTICULAR

CONSEJERO:



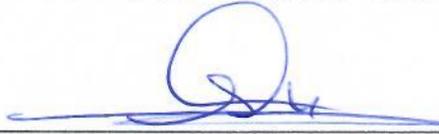
DR. ANGEL BUSTAMANTE GONZÁLEZ

ASESOR:



DR. JOSÉ LUIS JARAMILLO VILLANUEVA

ASESOR:



DR. SAMUEL VARGAS LÓPEZ

ASESOR:



DR. GUSTAVO MANUEL CRUZ BELLO

Puebla, Puebla, México, mayo del 2021

EVALUACIÓN DEL SERVICIO AMBIENTAL DE CAPTURA DE CARBONO COMO ALTERNATIVA DE USO DEL BOSQUE EN EL EJIDO ZAUTLA, PUEBLA, MÉXICO

Jaime Cervantes Parra, M. C.
Colegio de Postgraduados, 2021

El Ejido Zautla tiene una superficie de 768.79 hectáreas de las cuales 387.45 son de uso forestal, aprovechadas recientemente para la extracción de madera. Dado el deterioro del ecosistema asociado a este aprovechamiento, un programa de Pago del Servicio Ambiental de Captura de Carbono (PSACC) puede ser una alternativa más amigable con el ambiente. En este estudio se evaluó el contenido de carbono del bosque en cuatro reservorios: carbono sobre el suelo, carbono bajo el suelo, carbono de vegetación muerta y carbono en el suelo. La cuantificación de carbono se realizó a través de un inventario forestal en 202 sitios de muestreo para medir el carbono del suelo y para estimar la biomasa y el carbono almacenado. Como segundo método, se utilizó el modelo InVEST 3.7.0. También, se hizo un análisis económico de las alternativas de aprovechamiento forestal y pago de servicios ambientales por captura de carbono. El estudio indicó que el ecosistema forestal del Ejido Zautla es un reservorio importante de carbono en sus diferentes compartimentos, lo que hace factible destinarlo como área de provisión del servicio ecosistémico de captura y almacenamiento de carbono como alternativa al aprovechamiento forestal extractivo.

Palabras clave: Bosque, ecosistema, InVEST, uso.

ASSESSMENT OF THE ENVIRONMENTAL SERVICE OF CARBON SEQUESTRATION AS A FOREST ALTERNATIVE USE IN THE EJIDO ZAUTLA, PUEBLA, MEXICO

Jaime Cervantes Parra, M. C.
Colegio de Postgraduados, 2021

Ejido Zautla has 768.79 hectares of land, of which 387.45 hectares are forestry land, recently harvested for timber. Given the deterioration of the ecosystem associated with this logging, a Payment for Environmental Service for Carbon Capture (PESC) program may be a more environmentally friendly alternative. In this study, the carbon content of the forest was evaluated in four pools: above-ground carbon, below-ground carbon, dead vegetation carbon and soil carbon. Carbon quantification was carried out through a forest inventory in 202 sampling sites to measure soil carbon and to estimate biomass and stored carbon. As a second method, the InVEST 3.7.0 model was used. An economic analysis of the alternatives for forest harvesting and payment of environmental services for carbon sequestration was also performed. The study indicated that the forest ecosystem of Ejido Zautla is an important reservoir of carbon in its different compartments, which makes it feasible to use it as an area for providing the ecosystem service of carbon capture and sequestration as an alternative use to extractive forestry.

Keyword: forest, ecosystem, InVEST, use.

AGRADECIMIENTOS

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT), por el apoyo económico otorgado para la realización de mis estudios de postgrado.

Al Colegio de Postgraduados (COLPOS Campus Puebla), por permitir realizar mis estudios de postgrado, en este centro de excelencia académica.

A mi asesor consejero y director de tesis Dr. Angel Bustamante González, por su invaluable apoyo para la realización de este trabajo de investigación.

A los integrantes de mi consejo particular Dr. Samuel Vargas López, Dr. José Luis Jaramillo Villanueva y al Dr. Gustavo Manuel Cruz Bello por su apoyo en la asesoría y revisión de este trabajo de investigación.

A todos mis profesores de esta institución que con sus cursos me ayudaron a aumentar mis conocimientos.

Al Ejido Zautla por permitir la realización de esta investigación en su territorio, particularmente a los integrantes del comisariado ejidal por las facilidades otorgadas y apoyo en facilitar información que fue requerida.

A mi familia por el apoyo que siempre me ha brindado.

DEDICATORIA

Todo el trabajo y esfuerzo de esta investigación se lo dedico a mi esposa e hija por su apoyo incondicional en esta etapa de mi vida.

A todos los integrantes de mi familia por su apoyo y consejos.

CONTENIDO

	Página
1. INTRODUCCIÓN	1
1.1. Planteamiento del problema.....	2
1.2. Objetivos	3
1.2.1. Objetivo general	3
1.2.2. Objetivos específicos.....	3
1.3. Hipótesis	4
2. MARCO TEÓRICO CONCEPTUAL.....	5
2.1. El manejo forestal en México	5
2.2. Enfoque convencional y comunitario del manejo forestal en México	6
2.3. Enfoque de Manejo Integrado de Ecosistemas	7
2.4. Mercado de bonos de carbono.....	8
2.5. Programa de Pagos por Servicios Ambientales (PPSA).....	9
2.6. Programa de Pago del Servicio Ambiental de Captura de Carbono (PSACC)	11
2.7. La cuantificación del servicio ambiental de captura y almacenamiento de carbono	13
2.8. Valoración económica del servicio de captura y almacenamiento de carbono	15
2.9. Definición del enfoque	15
3. MARCO DE REFERENCIA.....	17
3.1. Ubicación	17
3.2. Características sociopolíticas	17
3.3. Orografía	18

3.4. Clima.....	18
3.5. Suelos.....	19
3.6 Vegetación	19
4. MATERIALES Y METODOS.....	21
4.1 Mapa de Uso y Cobertura del Suelo (USCS)	21
4.2. Estimación del carbono con el inventario forestal.....	22
4.2.1. Estimación del carbono sobre el suelo	23
4.2.2. Estimación del carbono bajo el suelo	25
4.2.3. Estimación del carbono de la materia muerta	25
4.2.4. Estimación del carbono el suelo.....	27
4.3. Cuantificación del carbono mediante uso del software InVEST 3.7.0	28
4.4. Valoración económica de alternativas de uso del bosque del Ejido Zautla	33
4.4.1. Primera alternativa (extracción de madera en la superficie del BBMF)	33
4.4.2. Segunda alternativa (implementación de un programa PSACC en la superficie del BP y por la extracción de madera en la superficie del BBMF)	36
4.4.3. Tercera alternativa (implementación de un programa PSACC en la superficie del BP y en la superficie del BBMF).....	37
5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	38
5.1. Cuantificación del carbono mediante método directo	38
5.1.1 Carbono sobre el suelo.....	38
5.1.2. Carbono bajo el suelo	42
5.1.3. Carbono de la biomasa muerta	43
5.1.4. Carbono en el suelo	45

5.1.5. Carbono total obtenido con el método directo	47
5.2. Cuantificación del carbono con el uso del programa InVEST 3.7.0.....	48
5.3. Comparación del carbono obtenido con los dos métodos	50
5.4. Valoración económica de alternativas de aprovechamiento del bosque del Ejido Zautla	51
5.4.1 Primera alternativa: extracción de madera en la superficie del BBMF	51
5.4.2. Segunda alternativa: implementación de un programa PSACC en la superficie del BP y extracción de madera en la superficie del BBMF	60
5.4.3. Tercera alternativa: implementación de un programa PSACC tanto en la superficie del BP como en la superficie del BBMF	60
5.5. Comparación de las tres alternativas de aprovechamiento de la superficie forestal del Ejido Zautla	61
6. CONCLUSIONES	63
7. RECOMENDACIONES	64
8. LITERATURA CITADA	65
9. ANEXOS	73
9.1. Mapa de USCS del Ejido Zautla.....	73
9.2. Distribución de sitios de muestreo.....	74

LISTA DE CUADROS

	Página
Cuadro 1. Modelos alométricos para ecosistemas forestales de México.	14
Cuadro 2. Clasificación de los tipos de USCS.....	22
Cuadro 3. Modelos alométricos utilizados para la estimación de biomasa en el arbolado vivo.....	24
Cuadro 4. Plan de cortas del Ejido Zautla.....	33
Cuadro 5. Distribución comercial de productos forestales del Ejido.....	35
Cuadro 6. Número de árboles por hectárea.....	39
Cuadro 7. Carbono total de la biomasa aérea.....	41
Cuadro 8. Carbono total obtenido mediante el método directo.....	47
Cuadro 9. Carbono obtenido utilizando raster de tamaño de pixel 1x1m.	48
Cuadro 10. Carbono obtenido utilizando raster de tamaño de pixel 15x15m. ...	49
Cuadro 11. Comparación de carbono total con los dos métodos.	50
Cuadro 12. Valoración económica del aprovechamiento forestal maderable. ..	53
Cuadro 13. Pérdida de C por el aprovechamiento forestal maderable.....	57
Cuadro 14. Ingreso neto por el aprovechamiento forestal maderable.	59
Cuadro 15. Ingreso económico por PSACC en el Bosque de Protección.....	60
Cuadro 16. Ingreso económico por PSACC en el BP y en el BBMF.	61
Cuadro 17. Comparación de ingresos con las tres alternativas.	62

LISTA DE FIGURAS

	Página
Figura 1. Ubicación del Ejido Zautla.....	17
Figura 2. Clima, temperatura y precipitación.....	18
Figura 3. Tipos de suelos presentes en el Ejido Zautla.....	19
Figura 4. Tipo de Vegetación y uso del suelo.....	20
Figura 5. Descripción gráfica de los sitios donde se tomaron los datos de campo.....	23
Figura 6. a. Medición de altura del arbolado y b. Medición de DAP.	24
Figura 7. a. Subparcela de 1 m ² , b. Biomasa que se juntó de la subparcela, c. Pesado de la biomasa y d. Pesado de la muestra llevada a la estufa de secado.	26
Figura 8. a. Medición del arbolado en el suelo, b. Árbol muerto en pie, c. Tronco en grado de descomposición tres, d. Muestra de madera muerta en grado descomposición dos.....	27
Figura 9. a. Punto donde se tomó la muestra de suelo, b. Profundidad, c. Combinación de las muestras de suelo tomadas en el sitio circular, d. Selección de la muestra llevada al laboratorio.....	28
Figura 10. Entrada de datos en el software InVEST 3.7.0.	30
Figura 11. Georreferenciación del raster resultante al correr el modelo.....	30
Figura 12. Reclasificación por valor único.....	31
Figura 13. Extracción de cada capa de tipo de USCS.....	31
Figura 14. Conversión de raster a polígono de cada capa de tipo de USCS.	32
Figura 15. Cálculo de superficie y multiplicación por la cantidad de carbono en un m ² , suma de resultados para obtener el carbono total por cada capa de USCS.	32
Figura 16. Carbono sobre el suelo.....	40
Figura 17. Cantidad de carbono bajo el suelo.	42
Figura 18. Cantidad de carbono por la biomasa muerta.....	43
Figura 19. Carbono promedio por hectárea en el suelo.....	45

Figura 20. Comparación de las estimaciones de carbono con los diferentes métodos.	51
Figura 21. Distribución del ingreso económico por rodal con la extracción de madera.	56
Figura 22. Distribución de la pérdida de C en cada rodal por la extracción de madera.	58

1. INTRODUCCIÓN

Los ecosistemas forestales ocupan el 30% de la superficie terrestre (FAO, 2007) y contienen una alta biodiversidad, ya que en ellos se encuentra alrededor del 75% de las especies continentales (Groombridge, 1992). Tienen funciones ambientales desde la escala local a la global (Byron y Arnold, 1997) y proporcionan servicios ambientales como la recarga hídrica, la asimilación de residuos, la fertilidad del suelo, la polinización, servicios recreativos y emocionales del paisaje (Lomas *et al.*, 2005). Dentro de su multifuncionalidad, estos ecosistemas son la base de la producción de otros bienes y servicios, como son la producción de madera, la actividad cinegética, y la producción ganadera y agrícola. En los países menos desarrollados, ellos contribuyen a la subsistencia de millones de personas (Pimentel, 1997).

México tiene aproximadamente 64 millones de hectáreas de bosques de clima templado y selvas, lo que representa el 32% de su territorio. La riqueza forestal de México se ha estado perdiendo en las últimas décadas, con la consecuente pérdida de servicios ambientales. La tasa nacional de deforestación es alta desde hace varias décadas. En el periodo de 1980 a 2000, se reportaron tasas de deforestación nacional promedio del 2%, con tasas regionales del 12.4% (Bray y Klepeis, 2005). Es una necesidad urgente el mantenimiento o mejoramiento de los servicios ambientales que los bosques proveen a la sociedad, procurando que se traduzcan en el mejoramiento del bienestar de la población directamente relacionada con su aprovechamiento y cuidado. De la amplia variedad de servicios ambientales que el bosque provee, la captura de carbono, los servicios hidrológicos y la biodiversidad son los que tienen el mayor potencial para integrarlos en un programa de Pago de Servicio Ambiental (Rojo, 2015).

El aprovechamiento y manejo de los bosques requiere la toma de decisiones de índole económico, ecológico y cultural. Convencionalmente, en México predomina el aprovechamiento de productos maderables. Otras opciones son la protección a través de Áreas Naturales Protegidas y aprovechamientos no consuntivos, como el

ecoturismo y la provisión de servicios ambientales. Hacer compatible intereses económicos, ecológicos y culturales es todo un reto. La promoción de alternativas que inducen la conservación de los bosques, como los programas de pagos de servicios ambientales, requieren su contraste con otras alternativas que pueden ser económicamente más atractivas para el poseedor del recurso. En este sentido, en el presente proyecto de investigación se comparó el beneficio económico de la alternativa del pago por servicio ambiental de captura de carbono con el del aprovechamiento forestal maderable en el Ejido de Zautla, Puebla.

1.1. Planteamiento del problema

El Ejido de Zautla, Puebla, tiene una superficie de 768.79 ha, de las cuales 381.34 son de uso agrícola, 387.45 ha de uso forestal, divididas a su vez en 209.37 de bosque de protección (BP) y 178.08 de bosque bajo manejo forestal (BBMF). El bosque de protección tiene una función ecológica, mientras que el bosque bajo manejo forestal tiene una función de generación de ingresos para el Ejido. Tradicionalmente, los ejidatarios perciben los beneficios tangibles del bosque, como es la producción de madera, con menos atención en los intangibles como son los servicios ambientales. Esto lleva a que se ponga mayor énfasis en el aprovechamiento o extracción de bienes, y no se considere el mantenimiento de los servicios ambientales en los programas de manejo forestal maderable del Ejido. Sin embargo, la tendencia actual en el manejo sustentable del bosque es cambiar hacia un manejo integrado de ecosistemas, donde se pone mayor atención a los bienes intangibles y el estado ecológico del ecosistema. Debido a que para los ejidatarios son importantes las utilidades económicas obtenidas del aprovechamiento forestal, es necesario evaluar y comparar los beneficios que se podrían obtener mediante otras alternativas como la de un Programa de Servicios Ambientales de Captura de Carbono (PSACC), información que actualmente no está disponible en el Ejido. La generación de esta información y la comparación de los beneficios e impactos ecológicos son útiles para contribuir a que los ejidatarios tomen decisiones informadas y más allá de solo criterios económicos.

Esta investigación aborda esta problemática y se establece como preguntas de investigación las siguientes:

- 1). ¿Cuál es la cantidad de carbono almacenado en la biomasa del ecosistema forestal del Ejido Zautla?
- 2). ¿Qué beneficio económico obtendrían los ejidatarios del Ejido Zautla, si se incorporara un programa de PSACC en el ecosistema forestal en comparación con los beneficios económicos actuales por el aprovechamiento forestal maderable?

1.2. Objetivos

1.2.1. Objetivo general

Comparar los beneficios económicos de las alternativas de aprovechamiento forestal maderable y de pagos de servicio ambiental de captura de carbono en el Ejido Zautla, municipio de Zautla, Puebla.

1.2.2. Objetivos específicos

- 1). Cuantificar el carbono almacenado en la biomasa del ecosistema forestal del Ejido Zautla, a través de la información de un inventario forestal y con el uso del programa InVEST 3.7.0.
- 2). Determinar cuál es la mejor alternativa de manejo y aprovechamiento, de acuerdo con los beneficios económicos, considerando el aprovechamiento forestal maderable y el programa de pago de servicios ambientales por captura de carbono en el ecosistema forestal del Ejido Zautla.

1.3. Hipótesis

El programa de pago por servicios ambientales de captura carbono genera mayores beneficios económicos que el aprovechamiento forestal maderable a los miembros del Ejido Zautla.

2. MARCO TEÓRICO CONCEPTUAL

2.1. El manejo forestal en México

El desarrollo forestal en México ha experimentado diferentes etapas de cambios principalmente por la tenencia de la tierra, implementación de políticas y la administración forestal. Durante los siglos XIX y XX predominó el uso extractivo, con atención a aspectos normativos sobre los derechos de acceso a la tierra y a los recursos naturales (Cruz y Vallejo, 2001). Durante el porfiriato, se dieron concesiones de bosques, como los de Chihuahua, a compañías ferrocarrileras y mineras norteamericanas (Lartigue, 1983), y aquellas que crearon los “imperios de la caoba” de las selvas de Chiapas (González, 1993). Como resultado de la revolución mexicana se crea el derecho forestal mexicano con la primera ley forestal de 1926 (Hinojosa, 1958), la cual reglamentó el dominio directo de la nación sobre los recursos forestales. Posteriormente, se decretaron las leyes en materia forestal de carácter federal de 1943, 1948, 1960 y 1986 (Romero, 1992).

A partir de 1940, se fomentaron los mecanismos de concesiones forestales en favor de grandes empresas paraestatales y extranjeras (Cruz y Vallejo, 2001), a través de las denominadas “Unidades Industriales de Explotación Forestal”, las cuales usan por primera vez métodos de silvicultura y ordenación como el “Método Mexicano de Ordenación de Bosques Irregulares” (MMOBI) (Jardel, 2018). De 1944 a 1973 se intensificó el uso del Método Mexicano de Ordenación de Montes, con la conversión de masas sobre-maduras a bosques de alta productividad (Cruz y Vallejo, 2001). En la década de 1970 se desarrolló el Método de Desarrollo Silvícola (MDS), el cual se basa en la práctica de árboles semilleros, y busca convertir bosques irregulares en regulares al final del turno para una producción continua y uniforme de madera para la industria (Jardel, 2018). En los años ochenta, se inicia la forestería comunitaria, como una forma de control de los recursos por las comunidades locales, dando lugar en los noventa al desarrollo del Sistema de Conservación y Desarrollo Silvícola (SICODESI).

La ley forestal de 1986 disolvió el sistema de concesiones y permitió a las comunidades el manejo de sus bosques y la contratación de servicios técnicos (Leigh, 2000). La ley Forestal de 1992 transfirió a las comunidades la responsabilidad de la administración, conservación y mejora de sus bosques. En esta perspectiva, se crearon el Programa de Desarrollo Forestal Comunitario (PROCYMAF) y el Programa de Desarrollo Forestal (PRODEFOR), se incorporó el concepto de manejo forestal sostenible y se regularon las plantaciones forestales (Cruz y Vallejo, 2001). En 2003 se crea la Ley de Desarrollo Forestal Sustentable, abrogada en 2018 para dar lugar a la nueva Ley de Desarrollo Forestal Sustentable. Esta última considera el manejo integral sustentable de los recursos forestales, para lo cual toma en cuenta la provisión de bienes y servicios ambientales y la protección y acrecentamiento de la biodiversidad de los ecosistemas forestales.

2.2. Enfoque convencional y comunitario del manejo forestal en México

La visión tradicional de manejo de recursos naturales considera básicamente la producción de bienes y servicios a través de empresas madereras (Vazquez, 2003). El manejo forestal en México se han orientado a la producción comercial con especies de valor económico, con una superficie bajo manejo de 28.08 millones de ha (SEMARNAT, 2016a). La producción maderable en el año 2016 fue de 6.7 millones de m³r y la producción de recursos forestales no maderable (productos vegetales como resina, fibras, gomas, ceras, rizomas y otros, excluyendo la tierra de monte) fue de 88.2 miles de toneladas. En promedio, en los últimos diez años se registró una producción de 76.3 miles de toneladas, con una participación del sector forestal en la economía nacional del 0.2% del PIB nacional (SEMARNAT, 2016b).

En los últimos años se incorporó el término Manejo Forestal Comunitario (MFC). Este término designa el proceso general de intervención en el bosque y uso de sus recursos desde una perspectiva local (Barton y Merino, 2004). Conlleva también la aplicación

del concepto de manejo sostenible, lo cual considera una producción diversificada maderable y no maderable, la generación de servicios ambientales (captación de agua, captura de carbono, protección contra la erosión y diversidad biológica), el uso de saberes tradicionales y el desarrollo de un programa de manejo que considera ciclos naturales para dirigir el crecimiento del bosque hacia una meta económica (Valdés y Negreros, 2002). El MFC promueve la creación de empresas forestales comunitarias (Barton y Merino, 2004), las cuales pueden tener una visión de conservación del bosque, por la preocupación local por conservar sus recursos y porque éstos saben que su subsistencia depende en gran medida de ellos.

2.3. Enfoque de Manejo Integrado de Ecosistemas

En la década de los ochenta del siglo pasado se desarrolló en el sector forestal de los Estados Unidos el concepto de Manejo Integrado de Ecosistemas como una alternativa al enfoque tradicional de manejo forestal. Anteriormente, el manejo forestal se orientaba a la optimización económica de un producto del bosque y más recientemente al de varios productos, conocido como manejo múltiple. El manejo integrado del ecosistema implica un cambio de paradigma en el manejo forestal, con una mayor orientación ecológica, sin ignorar los aspectos económicos (Grumbine, 1997). El tomar como base al ecosistema, implica la consideración del conjunto de especies vivientes en su ambiente físico (Mitchell, 2002) y plantea una visión comprehensiva, holística e integrada del entorno natural (Vazquez, 2003). Si en el manejo convencional la prioridad es la optimización económica de la extracción de materias o producción de bienes, en el manejo de ecosistemas se busca mantener la estabilidad de éstos (Grumbine, 1997).

El manejo integrado de ecosistemas considera aspectos como el contexto jerárquico, límites ecológicos, integridad ecológica, recolección de datos, monitoreo, cooperación interinstitucional, manejo adaptativo, cambio organizacional, tomando en cuenta a los seres humanos que están inmersos en la naturaleza, y el reconocimiento de sus valores (Grumbine, 1997) y debe integrar la investigación científica aplicada y teórica

con los saberes locales para un manejo adecuado del ecosistema (Mitchell, 2002; Vazquez, 2003). Implica también la negociación directa o indirecta entre una multiplicidad de actores sociales. A pesar de que el concepto de manejo integrado de ecosistemas es relativamente reciente, la idea de considerar el conjunto de sus elementos y funciones tiene ya un impacto positivo en el manejo de los bosques de México (Barton y Merino, 2004). Cada vez se extiende más la idea de que es necesario producir bienes y servicios forestales para la población y al mismo tiempo conservar la biodiversidad nativa y la estructura y funciones del ecosistema. Desde la perspectiva institucional, este enfoque de manejo ha llevado a la promoción del mantenimiento de los servicios ambientales forestales, a través de los mercados de bonos de carbono y de programas como el de Pagos de Servicios Ambientales (PSA).

2.4. Mercado de bonos de carbono

El mercado de bonos de carbono es uno de los mecanismos económicos usado a nivel mundial para mitigar las emisiones de gases de efecto invernadero, el que es considerado por López-Toache *et al.* (2016) como una “financiarización ambiental”, que lleva al derecho a contaminar el aire, que es un bien común, y cuyo precio es fijado por el mercado. Esquemas como el mecanismo de desarrollo limpio (MDL), mecanismos de acción conjunta (AC) y el comercio internacional de emisiones están considerados en el Protocolo de Kyoto (Naciones Unidas, 1998).

Los bonos o créditos de carbono permiten a las empresas privadas emitir dióxido de carbono (CO₂) como un bien canjeable y con un precio establecido. Un bono de carbono representa el derecho de emitir una tonelada de CO₂, las reducciones de emisiones se miden en toneladas de CO₂ y se traducen en certificados de emisiones reducidas (CER), otorgados por el mecanismo de desarrollo limpio (MDL). Un certificado equivale a una tonelada de CO₂ que no es emitida a la atmósfera y puede ser vendida en el mercado de carbono a países industrializados. Así, se beneficia a las empresas que no emiten o disminuyen la emisión (a través de mejores procesos

productivos, proyectos de energía limpia, energías renovables, forestales, etc.) y se hace pagar a las que emiten más de lo permitido. Los tipos de bonos con base en contratos consideran esquemas corporativos voluntarios y de comercialización y los creados bajo reglas obligatorias o un marco regulatorio (Bustamante y Gallegos, 2019).

2.5. Programa de Pagos por Servicios Ambientales (PPSA)

El deterioro de los recursos, de la biodiversidad y de las funciones ambientales de los ecosistemas forestales son considerados, por la teoría económica, como resultado de externalidades. Por su naturaleza e implicaciones sociales, las instituciones juegan un papel relevante y se han propuesto diferentes formas de acción, las cuales se pueden agrupar en tres categorías (Vatn, 2010): a) reconstruir o fortalecer las estructuras de propiedad y gobernanza de los comunes, como lo plantea Ostrom (2011); b) a través del uso de la fuerza del estado para regular las acciones de la propiedad privada (regulaciones legales e impuestos ambientales), y c) la creación de nuevos mercados, desde una perspectiva de mercado coesiano, que hace transable el flujo de bienes y servicios ambientales actualmente no compensados económicamente, los cuales tendrán un pago estatal o público (Vatn, 2010).

El concepto de servicio ambiental o ecosistémico se originó en la década de los años 70 del siglo pasado (Westman, 1977) y se fortaleció en los años 90 con los aportes de economistas como Costanza (1991) y Costanza y Daly (1992). La Evaluación de los Ecosistemas del Milenio (Millennium Ecosystem Assessment, 2005) consolidó el tema en la agenda política de los gobiernos y en el medio académico. Actualmente, los servicios ambientales se han posicionado en la toma de decisión económica gubernamental mediante la aplicación de instrumentos de conservación basados en los mercados, particularmente a través de los Programas de Pagos de Servicios Ambientales. Gómez-Baggethun *et al.* (2010) dentro de su análisis del desarrollo conceptual de los servicios ambientales o ecosistémicos, sugieren que la tendencia de considerarlos desde una perspectiva monetarista y de comodidad se asocia al cambio

gradual de la concepción de los beneficios naturales como valor de uso de la economía clásica a su conceptualización como valor de intercambio de la economía neoclásica.

Wunder (2005) definió el Pago de Servicio Ambiental (PSA) como “Una transacción voluntaria de un servicio bien identificado (o un uso de la tierra para asegurar el servicio) que está siendo “comprado por un mínimo de compradores de un mínimo de proveedores, con la condición de que éstos aseguren la provisión del servicio”. En la Evaluación de los Ecosistemas del Milenio (Millennium Ecosystem Assessment, 2005) se definió a los servicios ambientales como “Los beneficios que la gente obtiene de los ecosistemas”, clasificados como servicios de provisión (alimento, agua, madera y fibras), servicios reguladores (regulación climática, de inundaciones, enfermedades, desechos y calidad del agua), servicios de soporte (formación del suelo, fotosíntesis y ciclo de nutrientes) y servicios culturales (beneficios recreacionales, estéticos y espirituales). Wunder (2015) modificó ligeramente su definición de servicio ambiental de 2005, definiéndola como una “transacción voluntaria entre usuarios y proveedores que está condicionada en reglas de manejo de recursos naturales para la generación de servicios fuera del sitio”. En México, la Ley General de Desarrollo Forestal Sustentable (Artículo 7°) define a los servicios ecosistémicos o servicios ambientales como “beneficios que brindan los ecosistemas forestales de manera natural o por medio del manejo forestal sustentable, que pueden ser servicios de provisión, de regulación, de soporte o culturales, y que son necesarios para la supervivencia del sistema natural y biológico en su conjunto, y que proporcionan beneficios al ser humano” (LGDFS, 2018).

En los ecosistemas, los servicios ambientales o ecosistémicos son parte de un sistema complejo, por lo que, aunque la base del concepto es económica, requiere un análisis y una gestión multidisciplinaria. Por su composición, estos servicios son demasiado complejos para ser gestionados efectivamente por una sola agencia, la gestión requiere de la acción conjunta de múltiples partes (Berkes, 2009), lo que lleva a una perspectiva de manejo integrado de ecosistemas. Sin embargo, en la práctica se estudia y gestiona cada servicio de manera independiente, con mayor énfasis en los

servicios de biodiversidad, captura de carbono e hidrológicos. Los ecosistemas forestales han sido el centro de atención para estos tres servicios ambientales. Particularmente para México, se considera que en los bosques se concentra un almacén de carbono aproximado de 8 mil millones de toneladas de carbono, cantidad equivalente a las emisiones mundiales actuales de CO₂ (Maser *et al.*, 1997). La capacidad de almacenamiento de carbono (C) en estos bosques se está perdiendo rápidamente por los procesos de deforestación y degradación de los ecosistemas forestales.

2.6. Programa de Pago del Servicio Ambiental de Captura de Carbono (PSACC)

El PSACC da incentivos económicos a los dueños de los terrenos en donde se generan servicios ambientales para compensar tanto el costo de oportunidad derivado de realizar actividades que dañan los ecosistemas como los gastos requeridos para llevar a cabo prácticas de buen manejo forestal (Engel *et al.*, 2008), con el fin de que se conserven los ecosistemas forestales en buen estado. Se considera que el PSACC es un instrumento económico, flexible y adaptable, adecuado para incentivar a los propietarios de la tierra para mantener o mejorar la provisión de los servicios ambientales que benefician a la sociedad (De la Maza, 2011).

En una primera fase, son los gobiernos nacionales u organizaciones internacionales quienes llevan a cabo los programas de PSACC para fomentar los mercados de éste y otros servicios ambientales. Su rápida y creciente popularidad se debe en gran medida a que se concibe como un mecanismo que induce la conservación de ecosistemas, debido a su carácter de uso no consuntivo del bosque, a la par que provee de ingresos económicos a los propietarios rurales.

Para la implementación de un PSACC es fundamental identificar a los involucrados principales: el comprador y el vendedor. En cuanto a los compradores, pueden ser los

usuarios actuales u otros agentes, como los gobiernos, organizaciones no gubernamentales o agencias internacionales. Los vendedores son aquellos que poseen las tierras donde se generan el servicio ambiental y que son considerados como salvaguardas de su flujo hacia la sociedad y a los ecosistemas (Engel *et al.*, 2008). Idealmente, en un PSACC el comprador ofrece un pago por el servicio ambiental a un vendedor que lleva a cabo actividades que benefician al comprador. En la práctica, las iniciativas de los PSACC pueden provenir de los compradores, de los vendedores o de un tercer agente, como los gobiernos.

Un PSACC será atractivo para los propietarios de las tierras solo si los ingresos asociados al mismo son mayores que los obtenidos por un uso alternativo de las mismas y menor que el valor del beneficio que se provee. La estimación de estos beneficios es más complicada que la del valor del costo de oportunidad. Una opción de estimación del costo de oportunidad es a través del rendimiento anual promedio de una actividad forestal, ponderada por la superficie ocupada por esta actividad (Picharillo y Lima, 2019). Como un mecanismo de mercado, está implicado un factor de competitividad, lo que lleva a una polémica de la aplicación actual del PSACC en países en desarrollo, como México. Tanto la visión gubernamental como el de conservacionistas y activistas centra su atención en su aplicación en regiones rurales de bajo desarrollo, para mejorar las condiciones de los propietarios de la tierra, que la mayor parte de las veces son los más pobres. Wunder (2008) plantea la pregunta si los pobres desean, son capaces y son elegibles para constituirse en proveedores competitivos de un servicio ambiental. Debe considerarse si el costo de oportunidad específico de la unidad de producción es suficientemente bajo para que ellos tengan un beneficio neto. En el caso de que el esquema de pagos ofrezca una tasa fija por superficie de tierra o por unidad de salida del servicio ambiental, al productor no le quedará otra opción que la de tomarla o dejarla, y el factor de competitividad es capturada en su disposición a participar en el PSACC.

2.7. La cuantificación del servicio ambiental de captura y almacenamiento de carbono

Tanto para el esquema de bonos de carbono como para el pago de servicios ambientales es fundamental estimar los beneficios del servicio de captura y almacenamiento de carbono, como la del costo de oportunidad del mejor uso alternativo del bosque. Para estimar el beneficio asociado a un servicio ambiental intangible como la captura y almacenamiento de carbono se requiere cuantificar el servicio producido y valorarlo económicamente. La evaluación del valor económico potencial del carbono capturado y almacenado en un ecosistema forestal es indicativa del potencial del mismo para considerarlo en un mercado de servicio ambiental de captura de carbono (Mohammadi *et al.*, 2017).

El stock o reservorio total de carbono almacenado incluye al carbono contenido en el suelo, en la materia seca sobreyacente en el suelo y la biomasa forestal de la vegetación viva (aérea y radicular). Aunque es más evidente el papel de la biomasa de la vegetación viva, recientemente se ha puesto atención al papel del suelo como reservorio de carbono (Siwar *et al.*, 2016). Para la formación de estos reservorios, se tiene un proceso de captura anual de carbono de una vegetación en desarrollo, misma que va agregando carbono al reservorio (carbono almacenado).

Para estimar el carbono almacenado en la biomasa aérea de la vegetación el método más común es la utilización de ecuaciones alométricas, desarrolladas con análisis de regresión (Duque *et al.*, 2015). Esto requiere de extensos inventarios forestales, obtenidos con un laborioso trabajo de campo. En el Cuadro 1 se presentan los principales modelos alométricos disponibles en México para estimar biomasa en ecosistemas similares al del área de estudio. La mayoría se basan en mediciones de diámetro a la altura del pecho (130 cm), con algunos que consideran también la variable altura al inicio de la copa del árbol.

Cuadro 1. Modelos alométricos para ecosistemas forestales de México.

Especie	Ecuación del modelo	Autor	Lugar
	$B = \text{Exp}(-3.182) \cdot (\text{DN}^{2.702})$	(Návar, 2010)	Durango
	$B = 0.2057 \cdot \text{DN}^{2.2583}$	(Návar, 2009)	Chihuahua
<i>Pinus teocote</i>	$B_t = 0.04428 \cdot \text{DN}^{1.8953} h^{0.84674}$ $B_c = 0.00341 \cdot \text{DN}^{1.96215} h^{0.66178}$ $B_r = 0.0051 \cdot \text{DN}^{1.78757} h^{1.12341}$ $B_f = 0.03041 \cdot \text{DN}^{1.78361}$ $B = 0.40196 \cdot \text{DN}^2$	(Vargas <i>et al.</i> , 2017)	Durango
		(Aguirre y Jiménez, 2011)	Nuevo León
	$B = 0.003 \cdot \text{DN}^{3.383}$	(Méndez <i>et al.</i> , 2011)	Guanajuato
<i>Pinus pseudostrabus</i>	$B = \text{Exp}(-2.611) \cdot (\text{DN}^{2.531})$ $B = 0.35179 \cdot \text{DN}^2$ $B = 0.128495 \cdot \text{DN}^{2.36444}$	(Návar, 2010) (Aguirre y Jiménez, 2011) (Rodríguez <i>et al.</i> , 2009)	Durango Nuevo León Tamaulipas
	$B = \text{Exp}(-3.066) \cdot (\text{DN}^{2.646})$	(Návar, 2010)	Durango
<i>Pinus ayacahuite</i>	$B = 0.2893 \cdot \text{DN}^{2.1569}$ $B = 0.058 \cdot (\text{DN}^2 \cdot h)^{0.919}$	(Návar, 2009) (Ayala, 1998)	Chihuahua Chiapas
<i>Pinus patula</i>	$B = 0.0357 \cdot \text{DN}^{2.6916}$	(Díaz <i>et al.</i> , 2007)	Tlaxcala
<i>Pinus spp.</i>	$B_t = 0.0291 \text{DN}^{1.74165} h^{1.16614}$ $B_c = 0.02029 \text{DN}^{1.33299} h^{0.92887}$ $B_r = 0.02508 \text{DN}^{1.83773} h^{0.54626}$ $B_f = 0.05227 \text{DN}^{1.28231} h^{0.43275}$	(Vargas <i>et al.</i> , 2017)	Durango
	$B = 0.0890 \cdot \text{DN}^{2.5226}$	(Návar, 2009)	Chihuahua
	$B = 0.283 \cdot (\text{DN}^2 \cdot h)^{0.807}$	(Ayala, 1998)	Chiapas
<i>Quercus spp.</i>	$B = 0.0706 (\text{DN})^{2.4077} + 0.004 (\text{DN})^{3.0799}$ $B = \text{Exp}(-2.27) \cdot \text{DN}^{2.39}$	(Návar, 2010) (Acosta <i>et al.</i> , 2002)	Durango Oaxaca
<i>Cupressus spp.</i>	$B = 0.5266 \cdot \text{DN}^{1.7712}$	(FAO, 2013)	
<i>Arbutus xalapensis</i>	$B = 0.3764 \cdot (\text{DN}^{2-2.3146}) \cdot (\text{DN} - 1.9106)$	(Aguilar <i>et al.</i> , 2016)	

DN = Diámetro Normal (o diámetro a altura de pecho, medido a 1.3 m); h = altura

Con el fin de facilitar las evaluaciones, se han desarrollado modelos para estimar el carbono almacenado en los diferentes compartimentos de un ecosistema forestal, dentro de los que sobresale el programa InVEST, el cual agrega las cantidades de este elemento en los diferentes reservorios y estima el carbono almacenado (Chu *et al.*, 2019). El programa InVEST es un paquete computacional desarrollado por Natural Capital Project (NATCAP) y es una herramienta eficaz para informar a los usuarios de posibles escenarios de gestión y manejo de los recursos naturales (Nelson *et al.*, 2014).

2.8. Valoración económica del servicio de captura y almacenamiento de carbono

El costo de capturar y almacenar el carbono a través de actividades forestales (plantaciones, agroforestería y protección forestal), se ha estimado particularmente para países en desarrollo. Se considera el costo promedio de un proyecto particular, por ejemplo, el costo de establecer el bosque por tonelada de carbono capturada y almacenada, estimada por tipo de vegetación y la forma de regeneración del bosque. Otra forma es analizar las opciones alternativas, como es el uso de la vegetación en un programa de reserva para capturar carbono. Para proyectos extensivos de captura de carbono los costos marginales se esperaría que reflejen: “a) costos de oportunidad crecientes de la tierra, b) productividad de la tierra para el crecimiento de los árboles y las asociadas de captura de carbono, y c) los costos crecientes de otros insumos” (Sedjo *et al.*, 1995).

2.9. Definición del enfoque

Este trabajo de investigación comparó el beneficio económico dado por el servicio ambiental de captura y almacenamiento de carbono, contra el beneficio de la

extracción de madera. La premisa fue que, si el mecanismo de pagos de servicios ambientales es capaz de proveer a los silvicultores la misma o mayor cantidad de ingresos que el generado con la actividad de extracción de madera, entonces el programa puede ser una opción de manejo y aprovechamiento del Ejido bajo estudio, con la ventaja de que representaría un manejo más sostenible del recurso.

3. MARCO DE REFERENCIA

3.1. Ubicación

El Ejido Zautla se encuentra al norte del estado de Puebla, al sur de la cabecera municipal de Zautla (Figura 1).

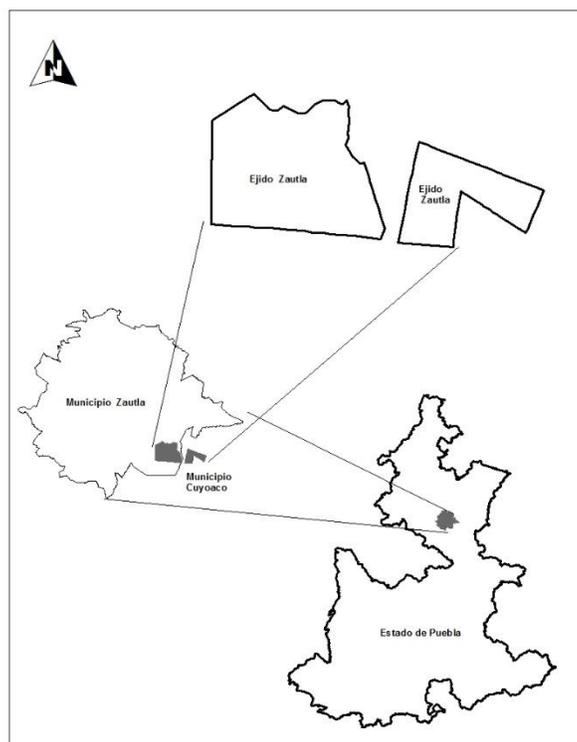


Figura 1. Ubicación del Ejido Zautla.

3.2. Características sociopolíticas

El Ejido Zautla lo conforman tres localidades del municipio de Zautla: Zautla, Atemoloni y Emiliano Zapata, y una localidad del municipio de Cuyoaco: La independencia. La dotación se otorgó el 12 de agosto de 1932 por el gobernador del estado de Puebla, con una superficie de 550.18 ha, de las cuales 342.97 son de uso común, 200.52

parceladas, 3.83 de infraestructura y 2.76 de ríos, arroyos y cuerpos de agua, con un total de 100 ejidatarios activos actualmente

3.3. Orografía

En el área se inicia la sierra norte del Estado de Puebla. La mayor parte de su superficie está constituida por elevaciones como sierras, cerros y altiplanicies intermontañosas, con una altitud que va de los 1,760 a 2,900 metros sobre el nivel del mar (INAFED, 2020)

3.4. Clima

El clima predominante es templado, la vegetación presente son bosques de pino y asociaciones de pino-encino, con temperatura media de 14C° y precipitación promedio de 700 mm anuales (Figura 2).

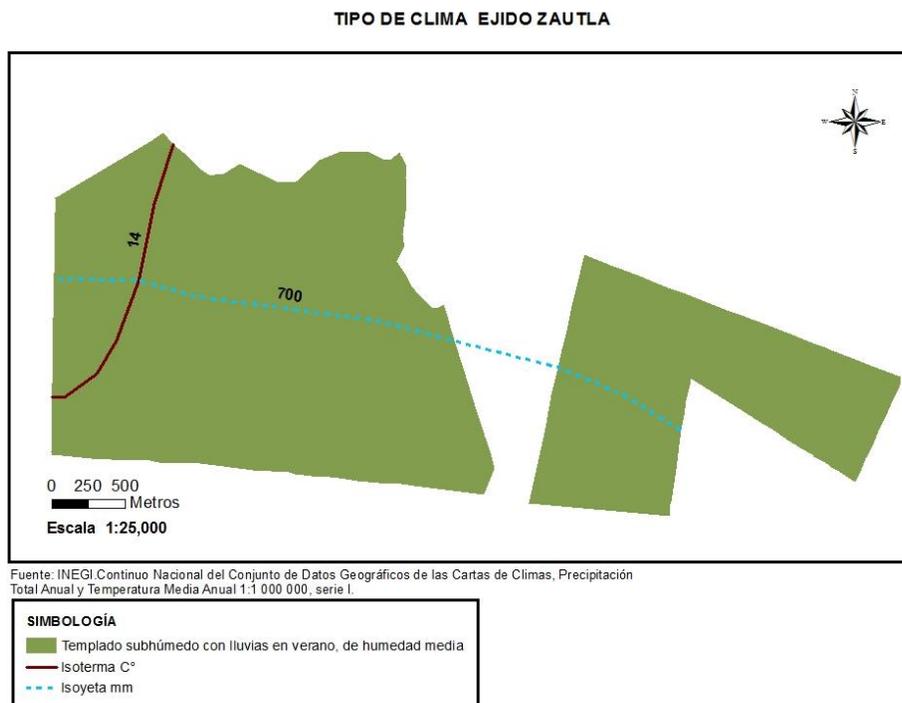


Figura 2. Clima, temperatura y precipitación.

3.5. Suelos

Los tipos de suelos presentes son Phaeozem y Leptosol. Los suelos Phaeozem tienen alto contenido de materia orgánica originada por el bosque. En una menor extensión se encuentra el suelo Leptosol, en las zonas más erosionadas (INEGI, 2005) (Figura 3).

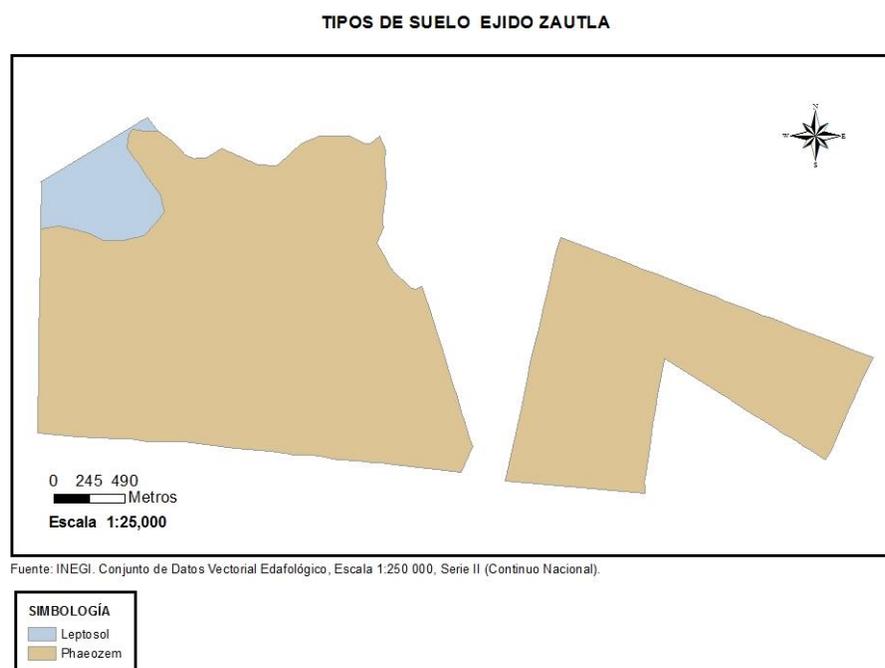


Figura 3. Tipos de suelos presentes en el Ejido Zautla.

3.6 Vegetación

La superficie del ecosistema forestal se encuentra en las montañas que inician la sierra nororiental de Puebla, con asociaciones de vegetación de bosque de pino y encino donde se encuentran las especies *Pinus pseudostrubus*, *P. teocote*, *P. ayacahuite*, *P. patula*, *Cupressus sp.*, *Arbutus xalapensis* y *Quercus sp.* Asociaciones representativas

de un bosque de clima templado. Las condiciones de altitud y clima determinan la presencia de 387.45 ha de bosques de pino (Figura 4), los cuales proveen diversos servicios ambientales.

La superficie agrícola la componen parcelas dedicadas principalmente a la producción de temporal de granos como maíz, frijol, haba, trigo y cebada, en agricultura de laderas con formas de producción tradicionales. Las parcelas que se encuentran en el ecosistema forestal poco a poco han sido abandonadas y convirtiéndose en zonas de regeneración de especies forestales. En contraste en las parcelas que se encuentran en la zona de valle, éstas se han seguido utilizando para la producción agrícola con uso de maquinaria, principalmente.

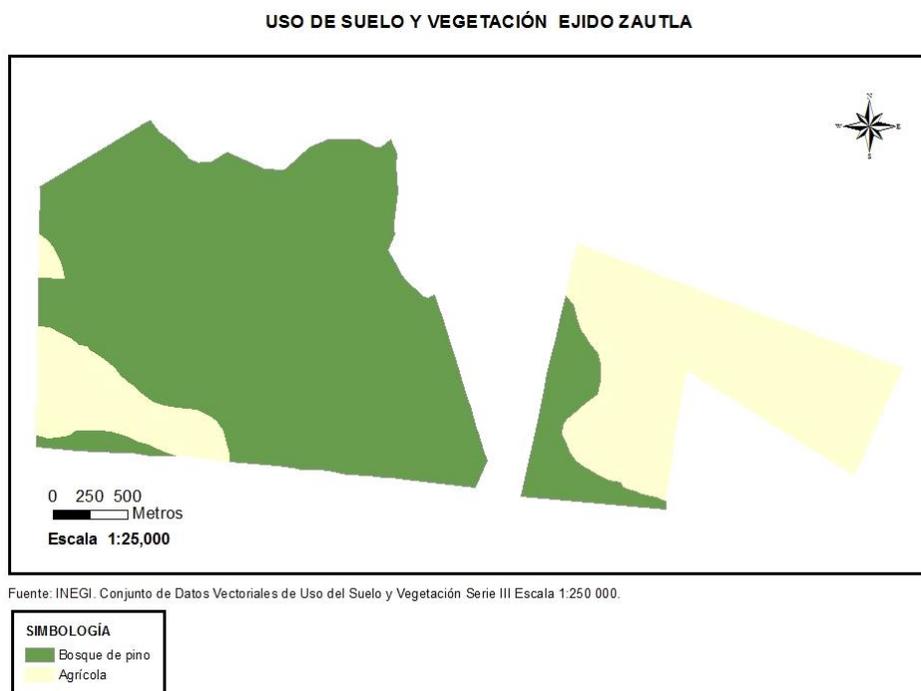


Figura 4. Tipo de Vegetación y uso del suelo.

4. MATERIALES Y MÉTODOS

Se obtuvo un mapa de Uso y Cobertura del suelo (USCS) como base para la zonificación del Ejido. Posteriormente, la cuantificación del carbono (C) almacenado se realizó con dos métodos. En el primero se obtuvo la biomasa aérea con datos del inventario forestal del Ejido, ecuaciones alométricas y considerando que 0.5 de la biomasa es carbono; la suma del carbono almacenado en la biomasa aérea, en la vegetación muerta encontrada en la superficie del suelo, la biomasa radicular y el carbono almacenado en el suelo generó el total de carbono en el ecosistema forestal. Una segunda estimación del carbono almacenado en el ecosistema forestal se realizó con el programa Integrated Valuation of Ecosystem Services and Tradeoffs (InVEST) versión 3.7.0, considerando datos promedios de los parámetros para cada rodal. Esta estimación se hizo a dos niveles de resolución (tamaño de pixel): 1 x 1 m y 15 x 15 m.

4.1 Mapa de Uso y Cobertura del Suelo (USCS)

Con base en la clasificación del Programa de Manejo Forestal Maderable (PMFM) del Ejido (PMFM, 2012), la superficie se clasificó en tres tipos de uso y cobertura vegetal: a) Agrícola, b) Bosque de protección (superficie forestal sin aprovechamiento) y c) Bosque bajo manejo forestal. El bosque bajo aprovechamiento comprende 13 rodales (Cuadro 2). Con la información anterior se generó un archivo vectorial shapefile mismo que se convirtió a un archivo raster considerando dos tamaños de pixel 1m x 1m y 15m x 15m (Anexo 1).

Cuadro 2. Clasificación de los tipos de USCS.

Tipo USCS	Clave de identificación	Superficie (ha)
Agrícola	Agr	381.34
Bosque de protección	BP	209.37
Bosque Bajo Manejo Forestal (BBMF ⁺)	RI ^a	4.07
	RII ^b	4.67
	RIII ^c	25.6
	RIV ^d	24.54
	RV ^e	16.65
	RVI ^f	14.19
	RVII ^g	15.76
	RVIII ^h	6.01
	RIX ⁱ	19.03
	RXI ^j	20.29
	RXI ^k	3.2
RXII ^l	11.99	
RXIII ^m	12.08	
	Total	768.79

⁺Superficie con aprovechamiento maderable dividida en trece rodales, RI^a =Rodal uno, RII^b =Rodal dos.... RXIII^m=Rodal trece.

4.2. Estimación del carbono con el inventario forestal

Se realizó la estimación con datos del inventario forestal de la superficie del ejido, considerando cuatro grupos: 1) carbono sobre el suelo que lo compone la biomasa aérea (troncos, ramas, hojas y cortezas de árboles y arbustos), 2) carbono bajo el suelo se refiere al carbono de la biomasa subterránea que abarca los sistemas de raíces, 3) carbono por la biomasa muerta que incluye hojarascas, ocochal, ramillas y estrobillos, así como madera muerta en pie o en el suelo, y 4) carbono en el suelo que comprende la materia orgánica del suelo.

4.2.1. Carbono sobre el suelo

Se realizó un inventario forestal en 85 sitios de muestreo en el bosque de protección y 117 en los 13 rodales del bosque bajo manejo forestal. Los sitios de muestreo fueron circulares de 1000 m² (Figura 5) donde se tomaron datos dasométricos del arbolado: Diámetro a la Altura del Pecho (DAP) y la Altura Total (AT). En el Anexo 2 se muestra la distribución de los sitios de muestreo en la superficie del Ejido.

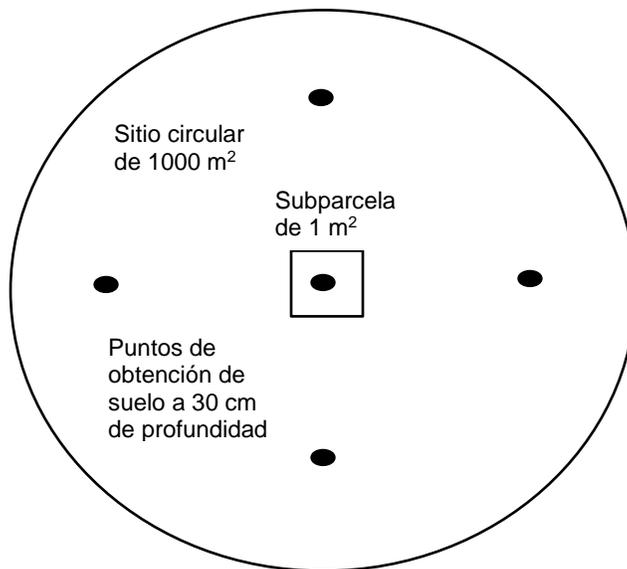


Figura 5. Descripción gráfica de los sitios donde se tomaron los datos de campo.



Figura 6. a. Medición de altura del arbolado y b. Medición de DAP.

Con estos datos se estimó la cantidad de biomasa aérea por árbol utilizando modelos alométricos de acuerdo con la especie (Cuadro 3). Para su selección, se revisaron los modelos alométricos publicados para estimar biomasa (Kg/árbol) en especies similares a las presentes en el ecosistema forestal del Ejido. Los modelos seleccionados se generaron para condiciones similares a las del Ejido Zautla. Para estimar el contenido de carbono por árbol se utilizó un factor de contenido de carbono de 0.50 (IPCC, 2003).

Cuadro 3. Modelos alométricos utilizados para la estimación de biomasa en el arbolado vivo.

Especie	Ecuación del modelo	Autor
<i>Pinus teocote</i>	$B=0.40196 \cdot DN^2$	(Aguirre y Jiménez, 2011)
<i>P. pseudostrobus</i>	$B=0.128495 \cdot DN^{2.36444}$	(Rodríguez <i>et al.</i> , 2009)
<i>P. ayacahuite</i>	$B = \text{Exp}(-3.066) \cdot (DN^{2.646})$	(Návar, 2010)
<i>Quercus spp</i>	$B=\text{Exp}(-2.27) \cdot DN^{2.39}$	(Acosta <i>et al.</i> , 2002)
<i>P. patula</i>	$B=0.0357 \cdot DN^{2.6916}$	(Díaz <i>et al.</i> , 2007)
<i>Cupressus spp.</i>	$B = 0.5266 \cdot DN^{1.7712}$	(FAO, 2013)
<i>Arbutus xalapensis</i>	$B = 0.3764 \cdot (DN^{2 - 2.3146})$	(Aguilar <i>et al.</i> , 2016)

4.2.2. Carbono bajo el suelo

El carbono bajo el suelo se refiere al contenido en la biomasa de las raíces de la vegetación aérea. Para su estimación se utilizó lo reportado por Rodríguez *et al.* (2009) en un estudio para bosque de pino-encino dentro de la Reserva de la Biosfera El Cielo, Tamaulipas, México. Este autor menciona que el porcentaje de biomasa en las raíces corresponde a un 15% con respecto a la biomasa total de la vegetación viva sobre el suelo. Por lo tanto, en este estudio se estimó la cantidad de carbono bajo el suelo por árbol como el 15 % del carbono estimado para su biomasa aérea.

4.2.3. Carbono de la materia muerta

Lo integra el C de la biomasa forestal no viva como árboles muertos en pie y caídos, troncos y tocones, así como la biomasa muerta sobre el suelo (hojarascas, ocochal y ramas) en diferentes estados de descomposición. Para la estimación de la biomasa muerta de la hojarascas y ramas, en cada sitio de muestreo del inventario forestal se ubicó una sub-parcela de 1 m², donde se colectó toda la biomasa que había dentro y posteriormente se pesó en una báscula digital (peso húmedo). Se tomó una sub-muestra de 200 g en cada sitio y se guardó en bolsas de papel debidamente etiquetadas y fueron llevadas al laboratorio para secar en la estufa hasta obtener un peso constante (peso en seco) (Figura 7). Finalmente, se obtuvo la relación peso seco/peso húmedo, y se multiplicó por el peso húmedo total de cada sub-parcela para obtener la biomasa de hojarasca y ramas.



Figura 7. a. Subparcela de 1 m², b. Biomasa que se juntó de la subparcela, c. Pesado de la biomasa y d. Pesado de la muestra llevada a la estufa de secado.

Los árboles muertos en pie se midieron utilizando la misma metodología de los árboles vivos, registrándose algunas variables complementarias, como la presencia de ramas y rebrotes. Para el cálculo de la biomasa de estos árboles, con una arquitectura similar a la de los árboles vivos, se utilizó el modelo alométrico usado para los árboles vivos, sustrayendo la biomasa de las hojas (2 % de la biomasa total/árbol). A los árboles muertos en pie se les midió el DAP y AT y con estos datos se estimó el volumen. Para los troncos caídos y tocones el procedimiento consistió en medir el diámetro medio y la longitud, para estimar su volumen (Figura 8). A los componentes anteriores se le asignó un grado de descomposición, de acuerdo con la clasificación por categorías de descomposición propuesta por el IPCC (2006): sano, intermedio y podrido. Para cada una de las categorías anteriores se tomaron muestras para determinar la densidad. Una vez que se tuvo el dato de densidad se multiplicó por el volumen de cada componente para así tener el valor de biomasa. Finalmente, todos los valores de

biomasa que se obtuvieron se multiplicaron por 0.5 para obtener el contenido de carbono.



Figura 8. a. Medición del arbolado en el suelo, b. Árbol muerto en pie, c. Tronco en grado de descomposición tres, d. Muestra de madera muerta en grado descomposición dos.

4.2.4. Carbono en el suelo

El carbono en el suelo lo comprende principalmente la materia orgánica. Para conocer los valores de carbono en el suelo se eligieron 45 sitios de muestreo. En cada sitio se tomaron cinco muestras de suelo a los 30 cm de profundidad. Posteriormente, en una manta se mezcló el suelo y se tomó una sub-muestra de 1 kg aproximadamente y se guardó en una bolsa de plástico debidamente etiquetada para ser llevada al laboratorio y hacer un análisis de contenido de carbono orgánico mediante el método de Walkley & Black. Para hacer el cálculo de carbono en el suelo se consideró una densidad

aparente del suelo (D_a) de 0.90 g/cm^3 , correspondiente a los suelos Phaeozem (Murillo *et al.*, 2012), suelo dominante en la superficie del Ejido .



Figura 9. a. Punto donde se tomó la muestra de suelo, b. Profundidad, c. Combinación de las muestras de suelo tomadas en el sitio circular, d. Selección de la muestra llevada al laboratorio.

4.3. Cuantificación del carbono mediante uso del software InVEST 3.7.0

En este estudio se utilizó el componente “Carbon Storage and Sequestration” del programa InVEST para estimar la cantidad de carbono almacenado, o secuestrado en el tiempo, en el ecosistema forestal del Ejido Zautla. Se utilizó el mapa de Uso y Cobertura del Suelo (USCS) y las densidades de almacenamiento de C en Mg/ha de cuatro grupos de reservas de carbono: carbono sobre el suelo, bajo el suelo, carbono

de la biomasa muerta y carbono en el suelo. Con las densidades de almacenamiento de C el modelo aplica estimaciones a cada USCS para producir un mapa de almacenamiento de C en los grupos de reserva incluidos.

Una vez que se introdujeron los datos (Figura 10) en la plataforma de trabajo y se corrió el modelo. Se generó una capa raster con la cantidad de carbono representado en 1 m². Para conocer qué cantidad de carbono total corresponde a cada USCS se realizó el siguiente procedimiento: la capa raster se georreferenció con el software ArcMap 10.3, adicionando puntos de control conocidos en coordenadas UTM. Posteriormente, ya georreferenciado el raster, se realizó una reclasificación para saber la cantidad de carbono por 1 m². Después se agregó la capa, en formato shapefile, de los tipos de USCS del Ejido creada en el método directo y se realizó una extracción de la capa raster para cada USCS para obtener el carbono correspondiente para cada pixel de 1 m². Posteriormente, se calculó la superficie de cada USCS (en m²) y se multiplicó la superficie del USCS por la cantidad de carbono total contenida en los pixeles del mismo. El procedimiento anterior se realizó a dos niveles de resolución de las capas raster resultantes: 1 x 1m y 15 x 15 m de tamaño de pixel.

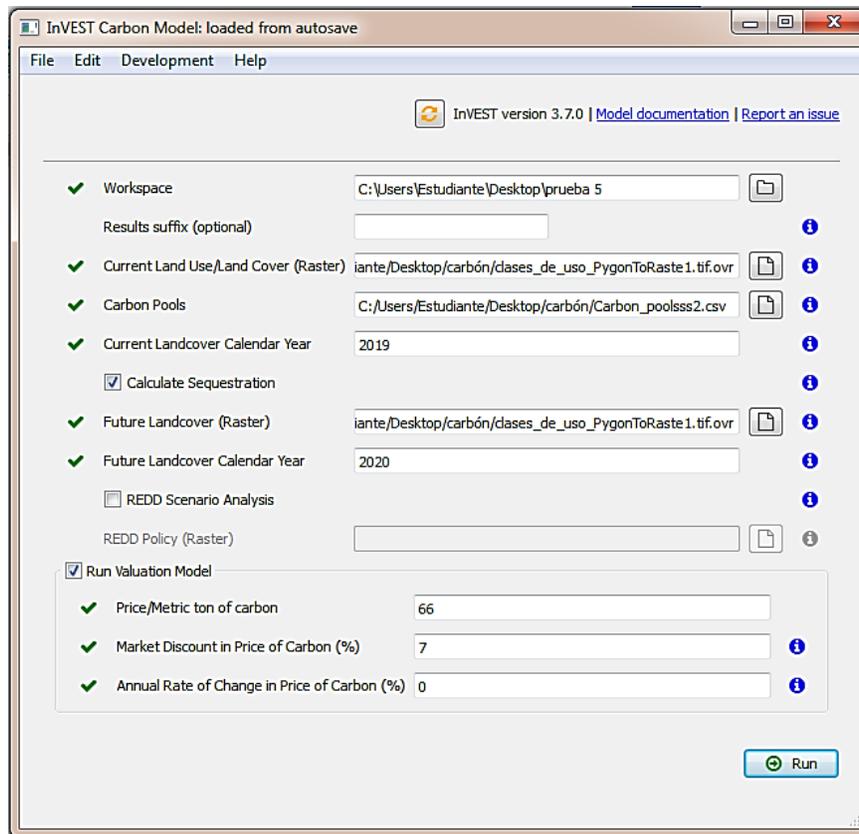


Figura 10. Entrada de datos en el software InVEST 3.7.0.

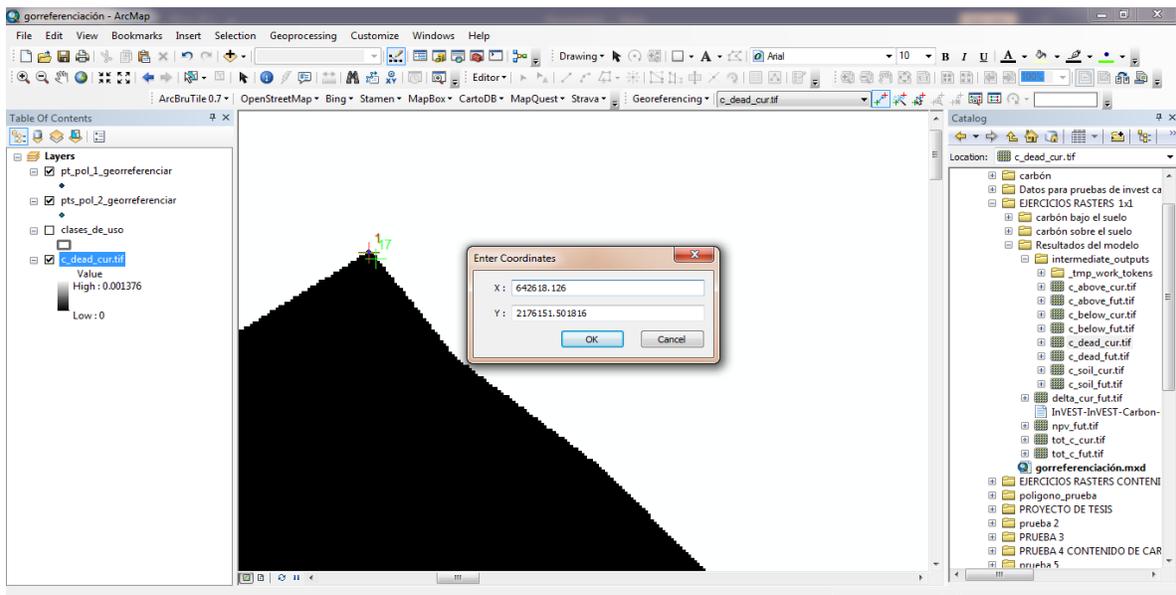


Figura 11. Georreferenciación del raster resultante al correr el modelo.

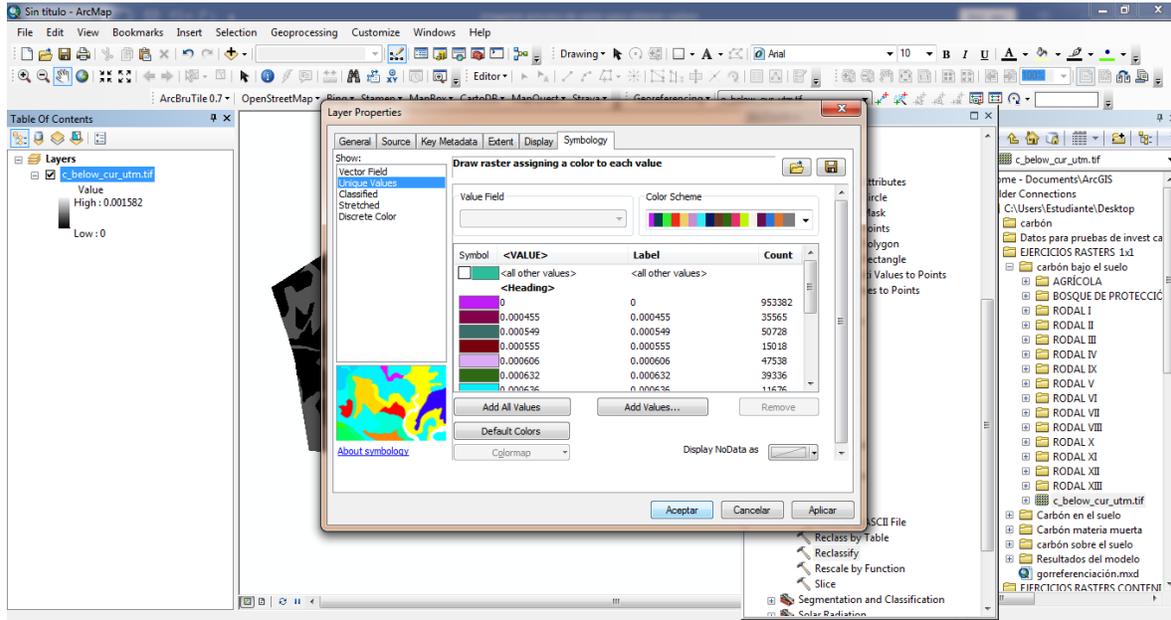


Figura 12. Reclasificación por valor único.

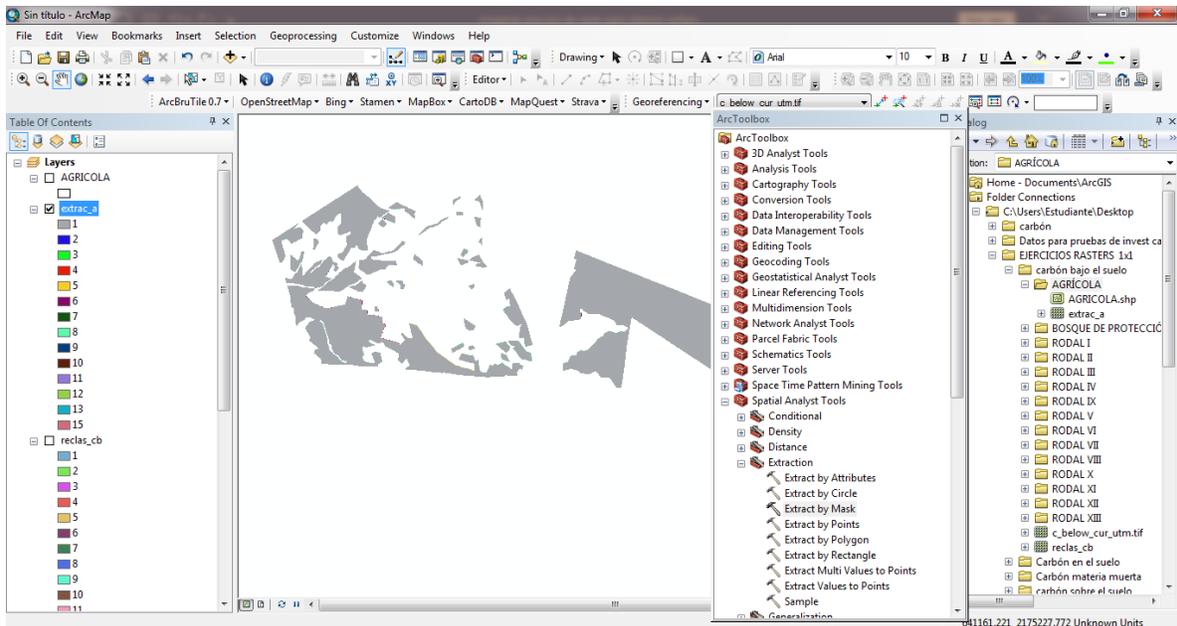


Figura 13. Extracción de cada capa de tipo de USCS.

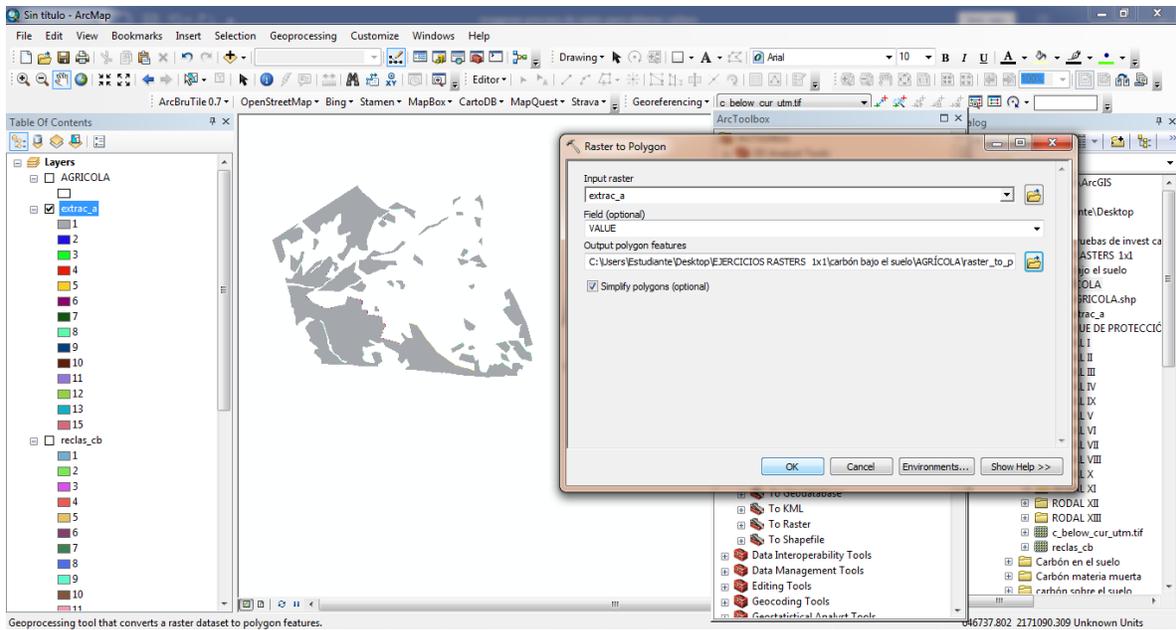


Figura 14. Conversión de raster a polígono de cada capa de tipo de USCS.

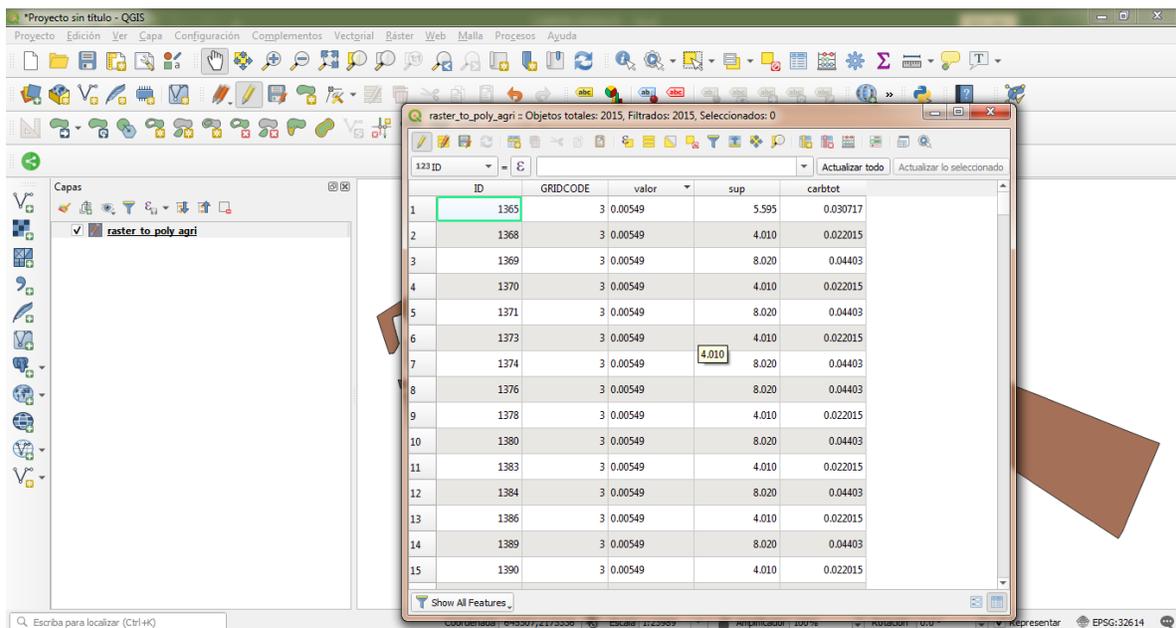


Figura 15. Cálculo de superficie y multiplicación por la cantidad de carbono en un m², suma de resultados para obtener el carbono total por cada capa de USCS.

4.4. Valoración económica de alternativas de uso del bosque del Ejido Zautla

4.4.1. Primera alternativa (extracción de madera en la superficie del BBMF)

Se realizó una valoración económica para estimar los ingresos económicos que el Ejido obtendría mediante la extracción de madera en las 176.26 ha de superficie del BBMF que se propone en el programa de manejo forestal. El tiempo que se consideró para los cálculos fue de 10 años. Se utilizaron los datos de volumen en metros cúbicos rollo total árbol (m^3/rta) por especie propuesto a extraer mediante el tratamiento silvícola "Corta de selección". Estos datos se obtuvieron del cuadro de "plan de cortas" del programa de manejo forestal (Cuadro 4).

Cuadro 4. Plan de cortas del Ejido Zautla.

Anualidad ^a	Rodal		Volumen a extraer	
	No.	Sup. (ha) ^b	Especie	Vol. (m^3/rta) ^c
1/10	I	3.78	<i>P. pseudostrobus</i>	121.10
			<i>P. teocote</i>	6.50
			<i>Quercus sp.</i>	2.33
	II	4.54	<i>P. pseudostrobus</i>	130.88
			<i>P. teocote</i>	4.15
			<i>Quercus sp.</i>	13.91
Subtotal	14.59	<i>P. pseudostrobus</i>	210.19	
		<i>Quercus sp.</i>	48.00	
2/10	VII	8.81	<i>P. pseudostrobus</i>	295.85
			<i>Quercus sp.</i>	67.57
	VIII	5.98	<i>P. pseudostrobus</i>	156.53
			<i>Quercus sp.</i>	42.93
	IX	0.87	<i>P. pseudostrobus</i>	20.74
			<i>Quercus sp.</i>	6.57
Subtotal	15.66	<i>P. pseudostrobus</i>	590.19	
		<i>Quercus sp.</i>	425.52	
3/10	IX	17.79	<i>Quercus sp.</i>	134.84
			<i>P. pseudostrobus</i>	47.58
	IV	1.98	<i>P. pseudostrobus</i>	47.58
			<i>Quercus sp.</i>	26.97

Anualidad ^a	Rodal		Volumen a extraer	
	No.	Sup. (ha) ^b	Especie	Vol. (m ³ /rta) ^c
Subtotal		19.77		634.91
4/10	IV	19.71	<i>P. pseudostrobus</i>	473.08
			<i>Quercus sp.</i>	268.20
Subtotal		19.71		741.28
5/10	IV	2.68	<i>P. pseudostrobus</i>	64.42
			<i>Quercus sp.</i>	36.52
	V	13.06	<i>P. pseudostrobus</i>	409.06
			<i>Quercus sp.</i>	121.35
Subtotal		15.74		631.35
6/10	V	3.39	<i>P. pseudostrobus</i>	106.16
			<i>Quercus sp.</i>	31.49
	III	14.46	<i>P. pseudostrobus</i>	381.95
			<i>Quercus sp.</i>	211.46
Subtotal		17.85		731.06
7/10	III	11.40	<i>P. pseudostrobus</i>	301.00
			<i>Quercus sp.</i>	166.65
	VI	11.47	<i>P. pseudostrobus</i>	155.15
			<i>Quercus sp.</i>	111.58
Subtotal		22.87		734.38
8/10	VI	2.57	<i>P. pseudostrobus</i>	34.83
			<i>Quercus sp.</i>	25.05
	X	20.23	<i>P. pseudostrobus</i>	309.40
			<i>Quercus sp.</i>	145.30
	XI	2.51	<i>P. ayacahuite</i>	131.67
			<i>Quercus sp.</i>	6.86
Subtotal		25.32		653.11
9/10	XI	0.67	<i>P. ayacahuite</i>	34.85
			<i>Quercus sp.</i>	1.82
	XII	12.15	<i>P. pseudostrobus</i>	338.67
			<i>P. teocote</i>	19.65
			<i>Quercus sp.</i>	39.07
	XIII	1.75	<i>P. pseudostrobus</i>	81.13
			<i>P. teocote</i>	0.00
			<i>Quercus sp.</i>	4.30
Subtotal		14.56		519.48
10/10	XIII	10.18	<i>P. pseudostrobus</i>	473.23
			<i>P. teocote</i>	0.00
			<i>Quercus sp.</i>	25.10
Subtotal		10.18		498.34
Total		176.26		6271.15

a=Numero de anualidad; b= Superficie a intervenir; c = Volumen a extraer.

Se tomó la propuesta de porcentajes de distribución de los productos forestales comerciales que van a extraer (Cuadro 5). Para estimar los ingresos se utilizó el precio del m³ de madera en rollo a pie de brecha, tomado del anuario de sistema de precios de productos forestales maderables de la Comisión Nacional Forestal (CONAFOR, 2018).

Cuadro 5. Distribución comercial de productos forestales del Ejido.

Distribución comercial de productos								
Especie	<i>P. pseudostrobus</i>		<i>P. teocote</i>		<i>P. ayacahuite</i>		<i>Quercus sp.</i>	
	%	Precio (\$/m ³)	%	Precio (\$/m ³)	%	Precio (\$/m ³)	%	Precio (\$/m ³)
Productos comerciales								
Largas dimensiones ^a	55	\$1202.72	35	\$1202.72	0	\$1202.72	0	
Cortas dimensiones ^b	25	\$574.22	45	\$574.22	40	\$574.22	20	\$460
Leña/combustible	14	\$236.67	14	\$236.67	48	\$236.67	68	\$236.67
Desperdicio ^c	6		6		12		12	

a= Son trozas que van de 8 a 24 pies de largo (2.44 a 7.31 m); b= Son secciones más delgadas, sus medidas más comunes van de 2 a 6 pies de largo (0.61 a 1.82 m); c= Son secciones en rollo o en raja que se obtienen por lo general de la trocaría, puntas o ramas, sus medidas más comunes van de 1 a 10 pies de largo (0.30 a 3.04 m) (Whelna y Minnick, 2009).

Para la cuantificación económica se siguió el siguiente procedimiento, el volumen a extraer por especie, se multiplicó por el porcentaje de producto comercial a que se destinará la madera, y el resultado se multiplicó por el precio correspondiente.

Además, se realizó una estimación del carbono perdido por la madera extraída. Para esta estimación se utilizó el valor de C promedio por hectárea de la biomasa aérea por especie, este dato se multiplicó por la superficie de cada rodal, el resultado se dividió entre la “intensidad de remoción” valor que se obtuvo del cuadro de “plan de cortas” del programa de manejo forestal del Ejido. Para cuantificar en términos monetarios la pérdida de C. Se tomó como referencia el precio de una tonelada de C propuesto por la Comisión de Cooperación Ambiental (CCA) de 10 dólares por tonelada (OECD, 2018). Para la conversión a pesos mexicanos se consideró el valor del dólar en \$20.36. Se multiplicó la cantidad de C perdido por el precio respectivo de una tonelada de C.

Posteriormente, la cantidad obtenida se restó al ingreso total por la extracción de madera.

4.4.2. Segunda alternativa (la implementación de un programa PSACC en la superficie del BP y por la extracción de madera en la superficie del BBMF)

Se realizó una valoración económica para estimar los ingresos económicos que el Ejido obtendría si se considerara un Programa de Pago por Servicios Ambientales de Captura de Carbono (PSACC) en las 209.37 ha del BP del Ejido. Se tomó como referencia el Programa de Pago por Servicios Ambientales de la Comisión Nacional Forestal (CONAFOR). Se consultaron las Reglas de Operación de Apoyos para el Desarrollo Forestal Sustentable 2019 de la CONAFOR para revisar los criterios y montos de apoyo por hectárea.

El programa de Pago por Servicios Ambientales de la CONAFOR consiste en incentivos económicos dirigidos a las personas propietarias y legítimas poseedoras de terrenos forestales por los beneficios que la sociedad recibe de los ecosistemas forestales, tales como la captación de agua, el mantenimiento de la biodiversidad, la captura y conservación del carbono, los cuales benefician a centros de población y al desarrollo de actividades productivas (CONAFOR, 2019). El apoyo contempla un pago económico de \$1,100 por hectárea que se destine al programa durante un periodo de 5 años.

Con la intención de poder comparar los ingresos de las diferentes alternativas de aprovechamiento se consideró un tiempo de duración del PSACC de 10 años. El procedimiento fue el siguiente: se multiplicó la superficie total por el monto de apoyo por hectárea, el resultado se multiplicó por 10 que es el tiempo en años. Finalmente, a la cantidad obtenida anteriormente se le sumó la cantidad obtenida en la valoración económica por la extracción de madera en el BBMF, y así tener la cantidad de ingreso total por estas dos formas de aprovechamiento.

4.4.3. Tercera alternativa: Por la implementación de un programa PSACC en la superficie del BP y en la superficie del BBMF

Se realizó una valoración económica considerando la implementación de un programa PSACC en toda la superficie forestal del Ejido, en este sentido se tendrían 209.37 ha del BP y 178.08 ha del BBMF haciendo un total de 387.45 ha. Con la intención de poder comparar los ingresos de las diferentes alternativas de aprovechamiento se consideró un tiempo de duración del PSACC de 10 años. El procedimiento fue en siguiente: se multiplicó la superficie total destinada al PSACC por el monto de apoyo por hectárea, el resultado se multiplicó por 10 que es el tiempo en años.

5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

5.1. Cuantificación del carbono mediante método directo

5.1.1 Carbono sobre el suelo

El carbono sobre el suelo estuvo determinado por la cantidad de biomasa aérea presente. Ésta a su vez estuvo determinada por la especie y número de árboles por hectárea. En el Cuadro 6 se muestra el promedio de número de árboles por hectárea y las diferentes especies arbóreas encontradas en cada tipo de USCS. Se observa que las especies con mayor número de individuos son *Pinus pseudostrobus* y *Quercus sp.* Lo anterior está relacionado a que este ecosistema forestal lo componen en su mayoría bosques de *P. pseudostrobus* y *P. pseudostrobus* combinado con *P. teocote* en menor proporción. Asimismo, se encontraron asociaciones de bosque *P. pseudostrobus*, *Quercus sp* y *Arbutus xalapensis*, principalmente en la superficie que ocupa el BP. En el caso de *Pinus ayacahuite* esta especie solo está presente en la parte más alta de los terrenos del Ejido, a altitudes de 2850 m, donde las condiciones ambientales le permiten desarrollarse adecuadamente. Las especies con baja presencia como *P. patula* y *Cupressus sp.* se ubican en un punto del BP donde fueron introducidas en un proyecto de reforestación y conservación de suelos.

Cuadro 6. Número de árboles por hectárea

Especie	Bosque de protección	Bosque bajo manejo forestal
<i>P. pseudostrobus</i>	194	123
<i>P. teocote</i>	0	4
<i>P. ayacahuite</i>	0	10
<i>Quercus sp.</i>	182	86
<i>P. patula</i>	3	0
<i>Cupressus sp.</i>	19	0
<i>Arbutus xalapensis</i>	6	0

La cantidad de carbono por hectárea fue similar en el Bosque de Protección (BP) y el Bosque Bajo Manejo Forestal (BBMF), como se muestra en la Figura 16. El rodal RXI fue el de mayor cantidad de carbono por hectárea (105.45 Mg/ha), y corresponde a bosque de *Pinus ayacahuite*, donde se encontraron árboles de hasta 75 cm DAP. La cantidad de carbono del rodal RXIII fue la segunda más alta (70.06 Mg/ha), lo que se explica porque es una masa forestal de *Pinus pseudostrobus*, con árboles de gran porte (hasta 60 cm de DAP). Por el contrario, el rodal RVI fue el más bajo, debido a que la superficie la compone una asociación de bosque de pino-encino con árboles en su mayoría de menor porte, con promedio de DAP de 25 cm. Para las áreas agrícolas no se cuantificó el carbono sobre el suelo.

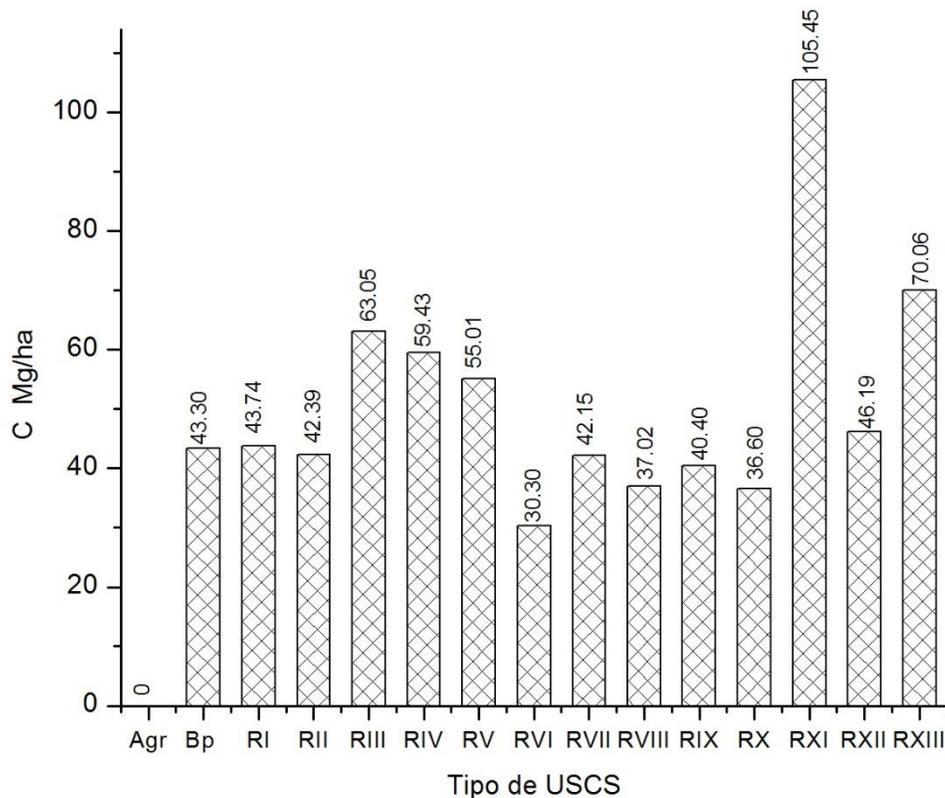


Figura 16. Carbono sobre el suelo.

Se han reportado contenidos superiores (163.09 Mg/ha) de carbono por la biomasa aérea a la obtenida en este estudio, con datos del inventario forestal en un rodal de bosque de *Pinus pseudostrobus* con 1,244 árboles/ha, con condiciones similares (Hernández, 2015). Lo anterior puede relacionarse con la edad de la masa forestal, ya que la de los árboles del estudio reportado se encuentra en el rango de 10-20 años y, de acuerdo con Casiano *et al.* (2018), en este rango de edad los árboles tienen una mayor tasa de fijación de carbono, comparado con arbolados de mayor edad, como es el caso del bosque del Ejido Zautla, donde la edad de los árboles es mayor de 60 años. Similarmente, otros estudios encontraron contenidos de carbono mayores: Galicia *et al.* (2015) reportaron un contenido de carbono de 225 a 347 Mg/ha en un bosque de pino-encino con manejo forestal en la sierra de Oaxaca; Álvarez *et al.* (2013) estimaron 414.53 Mg/ha para vegetación de la sierra norte de Oaxaca, a una altitud de 2500 m,

mientras que Ordóñez y Vázquez (2015) estimaron un contenido de carbono de 129.1 Mg/ha. Valores en el rango de las estimaciones de este estudio son los de Acosta *et al.* (2009), quienes estimaron contenidos de carbono de 94.9 Mg/ha y Rodríguez *et al.* (2009) que estimaron contenidos de carbono 82.92 Mg/ha en bosque con asociación de pino-encino en Tamaulipas, con 232 árboles por hectárea de *Pinus pseudostrobus*.

En el Cuadro 7 se muestra el total de carbono sobre el suelo por especies. *Pinus pseudostrobus* tuvo mayor número de árboles por hectárea, superficie y cantidad de carbono. La especie se encuentra tanto en el BP como en el BBMF. *Quercus sp.* fue la otra especie con cantidad total alta de carbono de la biomasa aérea. Las demás especies están presentes en menor cantidad y con tamaño de DAP más pequeños, ya que generalmente son de menor edad.

Cuadro 7. Carbono total de la biomasa aérea.

Especie	Bosque de protección	Bosque con aprovechamiento
<i>P. pseudostrobus</i>	3977.87 ^a	6,664.54
<i>P. teocote</i>	12.62	84.12
<i>P. ayacahuite</i>	0	336.6
<i>Quercus sp.</i>	4824.71	1,844.61
<i>P. patula</i>	8.91	0
<i>Cupressus sp.</i>	114.76	0
<i>Arbutus xalapensis</i>	126.17	0

a. Cantidad de carbono en Mg.

5.1.2. Carbono bajo el suelo

El carbono bajo el suelo estuvo influenciado por la cantidad de biomasa que representa las raíces de la vegetación aérea (Figura 17). El rodal RXI fue el de mayor cantidad de carbono bajo el suelo por hectárea (15.82 Mg/ha) y en segundo lugar el rodal RXIII (10.51 mg/ha). El rodal RVI tuvo el contenido de carbono más bajo. Se tienen reportes de cantidades similares a las obtenidas en este estudio. Galicia et al. (2015) reportan cantidades de carbono bajo el suelo en un rango de 2.2 a 9.8 Mg/ha; mientras que Rodríguez *et al.* (2009) reportaron un contenido de 16.51 Mg/ha. Ambos estudios se realizaron en vegetación de pino-encino. En contraste, Álvarez *et al.* (2013) reportan 78.76 Mg/ha de carbono por raíces finas y gruesas en vegetación de la sierra norte de Oaxaca, cantidad mayor a la obtenida en el presente estudio.

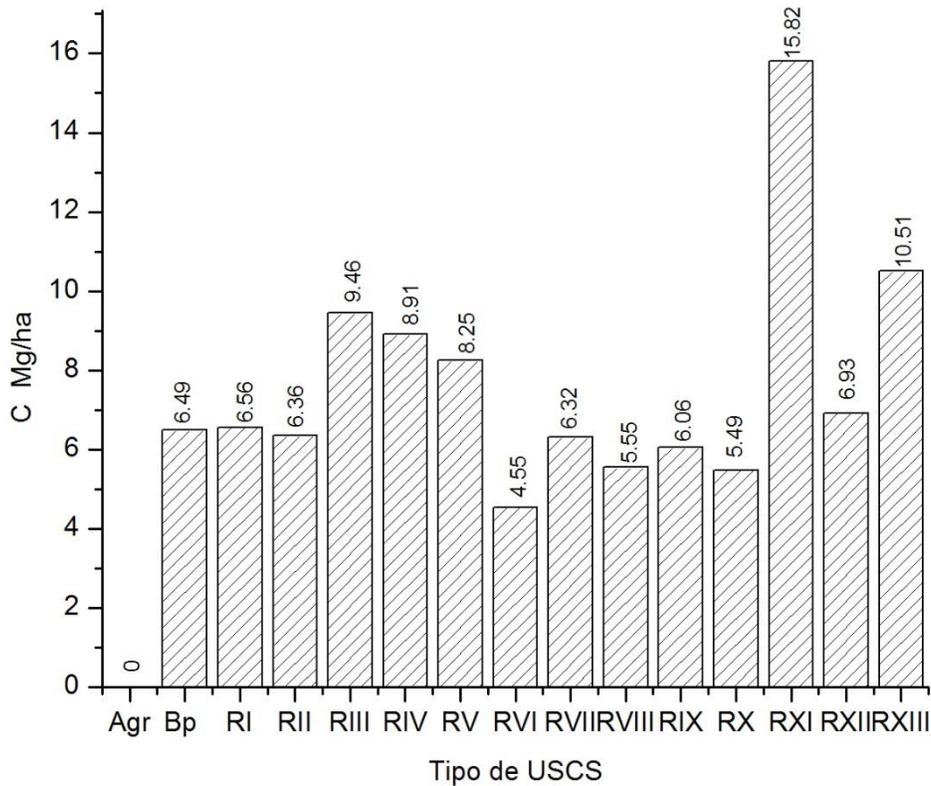


Figura 17. Cantidad de carbono bajo el suelo.

5.1.3. Carbono de la biomasa muerta

El carbono de la biomasa muerta estuvo determinado por la cantidad de biomasa muerta almacenada como hojarascas, ocochal y estrobillos, así como por el número de árboles, tocones y troncos muertos: además del nivel de descomposición de cada uno de éstos. En la Figura 18 se muestran las cantidades de contenido de carbono de la biomasa muerta promedio por hectárea (Mg/ha) para cada USCS.

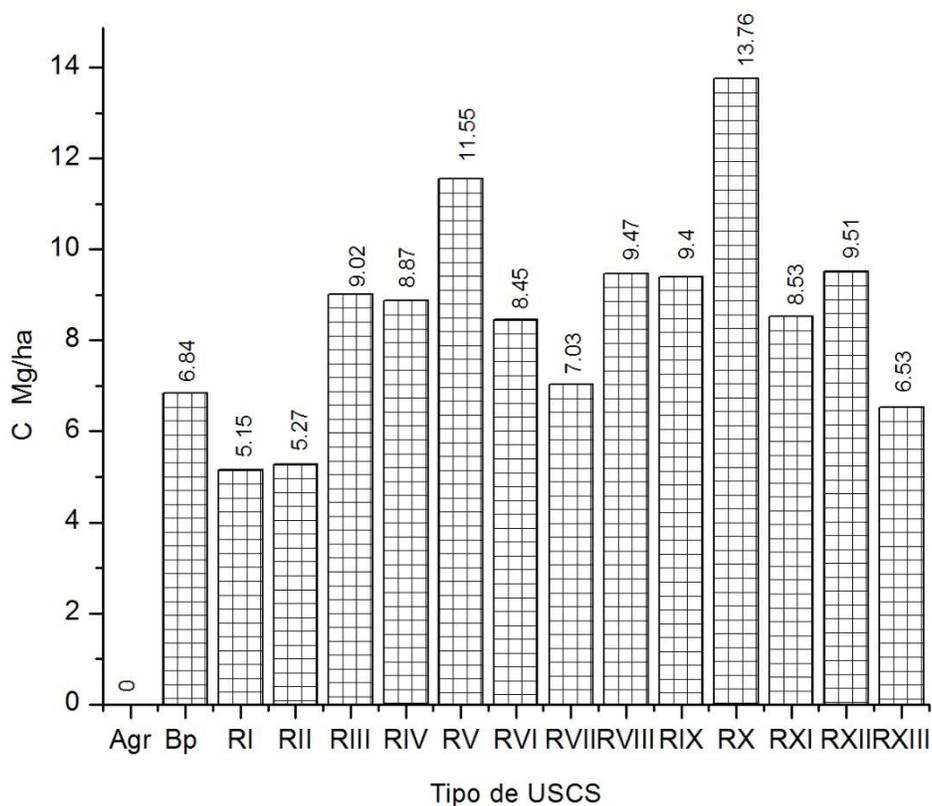


Figura 18. Cantidad de carbono por la biomasa muerta.

En el rodal RX se obtuvo la mayor cantidad de carbono estimado por biomasa muerta. Esto se explica por la condición del sitio, ya que se ubica en laderas con altas cantidades de biomasa acumulada en el suelo: 9.62 Mg/ha por hojarascas y 4.14 Mg/ha por árboles, tocones y troncos muertos. En contraste, en los rodales RI y RII se

encontró la menor cantidad de carbono. En estos rodales presentan poca acumulación de biomasa, ya que están cerca de la población y en ellos las personas periódicamente van a recoger la hojarasca y el ocochal para utilizarlos como combustible y cocer sus artesanías de barro y sus alimentos. La cantidad de carbono de la biomasa acumulada en el suelo en el RI fue de 3.85 Mg/ha por árboles muertos y 1.30 Mg/ha por tocones y troncos muertos. En el RII la cantidad del carbono por la biomasa acumulada en el suelo fue de 5.20 Mg/ha por árboles muertos y 0.07 Mg/ha por tocones y troncos muertos. En el rodal RXII, en tres de los cinco sitios muestreados se encontró una alta cantidad de troncos muertos en el suelo y en su mayoría corresponde a árboles que fueron arrancados por los fuertes vientos. En el rodal RIII, en seis de los 21 sitios muestreados se encontró una baja cantidad de biomasa en el suelo. Esto está asociado al aprovechamiento maderable actual, que deja sin cobertura vegetal arbórea al suelo.

En lo que respecta al bosque de protección, la cantidad del carbono por la biomasa acumulada en el suelo fue de 6.40 Mg/ha por árboles muertos y 0.44 Mg/ha por tocones y troncos muertos. En la mayoría de los sitios muestreados no se encontraron árboles, tocones y troncos muertos, ya que más de la mitad de la superficie son áreas con poca humedad del suelo y de difícil acceso, con vegetación arbustiva.

En el USCS agrícola no se tomaron datos de la biomasa sobre el suelo y vegetación muerta, por considerar que esta superficie está compuesta por parcelas agrícolas donde solo están cubiertas por cultivos la mitad del año y la otra mitad están descubiertas.

Cantidades de carbono similares a las de este estudio fueron reportadas por Galicia *et al.* (2015), con rangos que van de los 8.7 a 17.9 Mg/ha. Así mismo, Rodríguez *et al.* (2009) estimaron contenidos de carbono de 10.19 Mg/ha. Por su parte, Álvarez *et al.* (2013) reportaron 29.63 Mg/ha de carbono por árboles muertos, ramillas y mantillo, cantidad mayor a las obtenidas en el Ejido Zautla.

5.1.4. Carbono en el suelo

El carbono en el suelo fue definido por el porcentaje de concentración de carbono orgánico en las muestras de suelo tomadas. En la Figura 19 se muestran las cantidades de contenido de carbono en el suelo promedio por hectárea (Mg/ha) para cada USCS.

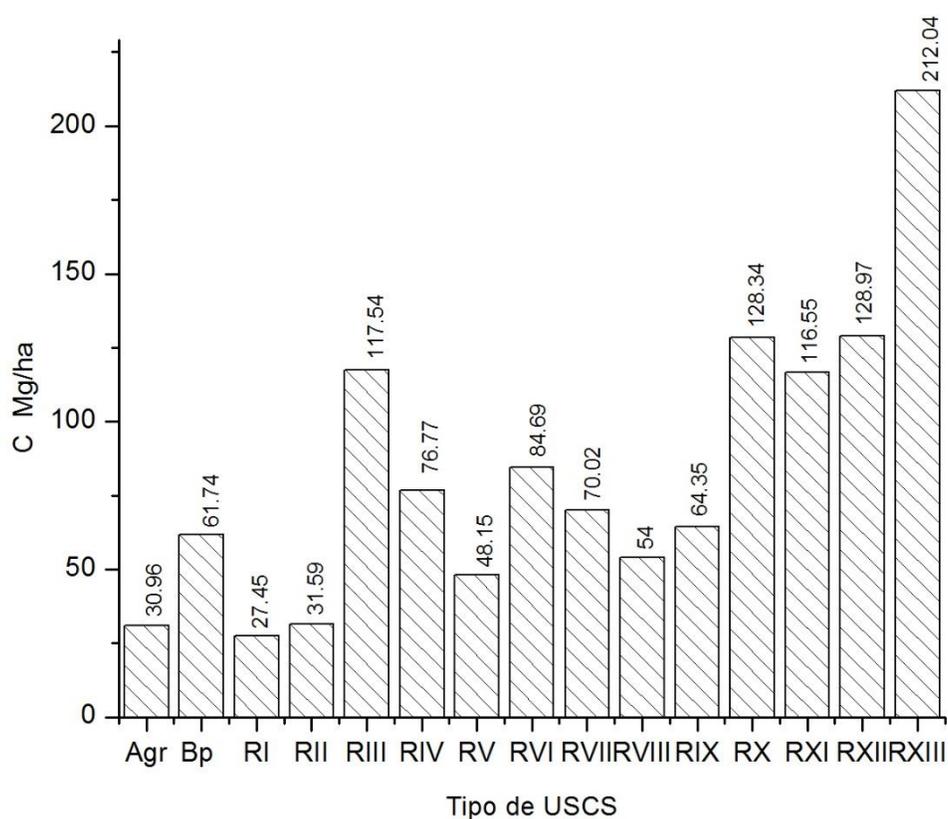


Figura 19. Carbono promedio por hectárea en el suelo.

El rodal RXIII tuvo la mayor cantidad de carbono, lo que está asociado a una alta acumulación de biomasa en proceso de descomposición, lo que da origen a una alta concentración de materia orgánica. Por ejemplo, en uno de los sitios muestreados del

rodal se obtuvo una concentración del 12% de carbono orgánico, mientras que la media de concentración de carbono orgánico en los sitios muestreados fue de 3%.

Los rodales RIII, RX, RXI y RXII tuvieron una cantidad similar de carbono en el suelo. Mientras que en los rodales RI y RII se registraron las cantidades de carbono más bajas. Lo anterior está relacionado a la cercanía con la población, y a la frecuente extracción de hojarasca, ocochal y el material vegetal muerto, para utilizarlo como combustible. Además, en estos dos rodales se practica el pastoreo de ganado caprino. Generalmente, en estos rodales se tiene poca biomasa en descomposición y el suelo está expuesto, lo que resulta en una baja concentración de materia orgánica.

En el bosque de protección el contenido de materia orgánica fue de 2.29%. Como se mencionó anteriormente, en esta superficie predomina vegetación arbustiva, con baja concentración de biomasa. Esto da como resultados baja acumulación de materia orgánica.

El promedio de carbono en el suelo obtenido en el USCS Agrícola fue de 30.96 Mg/ha. En este USCS se tuvo el contenido de carbono más bajo, el cual fue de 1.15%. Esto se explica por la baja incorporación de biomasa vegetal al suelo. El principal cultivo es el maíz, del cual se extrae tanto el grano como el forraje. Solo se incorpora al suelo la biomasa de las raíces y pequeñas partes de la planta que quedan en los terrenos. Contreras (2014) reportó contenidos de carbono en el suelo, para parcelas con cultivos de maíz y frijol, de 42.94 y 49.83 Mg/ha, respectivamente; resultados similares a los estimados en el presente estudio.

En el bosque de protección el promedio carbono en el suelo fue de 61.74 Mg/ha. Este valor es menor al contenido de carbono en el suelo de 128 Mg/ha reportado por González (2019) para un bosque de protección en el Ejido Cuauhtémoc, en el estado de Puebla.

Para los rodales del BMBF el promedio de carbono en el suelo fue de 89.27 Mg/ha. Este resultado está por debajo de los contenidos reportados por otros investigadores para suelos de bosques templados con vegetación de pino-encino. González (2019) reportó un contenido de carbono en el suelo de 230 Mg/ha, Álvarez *et al.* (2013) reportaron 158.2 mg/ha, y Correa *et al.*(2012) registraron 119.4 Mg/ha.

5.1.5. Carbono total obtenido con el método directo

En el Cuadro 8 se muestra la cantidad total de carbono para cada USCS estimado mediante el inventario forestal en el Ejido Zautla.

Cuadro 8. Carbono total obtenido mediante el método directo.

USCS	Sup (Ha)	Promedio (Mg/ha)				Carbono total (Mg)				Total
		Css	Cbs	Cbm	Cs	Css ^a	Cbs ^b	Cbm ^c	Cs ^d	
Agr	381.34	0.00	0.00	0.00	30.96	0.00	0.00	0.00	11806.29	11806.29
BP	209.37	43.30	6.49	6.84	61.74	9065.72	1358.81	1432.09	12926.50	24783.13
RI	4.07	43.74	6.56	5.15	27.45	178.02	26.70	20.96	111.72	337.40
RII	4.67	42.39	6.36	5.27	31.59	197.96	29.70	24.61	147.53	399.80
RIII	25.60	63.05	9.46	9.02	117.54	1614.08	242.18	230.91	3009.02	5096.19
RIV	24.54	59.43	8.91	8.87	76.77	1458.41	218.65	217.67	1883.94	3778.67
RV	16.65	55.01	8.25	11.55	48.15	915.92	137.36	192.31	801.70	2047.28
RVI	14.19	30.30	4.55	8.45	84.69	429.96	64.56	119.91	1201.75	1816.18
RVII	15.76	42.15	6.32	7.03	70.02	664.28	99.60	110.79	1103.52	1978.20
RVIII	6.01	37.02	5.55	9.47	54.00	222.49	33.36	56.91	324.54	637.30
RIX	19.03	40.40	6.06	9.40	64.35	768.81	115.32	178.88	1224.58	2287.60
RX	20.29	36.60	5.49	13.76	128.34	742.61	111.39	279.19	2604.02	3737.22
RXI	3.20	105.45	15.82	8.53	116.55	337.44	50.62	27.30	372.96	788.32
RXII	11.99	46.19	6.93	9.51	128.97	553.82	83.09	114.02	1546.35	2297.28
RXIII	12.08	70.06	10.51	6.53	212.04	846.32	126.96	78.88	2561.44	3613.61
Total						17995.85	2698.31	3084.44	41625.85	65404.46

Css=Carbono sobre el suelo; Cbs= Carbono bajo el suelo; Cbm=Carbono de la biomasa muerta; Cs=Carbono del suelo; Cssa = Carbono sobre el suelo*superficie; Cbsb= Carbono bajo el suelo*superficie; Cbcm= Carbono de la biomasa muerta*superficie; Csd= Carbono del suelo*superficie

En el Ejido Zautla se tiene un almacén de carbono total de 65,404.46 Mg. Este carbono se distribuye de la siguiente forma: 11,806.29 Mg en el USCS agrícola, 24,783.13 Mg

en el BP y 28,815.05 Mg en el BBMF. Comparando el resultado obtenido con estudios previos, Rodríguez *et al.* (2009) estimaron un contenido total de carbono en un bosque de pino-encino de 110 Mg/ha. Rodríguez *et al.* (2017) estimaron 380.13 Mg/ha para un ecosistema de Pino en Chiapas, México.

5.2. Cuantificación del carbono con el uso del programa InVEST 3.7.0.

Con una resolución de 1 m, se estimó con el modelo InVEST un contenido de carbono de 65,269.62 Mg en toda la superficie del Ejido (Cuadro 9). En el uso agrícola el promedio de carbono almacenado por ha fue de 31.11 Mg, asociado al carbono almacenado en el suelo; mientras que en el Bosque de Protección se tuvo 117.97 Mg/ha y en el Bosque Bajo Manejo Forestal el contenido promedio de carbono fue de 161.18 Mg/ha.

Con una resolución de 15 m, el contenido de carbono total para toda la superficie del Ejido fue de 63,083.39 Mg/ha (Cuadro 10). El promedio de carbono almacenado por ha para el uso agrícola fue de 32.81 Mg/ha, para el Bosque de Protección fue de 112.43 Mg/ha y para el Bosque Bajo Manejo Forestal fue de 151.80 Mg/ha.

Cuadro 9. Carbono obtenido utilizando raster de tamaño de pixel 1x1m.

USCS	Sup (Ha)	Carbono total (Mg) pixel 1x1m				Total
		Css	Cbs	Cbm	Cs	
Agr	381.34				11867.26	11867.26
BP	209.37	9021.22	1351.39	1424.92	12902.25	24699.78
RI	4.07	177.18	26.56	20.89	112.47	337.11
RII	4.67	197.59	29.63	24.59	148.60	400.41
RIII	25.60	1609.48	241.35	230.00	2996.68	5077.51
RIV	24.54	1455.89	217.94	217.19	1878.97	3770.00
RV	16.65	912.46	136.75	191.34	800.92	2041.46
RVI	14.19	430.55	64.69	119.88	1200.04	1815.16
RVII	15.76	662.08	99.33	110.49	1100.99	1972.90
RVIII	6.01	221.99	33.27	56.77	324.58	636.61
RIX	19.03	766.70	114.96	178.18	1223.07	2282.91

Carbón total (Mg) píxel 1x1m						
USCS	Sup (Ha)	Css	Cbs	Cbm	Cs	Total
RX	20.29	742.15	111.27	278.52	2598.61	3730.55
RXI	3.20	330.27	48.96	26.69	365.97	771.90
RXII	11.99	550.89	82.26	113.03	1530.97	2277.14
RXIII	12.08	840.64	125.59	78.34	2544.35	3588.92
Total		17985.90	2696.55	3085.38	41595.73	65269.62

Cuadro 10. Carbón obtenido utilizando raster de tamaño de píxel 15x15m.

Carbón total (Mg) píxel 15x15m						
USCS	Sup (Ha)	Css	Cbs	Cbm	Cs	Total
Agr	381.34				12510.89	12510.89
BP	209.37	8287.93	1253.95	1332.15	12666.13	23540.16
RI	4.07	161.90	24.51	19.59	124.86	330.85
RII	4.67	192.38	27.82	23.38	150.46	394.03
RIII	25.60	1583.18	238.58	249.70	2954.48	5025.94
RIV	24.54	1435.74	212.19	209.61	1867.19	3724.73
RV	16.65	820.87	128.19	174.12	788.15	1911.33
RVI	14.19	451.28	67.04	113.32	1137.75	1769.39
RVII	15.76	616.14	91.67	100.75	1052.80	1861.36
RVIII	6.01	212.07	29.45	49.13	315.88	606.53
RIX	19.03	751.71	111.54	171.20	1176.03	2210.47
RX	20.29	738.86	111.42	259.14	2505.89	3615.32
RXI	3.20	180.34	30.10	16.82	260.97	488.23
RXII	11.99	441.72	68.24	84.18	1371.83	1965.97
RXIII	12.08	737.28	110.18	70.63	2210.10	3128.19
Total		17929.92	2651.88	3053.67	41093.39	63083.39

En México no se han realizado estudios de estimación de carbono con el uso del software InVEST. Sólo Ordóñez *et al.* (2001) estimaron contenido de carbono mediante el uso del modelo dinámico CO2Fix para Windows Ver. 1.2., y obtuvieron un potencial de captura de carbono de 74 Mg/ha de biomasa sobre el suelo, cantidad mayor a los 46.24 y 42.87 Mg/ha obtenidos en este estudio para carbono sobre el suelo con InVEST, para las resoluciones de 1 m y 15 m, respectivamente.

5.3. Comparación del carbono obtenido con los dos métodos

La cantidad de carbono obtenido mediante el modelo InVEST con el tamaño de pixel 1x1m es similar a la cantidad obtenida mediante el método directo (Cuadro 11 y Figura 20). Con un tamaño de salida de 15x15 m, el modelo estima una cantidad menor de carbono total, comparada con la estimación realizada a partir de los datos del inventario forestal, aunque todavía se tiene una buena aproximación en la estimación. Lo anterior significa que, con la estimación de carbono en los diferentes almacenes del bosque, en áreas de muestreo representativos de cada condición (rodal), se puede alimentar el modelo (InVEST) y estimar con una buena aproximación el carbono almacenado en toda la superficie del área de interés, en este caso el Ejido Zautla. Una segunda opción de aplicación del programa InVEST es el tomar datos promedio de contenido de carbono reportados para esos almacenes del ecosistema forestal.

Cuadro 11. Comparación de carbono total con los dos métodos.

USCS	Sup (ha)	Carbono total (Mg)		
		Método directo	InVEST con pixel	
			1x1m	15x15m
Agr	381.34	11806.29	11867.26	12510.89
BP	209.37	24783.13	24699.78	23540.16
RI	4.07	337.40	337.11	330.85
RII	4.67	399.80	400.41	394.03
RIII	25.60	5096.19	5077.51	5025.94
RIV	24.54	3778.67	3770.00	3724.73
RV	16.65	2047.28	2041.46	1911.33
RVI	14.19	1816.18	1815.16	1769.39
RVII	15.76	1978.20	1972.90	1861.36
RVIII	6.01	637.30	636.61	606.53
RIX	19.03	2287.60	2282.91	2210.47
RX	20.29	3737.22	3730.55	3615.32
RXI	3.20	788.32	771.90	488.23
RXII	11.99	2297.28	2277.14	1965.97
RXIII	12.08	3613.61	3588.92	3128.19
Total	768.79	65404.46	65269.62	63083.39

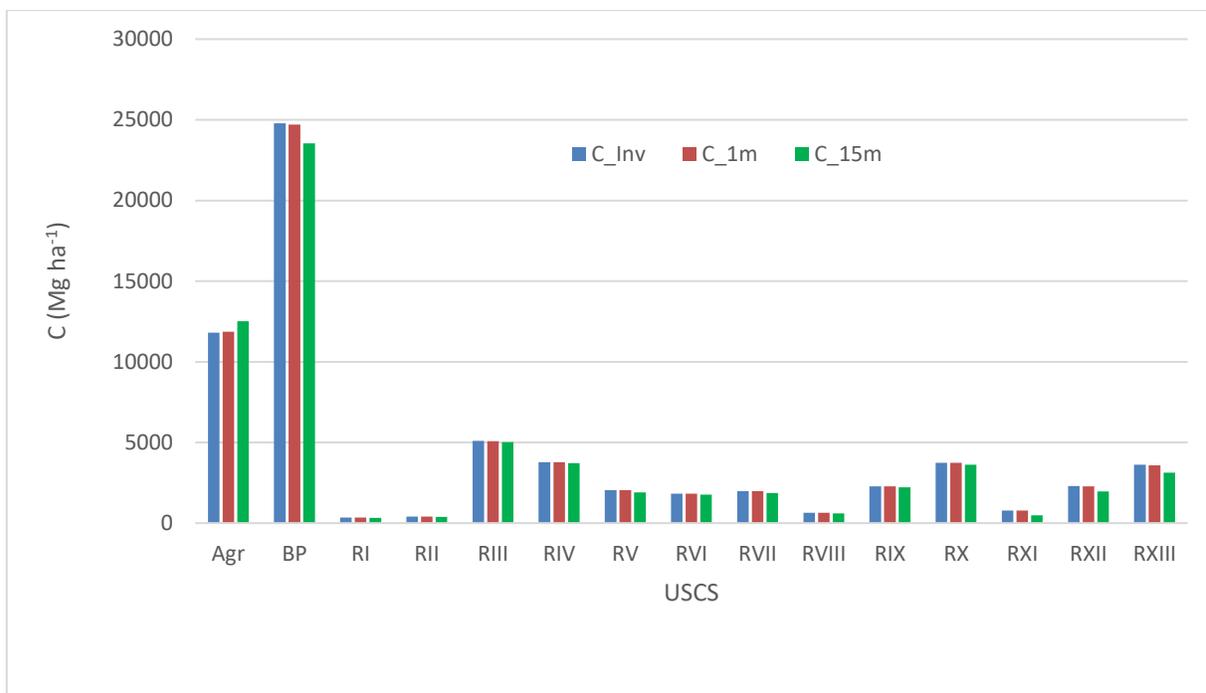


Figura 20. Comparación de las estimaciones de carbono con los diferentes métodos.

5.4. Valoración económica de alternativas de aprovechamiento del bosque del Ejido Zautla

5.4.1 Primera alternativa: extracción de madera en la superficie del BBMF

El ingreso económico que representa la extracción de madera estuvo determinado por la cantidad de volumen de madera a extraer, el tipo de producto forestal comercial y el precio de la madera. Con la ejecución del programa de manejo, el Ejido Zautla tendría un ingreso total de \$4,270,123.55 durante los 10 años del ciclo de corta. La especie que aporta la mayor cantidad al ingreso es *P. pseudostrubus*, con \$3,802,387.63 y representa el 89% del ingreso total. El bosque de *Quercus sp* aporta \$388,985.11, equivalente al 9% del ingreso; *P. ayacahuite* aporta \$57,162.52 (1.5% del ingreso total), y *P. teocote* aporta \$21,588.29, equivalente al 0.5% del ingreso total. El

promedio de ingreso anual para el Ejido es de \$427,012.35. La anualidad en la que se obtendría la mayor cantidad de ingresos es la sexta, con \$470,574.49, valor que está por arriba del promedio anual. La anualidad con el ingreso más bajo es la octava anualidad, con \$378,555.86.

En la figura 21 se muestra la distribución del ingreso que representa cada rodal. Se observa que los rodales con mayor ingreso fueron: RIII, RIV, RVIII y RV. En estos rodales se tiene programado extraer el mayor volumen de madera. Los rodales con menor ingreso económico fueron RI, RII y RXI. Estos rodales son los de menor superficie, por lo tanto, se extraerá el menor volumen de madera.

Cuadro 12. Valoración económica del aprovechamiento forestal maderable.

Anualidad	Rodal		Volumen a extraer			Distribución de productos							
	No.	Sup. (ha)	Especie	Largas dimensiones			Cortas dimensiones		Leña/combustible		Desperdicio	Valor total (\$) ^d	
				Vol. (m ³ /rta) ^a	Vol. (m ³ /rta) ^b	Valor (\$) ^c	Vol. (m ³ /rta)	Valor (\$)	Vol. (m ³ /rta)	Valor (\$)	Vol. (m ³ /rta)		
1/10	I	3.78	<i>P. pseudostrobus</i>	121.10	66.60	\$ 80,106.50	30.27	\$ 17,384.37	16.95	\$ 4,012.47	7.27	\$ 101,503.34	
			<i>P. teocote</i>	6.50	2.28	\$ 2,736.61	2.93	\$ 1,679.85	0.91	\$ 215.40	0.39	\$ 4,631.86	
			<i>Quercus sp.</i>	2.33	0.00	\$ -	0.47	\$ 214.54	1.59	\$ 375.30	0.28	\$ 589.85	
	II	4.54	<i>P. pseudostrobus</i>	130.88	71.98	\$ 86,575.27	32.72	\$ 18,788.19	18.32	\$ 4,336.49	7.85	\$ 109,699.95	
			<i>P. teocote</i>	4.15	1.45	\$ 1,746.53	1.87	\$ 1,072.10	0.58	\$ 137.47	0.25	\$ 2,956.10	
			<i>Quercus sp.</i>	13.91	0.00	\$ -	2.78	\$ 1,279.90	9.46	\$ 2,238.94	1.67	\$ 3,518.84	
	VII	6.26	<i>P. pseudostrobus</i>	210.19	115.61	\$ 139,040.51	52.55	\$ 30,173.97	29.43	\$ 6,964.43	12.61	\$ 176,178.90	
			<i>Quercus sp.</i>	48.00	0.00	\$ -	9.60	\$ 4,416.28	32.64	\$ 7,725.39	5.76	\$ 12,141.67	
	Subtotal		14.59		537.07							\$ 411,220.51	
2/10	VII	8.81	<i>P. pseudostrobus</i>	295.85	162.72	\$ 195,706.24	73.96	\$ 42,471.32	41.42	\$ 9,802.77	17.75	\$ 247,980.33	
			<i>Quercus sp.</i>	67.57	0.00	\$ -	13.51	\$ 6,216.16	45.95	\$ 10,873.94	8.11	\$ 17,090.10	
	VIII	5.98	<i>P. pseudostrobus</i>	156.53	86.09	\$ 103,542.65	39.13	\$ 22,470.38	21.91	\$ 5,186.37	9.39	\$ 131,199.39	
			<i>Quercus sp.</i>	42.93	0.00	\$ -	8.59	\$ 3,949.56	29.19	\$ 6,908.97	5.15	\$ 10,858.53	
	IX	0.87	<i>P. pseudostrobus</i>	20.74	11.41	\$ 13,718.10	5.18	\$ 2,977.04	2.90	\$ 687.13	1.24	\$ 17,382.28	
			<i>Quercus sp.</i>	6.57	0.00	\$ -	1.31	\$ 604.53	4.47	\$ 1,057.51	0.79	\$ 1,662.04	
	Subtotal		15.66		590.19							\$ 426,172.66	
	3/10	IX	17.79	<i>P. pseudostrobus</i>	425.52	234.04	\$ 281,479.78	106.38	\$ 61,085.52	59.57	\$ 14,099.09	25.53	\$ 356,664.40
				<i>Quercus sp.</i>	134.84	0.00	\$ -	26.97	\$ 12,404.91	91.69	\$ 21,699.91	16.18	\$ 34,104.82
IV		1.98	<i>P. pseudostrobus</i>	47.58	26.17	\$ 31,472.66	11.89	\$ 6,830.06	6.66	\$ 1,576.44	2.85	\$ 39,879.16	
			<i>Quercus sp.</i>	26.97	0.00	\$ -	5.39	\$ 2,481.61	18.34	\$ 4,341.08	3.24	\$ 6,822.68	
Subtotal			19.77		634.91							\$ 437,471.06	
4/10		IV	19.71	<i>P. pseudostrobus</i>	473.08	260.19	\$ 312,937.22	118.27	\$ 67,912.28	66.23	\$ 15,674.77	28.38	\$ 396,524.27
				<i>Quercus sp.</i>	268.20	0.00	\$ -	53.64	\$ 24,674.58	182.3	\$ 43,163.25	8	\$ 67,837.83
Subtotal			19.71		741.28							\$ 464,362.11	

Anualidad	Rodal		Volumen a extraer			Distribución de productos						
	No.	Sup. (ha)	Especie	Largas dimensiones			Cortas dimensiones		Leña/combustible		Desperdicio	Valor total
				Vol. (m³/rta) ^a	Vol. (m³/rta) ^b	Valor (\$) ^c	Vol. (m³/rta)	Valor (\$)	Vol. (m³/rta)	Valor (\$)	Vol. (m³/rta)	Valor (\$) ^d
5/10	IV	2.68	<i>P. pseudostrobus</i>	64.42	35.43	\$ 42,612.91	16.10	\$ 9,247.67	9.02	\$ 2,134.45	3.87	\$ 53,995.03
			<i>Quercus sp.</i>	36.52	0.00	\$ -	7.30	\$ 3,359.93	24.83	\$ 5,877.53	4.38	\$ 9,237.46
	V	13.06	<i>P. pseudostrobus</i>	409.06	224.98	\$ 270,588.91	102.26	\$ 58,722.03	57.27	\$ 13,553.58	24.54	\$ 342,864.52
			<i>Quercus sp.</i>	121.35	0.00	\$ -	24.27	\$ 11,164.48	82.52	\$ 19,530.02	14.56	\$ 30,694.49
Subtotal		15.74		631.35							\$ 436,791.50	
6/10	V	3.39	<i>P. pseudostrobus</i>	106.16	58.39	\$ 70,224.42	26.54	\$ 15,239.80	14.86	\$ 3,517.48	6.37	\$ 88,981.70
			<i>Quercus sp.</i>	31.49	0.00	\$ -	6.30	\$ 2,897.45	21.42	\$ 5,068.51	3.78	\$ 7,965.95
	III	14.46	<i>P. pseudostrobus</i>	381.95	210.07	\$ 252,655.75	95.49	\$ 54,830.26	53.47	\$ 12,655.32	22.92	\$ 320,141.33
			<i>Quercus sp.</i>	211.46	0.00	\$ -	42.29	\$ 19,454.23	143.7 9	\$ 34,031.28	25.38	\$ 53,485.51
Subtotal		17.85		731.06							\$ 470,574.49	
7/10	III	11.40	<i>P. pseudostrobus</i>	301.00	165.55	\$ 199,112.94	75.25	\$ 43,210.63	42.14	\$ 9,973.41	18.06	\$ 252,296.98
			<i>Quercus sp.</i>	166.65	0.00	\$ -	33.33	\$ 15,331.43	113.3 2	\$ 26,819.27	20.00	\$ 42,150.71
	VI	11.47	<i>P. pseudostrobus</i>	155.15	85.33	\$ 102,627.80	38.79	\$ 22,271.84	21.72	\$ 5,140.54	9.31	\$ 130,040.18
			<i>Quercus sp.</i>	111.58	0.00	\$ -	22.32	\$ 10,265.64	75.88	\$ 17,957.68	13.39	\$ 28,223.31
Subtotal		22.87		734.38							\$ 452,711.18	
8/10	VI	2.57	<i>P. pseudostrobus</i>	34.83	19.16	\$ 23,041.23	8.71	\$ 5,000.31	4.88	\$ 1,154.12	2.09	\$ 29,195.65
			<i>Quercus sp.</i>	25.05	0.00	\$ -	5.01	\$ 2,304.69	17.03	\$ 4,031.60	3.01	\$ 6,336.29
	X	20.23	<i>P. pseudostrobus</i>	309.40	170.17	\$ 204,668.85	77.35	\$ 44,416.35	43.32	\$ 10,251.70	18.56	\$ 259,336.89
			<i>Quercus sp.</i>	145.30	0.00	\$ -	29.06	\$ 13,367.69	98.80	\$ 23,384.10	17.44	\$ 36,751.80
XI	2.51	<i>P. ayacahuite</i>	131.67	0.00	\$ -	52.67	\$ 30,242.79	63.20	\$ 14,957.81	15.80	\$ 45,200.60	
		<i>Quercus sp.</i>	6.86	0.00	\$ -	1.37	\$ 630.94	4.66	\$ 1,103.70	0.82	\$ 1,734.63	
Subtotal		25.32		653.11							\$ 378,555.86	
9/10	XI	0.67	<i>P. ayacahuite</i>	34.85	0.00	\$ -	13.94	\$ 8,003.48	16.73	\$ 3,958.45	4.18	\$ 11,961.93
			<i>Quercus sp.</i>	1.82	0.00	\$ -	0.36	\$ 166.98	1.23	\$ 292.10	0.22	\$ 459.08
	XII	12.15	<i>P. pseudostrobus</i>	338.67	186.27	\$ 224,025.54	84.67	\$ 48,617.05	47.41	\$ 11,221.26	20.32	\$ 283,863.86
			<i>P. teocote</i>	19.65	6.88	\$ 8,271.71	8.84	\$ 5,077.54	2.75	\$ 651.08	1.18	\$ 14,000.33

Anualidad	Rodal		Volumen a extraer		Largas dimensiones			Distribución de productos				Desperdicio	Valor total (\$) ^d
	No.	Sup. (ha)	Especie	Vol.	Vol.	Valor (\$) ^c	Cortas dimensiones		Leña/combustible		Vol.		
				(m ³ /rta) ^a			(m ³ /rta) ^b	Vol.	Valor (\$)	Vol.			
			<i>Quercus sp.</i>	39.07	0.00	\$ -	7.81	\$ 3,594.07	26.56	\$ 6,287.11	4.69	\$ 9,881.18	
			<i>P. pseudostrobus</i>	81.13	44.62	\$ 53,668.49	20.28	\$ 11,646.90	11.36	\$ 2,688.21	4.87	\$ 68,003.61	
			<i>P. teocote</i>	0.00	0.00	\$ -	0.00	\$ -	0.00	\$ -	0.00	\$ -	
			<i>Quercus sp.</i>	4.30	0.00	\$ -	0.86	\$ 395.97	2.93	\$ 692.67	0.52	\$ 1,088.63	
Subtotal		14.56		519.48								\$ 389,258.61	
			<i>P. pseudostrobus</i>	473.23	260.28	\$ 313,041.08	118.31	\$ 67,934.82	66.25	\$ 15,679.97	28.39	\$ 396,655.87	
10/10			<i>P. teocote</i>	0.00	0.00	\$ -	0.00	\$ -	0.00	\$ -	0.00	\$ -	
			<i>Quercus sp.</i>	25.10	0.00	\$ -	5.02	\$ 2,309.57	17.07	\$ 4,040.13	3.01	\$ 6,349.70	
Subtotal		10.18		498.34								\$ 403,005.56	
Total		176.2		6271.1								\$4,270,123.55	

a=volumen de extracción; b = a* el % de distribución de productos; c= b*precio del m³ ; d= suma del valor de cada uno de los productos comerciales.

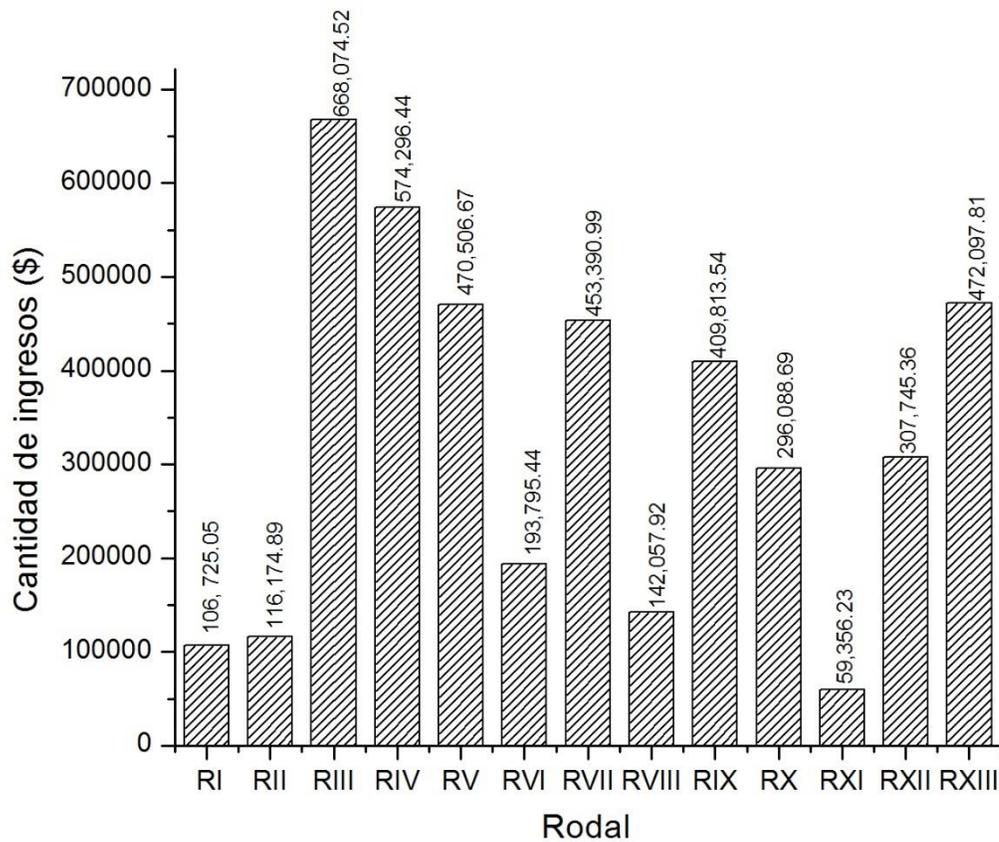


Figura 21. Distribución del ingreso económico por rodal con la extracción de madera.

La pérdida total de carbono del ecosistema por actividades de aprovechamiento se estimó en 1,820.80 Mg de carbono para todo el bosque (Cuadro 13). La anualidad con mayor pérdida es la séptima, con 228.69 Mg. Los rodales con mayor pérdida fueron: RIII, RIV y RV (Figura 22); los rodales con la menor pérdida fueron: RI, RII, RVIII y RXI. La cantidad de carbono perdido está asociada con la intensidad de remoción de madera. Por especie, la pérdida de carbono está distribuida de la siguiente forma: *P. pseudostrubus* con 1,117.34 Mg, equivalente al 61.4%, le sigue *Quercus sp* con 641.14 Mg, equivalente al 35.2%, *P. ayacahuite* con 52.27 Mg equivalente (2.9%), y *P. teocote*, con 10.04 Mg (0.6%).

Cuadro 13. Pérdida de C por el aprovechamiento forestal maderable.

Rodal	Sup. (ha)	Especie	C (Mg/ha ⁻¹)	C por rodal	Remoción por rodal (%)	Cantidad de C extraído (Mg)
I	3.78	<i>P. pseudostrobus</i>	40.46	152.96	23.13	35.38
		<i>P. teocote</i>	2.35	8.89	19.08	1.70
		<i>Quercus sp.</i>	0.92	3.49	35	1.22
Subtotal				165.33		38.30
II	4.54	<i>P. pseudostrobus</i>	33.19	150.81	23.11	34.85
		<i>P. teocote</i>	3.67	16.67	30.04	5.01
		<i>Quercus sp.</i>	5.53	25.13	35	8.79
Subtotal				192.61		48.65
III	25.86	<i>P. pseudostrobus</i>	46.17	1194.08	13.87	165.62
		<i>Quercus sp.</i>	16.85	435.92	35	152.57
Subtotal				1630.00		318.19
IV	24.38	<i>P. pseudostrobus</i>	43.68	1064.69	13.59	144.69
		<i>Quercus sp.</i>	15.73	383.57	35	134.25
Subtotal				1448.27		278.94
V	16.44	<i>P. pseudostrobus</i>	43.23	710.85	21.74	154.54
		<i>Quercus sp.</i>	11.78	193.77	35	67.82
Subtotal				904.63		222.36
VI	14.04	<i>P. pseudostrobus</i>	17.82	250.21	18.76	46.94
		<i>Quercus sp.</i>	12.49	175.35	35	61.37
Subtotal				425.56		108.31
VII	15.07	<i>P. pseudostrobus</i>	32.80	494.38	23.87	118.01
		<i>Quercus sp.</i>	7.79	117.42	35	41.10
Subtotal				611.80		159.11
VIII	5.98	<i>P. pseudostrobus</i>	28.14	168.37	21.59	36.35
		<i>Quercus sp.</i>	8.88	53.15	35	18.60
Subtotal				221.52		54.95
IX	18.66	<i>P. pseudostrobus</i>	31.16	581.40	17.34	100.81
		<i>Quercus sp.</i>	9.23	172.26	35	60.29
Subtotal				753.66		161.11
X	20.23	<i>P. pseudostrobus</i>	27.17	549.62	13.18	72.44
		<i>Quercus sp.</i>	9.00	182.01	35	63.70
Subtotal				731.63		136.14
XI	3.18	<i>P. ayacahuite</i>	102.48	325.88	16.04	52.27
		<i>Quercus sp.</i>	2.97	9.44	35	3.30
Subtotal				335.32		55.58
XII	12.15	<i>P. pseudostrobus</i>	40.30	489.69	15.61	76.44
		<i>P. teocote</i>	2.10	25.52	13.08	3.34
		<i>Quercus sp.</i>	3.78	45.98	35	16.09

Rodal	Sup. (ha)	Especie	C (Mg/ha ⁻¹)	C por rodal	Remoción por rodal (%)	Cantidad de C extraído (Mg)
Subtotal				561.19		95.87
XIII	11.93	<i>P. pseudostrabus</i>	66.65	795.09	16.51	131.27
		<i>Quercus sp.</i>	2.88	34.34	35	12.02
Subtotal				829.43		143.29
Total	176.26			8,810.94		1,820.80

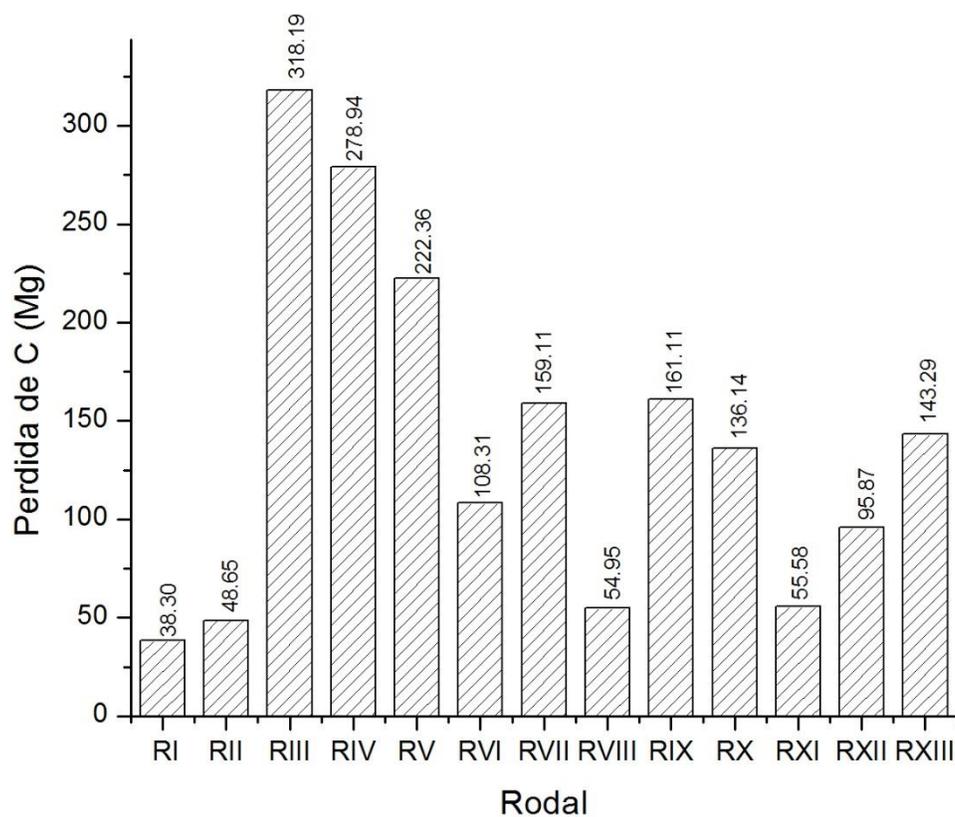


Figura 22. Distribución de la pérdida de C en cada rodal por la extracción de madera.

En el Cuadro 14 se muestra la cantidad de ingreso económico por la extracción de madera, descontando el valor monetario del costo de oportunidad del carbono que

representa la madera que se extraerá en ese año. La equivalencia monetaria de los 1,820.8 Mg de carbono perdido es de \$370,714.02. Por lo tanto, si al ingreso total por la extracción de madera se le resta la cantidad anterior tendríamos que el ingreso real del Ejido es, durante los 10 años del ciclo de corta, de \$3,899,409.52.

Cuadro 14. Ingreso neto por el aprovechamiento forestal maderable.

Anualidad	Ingresos por extracción de madera (\$)	Costo de oportunidad de C extraído	Ingreso neto total ^a
1/10	\$ 411,220.51	\$ 31,158.12	\$ 380,062.39
2/10	\$ 426,172.66	\$ 31,651.39	\$ 394,521.26
3/10	\$ 437,471.06	\$ 35,895.26	\$ 401,575.80
4/10	\$ 464,362.11	\$ 45,921.03	\$ 418,441.08
5/10	\$ 436,791.50	\$ 42,197.33	\$ 394,594.17
6/10	\$ 470,574.49	\$ 45,559.28	\$ 425,015.21
7/10	\$ 452,711.18	\$ 46,561.74	\$ 406,149.43
8/10	\$ 378,555.86	\$ 40,709.22	\$ 337,846.64
9/10	\$ 389,258.61	\$ 26,156.89	\$ 363,101.72
10/10	\$ 403,005.56	\$ 24,903.76	\$ 378,101.80
Total	\$ 4,270,123.55	\$ 370,714.02	\$ 3,899,409.52

a= ingreso por extracción de madera menos costo de oportunidad del C extraído.

Si se toma como referencia el promedio de ingreso anual por la extracción de madera de \$389,940.95, y considerando que actualmente 100 ejidatarios de 189 registrados en el padrón están activos, entonces, el ingreso anual que le correspondería a cada ejidatario sería de \$3,899.40. Sin embargo, esta cantidad se reduce ya que buena parte del ingreso se utiliza para los gastos operativos de las actividades de extracción. Información obtenida de un informante clave mencionó que actualmente cada ejidatario recibe \$1,000 al año.

5.4.2. Segunda alternativa: implementación de un programa PSACC en la superficie del BP y extracción de madera en la superficie del BBMF

En el Cuadro 15 se presenta la cantidad de dinero que se obtendría por la implementación de un programa de PSACC en la superficie del BP. La cantidad de ingresos económicos estuvo determinada por la superficie que se destinará al programa de PSACC. Por lo tanto, si el PSACC se aplica en las 209.37 ha de la superficie del BP, entonces el Ejido tendría ingresos por \$2,303,070.00 en 10 años. Si a este ingreso se le suman las ganancias económicas por la extracción de madera obtenido en el punto anterior de \$3,899,409.52. Tendríamos que el ingreso total del Ejido con estas dos formas de aprovechamiento será de \$6,202,479.52.

Cuadro 15. Ingreso económico por PSACC en el Bosque de Protección.

USCS	Sup. (ha)	Ingreso anual (\$)	Ingreso a 10 años
BP	209.37	\$ 230,307.00	\$ 2,303,070.00

Si se considera que el promedio anual por estas formas de aprovechamiento es de \$620,247.95 y se divide entre los 100 ejidatarios activos, cada ejidatario percibiría \$6,202.47 al año.

5.4.3. Tercera alternativa: implementación de un programa PSACC tanto en la superficie del BP como en la superficie del BBMF

En el Cuadro 16 se muestra la cantidad que el Ejido obtendría si se implementa un PSACC en toda la superficie forestal. El Ejido tendría un ingreso total de \$4,241,930.00. Tomando como referencia el ingreso anual de \$424,193.00 y un padrón de 100 ejidatarios activos, cada ejidatario percibiría con esta forma de aprovechamiento \$4,241.93 al año.

Cuadro 16. Ingreso económico por PSACC en el BP y en el BBMF.

USCS	Sup (ha)	Ingreso anual (\$)	Ingreso a 10 años
BBMF	176.26	\$193,886.00	\$1,938,860.00
BP	209.37	\$230,307.00	\$2,303,070.00
Total	385.63	\$424,193.00	\$4,241,930.00

5.5. Comparación de las tres alternativas de aprovechamiento de la superficie forestal del Ejido Zautla

En el Cuadro 17 se muestra la comparación del ingreso por las tres alternativas de aprovechamiento del ecosistema forestal del Ejido Zautla. La segunda alternativa (combinación un PSACC en el BP con aprovechamiento forestal del BBMF) arrojó la mayor cantidad de ingresos económicos, seguida por la de aplicación del PSACC en todo el bosque. La alternativa de solo aprovechamiento forestal fue la de más bajo ingreso. Los ejidatarios pueden optar por combinar el aprovechamiento madera y la implementación de un programa de PSACC para obtener mayores ingreso económicos. La desventaja es que deben invertir parte de estos ingresos en los gastos de operación para la extracción de la madera. La ventaja es que se pueden tener ingresos por más de 10 años, ya que una vez que culmina el ciclo de cortas se puede renovar por más periodos. Con el programa PSACC se obtienen buenos ingresos, pero la desventaja es que la CONAFOR solo apoya cinco años, lo cual reduciría los ingresos

notablemente. Una alternativa para el PSACC puede ser la de considerar programas de bonos de carbono.

Comparando los resultados de este estudio con los reportados por otros estudios, Bautista y Torres (2003) estimaron ingresos por \$35,334.1 ha/año por la venta de carbono almacenado en el Ejido Noh Bec, Quintana Roo, cantidad mayor a los \$1100 otorgados por la CONAFOR, que fue la base de la estimación del ingreso que obtendría el Ejido por un PSA por captura de carbono. Otros estudios han sido dirigidos a la valoración de servicios hidrológicos principalmente para conocer la disposición de ejidatarios a aceptar Pagos por Servicios Ambientales Hidrológicos (PSAH), como lo indicaron Ramón *et al.* (2010) para los poseionarios de los recursos forestales en el Salto Durango que están dispuestos a aceptar PSAH solo si estos son de al menos \$5.26 por hectárea por año. Por su parte Martínez,(2010) encontró que los poseionarios de la región Izta-Popo esta dispuestos a aceptar PSAH solo si el monto de apoyo de la CONAFOR es de \$1,200 ha/año. No se encontraron estudios similares que se hayan realizado en el país sobre valoración económica por extracción de madera, para poder comparar los resultados obtenidos en esta investigación.

Cuadro 17. Comparación de ingresos con las tres alternativas.

Alternativas	Ingreso anual	Ingreso a 10 años
Primera alternativa	\$389,940.95	\$3,899,409.52
Segunda alternativa	\$620,247.95	\$6,202,479.52
Tercera alternativa	\$424,193.00	\$4,241,930.00

6. CONCLUSIONES

El estudio indicó que el ecosistema forestal del Ejido Zautla es un reservorio importante de carbono en sus diferentes compartimentos, lo que hace factible destinarlo como área de provisión de servicios ecosistémicos, particularmente de captura y almacenamiento de carbono. El programa InVEST es una alternativa para estimar el carbono almacenado en el ecosistema forestal del Ejido Zautla, del estado de Puebla, y es conveniente evaluar su aplicación en ecosistemas forestales similares de la región. Es viable el diseño y ejecución de un manejo mixto, con un área de bosque de protección que provea el servicio ambiental de captura de carbono y otra área forestal bajo manejo y aprovechamiento forestal para la provisión de madera.

7. RECOMENDACIONES

- 1) Establecer un aprovechamiento mixto del ecosistema forestal combinando un PSACC en el área de protección y el aprovechamiento forestal maderable de las áreas aptas para la extracción de madera. Esto permitirá conjuntar objetivos de conservación y aprovechamiento, mejorando el ingreso de los ejidatarios.

- 2) Cuando se estime el almacenamiento de carbono de un ecosistema forestal con el programa InVEST, se recomienda utilizar un tamaño de pixel 1mx1m en la imagen raster para obtener una mejor precisión en la estimación.

- 3) La superficie de bosque de protección puede ser considerada para comercializar bonos de carbono en el mercado libre, bajo la modalidad de Certificados de reducción de Emisiones voluntarias, para aumentar los ingresos económicos en el Ejido.

8. LITERATURA CITADA

- Acosta, Miguel Mireles, Vargas, J. H., Velázquez, A. M., y Etchevers, J. D. B. (2002). Estimación de la biomasa aérea mediante el uso de relaciones alométricas en seis especies de arbóreas en Oaxaca, México. *Agrociencia*, 36(06), 725–736.
- Acosta, M. Mireles, Carrillo, F. A., y Díaz, M. L. (2009). Determinación del carbono total en bosque mixtos de *Pinus patula* Schl. et Cham. *Terra Latinoamericana*, 27(2), 105–114.
- Aguilar, L. H., Martínez, R. G., Gómez, A. M., y Martínez, O. G. (2016). Estimación de biomasa mediante la generación de una ecuación alométrica para madroño (*Arbutus xalapensis*) (pp. 529–530). Chapingo, Estado de México: IV Congreso Internacional y XVIII Congreso Nacional de Ciencias Agronómicas.
- Aguirre, O. A. C., y Jiménez, J. P. (2011). Evaluación Del Contenido De Carbono En Bosques Del Sur De Nuevo León. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 2(6), 73–84. <https://doi.org/10.29298/rmcf.v2i6.575>
- Álvarez, G. A., García, C. N. E., Krasilnikov, P., y García, O. F. (2013). Almacenes de carbono en bosques montañosos de niebla de la sierra norte de Oaxaca, México. *Agrociencia*, 171–180.
- Ayala, R. S. L. (1998). Ecuaciones para estimar biomasa de pinos y encinos en la meseta central de Chiapas. Universidad Autónoma de Chapingo.
- Barton, D. B., y Merino, L. (2004). La experiencia de las comunidades forestales en México, 271. Recuperado de <http://www.inecc.gob.mx/descargas/publicaciones/431.pdf>
- Bautista, J. H., y Torres, J. A. P. (2003). Valoración económica del almacenamiento de carbono del bosque tropical del Ejido Noh Bec, Quintana Roo, México. *Revista Chapingo. Serie Ciencias Forestales y Del Ambiente*, 9, 69–75.
- Berkes, F. (2009). Evolution of co-management : Role of knowledge generation , bridging organizations and social learning. *Journal of Environmental Management*, 90(5), 1692–1702. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2008.12.001>
- Bray, D. B., y Klepeis, P. (2005). Deforestation, forest transitions, and institutions for

- sustainability in southeastern Mexico, 1900-2000. *Environment and History*, 11(2), 195–223. <https://doi.org/10.3197/096734005774434584>
- Bustamante, D. B., y Gallegos, E. S. (2019). El mercado de bonos de carbono en México: generalidades y perspectivas de desarrollo. Universidad Autónoma de San Luis Potosí.
- Byron, N., y Arnold, M. (1997). What Futures for the People of the Tropical Forests ? *Center for International Forestry Research*, 62(19).
- Casiano, M. D., Paz, F. P., Rojo, M. M., Covalada, S. O., y Raj, D. A. (2018). El carbono de la biomasa aérea medido en cronosecuencias: primera estimación en México. *Madera Bosques*, 24, 1–22.
<https://doi.org/10.21829/myb.2018.2401894>
- Chu, X., Zhan, J., Li, Z., Zhang, F., y Qi, W. (2019). Assessment on forest carbon sequestration in the Three -North Shelterbelt Program region, China. *Journal of Cleaner Production*, 215, 382–389.
- CONAFOR. (2018). Tipo de precios. Zapopan, Jalisco.
- CONAFOR. (2019). Reglas de Operación del Programa Apoyos para el Desarrollo Forestal Sustentable 2019. Recuperado de https://www.conafor.gob.mx/apoyos/index.php/inicio/app_apoyos#/detalle/2019/79
- Contreras, J. M. (2014). Almacenes de carbono edáfico en sistemas productivos en la comunidad de Cevatí, San José del Rincón, Estado de México. Universidad Autónoma del Estado de México.
- Correa, G. V., López, J. B., y Rodríguez, M. L. (2012). Niveles de carbono orgánico total en el Suelo de Conservación del Distrito Federal , centro de México. *Investigaciones Geográficas, Boletín Del Instituto de Geografía, UNAM*, (77), 18–30.
- Costanza, Robert. (1991). Ecological economics: the science and management of sustainability. Columbia University Press.
- Costanza, Robert., y Daly, H. E. (1992). Natural capital and sustainable development. *Conservation Biology*, 6(1), 37–46.
- Cruz, A. G., y Vallejo, M. L. (2001). Síntesis de la Situación del Manejo Forestal en

- 17 Países de América Latina. Chile. Recuperado de http://www.fao.org/tempref/GI/Reserved/FTP_FaoRlc/old/proyecto/rla133ec/Infor mes Regionales-pdf/Manejo Forestal.PDF
- De la Maza, R. H. (2011). Pago por Servicios Ambientales. *Agua: El Oro Azul. Foro La Agenda Del Agua*, 73–88.
- Díaz, R. F., Acosta, M. M., Carrillo, F. M., y Flores, E. A. (2007). Determinación de ecuaciones alométricas para estimar biomasa y carbono en, *13*(1), 25–34.
- Duque, G. E. C., Gomes, L. M. S., Fernandez, V., y Moura, M. P. D. A. (2015). The economic evaluation of carbon storage and sequestration as ecosystem services of mangroves : a case study from southeastern Brazil. *International Journal of Biodiversity Science, Ecosystem Services & Management*, *11*(1), 29–35. <https://doi.org/10.1080/21513732.2014.963676>
- Engel, S., Pagiola, S., y Wunder, S. (2008). Designing payments for environmental services in theory and practice: An overview of the issues. *Ecological Economics*, *65*(4), 663–674. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2008.03.011>
- FAO. (2007). Parte 2. Cuestiones seleccionadas de interés en el sector forestal. *Situación de Los Bosques Del Mundo 2007*, 72–99. Recuperado de <ftp://ftp.fao.org/docrep/fao/009/a0773s/a0773s09.pdf>
- FAO. (2013). GlobAllomeTree-Assessing volume, biomass and carbon stocks of trees and forests. Retrieved January 6, 2020, Recuperado de <http://www.globalometree.org/>
- Galicia, L., Saynes, V., y Campo, J. (2015). Biomasa aérea, biomasa subterránea y necromasa en una cronosecuencia de bosques templados con aprovechamiento forestal, *93*(3), 473–484. <https://doi.org/10.17129/botsci.66>
- Gómez-Baggethun, E., de Groot, R., Lomas, P. L., y Montes, C. (2010). The history of ecosystem services in economic theory and practice: From early notions to markets and payment schemes. *Ecological Economics*, *69*(6), 1209–1218. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2009.11.007>
- González, M. (2019). Carbono orgánico del suelo bajo diferentes condiciones forestales, bienes comunales San Juan Cuahutémoc. Benemerita Universidad Autónoma de Puebla.

- González, P. C. (1993). *Capital extranjero en la selva de Chiapas 1863-1982* (México : U).
- Groombridge, B. (1992). *Global biodiversity status of the earth's living resources*. Cambridge y Chapman & Hall, Londres: WCMC.
- Grumbine, R. E. (1997). Reflections on “ What is Ecosystem Management ?” *Conservation Biology*, 11(1), 41–47.
- Hernández, M. O. E. (2015). Estimación de los almacenes de carbono en bosque templado, caso de estudio predio particular “CEBATI”, municipio de San José del Rincón, Estado de México. Universidad Autónoma del Estado de México.
- Hinojosa, M. (1958). *Los Bosques de México Relato de un Despilfarro y una Injusticia* (Editorial). México.
- INAFED. (2020). Enciclopedia de los municipios y delegaciones de México. Recuperado de <http://www.inafed.gob.mx/work/enciclopedia/EMM21puebla/municipios/21212a.html>
- INEGI. (2005). *Conjunto de datos vectoriales edafológicos*. México.
- IPCC. (2003). *Good Practice Guidance for Land Use, Land-Use Change and Forestry*. Recuperado de https://www.ipccnggip.iges.or.jp/public/gpplulucf/gpplulucf_languages.html
- IPCC. (2006). *Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories Volume 4 Agriculture, Forestry and Other Land Use*. Hayama, Japan. Recuperado de <https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/vol4.html>
- Jardel, E. P. (2018). El manejo forestal en México: conceptos básicos, antecedentes, estado actual y perspectivas. Recuperado de [era mx.org/Estudios_y_proyectos/Estudios/Edo.../Libro.../2_Jardel_Manejo_3.doc%0A](http://www.inecologia.mx.org/Estudios_y_proyectos/Estudios/Edo.../Libro.../2_Jardel_Manejo_3.doc%0A)
- Lartigue, F. (1983). *Indios y bosques políticas forestales y comunales de la sierra Tarahumara* (Ediciones).
- Leigh, P. (2000). Producing more with less? Community forestry in Durango, Mexico in an era of trade liberalization. *Rural Sociology*, 65(2), 253–274.
- LGDFS. (2018). *Ley General de Desarrollo Forestal Sustentable*. México.

- Lomas, P. L., Martín, B., Louit, C., Montoya, D., y Montés, C. (2005). Guía práctica para la valoración económica de los bienes y servicios ambientales de los ecosistemas. Madrid, España.
- López Toache, V., Romero Amado, J., Toache Bertollini, G., y García Sánchez, S. (2016). Bonos de carbono: financiarización del medioambiente en México. *Estudios Sociales: Revista de Investigación Científica*, 25(47), 189–214.
- Martínez, D. A. C. (2010). El programa de pago del servicio ambiental hidrológico (PSAH) como una estrategia de conservación de recursos naturales y sensibilización ambiental en la región en la región de Izta-Popo. Colegio de Posgraduados Campus Puebla. <https://doi.org/10.3856/vol40-issue1-fulltext-7>
- Masera, O. R., Ordoñez, M. J., y Dirzo, R. (1997). Carbon Emissions from Mexican Forest: Current Situation and Long-Term Scenarios. *Climatic Change*, 35, 265–295. <https://doi.org/10.1023/A:1005309908420>
- Méndez, J. G., Luckie, S. L. N., Capó, M. A. A., y Nájera, J. A. L. (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(4), 479–491.
- Millennium Ecosystem Assessment. (2005). Ecosystems and Human Well-being. Washington D.C.
- Mitchell, B. (2002). Resource and Environmental Management (segunda). New York, US: Routledge.
- Mohammadi, Z., Limaiei, S. M., Lohmander, P., y Olsson, L. (2017). Estimating the aboveground carbon sequestration and its economic value (case study: Iranian caspian forests). *Journal of Forest Science*, 63(11), 511–518. <https://doi.org/10.17221/88/2017-JFS>
- Murillo, R. T., Prado, B., Durán, J. C. Á., y Jiménez, B. C. (2012). Retención de 4-Nonilfenol y Di(2-etilhexil) Ftalato en suelos del Valle de Tula , Hidalgo, México. *Tecnología y Ciencias Del Agua*, III, 113–126.
- Naciones Unidas. (1998). Marco de Las Naciones Unidas sobre el cambio climático (p. 27).
- Návar, J. (2009). Allometric equations for tree species and carbon stocks for forests

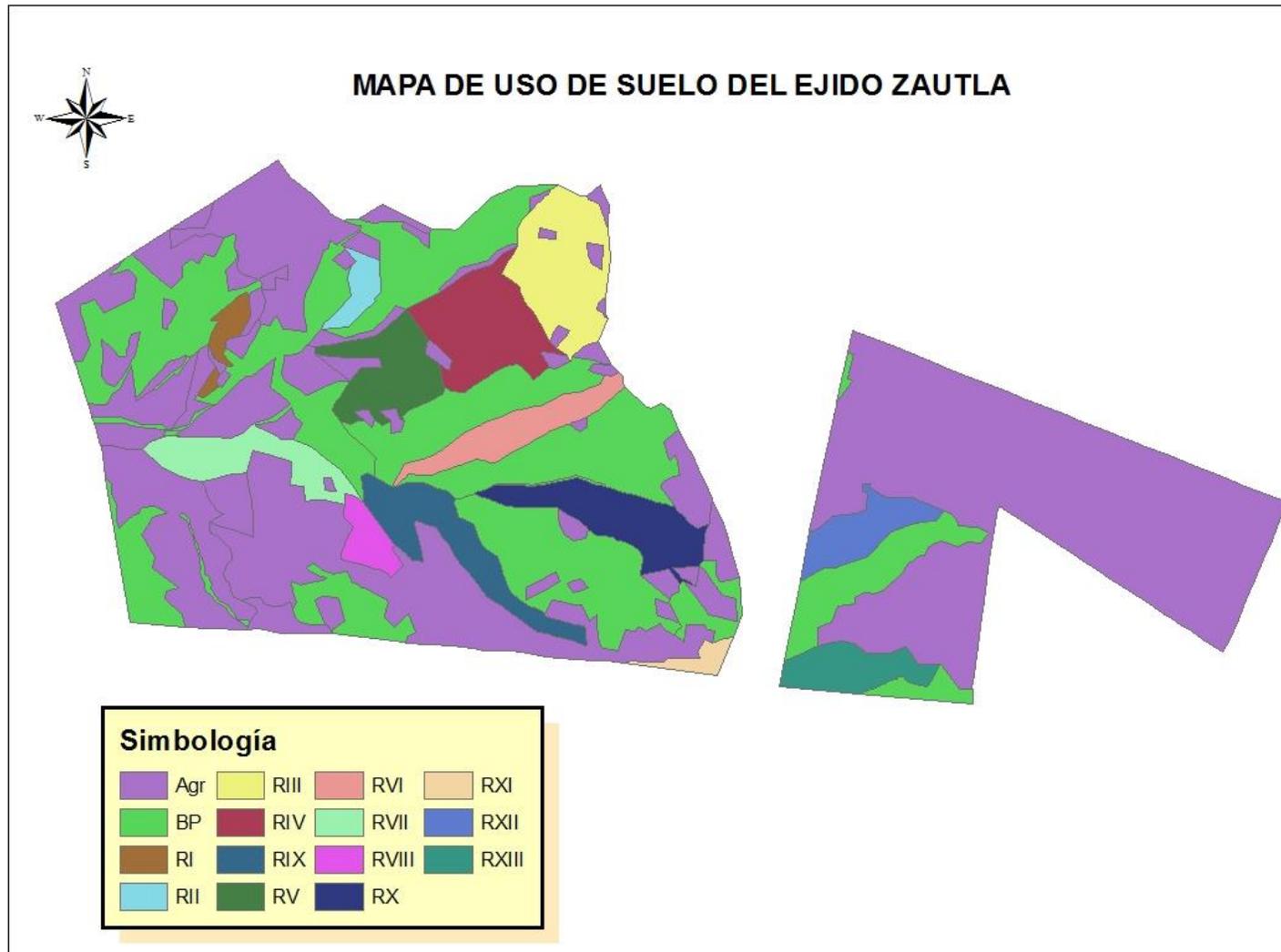
- of northwestern Mexico. *Forest Ecology and Management*, 257(2), 427–434.
<https://doi.org/10.1016/j.foreco.2008.09.028>
- Návar, J. C. (2010). Biomass Allometry for Tree Species of Northwestern Mexico. *Tropical and Subtropical Agroecosystems*, 12(3), 507–519.
- Nelson, E., Ennaanay, D., Wolny, S., Olwero, N., Vigerstol, K., Pennington, D., Bierbower, W. (2014). InVEST User Guide. National Capital Project. Recuperado de http://data.naturalcapitalandresilienceplatform.org/invest-releases/documentation/current_release/index.html
- OECD. (2018). Effective carbon rates 2018.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1787/9789264305304-en>
- Ordóñez, J. A., De Jong, B. H. J., y Masera, O. (2001). Almacenamiento de carbono en un bosque de *Pinus pseudostrobus* en Nuevo San Juan, Michoacán. *Madera y Bosques*, 7(2), 27–47. <https://doi.org/10.21829/myb.2001.721310>
- Ordóñez, J. A. B., & Vázquez, R. R. (2015). Contenido y captura potencial de carbono en la biomasa forestal de San Pedro Jacuaro, Michoacán. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 6(32), 7–16.
- Ostrom, E. (2011). Background on the institutional analysis and development framework. *Policy Studies*, 39(1), 7–27.
- Picharillo, C., y Lima, R. V. E. (2019). Payment for environmental services: guidelines for identifying priority areas focusing on biodiversity. *Ambiente & Sociedade*, 22.
- Pimentel, D. (1997). The value of forests to world food security. *Human Ecology*, 25(1), 91–120. <https://doi.org/10.1023/A:1021987920278>
- PMFM. (2012). Programa de manejo forestal nivel intermedio para el aprovechamiento de recursos forestales maderables. Tezihutlan, Puebla.
- Ramón, S. flores, Pérez, G. V., y Návar, J. D. J. C. (2010). Valoración económica de los servicios ambientales hidrológicos en El Salto , Pueblo Nuevo , Durango
Economic valuation of the hydrological environmental services in El Salto , Pueblo Nuevo , Durango. *Madera y Bosques*, 16(119), 31–49.
- Rodríguez, L. A. L., Guevara, F. H., Reyes, L. M., Ovando, J. C., Nahed, J. T., Prado, M. L., y Campos, R. A. S. (2017). Estimación de biomasa y carbono almacenado en bosques comunitarios de la región Frailesca de Chiapas, México. *Revista*

- Mexicana de Ciencias Forestales*, 7(37), 77–94.
<https://doi.org/10.29298/rmcf.v7i37.53>
- Rodríguez, R. L., Jiménez, P. J., Aguirre, O. A. C., Treviño, E. J. G., y Razo, R. Z. (2009). Estimation of carbon storage in forest pine-oak at biosphere reserve El Cielo, Tamaulipas, Mexico. *Ra Ximhai Revista de Sociedad, Cultura y Desarrollo Sustentable*, 5(3), 317–327.
- Rojo, J. M. T. (2015). Desarrollo forestal comunitario: La política Pública.
- Romero, F. (1992). La política y administración forestal de México. Montecillos, Estado de México, México.
- Sedjo, R. ., Wisniewski, J., Sample, A. ., & Kinsman, J. . (1995). The economics of managing carbon via forestry: assessment of existing studies. *Environmental & Resource Economics*, 6(2), 139–165.
- SEMARNAT. (2016a). Anuario Estadístico de la Producción Forestal 2016.
- SEMARNAT. (2016b). Cuarto Informe de Labores 2015-2016. México.
- Siwar, C., Chinade, A. A., Ismail, S. M., y Isahak, A. (2016). Economic valuation of soil carbon sequestration services in Malaysia's forest sector: A review of possible approaches. *Journal of Sustainability Science and Management*, 11(1), 14–28.
- Valdés, A. O. R., y Negreros, P. C. (2002). El manejo forestal comunitario en México. *México Forestal*, (Semarnat 2002), 34. Recuperado de http://inforural.com.mx/IMG/pdf/100308_Manejo_Comunitario.pdf
- Vargas-Larreta, B., López-Sánchez, C. A., Corral-Rivas, J. J., López-Martínez, J. O., Aguirre-Calderón, C. G., y Álvarez-González, J. G. (2017). Allometric equations for estimating biomass and carbon stocks in the temperate forests of North-Western Mexico. *Forests*, 8(8), 1–20. <https://doi.org/10.3390/f8080269>
- Vatn, A. (2010). An institutional analysis of payments for environmental services. *Ecological Economics*, 69(6), 1245–1252.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2009.11.018>
- Vazquez, V. G. (2003). La gestión ambiental con perspectiva de género. El manejo integrado de ecosistemas y la participación comunitaria. *Gestión y Política Pública*, 12, 291–322.

- Westman, W. (1977). How Much Are Nature's Services Worth? *Science*, 197(4307), 960–964. Recuperado de <http://www.jstor.org/stable/1744285>
- Whelna, T. (Rainforest A., y Minnick, G. (TREES). (2009). Productos Maderables Certificados. México.
- Wunder, S. (2005). Payments for environmental services: some nuts and bolts. *Payments for Environmental Services: Some Nuts and Bolts*.
<https://doi.org/10.17528/cifor/001765>
- Wunder, S. (2008). Payments for environmental services and the poor: concepts and preliminary evidence. *Environment and Development Economics*, 13(3), 234–243. <https://doi.org/doi:10.1017/S1355770X08004282>
- Wunder, S. (2015). Revisiting the concept of payments for environmental services. *Ecological Economics*, 117, 234–243. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2014.08.016>

9. ANEXOS

9.1. Mapa de USCS del Ejido Zautla



9.2. Distribución de sitios de muestreo

