

CENTRO AGRONÓMICO TROPICAL DE INVESTIGACIÓN Y ENSEÑANZA

DIVISIÓN DE EDUCACIÓN

PROGRAMA DE POSGRADO

Existencias de carbono azul y la dinámica histórica de la cobertura del bosque manglar en el área conservación Sipacate Naranjo, Guatemala, Centroamérica

Tesis sometida a consideración de la División de Educación y el Programa de Posgrado
como requisito para optar al grado de

Magister Scientiae en

Mitigación y Adaptación al Cambio Climático

Por

Carlos Humberto Rodríguez Hernández

Turrialba, Costa Rica

2017

Esta tesis ha sido aceptada en su presente forma por la División de Educación y el Programa de Posgrado del CATIE y aprobada por el Comité Consejero del estudiante, como requisito parcial para optar por el grado de

**MAGISTER SCIENTIAE EN MITIGACIÓN Y ADAPTACIÓN
AL CAMBIO CLIMÁTICO**

FIRMANTES:



Miguel Cifuentes, Ph.D.
Director de tesis



Mario Chacón, M.Sc.
Miembro Comité Consejero



CHRISTIAN BRENES P
Christian Brenes, M.Sc.
Miembro Comité Consejero



Isabel A. Gutiérrez-Montes, Ph.D.
Decana Programa de Posgrado



Carlos Humberto Rodríguez Hernández
Candidato

DEDICATORIA

*A Dios;
fuente de sabiduría y modelo de los valores humanitarios
más sublimes y auténticos, que guían mi vida.*

*Especialmente a la memoria de mi madre,
María Eugenia Hernández Quino (+);
quien bajo su entrega y esfuerzo supo guiarme
para ser una persona de bien y poder cumplir mis metas.*

*A mi esposa, Tania Gisel España de León;
por ser el motor de mi vida, mi cómplice, mi amiga
y apoyarme en los momentos más importantes de nuestras vidas.*

*A mi padre, Carlos Humberto Rodríguez Arango;
por apoyarme incondicionalmente en cada meta
que me he propuesto, por su dedicación y entrega.*

*A las hermanas, de León Samayoa (Seño Blanky, Seño Rosita y Seño Tita (+));
por estar presentes en cada momento a partir del 2009,
por su apoyo incondicional, amor y cariño.*

AGRADECIMIENTOS

A Dios, quien me brindó fortaleza, perseverancia y sabiduría para sacar adelante y terminar con éxito una más de las metas que me he propuesto.

Al fondo académico del Programa Cambio Climático y Cuencas -PCCC-, por haber confiado en mí y otorgarme la beca y el financiamiento para realizar mis estudios de posgrado en CATIE.

A mi Comité Asesor, especialmente a mi Director de Tesis; Ph.D. Miguel Cifuentes, por su siempre buena disposición para ayudarme y orientarme, por su paciencia, motivación y por su ejemplo y calidad de ser humano. A los profesores Christian Brenes y Mario Chacón, por compartirme su tiempo, conocimiento y experiencia en el proceso del trabajo de tesis.

A los profesores de la maestría en Mitigación y Adaptación al Cambio Climático, por brindarnos sus conocimientos y entrega. Al personal administrativo de la Escuela de Posgrado y al personal de la biblioteca Orton, por todo el apoyo brindado durante este tiempo de formación académica.

Al Instituto Privado de Investigación Sobre Cambio Climático -ICC-, principalmente al Ph.D. Alex Guerra, por la oportunidad brindada para realizar mi investigación en la institución. Al MSc. Oscar González, por su apoyo y colaboración desde el primer día en el Programa de Sostenibilidad de Sistemas Productivos. A los Ingenieros, Melany Ramírez y Gonzalo López, por su apoyo y colaboración en proporcionarme información con respecto al área de estudio. Al MA. Pablo Yax, por su apoyo y consejos brindados desde que nos conocemos en el ICC y a todo el equipo del ICC que conozco, gracias por su amistad.

Al MSc. Héctor Espinoza, quien en el 2015 realizó su trabajo de tesis en el ICC y despertó en mí el interés y el deseo de estudiar en CATIE.

A mis compañeros de promoción 2016-2017, especialmente a los chapines; Melvin, Pablo, Chepe y Jesua, a quienes recordaré siempre con mucho aprecio. Gracias por su amistad y compañía durante todo este tiempo.

Contenido

Dedicatoria.....	iii
Agradecimientos.....	iv
Índice de cuadros.....	vii
Índice de figuras.....	viii
Lista de abreviaturas.....	ix
Resumen.....	xi
Abstract.....	xii
1. INTRODUCCIÓN.....	1
2. OBJETIVOS.....	4
2.1.1 Objetivo General.....	4
2.1.2 Objetivos Específicos	4
3. PREGUNTAS DE INVESTIGACIÓN	4
4. MARCO CONCEPTUAL	5
4.1 El cambio climático y el impacto en los ecosistemas.	5
4.2 Servicios ecosistémicos	6
4.3 Almacenamiento de carbono en manglares	8
4.4 Almacenamiento de carbono en manglares y otros ecosistemas del trópico	10
4.5 Aplicación de sensores remotos en manglares	11
4.6 Referencias	13
5. ARTÍCULOS DE INVESTIGACIÓN	17
5.1 Artículo 1. Cuantificación de las existencias de carbono azul en el área de conservación Sipacate Naranjo, Guatemala, Centroamérica.	17
5.1.1 Introducción.....	18
5.1.2 Metodología	19
5.1.2.1 Área de estudio.....	19
5.1.2.2 Diseño del inventario.	20
5.1.2.3 Cuantificación de las reservas de carbono.	21
5.1.2.4 Cuantificación del componente aéreo.	22
5.1.2.5 Cuantificación del componente subterráneo	23
5.1.3 Resultados	25
5.1.3.1 Componente aéreo.....	25
5.1.3.2 Componente Subterráneo	26
5.1.3.3 Existencias de carbono a nivel de ecosistema.	27
5.1.3.4 Estructura horizontal y composición florística de manglar	27
5.1.4 Discusión y conclusiones.....	28
5.1.5 Referencias	32

5.2 Artículo 2. Análisis de la dinámica histórica de la cobertura del bosque manglar, uso de la tierra y sus emisiones y remociones de carbono asociadas en el área de conservación Sipacate Naranjo, Guatemala, Centroamérica.	34
5.2.1 Introducción.....	35
5.2.2 Metodología.....	36
5.2.2.1 Área de estudio.....	36
5.2.2.2 Análisis histórico de la cobertura del suelo	37
5.2.2.3 Inventario de emisiones/remociones de GEI asociados a los cambios de cobertura del suelo en el área de conservación Sipacate-Naranjo, Guatemala, Centroamérica.	38
5.2.2.4 Escenario de cambio de la cobertura del manglar al 2030 y las emisiones asociadas.	39
5.2.3 Resultados.....	39
5.2.3.1 Dinámica de la cobertura del suelo con un área de paisaje de 11,466.46 ha en el área de conservación Sipacate-Narango, Guatemala, Centroamérica.	40
5.2.3.2 Flujos históricos de emisiones:	43
5.2.3.3 Escenarios de cambio de la cobertura del manglar al 2030.	45
5.2.4 Discusión y conclusiones.....	47
5.2.5 Referencias	50
6. ANEXOS	53

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 1: Ecuaciones alométricas utilizadas para estimar biomasa aérea en los manglares de Guatemala.	23
Cuadro 2: Comparación de medias de la concentración de carbono por intervalo de profundidad en el área de conservación Sipacate-Naranjo, Guatemala, Centroamérica.	26
Cuadro 3: Densidad de carbono por intervalo de profundidad en el área de conservación Sipacate-Naranjo, Guatemala, Centroamérica.	26
Cuadro 4: Densidades de carbono subterráneo en manglar y otros usos del suelo hasta un metro de profundidad en el área de conservación Sipacate-Naranjo, Guatemala, Centroamérica.	27
Cuadro 5: Existencias de carbono a nivel de ecosistema en el área de conservación Sipacate-Naranjo, Guatemala, Centroamérica.	27
Cuadro 6: Densidad de carbono epigeo promedio reportado en diferentes sitios de Latinoamérica.	30
Cuadro 7: Coberturas del suelo encontradas en el 2016 con un área del paisaje de 11,466.46 hectáreas en el área de conservación Sipacate-Naranjo, Guatemala.	40
Cuadro 8: Cobertura del suelo y cambio neto del área entre periodos en el área de conservación Sipacate-Naranjo, Guatemala, Centroamérica.	40
Cuadro 9: Existencias de carbono hasta 1 m de profundidad para las coberturas analizadas en el área de conservación Sipacate-Naranjo, Guatemala, Centroamérica.	43
Cuadro 10: Carbono almacenado en las coberturas de suelo identificadas en un área del paisaje de 11,466.46 ha en el área de conservación Sipacate-Naranjo Guatemala, Centroamérica.	44
Cuadro 11: Balance de emisiones/remociones ($\text{Mg CO}_2\text{e}$) en la dinámica de cambio de uso del suelo a partir del manglar en los periodos de 1990-2006 y 2006-2016 en el área de conservación Sipacate-Naranjo Guatemala, Centroamérica.	44
Cuadro 12: Distribución relativa y absoluta del uso del suelo en el área de conservación Sipacate-Naranjo en el 2030 para cada escenario.	45
Cuadro 13: Cambio relativo y absoluto por cada escenario al 2030 en función de la cobertura del 2016.	46
Cuadro 14: Densidades de carbono epigeas por sitio de muestreo en el área de conservación, Sipacate Naranjo, Guatemala, Centroamérica.	53
Cuadro 15: Concentraciones de carbono (%) por sitio de muestreo en el área de conservación Sipacate – Naranjo, Guatemala, Centroamérica.	54
Cuadro 16: Características dasométricas de los puntos de muestreo en el área de conservación Sipacate-Naranjo, Guatemala, Centroamérica.	55
Cuadro 17: Dinámica de las ganancias y pérdidas del manglar en los dos periodos evaluados en el área de conservación Sipacate-Naranjo, Guatemala, Centroamérica.	56

Cuadro 18: Matriz de probabilidad de persistencia de uso para cada categoría. Año2030 ..	57
Cuadro 19: Matriz base de cambio de uso del suelo en el área de conservación Sipacate- naranjo para el periodo 2016-2030 proyectada por Markov.	57
Cuadro 20: Matriz base para el escenario 1 con las tendencias de ganancias en el periodo 1990-2006.....	58
Cuadro 21: Matriz base para el escenario 2 con las tendencias de ganancias en el periodo 2006-2016.....	58
Cuadro 22: Matriz base para el escenario 3 con las tendencias de pérdidas en el periodo 1990-2006.....	59
Cuadro 23: Matriz base para el escenario 4 con las tendencias de pérdidas en el periodo 2006-2016	59

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Servicios ecosistémicos y el bienestar social	6
Figura 2: Flujo de carbono en el ecosistema manglar	10
Figura 3: Promedio global de reservas de carbono por tipo de ecosistema en el trópico.	11
Figura 4: Ubicación del área de conservación Sipacate-Naranjo, Guatemala, Centroamérica.	19
Figura 5: Ubicación de transectos para el muestreo de las existencias de carbono a nivel de ecosistema en el área de conservación Sipacate-Naranjo, Guatemala, Centroamérica.....	21
Figura 6: Representación esquemática de la distribución de parcelas en manglares (transectos).	22
Figura 7: Densidad de carbono epigeo en el área de conservación Sipacate-Naranjo, Guatemala, Centroamérica.	25
Figura 8: Distribución por clase dimétrica del número de árboles por hectárea en el área de conservación Sipacate-Naranjo, Guatemala, Centroamérica.	28
Figura 9: Ubicación del área de conservación Sipacate-Naranjo, Guatemala, Centroamérica.	36
Figura 10: Relación porcentual entre la pérdida, persistencia y ganancia de mangle para los periodos 1990-2006 y 2006-2016 en el área de conservación Sipacate-Naranjo, Guatemala, Centroamérica.	41
Figura 11: Ubicación espacial de los cambios y persistencias del manglar en los dos periodos evaluados en el área de conservación Sipacate-Naranjo.	42
Figura 12: Relación de pérdida y ganancia de la cobertura del mangle en el área de conservación Sipacate-Naranjo, Guatemala Centroamérica.	43
Figura 13: Ubicación espacial de las pérdidas y ganancias del manglar proyectados al 2030 en el área de conservación Sipacate-Naranjo bajo los escenarios 1 y 2.	46
Figura 14: Ubicación espacial de las pérdidas y ganancias del manglar proyectados al 2030 en el área de conservación Sipacate-Naranjo bajo los escenarios 3 y 4.	47

LISTA DE ABREVIATURAS

°C	Grados Celsius
Bs-S	Bosque Seco Subtropical
CME	Ecosistemas Costeros y Marinos
CO ₂	Dióxido de Carbono
COCODE	Consejo de Desarrollo Comunitario
CONAP	Consejo Nacional de Áreas Protegidas
ICC	Instituto Privado de Investigación Sobre Cambio Climático
INAB	Instituto Nacional de Bosques
IPCC	Panel Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático
MCC	Marco de capitales de la comunidad
MDL	Mecanismos de Desarrollo Limpio
Mg C y ⁻¹	Megagramos de carbono por año
NAMAs	Acciones apropiadas nacionales de mitigación
OE	Objetivo Específico
PPMF	Parcelas Permanentes de Medición Forestal
REDD+	Reducción de las emisiones debidas a la deforestación y degradación
SE	Servicios Ecosistémicos
MgC·ha ⁻¹	Megagramos, o toneladas, de carbono por hectárea
UTCUTS	Uso de la tierra, cambio de uso de la tierra y silvicultura.

RESUMEN

Los ecosistemas de manglar ocupan una pequeña porción de las zonas costeras del planeta. Mantienen procesos fundamentales en el funcionamiento del régimen de soporte de la tierra y para el bienestar humano. Su conversión y manejo no planificado están provocando enormes pérdidas de los bienes y servicios que proporcionan. Uno de estos servicios y el menos estudiado es el almacenamiento de carbono, ya que los manglares son ecosistemas conocidos por sus funciones como almacenadores, transformadores y exportadores de materia orgánica, con lo que contribuyen significativamente a los ciclos biogeoquímicos de diversos elementos (Dittmar *et al.* 2006). Esto promueve el interés de implementar medidas de mitigación y adaptación a los efectos del cambio climático a través de estos ecosistemas.

Esta investigación es pionera, ya que no se han realizado estudios en Guatemala, contribuye a explorar el potencial de almacenamiento de carbono en dicho país y analizar la dinámica de cambio de cobertura del suelo y las emisiones de GEI asociadas a los cambios observados. El estudio se llevó a cabo en el área de conservación Sipacate-Naranjo, ubicada en la costa del Pacífico de Guatemala. La zona representa el 9.52% del área total de manglares en el Pacífico (MARN 2013).

El trabajo incluye la medición de carbono en el componente aéreo (biomasa de árboles vivos, madera caída y regeneración) y subterráneo (sedimento). La existencia de carbono aéreo fue de $66.08 \pm 3.39 \text{ MgC} \cdot \text{ha}^{-1}$, mientras que la existencia subterránea hasta 200 cm de profundidad fue de $422.1 \pm 68.51 \text{ MgC} \cdot \text{ha}^{-1}$. A nivel de ecosistema, en el área de conservación Sipacate-Naranjo, las existencias de carbono son de $488.1 \pm 71.90 \text{ MgC} \cdot \text{ha}^{-1}$. El análisis multitemporal del cambio de uso del suelo en los periodos 1990-2006, 2006-2016 evidenció que las principales pérdidas en el manglar fueron a pastos, salinera/camaronera, suelo desnudo, cuerpos de agua y en menor proporción a caña, cultivos y otros. Sin embargo, el balance entre pérdidas y ganancias ha sido positivo para el manglar, puesto que en ambos periodos las ganancias netas han sido de 163.95 ha (8.78%) con respecto a la cobertura de 1990 y 46.88 ha (2.31%) en la cobertura de 2006. Las áreas de manglar que fueron convertidas a otros usos desde 1990 al 2016 generaron una emisión total hacia la atmosfera de 110,932.76 MgCO_2e . Esta pérdida fue compensada por una remoción de carbono de 198,324.61 MgCO_2e por la recuperación del manglar en dicho periodo. La remoción neta fue de 87,391.85 MgCO_2e . Por último, bajo las proyecciones propuestas se estima que la cobertura del mangle al 2030, va aumentar de un 1.79% (37.26 ha) hasta un 16.47% (342.19 ha).

Palabras claves: Carbono azul, manglares, cambio de uso de la tierra, análisis multitemporal, almacenamiento de carbono, flujos de emisiones.

ABSTRACT

Mangrove ecosystems occupy a small portion of the coastal areas of the planet. They maintain fundamental processes in the functioning of the land and for human welfare. Their unplanned conversion and management are causing huge losses of goods and services they provide. One of these services and the least studied is carbon storage, since mangroves are ecosystems known for their functions for storages, transformers and exporters of organic matter, contributing significantly to the biogeochemical cycles of various elements (Dittmar et al. 2006). This promotes the interest of implementing mitigation and adaptation measures to the effects of climate change through ecosystems.

Since no studies have been conducted in Guatemala, this Pioneer Research contributes to exploration of carbon storage potential in the country and analyzes the dynamics of land covered change and GHG emissions associated with the changes observed. The study was carried out in the Sipacate-Naranjo conservation area, located on the Pacific coast of Guatemala. The zone represents 9.52% of the total area of mangroves in the Pacific (MARN 2013).

The work includes the measurement of carbon in the aerial component (biomass of live trees, fallen wood and regeneration) and underground (sediment). The existence of air carbon was $66.08 \pm 3.39 \text{ MgC} \cdot \text{ha}^{-1}$, while the underground existence up to 200cm depth was $422.1 \pm 68.51 \text{ MgC} \cdot \text{ha}^{-1}$. At the ecosystem level, in the Sipacate-Naranjo conservation area, carbon stocks are $488.1 \pm 71.90 \text{ Mg C} \cdot \text{ha}^{-1}$. The multitemporal analysis of land uses change in the periods 1990-2006, 2006-2016 showed that the main losses were were pasture, salt / shrimp, bare soil, bodies of water and, to a lesser extent, cane, crops and others. However, the balance between gains and losses has been positive for the mangrove since in both periods the net gains have been of 163.95 ha (8.78%) with respect to the coverage of 1990 and 46.88 ha (2.31%) with respect of the 2006 coverage. The mangrove areas that were converted to other uses from 1990 to 2016 generated a total emission into the atmosphere of 110,932.76 MgCO_2e . These losses were offsets by a carbon removal of 198,324.61 MgCO_2e due to the recovery of the mangrove in that period. The net removal was 87,391.85 MgCO_2e . Finally, under the proposed projections it is estimated that the coverage of the mangrove by 2030 will increase from 1.79% (37.26 ha) to 16.47% (342.19 ha).

Key words: Blue carbon, mangroves, land use change, multitemporal analysis, carbon storage, emissions flows.

1. INTRODUCCIÓN

Los manglares son bosques situados en la confluencia de la tierra y el mar en zonas tropicales y subtropicales del mundo. Son árboles o arbustos que se desarrollan mejor cuando baja la energía de las olas y la deposición de partículas finas, les permiten a estas plantas leñosas establecer raíces y crecer (Alongi 2002). Los sustratos en los que los manglares crecen están constituidos por mezclas de sedimentos y materia orgánica en distintas porciones. Los sedimentos son aportados por la descarga de los ríos o el oleaje marino, mientras la materia orgánica, es aportada principalmente por la vegetación del sitio. (Mainardi 1996; Pizarro *et al.* 2004; Mejía Quiñones *et al.* 2014)

Al ser inundados periódicamente por las mareas, los suelos son inestables, salinos y con reducido o nulo contenido de oxígeno. La particularidad de los manglares para sobrevivir en ambientes salinos se debe al mecanismo y sistemas de filtración y excreción que les permiten eliminar pequeñas cantidades de sal que logran penetrar la planta; las adaptaciones anatómicas incluyen glándulas especializadas para excretar sal por la base del pecíolo y tejidos foliares. Otro mecanismo es la exclusión selectiva, que permite regular la cantidad de sales que ingresan al sistema radicular de la planta. (Mainardi 1996; Pizarro *et al.* 2004; Mejía Quiñones *et al.* 2014)

Los manglares constituyen un importante recurso forestal en toda la banda intertropical del planeta, porque proveen gran variedad de servicios ecosistémicos que son importantes para la función, calidad ambiental y las actividades económicas de las zonas marinas y costeras (Yáñez *et al.* 1998).

Según Ammour (1999), los manglares, al igual que los demás ecosistemas naturales, se consideran “de uso común” y por ende, están sometidos a una presión interna y externa que hace peligrar su persistencia y a todos los demás recursos asociados a ellos como son los moluscos, peces, larvas de camarones y fauna silvestre en general. Sin duda, los ecosistemas costeros son fundamentales para mantener el bienestar humano y la biodiversidad mundial (Howard *et al.* 2014). Específicamente, los manglares, marismas de marea y los pastos marinos, que contribuyen a la capacidad de las personas para mitigar y adaptarse a los impactos del cambio climático y su variabilidad.

Muchos de estos servicios son esenciales para la adaptación al clima y la resiliencia a lo largo de las costas, incluida la protección contra las marejadas y el aumento del nivel del mar, prevención de la erosión a lo largo de las costas, la regulación de la calidad del agua costera, el reciclaje de nutrientes, retención de sedimentos, captura de carbono, la provisión de hábitat para numerosas especies marinas de importancia comercial y en peligro de extinción, y la seguridad alimentaria de muchas comunidades costeras de todo el mundo.

(McLeod y Salm 2006; Gutiérrez *et al.* 2009; De la Peña *et al.* 2010; Donato *et al.* 2011; Howard *et al.* 2014)

Los bosques del mundo juegan un papel primordial en el ciclo biogeoquímico del carbono y puede ser fuente o sumidero de carbono, según como estos sean manejados. Es probable que el servicio ecosistémico más importante y menos estudiado de los manglares, es su papel como reservas de carbono. Las reservas de carbono en los manglares y otros ecosistemas marino-costeros (conocidas como “carbono azul”) son de las más grandes que se han encontrado en cualquier tipo de bosque. (McLeod y Salm 2006; Duke *et al.* 2007; Murray *et al.* 2012; Kauffman *et al.* 2013; Howard *et al.* 2014)

Donato *et al.* (2011); Herrera-Silveira *et al.* (2016), estiman que los manglares en el trópico pueden almacenar hasta $1,123 \text{ MgC} \cdot \text{ha}^{-1}$ en promedio; de los cuales entre el 50 y 90% del almacén total de carbón está en el suelo, mientras que en los pastos marinos y marismas suele ser mayor al 90%.

Cuando estos son perturbados por la deforestación y la conversión a otros usos, por las actividades humanas, liberan CO_2 y otros gases de efecto invernadero como metano (resultado de la respiración durante la descomposición de materia orgánica en suelos anóxicos) y óxido nitroso (subproducto del proceso de desnitrificación), que contribuyen al cambio climático. (Yáñez *et al.* 1998; Kauffman *et al.* 2013; Romero-Berny *et al.* 2016)

A pesar de los beneficios que brinda este ecosistema, es objeto de fuertes impactos, debido principalmente al desarrollo urbano, deforestación y tala de árboles, la contaminación y la explotación forestal sin ordenamiento (Alongi 2002; Gutiérrez *et al.* 2009). Esto provoca que el área cubierta por vegetación marina esté disminuyendo rápidamente, en las últimas décadas (Valiela *et al.*, 2001; Duarte, 2002; Alongi, 2002; Verde y Short, 2003; Brevik y Homburg, 2004; Duarte *et al.*, 2005).

Las tasas de deforestación y conversión de estos ecosistemas están entre las más altas de los bosques tropicales y exceden por mucho las tasas de otros bosques. La pérdida es de 35% durante el periodo comprendido entre 1980 y 2000, a una tasa anual del 2.1%. Además, los manglares están amenazados por el cambio climático, debido al aumento del nivel medio del mar y el incremento de eventos extremos. (Valiela *et al.* 2001; Kauffman *et al.* 2013)

El área total de mangle en la República de Guatemala es de 18,840.08 ha, equivalente al 0.17% del territorio nacional según MARN (2013). La Costa del Pacífico cuenta con 17,670.56 ha de manglares, de las cuales el 22.75% están en áreas protegidas, mientras que la Costa del Caribe cuenta con 1,169.52 ha, y el 88.23% se ubica en áreas protegidas. CONAP y MARN, (2009) calculan que el país ha perdido desde 1950 una extensión aproximada de 26,500 hectáreas de manglares, que representan el 70% de su extensión

histórica. Este ecosistema ha sido sujeto a la presión de uso, por parte de los habitantes de la zona costera, porque es cortado para la producción de carbón y leña, para la construcción de viviendas y es utilizado como tutor del cultivo de pashte y tabaco. Sin embargo, el mayor problema para este ecosistema es el cambio de uso de la tierra para usos agropecuarios en el mercado de exportación y local, el establecimiento de salineras, construcción de camaroneras, casas de veraneo y centros hoteleros (CONAP y MARN, 2009).

Por otra parte, además de la deforestación, la fragmentación, es un proceso que pocas veces se ha evaluado en manglares (Romero-Berny et al. 2016). Tal es el caso de Guatemala, donde existe poca información sobre el análisis de la pérdida de cobertura de este ecosistema y la información disponible proviene de fuentes y metodologías distintas. Análisis realizados por (Wilkie y Fortuna 2003), muestra que las diferentes metodologías, no permiten establecer claramente el patrón de pérdida de manglar. Lo ideal sería, que en el país, realicen análisis sobre la cobertura de manera periódica y continua, utilizando la misma metodología para lograr una comparación temporal más certera en futuros análisis.

Según ICC (2015), en la zona del área de conservación Sipacate-Naranjo, el 66% de la población se dedica a la pesca y agricultura. Es evidente que para los pobladores es un capital natural importante por ser una fuente de recursos invaluable, apoyando su seguridad alimentaria y brindando un aporte a las economías locales. Sin embargo, también ejerce presión al ecosistema por la extracción de recursos y cambios se usó de la tierra para fines agrícolas.

Esta investigación se desarrolló en el área de conservación Sipacate-Naranjo, ubicada en la zona litoral Pacífico de Guatemala. La zona representa el 9.52% del área total de manglares en el Pacífico (MARN 2013). La información generada ayuda a identificar los agentes de deforestación y estimar de manera preliminar las reservas de carbono del manglar. Con esto, el país podría contar con información que permita considerar mejor a los manglares en estrategias actuales de mitigación, como REDD+ (Reducción de las Emisiones debidas a la Deforestación y Degradación), así la información derivada de esta investigación contribuirá para que Guatemala pueda desarrollar, de forma más informada, estas estrategias.

2. OBJETIVOS

2.1.1 Objetivo General

Cuantificar las existencias de carbono a nivel de ecosistema y analizar dinámica histórica de deforestación y cambios de cobertura del suelo en el área de conservación Sipacate-Naranjo.

2.1.2 Objetivos Específicos

- Analizar la dinámica histórica y futura de deforestación, cambio cobertura del suelo, del periodo 1990 al 2030.
- Cuantificar las existencias de carbono aéreo y subterráneo en el área de conservación Sipacate-Naranjo.
- Estimar las emisiones y remociones de carbono, asociados a los cambios de cobertura de la tierra observados en el área de conservación Sipacate-Naranjo.

3. PREGUNTAS DE INVESTIGACIÓN

Objetivo		
General	Cuantificar las existencias de carbono a nivel de ecosistema y analizar la dinámica histórica de deforestación y cambios de cobertura de la tierra en el área de conservación Sipacate Naranjo.	
Específicos	1. Analizar la dinámica histórica y futura de deforestación, cambio cobertura de la tierra, del periodo 1990 al 2030.	Preguntas de Investigación
		¿Cuál es la trayectoria de cambio más importante, mangle-pasto o mangle-camaroneras y desde que años?
		¿Cuáles son las zonas deforestadas, no deforestadas y regeneradas?
		¿Cuál será la dinámica de la cobertura al 2030 con base en la tasa de deforestación?
	2. Cuantificar las existencias de carbono aéreo y subterráneo en el área de conservación Sipacate-Naranjo.	¿Cuál es la cantidad de carbono aéreo y subterráneo almacenado en el área de conservación Sipacate-Naranjo?
	3. Estimar las emisiones y remociones de carbono asociados a los cambios observados en el área de conservación Sipacate-Naranjo.	¿En dónde se encuentran las mayores reservas de carbono del área de conservación Sipacate-Naranjo?
		¿Cuánto carbono equivalente, representan las trayectorias de cambio observado?

4. MARCO CONCEPTUAL

4.1 El cambio climático y el impacto en los ecosistemas

El Panel Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC 2007), define el cambio climático como la variación del estado del clima identificable, en las variaciones del valor medio y en la variabilidad de sus propiedades, que persiste durante largos períodos de tiempo, generalmente decenios o períodos más largos. El cambio es debido a procesos internos naturales, a forzamientos externos o a cambios antropogénicos persistentes de la composición de la atmósfera o del uso de la tierra. El IPCC también indica que el cambio climático aumenta las amenazas sobre los ecosistemas y sus servicios, además que sus servicios son cada vez más importantes para la supervivencia de muchas personas pobres. (Martínez-Alonso *et al.* 2010)

Los impactos del cambio climático a escala regional sobre los ecosistemas van a tener consecuencias sobre la biodiversidad; por ejemplo, en los bosques subtropicales de América, el 40% de las especies podrían desaparecer (Fischlin *et al.* 2009 citado por (Martínez-Alonso *et al.* 2010)). Sumado a los impactos naturales, las actividades humanas han producido cambios en los ecosistemas, con una consiguiente pérdida de biodiversidad en muchas regiones. Estos cambios en ecosistemas son debidos principalmente a factores como la degradación de los suelos, la degradación en la cantidad y calidad de las aguas, la pérdida, modificación y fragmentación del hábitat, la explotación selectiva de especies, y la introducción de especies no autóctonas. (Gitay *et al.* 2002)

La variabilidad climática determina los impactos del cambio climático sobre los ecosistemas. Por eso, los manglares como hábitat crítico de la zona costera presentan respuestas frente a la variabilidad climática que induce el cambio global, desarrollando un papel estructural y funcional clave en la estabilidad de la línea de costa, la persistencia de hábitats y biodiversidad, el metabolismo del ecosistema, reduciendo riesgos e incertidumbre para el desarrollo sustentable del uso de sus recursos. (Gitay *et al.* 2002)

Los cambios tendrán consecuencias además sobre el secuestro de carbono en los ecosistemas. Muchos estudios de modelación del carbono de la biósfera muestran que es probable que la capacidad de los ecosistemas de secuestrar carbono podría degradarse severamente bajo los escenarios de cambio climático. (Cramer *et al.* 2004 citado por (Martínez-Alonso *et al.* 2010)) Esa perspectiva es un tema de mucha preocupación, debido a que la degradación de ecosistemas y la emisión de carbono a la atmósfera refuerzan el cambio climático.

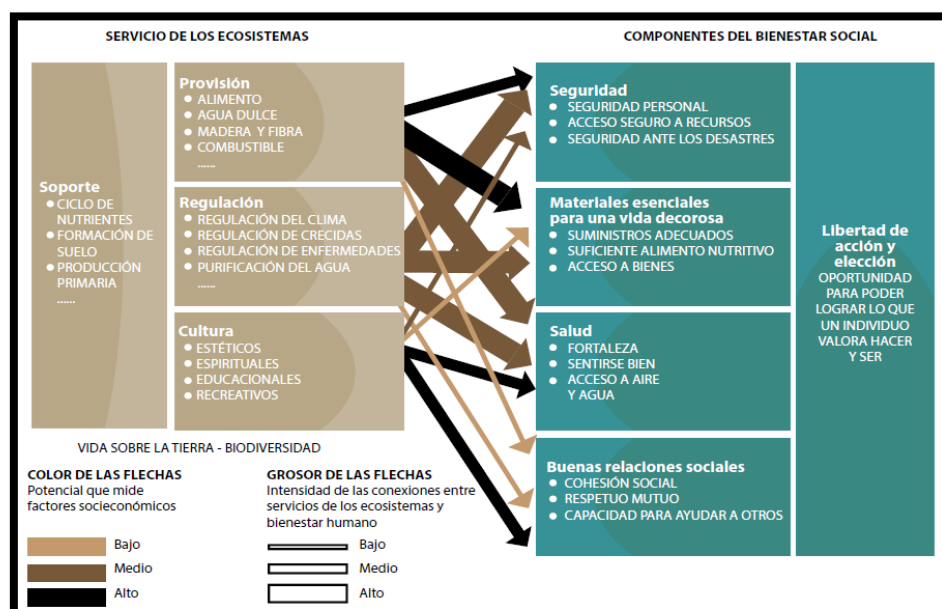
En las zonas costeras, se espera que el cambio climático se manifieste en cambios de la temperatura en aire y agua, circulación oceánica y atmosférica, incremento del nivel del

mar, e intensificación de huracanes. (Gitay *et al.* 2002; McLeod y Salm 2006) Los factores más significativos que afectan la estructura y función de los manglares son: la temperatura media del agua, el nivel medio de las mareas, el flujo y la disponibilidad de agua dulce en estuarios y humedales costeros, y la frecuencia creciente de tormentas y eventos extremos y cambios de salinidad. (Day *et al.* 2009; Cárdenas 2010) El aumento del nivel del mar se debe enfatizar, porque se proyecta que sea la mayor amenaza para los manglares. (McLeod y Salm 2006) Según Medina, 1999 citado por (McLeod y Salm 2006), el ascenso acelerado del nivel del mar está haciendo presión significativa sobre los humedales costeros, ya que las inundaciones y los cambios de salinidad afectan fisiológicamente el mangle e inducen a la pérdida de los manglares.

4.2 Servicios ecosistémicos

El ecosistema es la unidad funcional básica de la naturaleza, donde interactúan componentes bióticos (plantas, animales, microorganismos), abióticos (energía, agua, suelos, nutrientes, atmósfera), mientras las sociedades humanas, son sistemas complejos que interactúan de forma dinámica con esos ecosistemas y que habitan en ellos. El término Servicios Ecosistémicos (SE), se refiere a todos los beneficios, que las poblaciones humanas obtenemos de los ecosistemas (Balvanera y Cotler 2011). Los SE son importantes para el bienestar de la sociedad. La Evaluación de los Ecosistemas del Milenio (MEA 2005), muestra, a nivel global, cómo los diferentes ecosistemas y sus servicios son amenazados por las acciones humanas. (Camargo *et al.* 2012)

Figura 1: Servicios ecosistémicos y el bienestar social



Fuente: MEA, 2005

Los SE que brindan los ecosistemas, se dividen en cuatro grandes grupos:

- 1) Servicios de Soporte: estos son necesarios para la producción de todos los demás servicios ecosistémicos, como por ejemplo: formación del suelo, fotosíntesis y el ciclo de nutrientes.
- 2) Servicios de Aprovisionamiento: se refiere a los productos obtenidos del ecosistema como: alimento, madera y fibra.
- 3) Servicios de Regulación: son los beneficios obtenidos de la regulación de los procesos del ecosistema, como: clima, inundaciones, enfermedades, desechos y calidad del agua.
- 4) Servicios Culturales: se refiere a los beneficios no materiales que la gente obtiene de los ecosistemas, como: recreación, valores estéticos y espirituales. (MEA 2005; Martínez-Alonso *et al.* 2010; Balvanera y Cotler 2011; Barbier *et al.* 2011; Camacho-Valdez y Ruiz-Luna 2012; Costanza *et al.* 2014)

Los servicios de regulación son de gran relevancia para el bienestar humano, porque se obtienen directamente de los ecosistemas, sin pasar por procesos de transformación, como es el caso del aire limpio, el mantenimiento de los ciclos biogeoquímicos, como el carbono y la prevención de enfermedades, entre otros. (Camargo *et al.* 2012)

Los ecosistemas de manglar son sitios activos de intercambio de materiales (nutrientes y carbono) con ecosistemas adyacentes como pastos marinos y arrecifes de coral (Figura 2; Kauffman *et al.* 2013). Debido a su condición de ambientes costeros y ecosistema terminal de las cuencas hidrográficas, los manglares presentan varias características particulares como:

- 1) Son un ecosistema de gran riqueza biológica, en el que habitan tanto especies residentes permanentes como temporales de moluscos, cangrejos, jaibas, langostinos, camarones, insectos, peces, aves, mamíferos, y más.
- 2) Son un ecosistema altamente productivo, que genera nutrientes que son exportados por las mareas a las aguas marinas, donde son aprovechados por pastos marinos, arrecifes de coral y una gran variedad de peces.
- 3) Son un ecosistema que depende en buena medida de factores externos de gran escala, como las corrientes oceánicas, la conexión con el mar, afluentes de agua dulce, el clima y los cambios en la cobertura y usos del suelo a nivel de paisaje.
- 4) Son hábitat de diferentes etapas de especies de fauna marina.
- 5) Son hábitat de aves migratorias y de grupos de reproducción.

Los beneficios más importantes que proporcionan los manglares a los seres humanos son:

- 1) Son barreras naturales de protección que retienen la erosión causada por vientos y mareas, ayudando así a mantener la línea de costa y a sostener la arena sobre las playas. En aquellos sitios en donde los manglares se han mantenido, el impacto de fenómenos

naturales, como ciclones y tsunamis, ha sido menor al de aquellos sitios en donde se destruyeron o no existen estas barreras naturales. (Giri *et al.* 2008)

2) Disminuyen el impacto del acarreo de sedimentos y contaminantes por las corrientes de agua de ríos y arroyos sobre los arrecifes de coral.

3) Son zonas de protección, crianza y desove de especies comerciales como peces (bagre, lisa, mojarra, pargo, robalo, sábalo, etc.), camarones, cangrejos, langostinos y moluscos.

4) Funcionan como filtros biológicos en la retención y procesamiento de algunos fertilizantes utilizados en la agricultura, en la filtración de agua y abastecimiento de mantos freáticos.

5) Proporcionan materiales para la construcción de viviendas, fabricación de cercos para delimitar terrenos o para el confinamiento de animales domésticos.

6) Se utilizan en la industria de la construcción como puntales para las cimbras; producción de leña y carbón por las comunidades rurales, como materiales para la fabricación de artes de pesca como los tapos, en la elaboración de espigas y puntales para la locomoción de pequeñas embarcaciones en zonas someras de las lagunas costeras y los esteros.

7) Son zonas de desarrollo de actividades cinegéticas.

8) Son zona de desarrollo de la creciente industria asociada al ecoturismo, avistamiento de aves migratorias, vida silvestre y paisajes.

9) Son importantes sumideros de carbono para la lucha contra el cambio climático.

Lo anterior, demuestra que las actividades productivas en las costas deben ser compatibles con la protección y conservación de los manglares, y deben establecerse estrategias que permitan que este ecosistema mantenga su composición, estructura y función, para brindar los insustituibles servicios ecosistémicos que presta.

4.3 Almacenamiento de carbono en manglares

Las reservas de carbono de los manglares pueden dividirse en dos componentes principales: aéreo y subterráneo. Globalmente, el carbono azul representa más del 55% del carbono verde (el almacenado en los bosques). Entre el 80 y hasta el 97% de esta reserva de carbono se encuentra en el subsuelo, ya que los manglares poseen suelos ricos en materia orgánica, que permanece almacenada no durante décadas o siglos (como en las selvas tropicales), sino más bien durante milenios. (Nellemann *et al.* 2010; Agroambiental 2012; Kauffman *et al.* 2013; Howard *et al.* 2014)

El carbono que se encuentra almacenado en el ecosistema manglar puede clasificarse como autóctono o alóctono (Middelburg *et al.*, 1997; Kennedy *et al.*, 2010) citado por Howard *et al.* (2014). El carbono autóctono se produce y deposita en el mismo lugar como resultado de la fotosíntesis, la producción primaria neta y la deposición de materia orgánica en el suelo. Una gran parte de la biomasa vegetal se asigna a las raíces donde se descompone muy lentamente en condiciones anaeróbicas, almacenando también el carbono dentro de los suelos hídricos del manglar. El carbono alóctono se produce en un lugar y se deposita en

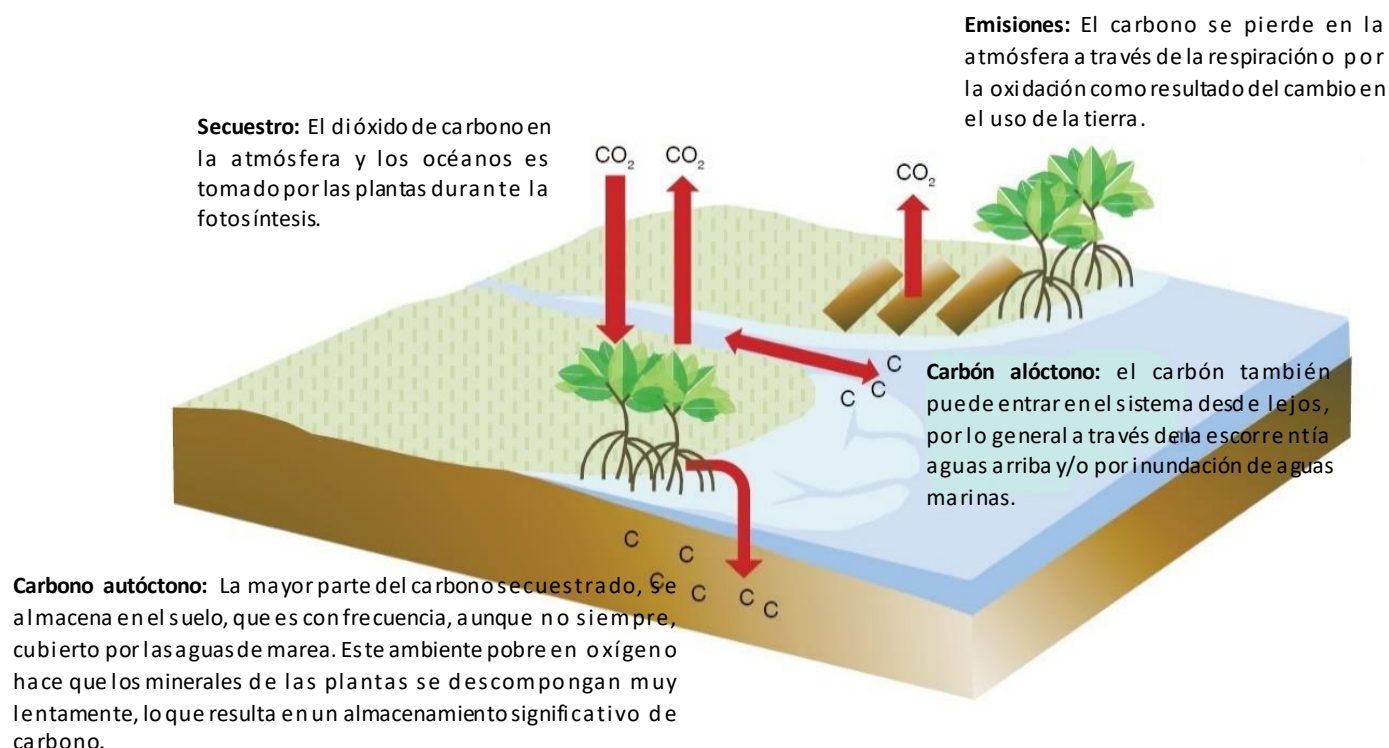
otro. Los ecosistemas de carbono azul existen en entornos muy dinámicamente activos; son constantemente golpeados por las olas, las mareas y las corrientes costeras que transportan los sedimentos y el carbono orgánico asociado de los ecosistemas adyacentes (mar adentro o terrestres). Las plantas que se encuentran en estos sistemas tienen estructuras de raíz y doseles complejos que son eficientes para atrapar los sedimentos a medida que se mueve a través del sistema, lo que se suma al stock de carbono local. (Howard *et al* 2014; Figura 2)

La acumulación de materia orgánica en los suelos de los manglares depende de la tasa de entrada (materia orgánica producida *in situ* y *ex situ*) y las salidas (descomposición bajo condiciones anóxicas/anaerobias) (Sahrawat 2003). La descomposición de material orgánico dentro de un manglar es un mecanismo complicado que involucra procesos aerobios y anóxicos/anaerobios. En los suelos de los manglares, los promedios de descomposición de material orgánico suelen ser bajos por las condiciones anaerobias, por lo que su potencial de almacenamiento de C es alto. (Benner *et al.* 1984; Sahrawat 2003; Warner *et al.* 2005; Muñiz *et al.* 2011)

Los sedimentos de los manglares son anóxicos y también son una fuente de gases de efecto invernadero mediados microbianamente, como por ejemplo: CO₂, CH₄, N₂ y N₂O. El crecimiento y la productividad de los manglares están estrechamente relacionados con los depósitos de nutrientes bentónicos y las transformaciones de nutrientes por la descomposición microbiana de la materia orgánica. (Prasad y Ramanathan 2008)

Si los suelos de los manglares son perturbados, son susceptibles de liberar grandes cantidades de gases de efecto invernadero. Por lo tanto, el conocimiento del papel de estos ecosistemas naturales en la captación de CO₂, es un componente cada vez más importante en el desarrollo de estrategias para mitigar el cambio climático y evitar la fragmentación de los ecosistemas, producto de las actividades que el hombre realiza en las áreas de manglar para aprovechar, incrementar o disminuir los recursos que éste ofrece. La fragmentación puede causar cambios en complejidad estructural, fauna, flora, hidrología, geomorfología y condiciones físico-químicas del ecosistema. (Gutiérrez *et al.* 2009; Nellemann *et al.* 2010; Murray *et al.* 2012)

Figura 2: Flujo de carbono en el ecosistema manglar



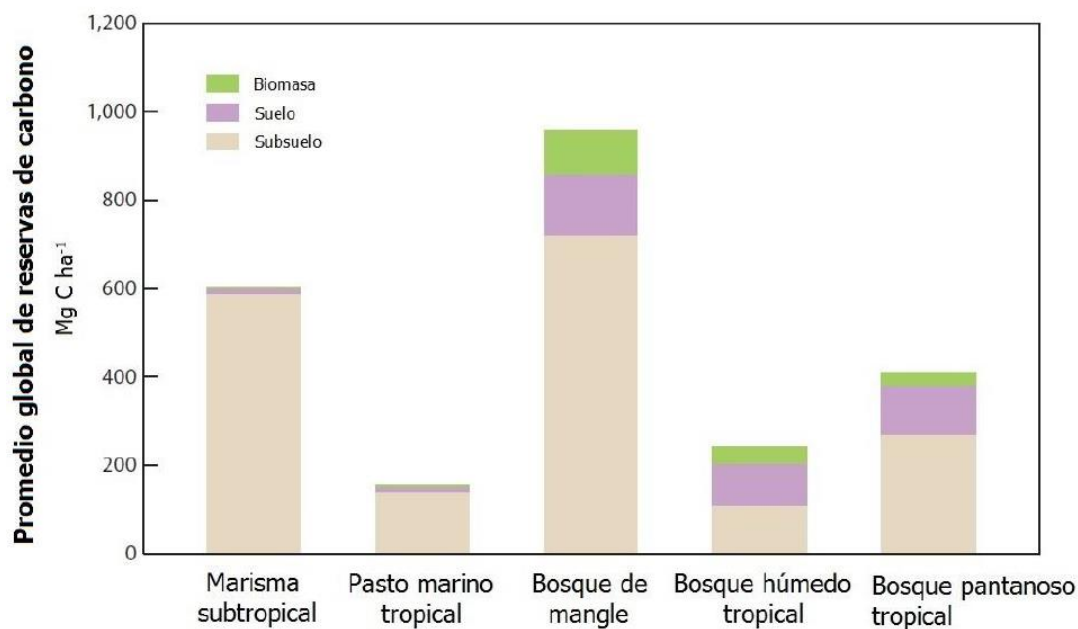
Fuente: Howard *et al.* 2014

4.4 Almacenamiento de carbono en manglares y otros ecosistemas del trópico

La diferencia en la acumulación de carbono en el suelo terrestre frente a los sistemas costeros, es que el almacenamiento potencial de carbono en los suelos de tierras altas tiene alta disponibilidad de oxígeno, lo que permite la oxidación microbiana de carbono aeróbico y la liberación de nuevo en la atmósfera. En los ecosistemas marino-costeros, donde el suelo es saturado con agua, se mantiene en un estado anaeróbico (bajo a ningún oxígeno), lo que resulta en una acumulación continua de carbono a lo largo del tiempo. (Chmura *et al.* 2003)

La contribución de los manglares al secuestro de carbono es un medio importante por su aporte a la lucha contra el cambio climático. La media global de la biomasa aérea en manglares es de 247 Mg ha⁻¹, similar al promedio global de los bosques húmedos tropicales perennes (Alongi 2009). Sin embargo, la mayor parte de las reservas de carbono en los manglares se almacena en el suelo y el subsuelo, acumulando un promedio total de 956 Mg C ha⁻¹; el cual representa el almacenamiento total más alto de carbono comparado con otros ecosistemas del trópico (Alongi 2014; Figura 3).

Figura 3: Promedio global de reservas de carbono por tipo de ecosistema en el trópico.



Fuente: Alongi (2014)

4.5 Aplicación de sensores remotos en manglares

Los primeros satélites de observación terrestre comenzaron a operar a principios de la década de 1970. Los sensores a bordo de satélites registran energía electromagnética emitida o reflejada por un objeto o superficie en distintas bandas del espectro electromagnético. Las imágenes satelitales proveen datos cuantitativos y espacialmente continuos de la superficie y en tal sentido, son mucho más que una fotografía. (Wessman 1992; Kerr y Ostrovsky 2003; Pettorelli *et al.* 2005, citado por Paruelo 2008).

Dadas las complicaciones en el acceso que impone el trabajo de campo en zonas intermareales. La percepción remota y los Sistema de Información Geográfica son herramientas útiles para dar seguimiento a variables ambientales a diferentes escalas espaciales y temporales como los cambios en el tamaño y forma de los parches de vegetación, ya que la constante dinámica de cambios en la zona costera y la alta tasa de deforestación de manglares, demandan la aplicación de marcos conceptuales y herramientas que permitan evaluarlos eficientemente y con exactitud a distintas escalas espaciales y temporales. (Howard *et al.* 2014; Romero-Berny *et al.* 2016)

En general, se ha recurrido a la interpretación visual de imágenes y la clasificación digital como herramientas para análisis espaciales. En estos casos, un atributo de la superficie terrestre (por ejemplo, un tipo dato de cobertura) se relaciona con un comportamiento

espectral determinado (valores de reflectancia o emisión de la superficie terrestre en distintas longitudes de onda). De esta forma, las imágenes de satélite permiten monitorear la variación espacial y temporal de las zonas de mangle y estudiar los diferentes estados de crecimiento o fragmentación de un ecosistema de mangle. (Lizano *et al.* 2002)

Estudios como el de Chen *et al.* (2013), en el Golfo de Fonseca, al sur de Honduras, analizó los cambios espaciotemporales en los manglares hondureños, utilizando imágenes de Landsat durante los periodos 1985-1996, 1996-2002 y 2002-2013. Además, la tendencia futura de los cambios del bosque de manglares fue proyectada por un modelo de cadena de Markov para apoyar la toma de decisiones para la gestión costera. El estudio reveló que los cambios de manglar a otros usos del suelo, desde 1985 a 2013, fueron de 11.9% (4,694.1 ha) y las ganancias del mangle en el mismo periodo fue de 3.9% (1,553.2 ha). Los cambios en la extensión de los bosques de manglares se proyectaron aún más hasta 2020, lo que indica que el área de manglares podría reducirse continuamente a 1.200 hectáreas hasta el 2013. Otro estudio realizado por Rodríguez-Zuñiga *et al.* 2013 en México, tuvo como objetivo establecer el Sistema de Monitoreo de los Manglares de México (SMMM), usando herramientas de percepción remota. El estudio muestra que la extensión estimada de manglares en México para el año 2010 es de 764, 486 hectáreas. También identificaron que a nivel nacional, los principales cambios en la extensión del manglar se dieron en los periodos de 1981-2005 y el segundo 2005-2010. La reducción de la superficie del manglar en el primer periodo fue de 9.6% y en el segundo de 1.2%.

Ejemplos como los antes mencionados, reflejan la importancia de estudiar la dinámica del cambio de uso del suelo y deforestación en las áreas marino- costeras, mediante el uso de sensores remotos. Sin embargo, uno de los problemas con que se pueden encontrar según Rodríguez-Zuñiga *et al.* 2013, CONAP y MARN 2009, es en relación con los métodos de análisis, ya que las diferentes metodologías empleadas no permiten establecer claramente el patrón de pérdida de manglar, haciendo imposible estimar con exactitud la tasa de pérdida de manglar en el paso del tiempo. Es por ello que se necesita obtener información precisa para evaluar los cambios en las escalas local y regional, y así detectar la magnitud, tendencias y agentes de la transformación del manglar.

4.6 Referencias

- Agroambiental, P. 2012. Capitales de la comunidad y la conservación de los recursos naturales.
- Alongi, D. 2009. The energetics of mangrove forests. Springer Science & Business Media.
- Alongi, DM. 2002. Present state and future of the world's mangrove forests *Environmental conservation* 29(03):331-349.
- Alongi, DM. 2014. Carbon cycling and storage in mangrove forests *Annual review of marine science* 6:195-219.
- Ammour, T. 1999. Manejo productivo de manglares en América Central. CATIE.
- Balvanera, P; Cotler, H. 2011. Los Servicios Ecosistémicos CONABIO. *Biodiversitas* 94:7-1.
- Barbier, EB; Hacker, SD; Kennedy, C; Koch, EW; Stier, AC; Silliman, BR. 2011. The value of estuarine and coastal ecosystem services *Ecological monographs* 81(2):169-193.
- Benner, R; Maccubbin, A; Hodson, RE. 1984. Anaerobic biodegradation of the lignin and polysaccharide components of lignocellulose and synthetic lignin by sediment microflora *Applied and Environmental Microbiology* 47(5):998-1004.
- Camacho-Valdez, V; Ruiz-Luna, A. 2012. Marco conceptual y clasificación de los servicios ecosistémicos *Revista Bio Ciencias* 1(4).
- Camargo, ESC; Carreño, JAF; Barón, EMP. 2012. Los servicios ecosistémicos de regulación: tendencias e impacto en el bienestar humano/Regulating ecosystem services: trends and impact on human welfare *Revista de Investigación Agraria y Ambiental* 3(1):77.
- Cárdenas, M. 2010. México ante el cambio climático. Evidencias, impactos, vulnerabilidad y adaptación México. Greenpeace.
- CONAP y MARN. 2009. Biodiversidad Marina de Guatemala: Análisis de Vacíos y Estrategias para su Conservación. Consejo Nacional de Áreas Protegidas, Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales, The Nature Conservancy. Guatemala. 152 p.
- Corrales, L. 1998. Estimación de los beneficios ambientales por no emisión y fijación de carbono (masa aérea) por acciones de ordenamiento forestal en el Área propuesta del Corredor Biológico Mesoamericano. República de Nicaragua PROARCA/CAPAS, CCAD/USAID.
- Costanza, R; de Groot, R; Sutton, P; van der Ploeg, S; Anderson, SJ; Kubiszewski, I; Farber, S; Turner, RK. 2014. Changes in the global value of ecosystem services *Global Environmental Change* 26:152-158.

- Chmura, GL; Anisfeld, SC; Cahoon, DR; Lynch, JC. 2003. Global carbon sequestration in tidal, saline wetland soils *Global biogeochemical cycles* 17(4):
- Chen, C-F; Son, N-T; Chang, N-B; Chen, C-R; Chang, L-Y; Valdez, M; Centeno, G; Thompson, CA; Aceituno, JL. 2013. Multi-decadal mangrove forest change detection and prediction in Honduras, Central America, with Landsat imagery and a Markov chain model *Remote sensing* 5(12):6408-6426.
- Day, JW; Yáñez-Arancibia, A; Mitsch, WJ. 2009. Management approaches to address water quality and habitat loss problems in coastal ecosystems and their watersheds: Ecotechnology and ecological engineering *Ocean Yearbook Online* 23(1):389-402.
- De la Peña, A; Rojas, CA; De la Peña, M. 2010. Valoración económica del manglar por el almacenamiento de carbono, Ciénaga Grande de Santa Marta Clío *América* 4(7):
- Dittmar, T; Hertkorn, N; Kattner, G; Lara, RJ. 2006. Mangroves, a major source of dissolved organic carbon to the oceans *Global biogeochemical cycles* 20(1):
- Donato, DC; Kauffman, JB; Murdiyarso, D; Kurnianto, S; Stidham, M; Kanninen, M. 2011. Mangroves among the most carbon-rich forests in the tropics *Nature geoscience* 4(5):293-297.
- Duke, NC; Meynecke, J-O; Dittmann, S; Ellison, AM; Anger, K; Berger, U; Cannicci, S; Diele, K; Ewel, KC; Field, CD. 2007. A world without mangroves? *Science* 317(5834):41-42.
- Gitay, H; Suárez, A; Watson, R; Dokken, D. 2002. Cambio climático y biodiversidad Documento técnico V del IPCC:
- Gutiérrez, L; Gómez, G; Gil Torres, W; Fonseca, G; Hernández Ortiz, M; Segura Quintero, C; López Rodríguez, ÁC; Figueroa, P; Restrepo Martínez, J; Sierra Correa, PC. 2009. Ordenamiento ambiental de los manglares de la Alta, Media y Baja Guajira:
- Herrera-Silveira, JA; Rico, AC; Pech, E; Pech, M; Ramírez-Ramírez, J; Teutli-Hernández, C. 2016. Dinámica del carbón (almacenes y flujos) en manglares de México *REVISTA TERRA LATINOAMERICANA* 34(1):61-72.
- Honorio, C; Eurícide, N; Baker Timothy, R. 2010. Manual para el monitoreo del ciclo del carboo en bosques amazónicos Instituto de Investigaciones de la Amazonia Peruana. Universidad de Leeds. Lima:
- Howard, J; Hoyt, S; Isensee, K; Telszewski, M; Pidgeon, E. 2014. Coastal blue carbon: methods for assessing carbon stocks and emissions factors in mangroves, tidal salt marshes, and sea grasses.
- ICC (Instituto Privado de Investigación sobre Cambio Climático) 2015: Análisis de vulnerabilidad climática en aldea El Paredón Buena Vista, La Gomera, Escuintla. Guatemala, Guatemala.

- IPCC (Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático) (2007). Cambio climático 2007: Informe de síntesis. Contribución de los Grupos de trabajo I, II y III al Cuarto Informe de evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático [Equipo de redacción principal: Pachauri, R.K. y Reisinger, A. (directores de la publicación)]. IPCC, Ginebra, Suiza, 104 págs.
- Kauffman, JB; Donato, DC; Adame, MF. 2013. Protocolo para la medición, monitoreo y reporte de la estructura, biomasa y reservas de carbono de los manglares. CIFOR.
- Lizano, O; Amador, J; Soto, R. 2002. Caracterización de manglares de Centroamérica con sensores remotos Revista de biología tropical 49:331-340.
- Mainardi, V. 1996. El manglar de Térraba Sierpe en Costa Rica. CATIE.
- MARN (Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales), GT. 2013. Informe técnico: Abundancia y Distribución del Ecosistema Manglar en Guatemala, su análisis y relación con los planes de desarrollo en el Caribe de Guatemala. Guatemala. 185 p.
- Martínez-Alonso, C; Locatelli, B; Vignolaa, R; Imbach, P. 2010. Adaptación al cambio climático y servicios ecosistémicos en América Latina:
- McLeod, E; Salm, RV. 2006. Managing mangroves for resilience to climate change. World Conservation Union (IUCN) Gland, Switzerland. 64pp.
- MEA, MEA. 2005. Ecosystems and human well-being: current state and trends Washington, DC: World Resources Institute:
- Mejía Quiñones, LM; Molina Jiménez, MP; Sanjuan Muñoz, A; Grijalba Bendeck, M; Niño Martínez, LM. 2014. Bosque de manglar, un ecosistema que debemos cuidar:1, 27.
- Muñiz, JLM; Alarcón, MEH; Barceló, PM-C. 2011. Secuestro de carbono en suelos de humedales costeros de agua dulce en Veracruz [soil carbon sequestration in coastal freshwater wetlands of veracruz] Tropical and Subtropical Agroecosystems 13:365-372.
- Murray, BC; Watt, CE; Cooley, DM; Pendleton, LH. 2012. Coastal Blue Carbon and the United Nations Framework Convention on Climate Change Policy Brief from the Nicholas Institute for Environmental Policy Solutions:
- Nellemann, C; Corcoran, E; Duarte, CM; De Young, C; Fonesca, L; Grimsdith, G. 2010. Blue carbon: the role of healthy oceans in binding carbon:
- Paruelo, JM. 2008. La caracterización funcional de ecosistemas mediante sensores remotos Revista Ecosistemas 17(3):
- Pizarro, F; Piedra, L; Bravo, J; Asch, J; Asch, C. 2004. Manual de Procedimientos para el Manejo de los Manglares de Costa Rica Heredia, CR. EFUNA:
- Prasad, MBK; Ramanathan, A. 2008. Sedimentary nutrient dynamics in a tropical estuarine mangrove ecosystem Estuarine, Coastal and Shelf Science 80(1):60-66.

- Rodríguez-Zúñiga, M; Troche-Souza, C; Vázquez-Lule, A; Márquez-Mendoza, J; Vázquez-Balderas, B; Valderrama-Landeros, L; Velázquez-Salazar, S; Cruz-López, M; Ressler, R; Uribe-Martínez, A. 2013. Manglares de México/Extensión, distribución y monitoreo Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. México DF:
- Romero-Berny, EI; Acosta-Velázquez, J; Tovilla-Hernández, C; Schmook, B; Gómez-Ortega, R. 2016. Cambios de cobertura y fragmentación de manglares en la región del Soconusco, Chiapas, México, 1994-2011 Revista Geográfica de América Central 1(54):153-169.
- Sahrawat, KL. 2003. Organic matter accumulation in submerged soils Advances in Agronomy 81:169-201.
- Valiela, I; Bowen, JL; York, JK. 2001. Mangrove Forests: One of the World's Threatened Major Tropical Environments At least 35% of the area of mangrove forests has been lost in the past two decades, losses that exceed those for tropical rain forests and coral reefs, two other well-known threatened environments Bioscience 51(10):807-815.
- Warner, B; Aravena, R; Moreno-Casasola, P. 2005. Cambio climático y reciclaje de carbono en los humedales costeros Estrategias para el manejo costero integral: el enfoque municipal. Instituto de Ecología, AC y Gobierno del Estado de Veracruz-Llave Xalapa, Ver, México: 297-318.
- Wilkie, ML; Fortuna, S. 2003. Status and trends in mangrove area extent worldwide Forest Resources Assessment Programme. Working Paper (FAO):
- Yáñez, A; Twilley, RR; Lara-Domínguez, AL. 1998. Los ecosistemas de manglar frente al cambio climático global Madera y Bosques 4(2):3-19.

5. ARTÍCULOS DE INVESTIGACIÓN

5.1 Artículo 1. Cuantificación de las existencias de carbono azul en el área de conservación Sipacate Naranjo, Guatemala, Centroamérica.

Resumen

Los manglares generan significativos servicios ecosistémicos para una amplia diversidad de especies y otros ecosistemas costeros como los marinos. Son muy importantes en las zonas intermareales por su conectividad y protección, tan solo ocupando una restringida distribución geográfica en las costas del trópico y subtrópico del planeta. Además, se caracterizan por su alta capacidad para almacenar carbono y, consecuentemente, por su potencial contra el calentamiento global.

En el presente estudio se estimaron las reservas de carbono a nivel de ecosistema en el área de conservación Sipacate-Naranjo, localizada en las costas del Pacífico de Guatemala. El área cuenta con una extensión territorial de 1,682.32 hectáreas y representa el 10% del total de mangle en el Pacífico (MARN 2013). Para cuantificar el carbono en el componente aéreo (árboles en pie, madera caída, regeneración) y el componente subterráneo (suelo), se adoptó la metodología de Kauffman *et al.* (2013) ubicando 27 puntos de muestreo distribuidos aleatoriamente en la zona de estudio.

La densidad promedio de carbono epigeo en el área de conservación Sipacate-Naranjo fue de $66.08 \pm 3.39 \text{ MgC} \cdot \text{ha}^{-1}$, donde el 96.8% del carbono epigeo se encontraba almacenado en los árboles con dap > 5cm, mientras que el 2.3% y 1 % se encontraba almacenado en la regeneración y madera caída. Por otra parte, la densidad de carbono hasta 200 cm es de $422.1 \pm 68.51 \text{ MgC} \cdot \text{ha}^{-1}$, donde el 32.84% se encuentra hasta los 50 cm de profundidad y un 67.16% corresponde hasta los 200 cm. Se encontró que las concentraciones de carbono (%) disminuyen significativamente ($p < 0.0001$) con la profundidad del perfil del suelo. Hasta los 50 cm del perfil, las concentraciones fueron distintas estadísticamente, mientras que de 50 cm hasta los 200 cm no se encontraron diferencias en la concentración de C. La densidad promedio de carbono a nivel de ecosistema en el área de conservación Sipacate-Naranjo es de $488.1 \pm 71.90 \text{ MgC} \cdot \text{ha}^{-1}$. Los componentes más importantes de las existencias de carbono a nivel de ecosistema fueron los suelos y los árboles (86.46% y 13% del total, respectivamente).

Palabras clave: Carbono azul, ecosistemas costeros, manglares, mitigación del cambio climático, reservas de carbono.

5.1.1 Introducción

Los servicios de los sistemas ecológicos producen procesos fundamentales para el funcionamiento del régimen de soporte de la Tierra (Costanza *et al.* 1998; MEA 2005). Siendo por ejemplo, la acumulación de carbono de los bosques es un servicio ecosistémico crítico para la mitigación del calentamiento global (Gitay *et al.* 2002). Los manglares sostienen gran parte de la productividad ecológica de las áreas estuarinas proporcionando la mayor cantidad de energía, la cual sirve de nutrición a los organismos que viven en ellas. (Lozano Torres 2007)

Los manglares poseen múltiples valores ecológicos entre los que se destacan la producción de hojarasca, detritos y compuestos orgánicos solubles disuelto por efecto de la hidrología (fuente de agua, hidroperíodo, dirección y velocidad de flujos de agua) que son aprovechados por un gran número de organismos que conforman complejas redes alimenticias, constituyendo de esta manera el hábitat de una variada fauna residente y migratoria. (Orihuela Belmonte *et al.* 2004; Prasad y Ramanathan 2008)

El valor económico de los ecosistemas de manglar reside en que de sus funciones ecológicas se derivan servicios económicos de importancia local, regional y mundial. Estos servicios van desde el uso de recursos para alimentación, combustible, medicina tradicional y regulación de procesos inherentes al problema de cambio climático, como captura o almacenamiento de carbono, siendo este muy importante y poco estudiado. (Dittmar *et al.* 2006; Lozano Torres 2007; Herrera-Silveira *et al.* 2016)

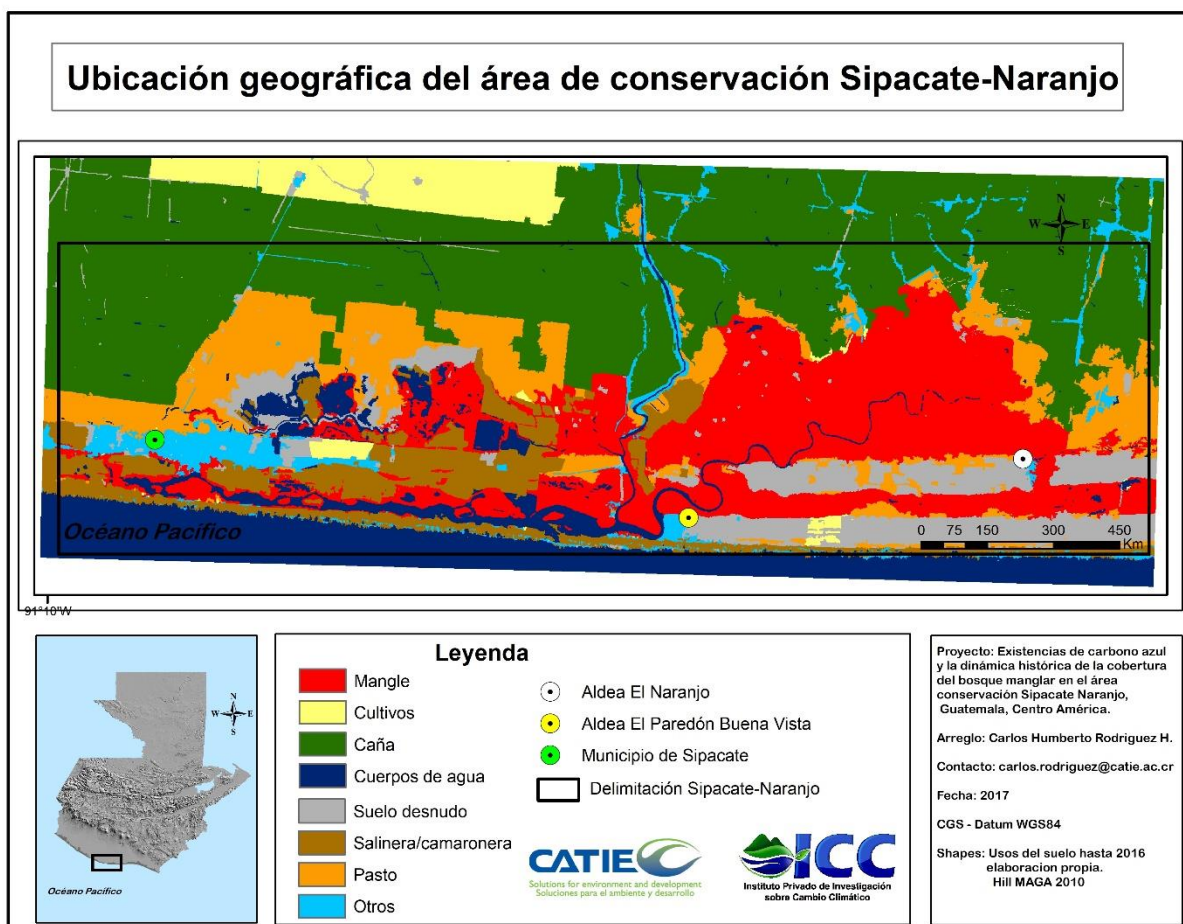
Se buscó información sobre la cuantificación de carbono en manglares y se encontró que en Guatemala no se reportan estudios que hayan cuantificado las existencias de carbono en los ecosistemas de manglar, lo cual ofrece la oportunidad para formar grupos de investigadores a escala nacional y abordar de forma consensada estudios bajo una estrategia metodológica interoperable que pueda ayudar de forma regional y estudiar más a fondo la dinámica de carbono en las costas del Pacífico de Centroamérica. El presente trabajo se realizó en el bosque manglar del área de conservación Sipacate-Naranjo, el cual está ubicada en la zona litoral del Pacífico de Guatemala y representa el 9.52% del área total de manglares en el pacífico (MARN 2013). El estudio está enfocado en cuantificar las reservas de carbono aéreo y subterráneo espacial del manglar y de los usos del suelo que más influyen en la pérdida del mismo. La información servirá para explorar el potencial de almacenamiento de carbono en los bosques de mangle de Guatemala, esperando que sirva para promover una línea de base para evaluaciones futuras del ecosistema además de ser una herramienta pensando en estrategias de mitigación como REDD+.

5.1.2 Metodología

5.1.2.1 Área de estudio

El área de conservación Sipacate-Naranjo está ubicada en la zona litoral Pacífico de Guatemala, en las coordenadas geográficas 13°55'58.20" N y 91°3'0.43"W (Figura 4). Perteneció al municipio de Sipacate, departamento de Escuintla y cuenta con un área de 1,682.32 hectáreas (MARN, 2013). Es administrada por el Consejo Nacional de Áreas Protegidas (CONAP 2002). La región donde se ubica es de clima cálido que se caracteriza por dos estaciones, la época seca, se presenta en los meses de noviembre- abril, y la lluviosa de mayo-octubre. La temperatura promedio oscila entre 21.07 y 33.50 °C, la humedad relativa promedio es de 77.14% y la precipitación promedio anual es de 1,673.59 mm (INSIVUMEH citado por CONAP 2002).

Figura 4: Ubicación del área de conservación Sipacate-Naranjo, Guatemala, Centroamérica.



5.1.2.2 Diseño del inventario

Para cuantificar las reservas de carbono aéreo y subterráneo del área de conservación Sipacate-Naranjo, se aplicó la metodología de Kauffman *et al.* (2013), que permitió coleccionar y analizar datos biométricos del manglar. La metodología propone el muestreo de varios sitios dentro de la zona, con parcelas circulares distribuidas linealmente (transectos) en un gradiente desde la orilla del canal de agua hacia 150 m adentro del manglar. El diseño de los transectos permite incluir la variabilidad de la vegetación, influenciada por la elevación topográfica y la frecuencia de inundación de la marea. Las parcelas fueron temporales con el objetivo de medir en un punto en el tiempo la composición, la estructura y las reservas de carbono del manglar.

La delimitación del área con mangle y los otros usos del suelo se hizo por medio de un Sistema de Información Geográfica (SIG). El polígono proviene del procesamiento de la imagen RapidEye del año 2016. Para clasificar la imagen se aplicó el método denominado Feature extraction (ENVI 5.3). Ese algoritmo permitió reconocer objetos a partir de características espaciales, espectrales y texturales de la imagen y diferenciar visualmente la cobertura de mangle de otros tipos de vegetación. La escena se recortó usando una máscara de aproximadamente 17.65 Km de largo por 6.5 Km de alto, a partir de la línea costera para obtener el área de paisaje, el cual fue de 11,466.46 ha.

En el área del paisaje se observaron 8 categorías de coberturas distintas (Figura 4). En esta área, se identificó que la caña comprende el doble de extensión que el mangle, cuerpos de agua y los pastos. Estas categorías representan el 78.21% del área total. El suelo desnudo, salinerías/camaroneras, cultivos y otros representan el 21.79% del área.

Según Kauffman *et al.* (2013), se requiere que la precisión del muestreo esté dentro del 10% del valor real de la media, con 95% de nivel de confianza. El número de parcelas se calculó con la fórmula:

$$\text{Número mínimo de parcelas (n)} = ((t*s)/ E)^2$$

Donde:

n= número de parcelas

t= estadístico de la distribución t para el intervalo de confianza de 95%

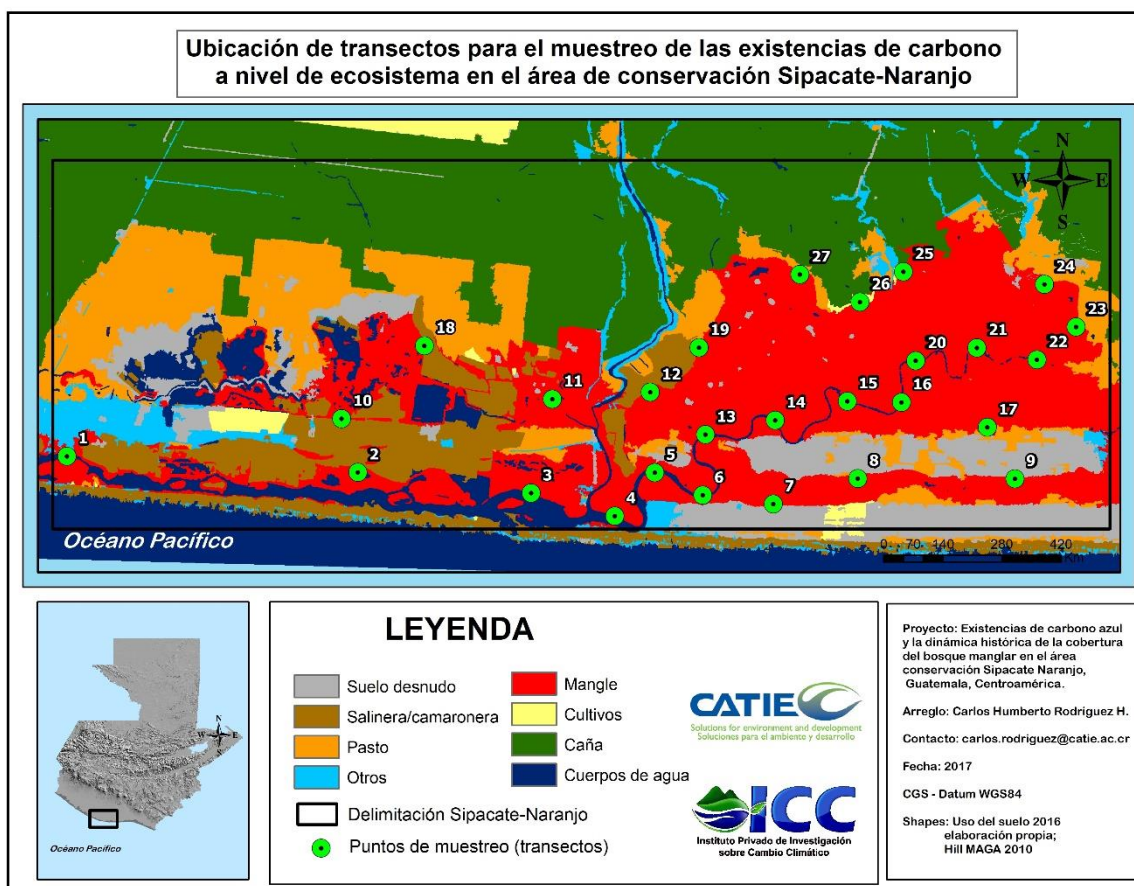
s= desviación estándar esperada o conocida de datos previos o iniciales

E= error admisible en la primera mitad del intervalo de confianza, obtenido de multiplicar el promedio de la reserva de carbono por la precisión deseada, i.e. * 0,1 (precisión de 10%).

Utilizando la información de dos Parcelas Permanentes de Medición Forestal (PPMF) establecidas en 2011 por el CONAP e ICC, se calculó que se necesitarían 236 parcelas (39

transectos) para alcanzar la precisión deseada, sin embargo, el número de parcelas se ajustó al presupuesto. Por lo que se trabajó con una precisión del 12% a un 95% de confianza, dando como resultado 164 parcelas (27 transectos). Las localizaciones de los 27 puntos se seleccionaron aleatoriamente utilizando la herramienta de análisis de puntos del software QGIS 2.16.1 (Figura 5). Las condicionantes que se asignaron al programa fue que tuvieran una distancia mínima de 50 m entre puntos.

Figura 5: Ubicación de transectos para el muestreo de las existencias de carbono a nivel de ecosistema en el área de conservación Sipacate-Naranjo, Guatemala, Centroamérica.

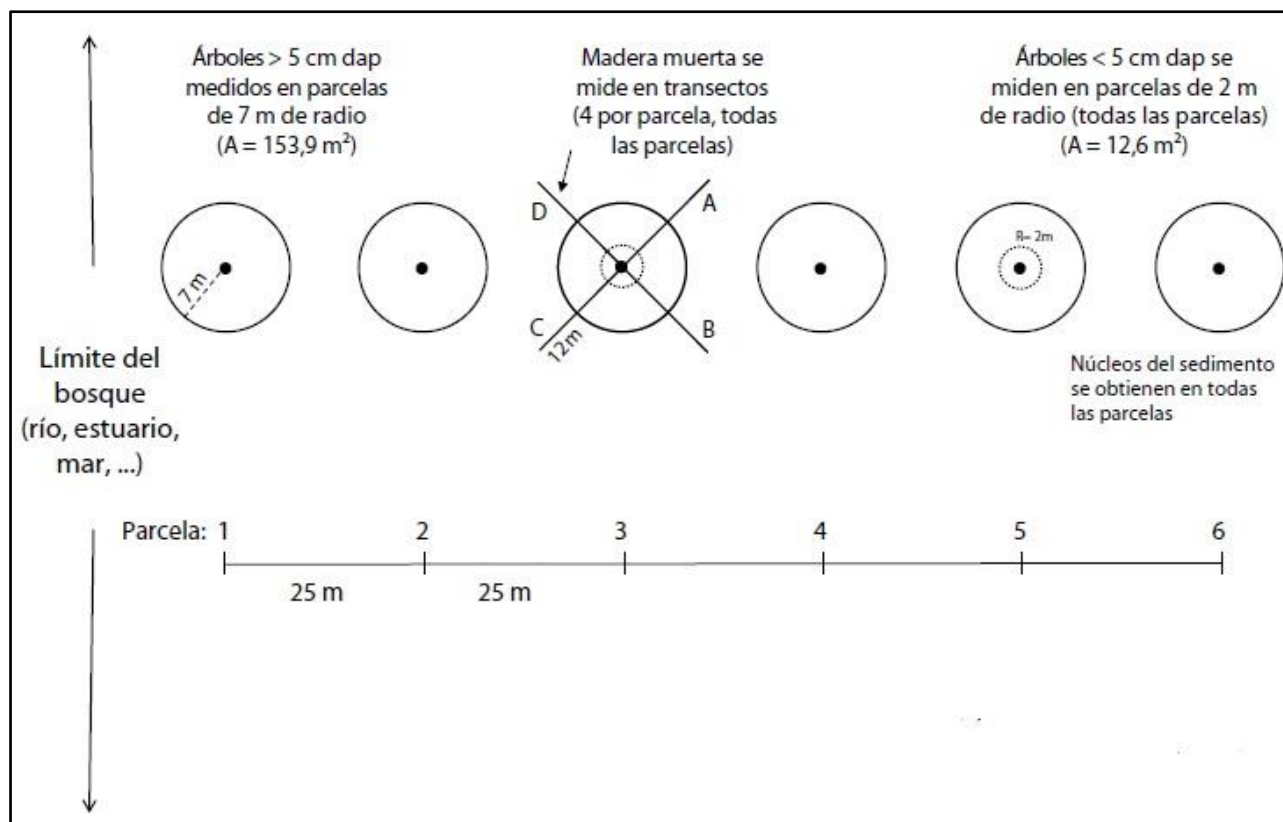


5.1.2.3 Cuantificación de las reservas de carbono

En cada uno de los puntos de muestreo, se establecieron transectos de medición trazados perpendiculares a la línea costera o la orilla del estero e iniciando a 15 m de distancia de dicha línea. Cada 25 m sobre estos transectos se delimitaron parcelas circulares de 7 m de radio y sub parcelas de 2 m de radio (Figura 6). En cada parcela se midió el componente aéreo (biomasa sobre el suelo), refiriéndose a los árboles en pie, regeneración y madera caída. Para el cálculo del carbono aéreo se utilizaron ecuaciones alométricas. El

componente subterráneo lo constituyeron muestras de suelo para estimar su contenido de carbono total y densidad aparente.

Figura 6: Representación esquemática de la distribución de parcelas en manglares (transectos).



Fuente: Kauffman *et al* 2013

5.1.2.4 Cuantificación del componente aéreo

Árboles en pie: En la parcela de 7 m de radio (153.9 m²) se midieron todos los árboles ≥ 5 cm de diámetro a la altura del pecho -dap- (medida a 1.30 m de altura sobre el fuste, o a 30 cm por encima de las raíces aéreas). Los árboles < 5 cm de dap se midieron en una subparcela de 2 m de radio (12.6 m²) contenida dentro de la parcela principal (Kauffman *et al* 2013; Figura 6). Para estimar la biomasa aérea, se utilizaron las ecuaciones alométricas de Fromard *et al.* (1998). El contenido de carbono de los árboles en pie, se obtuvo al multiplicar la biomasa aérea por 0.48 (Kauffman *et al.* 2013); luego se convirtió a MgC·ha⁻¹ (Megagramos, o toneladas, de carbono por hectárea).

Cuadro 1: Ecuaciones alométricas utilizadas para estimar biomasa aérea en los manglares de Guatemala.

Nombre técnico y común	Ecuación de biomasa arbórea sobre el suelo	R ²	D _{max}	Fuente
<i>Rhizophora mangle</i> L (rojo)	Biomasa = 0.178*DAP ^{2.47}	0.98		Fromard <i>et al.</i> (1998)
<i>Laguncularia racemosa</i> (L.) Gaertn.f. (blanco)	Biomasa = 0.1023 x DAP ^{2.50}	0.97	10	Fromard <i>et al.</i> (1998)
<i>Avicennia germinans</i> (L.)L. (Madre sal o mangle negro)	Biomasa = 0.14 x DAP ^{2.4}	0.97	42	Fromard <i>et al.</i> (1998)
<i>Conocarpus erectus</i> L. (botoncillo)	Biomasa = 0.1023 x DAP ^{2.50}	0.97	10	Fromard <i>et al.</i> (1998)

Regeneración: En la parcela principal de 7 m de radio, se estimó el contenido de carbono de las plántulas de regeneración. Para realizar este cálculo, fue necesario cosechar una muestra aleatoria de plántulas (Kauffman *et al* 2013; Figura 6). Se tomó el peso fresco de las plántulas en el campo. Posteriormente se secaron en un horno y por diferencia se obtuvo la masa en seco. La biomasa de las plántulas se calculó multiplicando la densidad de individuos por la biomasa promedio, luego se pasó a MgC·ha⁻¹.

Madera caída_ Se midió utilizando la metodología del plano de intersección linear (Van Wagner 1968; Brown y Roussopoulos 1974), a lo largo de 4 transectos de medición de 12 m de longitud a partir del centro de la parcela y orientados a 45° respecto de la dirección principal del transecto (Figura 6). Se tomaron como madera caída, aquellas piezas con diámetro ≥ 7.5 cm a lo largo de todo el transecto. Las piezas con diámetro entre 7.5 – 2.5 cm se midieron a lo largo de 10 m sobre el transecto. También se tomó nota del estado de decaimiento de la madera: a) *duro*, si al tratar de golpear la madera con el machete este rebotaba o se hundía ligeramente; o b) *podrido*, si se hundía considerablemente o si la madera se deshacía al contacto (Kauffman *et al.* 2013). Para calcular el carbono almacenado en la madera caída, se calculó el volumen de las piezas, con la fórmula propuesta por Van Wagner (1968), se multiplico el resultado por la densidad de la madera para obtener la biomasa. Por último, el carbono se obtuvo al multiplicar por 0.48 la biomasa (Kauffman *et al* 2013), eso se transformó a MgC·ha⁻¹.

5.1.2.5 Cuantificación del componente subterráneo

Las muestras de suelo se extrajeron utilizando un barreno para suelo no consolidado, en un punto ubicado aleatoriamente dentro de la parcela de 2 m de radio. Según Kauffman *et al.*

(2013), los manglares tienen suelos orgánicos ricos en carbono que miden desde 0,50 metros hasta más de 3 metros. Recomiendan muestrear, por lo menos, los primeros 100 cm de suelo en sitios con suelos de más de un metro de profundidad. Por lo tanto, las profundidades de muestreo fueron: 0 – 15, 15 – 30, 30 – 50, 50 – 100 y hasta 200 cm. Las muestras por intervalo de profundidad fueron homogenizadas y se extrajo una submuestra que represente cada intervalo, esto disminuyó el esfuerzo a 5 muestras por transecto. En total se extrajeron 120 muestras. Al llegar al sitio elegido para muestrear, se insertó el nucleador hasta que la parte superior del estuviera al nivel del suelo. Luego lo rotamos en dirección de las manecillas del reloj para hacer los cortes, finalmente lo jalamos para obtener la muestra. Una vez que logramos obtener la muestra, se midió el tamaño del núcleo y las profundidades de donde se tomaron las muestras mencionadas anteriormente. (Kauffman *et al.* 2013)

Se tomó una muestra de 3 cm de largo del centro de cada intervalo de profundidad para determinar la densidad aparente del suelo. El material restante se homogenizó con el de las otras parcelas para tener una muestra compuesta para cada profundidad y por transecto. Posteriormente, las muestras se depositaron en bolsa de plástico y fueron trasladadas al laboratorio de suelos de CENGICAÑA, donde se determinó la densidad aparente. Las muestras para determinar el contenido de C fueron secadas a 60 °C para disminuir la actividad microbiana y luego, fueron llevadas al laboratorio analítico del CATIE para realizar los análisis del contenido de carbono total siguiendo los métodos de Nelson y Sommers (1996). Para calcular el carbono del suelo se multiplicó el contenido de carbono por el intervalo de profundidad y la densidad aparente correspondiente a ese intervalo. Luego, para obtener el carbono acumulado en el suelo hasta 100 cm y 200cm de profundidad, se sumaron las existencias parciales para todos los intervalos de profundidad muestreados. La suma de los componentes de carbono aéreo (árboles en pie, regeneración y madera caída) y del carbono acumulado en el suelo, constituyen la densidad de carbono en el área de conservación Sipacate-Naranjo. Al multiplicar la densidad de carbono por el área total del manglar se obtuvo las existencias de carbono a nivel de ecosistema. Los datos para todos los componentes se reportaron en $\text{Mg C} \cdot \text{ha}^{-1}$ (Megagramos de carbono por hectárea)

Existencias de carbono subterráneo en otros usos de la tierra en el área de conservación Sipacate-Naranjo, Guatemala, Centroamérica.

Las directrices del IPCC 2006 establece que para realizar un inventario de gases de efecto invernadero asociados al cambio de uso de la tierra, se deben conocer los datos de actividad y el factor de emisión (Ver capítulo 2). Por ende, fue necesario extraer muestras de suelo en los usos de la tierra que ejercen presión al manglar de la zona. El método para extraer las muestras fue similar al utilizado en mangle. Sin embargo, lo que difiere es la profundidad de muestreo, ya que, para los otros usos del suelo, se muestreo hasta 1 metro de

profundidad porque esta es la profundidad es la que se utiliza comúnmente en estudios para hacer comparaciones.

Factor de corrección al valor de densidad aparente

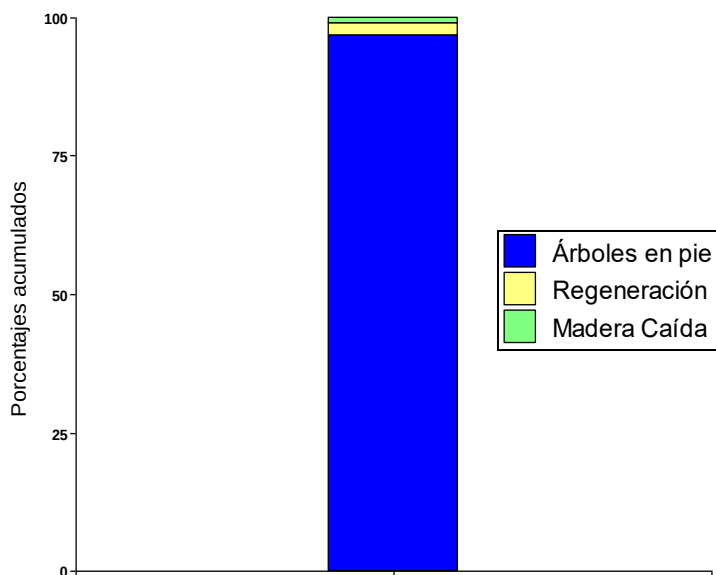
Se debe considerar que los resultados del contenido de carbono en el componente subterráneo tienen una fuente de sesgo que no fue posible cuantificar, debido a que las muestras destinadas para el cálculo de la densidad aparente fueron perturbadas, alterando la compactación y porosidad original de la muestra. Para minimizar el error, se calculó la desviación estándar de los valores de densidad aparente por intervalo de profundidad, luego cada desviación estándar se multiplico por valores reportados por el laboratorio de suelos. El cálculo permitió incluir la variabilidad existente por intervalo de profundidad y obtener un nuevo dato corregido para cada profundidad.

5.1.3 Resultados

5.1.3.1 Componente aéreo

En general, un 96.8% del carbono epigeo se encuentra almacenado en los arboles con dap > 5cm, mientras que solo un 2.3% y 1 % se encuentran almacenados en la regeneración y madera caída (Figura 7). La densidad promedio de carbono epigeo por componente fue; para árboles en pie $63.96 \pm 3.17 \text{ MgC} \cdot \text{ha}^{-1}$, para regeneración $1.49 \pm 0.14 \text{ MgC} \cdot \text{ha}^{-1}$ y madera caída 0.63 ± 0.08 La sumatoria de los tres componentes, nos demuestra que la densidad de carbono epigeo en el área de conservación Sipacate-Naranjo es de $66.08 \pm 3.39 \text{ MgC} \cdot \text{ha}^{-1}$. Los valores difieren en cuanto al sitio de muestreo, debido a las características biofísicas de cada punto (Cuadro 14 en anexos).

Figura 7: Densidad de carbono epigeo en el área de conservación Sipacate-Naranjo, Guatemala, Centroamérica.



5.1.3.2 Componente Subterráneo

La concentración de carbono (%) en el suelo mineral (Cuadro 15 en anexos), aumento en los puntos que se encuentran ubicados a la orilla del canal (zona central del área de conservación Sipacate-Naranjo; Figura 5) y disminuye en los bordes externos de la zona. Además, las concentraciones disminuyen significativamente ($p < 0.0001$) según el perfil del suelo. Se distinguieron cuatro grupos estadísticamente distintos (Cuadro 2). Hasta los 50 cm del perfil, las concentraciones disminuyen y son estadísticamente distintas, mientras que de 50 cm hasta los 200 cm estadísticamente no se encontraron diferencias.

Cuadro 2: Comparación de medias de la concentración de carbono por intervalo de profundidad en el área de conservación Sipacate-Naranjo, Guatemala, Centroamérica.

Profundidad (cm)	Medias	E.E.	
0-15	7.91	1.15	A
15-30	6.24	1.11	B
30-50	5.73	1.10	C
100-200	5.48	1.10	D
50-100	5.44	1.10	D

La densidad de carbono subterráneo almacenado en el área de conservación Sipacate-Naranjo aumenta según la profundidad del perfil del suelo (Cuadro 3). La densidad de carbono hasta 200 cm es de $422.1 \pm 68.51 \text{ MgC} \cdot \text{ha}^{-1}$. Del total de carbono, el 32.84% se encuentra hasta los 50 cm de profundidad y un 67.16% corresponde hasta los 200 cm.

Cuadro 3: Densidad de carbono por intervalo de profundidad en el área de conservación Sipacate-Naranjo, Guatemala, Centroamérica.

Profundidad	Carbono (Mg C ha^{-1})			n
0-15	48.9	±	6.65	24
15-30	41.38	±	6.55	24
30-50	48.33	±	8.61	24
50-100	103.8	±	18.24	24
100-200	179.7	±	28.46	24
	422.10	±	68.51	

Existencias de carbono subterráneo en otros usos de la tierra en el área de conservación Sipacate-Naranjo, Guatemala, Centroamérica.

La densidad de carbono subterráneo almacenado en manglar duplica y triplica a las densidades encontradas en los otros usos del suelo en área (Cuadro 4). Esto demuestra la importancia de los manglares como sumideros de carbono.

Cuadro 4: Densidades de carbono subterráneo en manglar y otros usos del suelo hasta un metro de profundidad en el área de conservación Sipacate-Naranjo, Guatemala, Centroamérica.

Cobertura	Carbono (MgC·ha ⁻¹)
Manglar	242.36
Salinera/camaronera	51.94
Caña	78.05
Pasto	106.33
Suelo desnudo	65.35

5.1.3.3 Existencias de carbono a nivel de ecosistema.

La densidad promedio de carbono a nivel de ecosistema es de 488.1 ± 71.90 MgC·ha⁻¹ (Cuadro 5). Los valores indican que los componentes más importantes a nivel de ecosistema son los árboles en pie con dap > 5 cm y el suelo hasta dos metros de profundidad. El suelo representa el 86.46% del total del ecosistema, mientras que los árboles en pie representan el 13% y en menor proporción la regeneración y madera caída con el 0.31 y 0.13%.

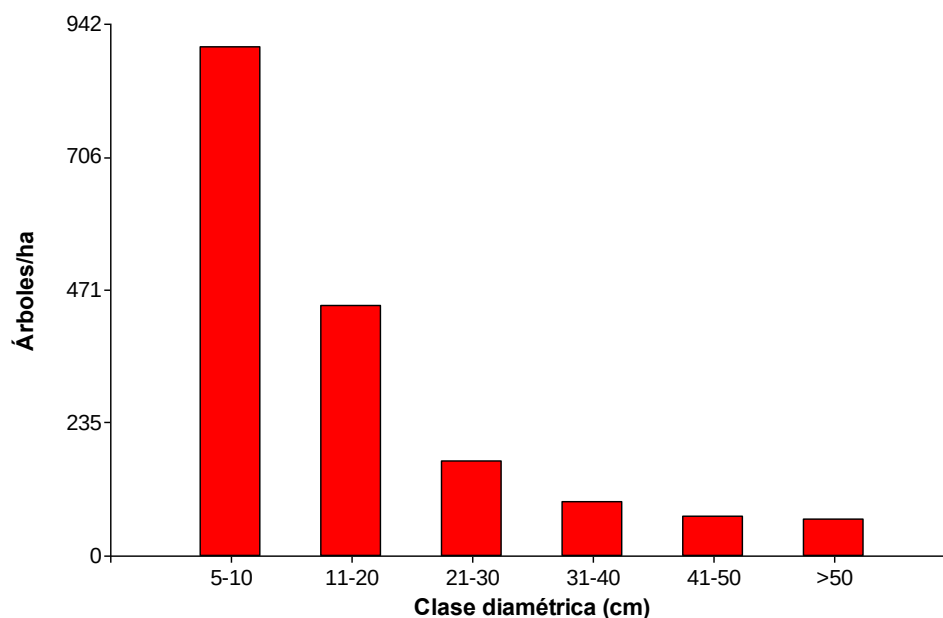
Cuadro 5: Existencias de carbono a nivel de ecosistema en el área de conservación Sipacate-Naranjo, Guatemala, Centroamérica.

Componente	Carbono (Mg C ha ⁻¹)
Árboles en pie	63.96 ± 3.17
Regeneración	1.49 ± 0.14
Madera caída	0.63 ± 0.08
Suelo	422.1 ± 68.51
C total del ecosistema	488.1 ± 71.90

5.1.3.4 Estructura horizontal y composición florística de manglar

Las especies de mangle más comunes encontradas en el área de conservación Sipacate-Naranjo fueron *Rhizophora mangle* y *Avicennia germinans*, con una dominancia y densidad relativa de 51.29% y 51.23%, y 33.36%, y 30.24%. En menor proporción *Laguncularia racemosa* y otras especies asociadas al manglar con una dominancia y densidad relativa de 11.96% y 14.24%, y 3.39% y 2.89% respectivamente. En general, en el bosque predominan árboles con un diámetro medio de 11.44 ± 0.61 cm. La media del área basal para la vegetación superior arriba de 5 cm de dap, fue de 18.28 ± 3.17 m² ha⁻¹. La media de la densidad de árboles presentes en el área es de $1,430 \pm 255$ ha⁻¹ (Cuadro 16 en anexos). La distribución por clase dimétrica en la zona identifica que hay más individuos en las clases dimétricas pequeñas y menos en las clases grandes (Figura 8).

Figura 8: Distribución por clase dimétrica del número de árboles por hectárea en el área de conservación Sipacate-Naranjo, Guatemala, Centroamérica.



5.1.4 Discusión y conclusiones

Este estudio fue el primero de su clase en Guatemala, la información generada ayudará a estimar de manera preliminar las reservas de carbono del manglar. Con esto, el país podría contar con información que permita considerar mejor a los manglares en estrategias actuales de mitigación, como REDD+ (Reducción de las Emisiones debidas a la Deforestación y Degradación) y los incentivos forestales ya establecidos en Guatemala. Además de tener información a escala local que permita reducir la incertidumbre en los inventarios de GEI que reporta el país con respecto a los factores de emisión, el cual se detalla en el artículo dos del documento.

En general, la densidad de carbono epigeo en el área de conservación Sipacate-Naranjo es de $66.08 \pm 3.39 \text{ MgC} \cdot \text{ha}^{-1}$ (rango: $10.92 - 230.04 \text{ Mg C ha}^{-1}$). La variabilidad de carbono entre sitios de muestreo se debe a la densidad y diámetro de los árboles. La densidad de árboles promedio es de $1,430 \pm 255$ (rango: $260 - 4,262 \text{ ha}^{-1}$) y el diámetro promedio es de 11.44 ± 0.61 (rango: $5 - 57.6 \text{ cm}$). Las distribuciones simétricas de los valores nos indican la heterogeneidad en los puntos de muestreo. Lo cual es evidente que la intrusión y mezcla de agua dulce y salada en el paisaje proveniente de la dinámica de las mareas y corrientes, el movimiento de sedimentos procedentes del Río Acomé y los zanjones que drenan hacia el manglar, producen un mosaico de condiciones morfológicas y fisiográficas que inciden sobre la variación en la estructura y tamaño de los manglares a largo del área de conservación Sipacate-Naranjo (Jiménez 1999). Aunque en este estudio no se midieron a detalle las variables antes mencionadas, para una próxima investigación se propone incluir

variables explicativas como la topografía del lugar, gradientes de salinidad para una discusión con menos incertidumbre. Sin embargo, la distribución por clase dimétrica (Figura 8), nos muestra que el bosque manglar de Sipacate-Naranjo presenta una curva de distribución de J invertida, con presencia de muchos individuos en las clases dimétricas pequeñas y pocos en las clases más grandes, esto nos sugiere que el manglar no está siendo intervenido para extracción de leña, al menos no de forma significativa y que tampoco existe efectos severos sobre la regeneración.

Varios estudios, a nivel regional, se han publicado, reconociendo la importancia del almacenamiento de carbono en los manglares, ofreciendo una oportunidad para comprar y analizar resultados entre sitios. La densidad de carbono epigeo en el área de conservación Sipacate-Naranjo tiene consistencia con otros resultados a nivel regional (Cuadro 6) y al promedio mundial de la biomasa aérea en manglares de $116.28 \text{ Mg C ha}^{-1}$ reportado por Alongi (2009). Aunque es evidente la variabilidad de los almacenes de carbono epigeo entre regiones, esto nos indica que hay diferentes tipos de estructuras vegetales (DAP, alturas, especies, densidades). Como por ejemplo en el estudio realizado en Honduras por Flores (2017), la densidad promedio de carbono epigeo fue de $145.84 \text{ Mg C ha}^{-1}$, con una densidad promedio de árboles de $2,158 \text{ ha}^{-1}$ y un área basal de $44.42 \text{ m}^2 \text{ ha}^{-1}$. Mientras que el estudio realizado por BIOMARCC et al. (2012) en Costa Rica, la densidad promedio de carbono epigeo fue de $72.52 \text{ Mg C ha}^{-1}$, con una densidad promedio de árboles de $1,154 \text{ ha}^{-1}$ y un área basal de $12.61 \text{ m}^2 \text{ ha}^{-1}$. En los manglares los diferentes tipos ecológicos son una expresión de la variabilidad de las condiciones ambientales, principalmente de clima, geomorfología, estresores, reguladores e hidroperíodo (Woodroffe, 1993; Twilley y Rivera, 2005; Jiménez 1999). Además de que se ven sometidos a diferente intensidad y magnitud de impactos, tanto naturales como antrópicos que afectan la composición de estos bosques. Sin embargo, esta aproximación y comparación nos demuestra que el manglar de Sipacate-Naranjo se encuentra entre los valores medios a nivel regional. Siendo una oportunidad para futuras investigaciones extenderse a explorar las otras áreas de mangle en Guatemala y así conocer las características y densidades de carbono de cada zona.

Cuadro 6: Densidad de carbono epigeo promedio reportado en diferentes sitios de Latinoamérica.

Densidad de C Mg C ha ⁻¹	Sitio	País	Fuente
145.84	Parque Nacional Blanca Jeannette Kawas	Honduras	Flores (2017)
136.30	Reserva de la Biosfera Sian Ka'an	México	Adame et al. (2013)
209.41	Parque Nacional Montecristo	República Dominicana	Kauffman et al. (2014)
215.00	Laguna Nichupté	México	Adame et al. (2015)
147.00	Parque Nacional Blanca Jeannette Kawas	Honduras	Bhomia et al. (2016)
72.52	Térraba-Sierpe	Costa Rica	BIOMARCC et al. (2012)
42.60	Golfo de Nicoya	Costa Rica	Cifuentes et al. (2014)
139.65	Pacífico sur	México	Herrera-Silveira et al (2016)
42.09	Pacífico Norte	México	Herrera-Silveira et al (2016)
101.75	Pacífico central	México	Herrera-Silveira et al (2016)
137.32	Golfo de México	México	Herrera-Silveira et al (2016)
46.78	Península de Yucatán	México	Herrera-Silveira et al (2016)

Según Ramírez (2016), el hidroperiodo en el área de conservación Sipacate-Naranjo dura tan solo unas horas y ocurre diariamente. Los niveles de agua van desde 0.01 metros hasta 1.50 metros. También indica que los niveles de agua son más altos en la parte central del lugar y va disminuyendo con forme se adentra al manglar. Las condiciones de inundación particulares en el ecosistema podrían explicar la variabilidad en las concentraciones de carbono entre sitios de muestreo. Es probable que en las áreas donde las condiciones de inundación son más frecuentes, el proceso de descomposición de material orgánico sea más bajo por las condiciones anaerobias, esto hace que su potencial de almacenamiento de carbono sea alto. Además, los sedimentos que son transportados por las mareas y el sistema aluvial del Río Acomé facilitan la acumulación de materia orgánica en el sustrato (carbono alóctono), el cual queda atrapado en las comunidades cercanas a la orilla del canal (Kanwar et al., 2003; Satrio et al., 2009; Hernández, 2010) citado por Muñiz *et al.* (2011).

La densidad de carbono subterráneo en el manglar hasta dos metros de profundidad fue de 422.10 Mg C ha⁻¹ y a un metro fue de 242.36 Mg C ha⁻¹. Los estimados de carbono en el manglar, demostraron que representa entre 3 a 4 veces más carbono que el medido en las salineras/camaroneras, suelo desnudo y caña, mientras que en los pastos dos veces más de carbono, probablemente por la biomasa aérea que acumulan. Los valores demuestran la importancia de los manglares como almacenadores de carbono.

En este estudio los componentes más importantes de las existencias de carbono a nivel de ecosistema fueron los suelos y los árboles; estos representan el 86.46% y 13%. Alongi (2014) menciona que la mayor parte de las reservas de carbono en los manglares se almacena en el suelo y el subsuelo, el cual representa el almacenamiento total más alto de carbono comparado con otros ecosistemas del trópico. El estudio realizado por Castellanos (2011), en los departamentos de Alta Verapaz y Baja Verapaz en Guatemala, estimó que en

bosques naturales de latifoliados, coníferas y mixtos, la densidad de carbono promedio a nivel de ecosistema es de 203.68 Mg C ha⁻¹ y que los componentes más importantes fueron los árboles y el suelo; estos representaron el 83% y 17% del total. Los resultados ratifican que los manglares acumulan mayor densidad de carbono en el suelo y subsuelo en comparación de un bosque terrestre. Por ende, la conversión del mangle a otros usos del suelo puede ocasionar que se emitan cantidades significativas de CO_{2e}, por ello, en el siguiente capítulo se analiza la dinámica del uso de la tierra en el área Sipacate-Naranjo y las emisiones asociadas a los cambios.

En este contexto, se evidencia que las evaluaciones en otras partes de la región destacan el papel de los manglares en el ciclo del carbono, principalmente como almacenes de carbono orgánico en los sedimentos y exportadores de carbono orgánico disuelto y particulado. Sin duda estos datos ayudan a estimar la contribución de los manglares, a escala local, regional y de país. Además, su buen manejo tiene el potencial de contribuir significativamente a mantener las reservas de carbono a través de los incentivos de programas de créditos de carbono si los mercados llegan a funcionar como se espera (Angelsen et al. 2010), al mismo tiempo que se preservan otros SE del manglar que benefician a las comunidades locales. Es importante reconocer que la extensión y distribución de los manglares ofrecen la oportunidad para formar grupos de investigadores a escala regional y abordar de forma consensuada y sistemática estudios bajo una estrategia metodológica interoperable el cual ayude a generar información para la región de Guatemala y Centroamérica.

Para finalizar, como seguimiento a esta línea de investigación, se propone ampliar el muestreo de carbono en el resto de manglares del país, especialmente en el litoral del Pacífico por tener el 94% de la cobertura del mangle de Guatemala. Además, para futuras experiencias en la medición de carbono en manglares, podría considerarse implementar transectos de mayor longitud, ya que actualmente el muestreo está sesgado hacia las áreas más cercanas al canal, esto hace que se desconozca si existe alguna variabilidad espacial dentro del manglar.

5.1.5 Referencias

- Alongi, DM. 2014. Carbon cycling and storage in mangrove forests Annual review of marine science 6:195-219.
- Alongi, DM. 2009. The energetics of mangrove forests. s.l. Springer Science & Business Media. 216 p.
- Brown, JK; Roussopoulos, PJ. 1974. Eliminating biases in the planar intersect method for estimating volumes of small fuels Forest science.
- BIOMARCC-SINAC-GIZ. 2012. Evaluación de carbono en el Humedal Nacional Térraba-Sierpe. San José, Costa Rica. 34 p.
- Castellanos, EJ. 2011. Elaboración del primer mapa nacional sobre el carbono capturado por plantaciones y bosques naturales de Guatemala. Guatemala. 76 p.
- CATHALAC. (2012). Cobertura actual de mangle en Guatemala, a través de técnicas de percepción remota. Panamá.
- CONAP (Consejo Nacional de Áreas Protegidas), GT. 2002. Informe técnico: Plan maestro 2002-2006 Parque Nacional Sipacate-Naranjo. Guatemala. 122 p.
- CONAP y MARN. 2009. Biodiversidad Marina de Guatemala: Análisis de Vacíos y Estrategias para su Conservación. Consejo Nacional de Áreas Protegidas, Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales, The Nature Conservancy. Guatemala. 152 p.
- Dittmar, T; Hertkorn, N; Kattner, G; Lara, RJ. 2006. Mangroves, a major source of dissolved organic carbon to the oceans Global biogeochemical cycles 20(1).
- Fromard, F; Puig, H; Mougin, E; Marty, G; Betoulle, J; Cadamuro, L. 1998. Structure, above-ground biomass and dynamics of mangrove ecosystems: new data from French Guiana Oecologia 115(1-2):39-53.
- Gitay, H; Suárez, A; Watson, R; Dokken, D. 2002. Cambio climático y biodiversidad Documento técnico V del IPCC:
- Herrera-Silveira, JA; Rico, AC; Pech, E; Pech, M; Ramírez-Ramírez, J; Teutli-Hernández, C. 2016. Dinámica del carbón (almacenes y flujos) en manglares de México REVISTA TERRA LATINOAMERICANA 34(1):61-72.
- Herrera Silveira, JA; Camacho Rico, A; Pech, E; Pech, M; Ramírez Ramírez, J; Teutli Hernández, C. 2016. Dinámica del carbono (almacenes y flujos) en manglares de México Terra Latinoamericana 34(1):
- Jiménez, JA. 1999. Ambiente, distribución y características estructurales en los manglares del Pacífico de Centro América: contrastes climáticos Ecosistemas de manglar en

- América Tropical. Instituto de Ecología, AC Xalapa México, UICN/ORMA Costa Rica, NOAA/NMFS Silver Spring MD EUA. p:51-70.
- Kauffman, JB; Donato, DC; Adame, MF. 2013. Protocolo para la medición, monitoreo y reporte de la estructura, biomasa y reservas de carbono de los manglares. CIFOR.
- Lozano Torres, Y. 2007. Los sumideros de carbono: Un análisis de la potencialidad económica en un bosque de manglar del Pacífico colombiano Ingeniería de Recursos Naturales y del Ambiente (6):
- MARN (Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales), GT. 2013. Informe técnico: Estudio de la cobertura de mangle en la República de Guatemala. Guatemala. 54 p.
- MARN (Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales), GT. 2013. Informe técnico: Estudio de la cobertura de mangle en la República de Guatemala. Guatemala. 54 p.
- Muñiz, JLM; Alarcón, MEH; Barceló, PM-C. 2011. Secuestro de carbono en suelos de humedales costeros de agua dulce en Veracruz [soil carbon sequestration in coastal freshwater wetlands of veracruz] Tropical and Subtropical Agroecosystems 13:365-372.
- Orihuela Belmonte, DE; Tovilla Hernández, C; M Vester, HF; Álvarez Legorreta, T. 2004. Flujo de materia en un manglar de la costa de Chiapas, México Madera y Bosques 10(Es2):
- PUIRNA (Programa Universitario de Investigación de Recursos Naturales y Medio Ambiente), GT. 2000. Bases ecológicas de las funcionalidades del ecosistema manglar del Pacífico de Guatemala. Guatemala: 79 p.
- Ramírez, M. 2016. Análisis de cobertura y flora asociada al ecosistema manglar en Sipacate-Naranjo, departamento de Escuintla, Guatemala, C.A. Tesis Lic. Guatemala, Universidad San Carlos de Guatemala. 184 p.
- SEGEPLAN (Secretaría de Planificación y Programación de la Presidencia, GT). 2010. Informe técnico: Plan de Desarrollo Municipal de la Gomera, Escuintla. Guatemala. 103 p.
- Twilley, R. R. and V. H. Rivera-Monroy. 2005. Developing performance measures of mangrove wetlands using simulation models of hydrology, nutrient biogeochemistry, and community dynamics. J. Coastal Res. 40: 79-93.
- Van Wagner, C. 1968. The line intersect method in forest fuel sampling Forest science 14(1):20-26.
- Woodroffe, C. D., 1992. Mangrove sediments and geomorphology. pp. 7-39. In: A. I. Robertson and D. M. Alongi (eds.). Tropical mangrove ecosystems. American Geophysical Union. doi: 10.1029/CE041p0007. Washington, DC, USA.

5.2 Artículo 2. Análisis de la dinámica histórica de la cobertura del bosque manglar, uso de la tierra y sus emisiones y remociones de carbono asociadas en el área de conservación Sipacate Naranjo, Guatemala, Centroamérica.

Resumen

En las últimas décadas, los avances tecnológicos han permitido desarrollar, actualizar y mejorar varios softwares para el análisis espacial del territorio. Esto sin duda ha contribuido a contar con herramientas suficientes para evaluar el estado actual de ocupación del territorio, así como prever su evolución futura. De la misma manera, la simulación de cambios de usos del suelo, deforestación, entre otros, proporciona una eficaz herramienta para el establecimiento o mejoramiento de políticas e implementación de acciones correctivas y de planificación territorial (Rubio *et al.* 2005; Pineda *et al.* 2009; Camacho *et al.* 2010). Aunque se ha documentado que los manglares del mundo están desapareciendo a una tasa anual de 1% a 2% (Duke *et al.* 2007), hay pocos estudios en este ámbito a escala local, especialmente en países como Guatemala. Según CONAP y MARN 2009, uno de los temas discutidos en relación con el manglar, ha sido el análisis de la pérdida de cobertura de este ecosistema, debido a que los pocos estudios que se tienen emplean diferentes metodologías, esto no permite establecer claramente el patrón de pérdida del manglar y su comparación. Según, MARN 2015 en la segunda comunicación nacional sobre Cambio Climático de Guatemala hacia la CMNUCC, estimó que el sector UTCUTS representa el 27% de las emisiones totales país y que los cambios del uso de la tierra que reportan mayor emisión son por la conversión de bosques a coberturas agrícolas de pequeña y gran escala.

Por la importancia que tiene cuantificar espacial y temporalmente la pérdida de cobertura de los ecosistemas y sus emisiones asociadas; en este estudio se estimó la extensión actual y la pérdida de la cobertura del manglar entre los periodos de 1990-2006 y 2006-2016. También se valoraron las emisiones de GEI asociadas a los cambios observados y, por último, se hizo una proyección de la cobertura manglar al 2030 tomando como base, las tendencias de pérdidas y ganancias observadas en el análisis multitemporal. En los periodos 1990-2006, 2006-2016, las principales transiciones de pérdidas en el manglar fueron a pastos, salinera/camaronera, suelo desnudo, cuerpos de agua y en menor proporción otros usos como caña, cultivos y otros. El balance indica que no hay pérdidas, ya que en ambos periodos las ganancias netas fueron de 163.95 ha (8.78 %) y 46.88 ha (2.31%) con respecto al área total de 1990 y 2006. En cuanto al balance de emisiones, las áreas de manglar que pasaron a otros usos generaron una emisión total hacia la atmosfera de 62,494.39 MgCO_{2e}. Esta pérdida fue compensada por una remoción bruta de carbono de 101,699.55 MgCO_{2e} por la recuperación del manglar en dicho periodo. Así, la remoción neta fue de 39,205.16 MgCO_{2e}. Por último, proyectamos que la cobertura del mangle al 2030 aumentará entre un 1.79% (37.26 ha) y 16.47% (342.19 ha) dependiendo del escenario propuesto.

Palabras clave: cambio de uso de suelo, análisis multitemporal, escenarios de cambio de cobertura.

5.2.1 Introducción

Los manglares son comunidades vegetales arbóreas o arbustivas asociadas a sistemas costeros que abarcan 137,760 km² de las costas tropicales y subtropicales en el mundo (Giri *et al.* 2011). Tienen un papel fundamental en la estabilidad climática, al ser los sumideros de carbono más eficientes en los trópicos; además, de sostener pesquerías y proteger las costas contra fenómenos hidrometeorológicos (Duke *et al.* 2007). A pesar de los numerosos servicios ambientales que proporcionan los manglares, se están perdiendo en tasas aceleradas a escala global. Entre 1980 y 2000 se perdió el 35% de los manglares del mundo (Valiela *et al.* 2001).

En Guatemala, según el Programa Universitario de Investigación de Recursos Naturales y Medio Ambiente -PUIRNA- menciona que desde 1965 a 1984 la tendencia de la cobertura del mangle en la costa pacífica va disminuyendo, principalmente en los años 70-80 se observan las mayores pérdidas que ascienden a 9180 ha (PUIRNA 2000). En el último informe nacional, se estima que la cobertura de mangle en la costa del Pacífico es de 17,670.56 ha (MARN 2013).

Entre las causas generales que generan cambios en un paisaje figuran aspectos de tipo:

- a) demográficos: incremento de población y patrones de asentamiento, procesos migratorios,
- b) económicos: cambios en las condiciones macro y micro económicas de un país o localidad, tendencia y acceso a los mercados, procesos de urbanización e industrialización,
- c) expansión de la frontera agrícola: aumento de los cultivos de la zona. (Pérez y Valenzuela 2006; Galicia *et al.* 2007)

Es por ello que la transición entre coberturas puede afectar el suelo, agua y atmósfera, ocasionando externalidades vinculadas directamente con aspectos ambientales de incidencia global (Jiménez 1999; García Rubio *et al.* 2005; Chen *et al.* 2013; Romero-Berny *et al.* 2016). Sin embargo, en el caso de los manglares su importancia reside en que de sus funciones ecológicas se derivan servicios económicos de importancia local, regional y mundial. Estos servicios van desde el uso de recursos para alimentación, combustible, medicina tradicional y la regulación de procesos inherentes al problema de cambio climático, como captura o almacenamiento de carbono. Los usos descritos desde el ámbito local presentan un trade off con los intereses regional y mundial en la medida que la sobreexplotación de este ecosistema incide sobre las funciones ambientales de interés global asociadas al cambio climático. La evaluación oportuna y precisa de los patrones de cambios en los ecosistemas permite no sólo conocer el impacto y sus causas específicas sino, además, su cuantificación. Además, se vuelve una herramienta para priorizar las áreas de restauración. En el presente estudio se realizó un análisis espacio-temporal de la dinámica del cambio de uso de suelo a nivel de paisaje en el área de conservación Sipacate-

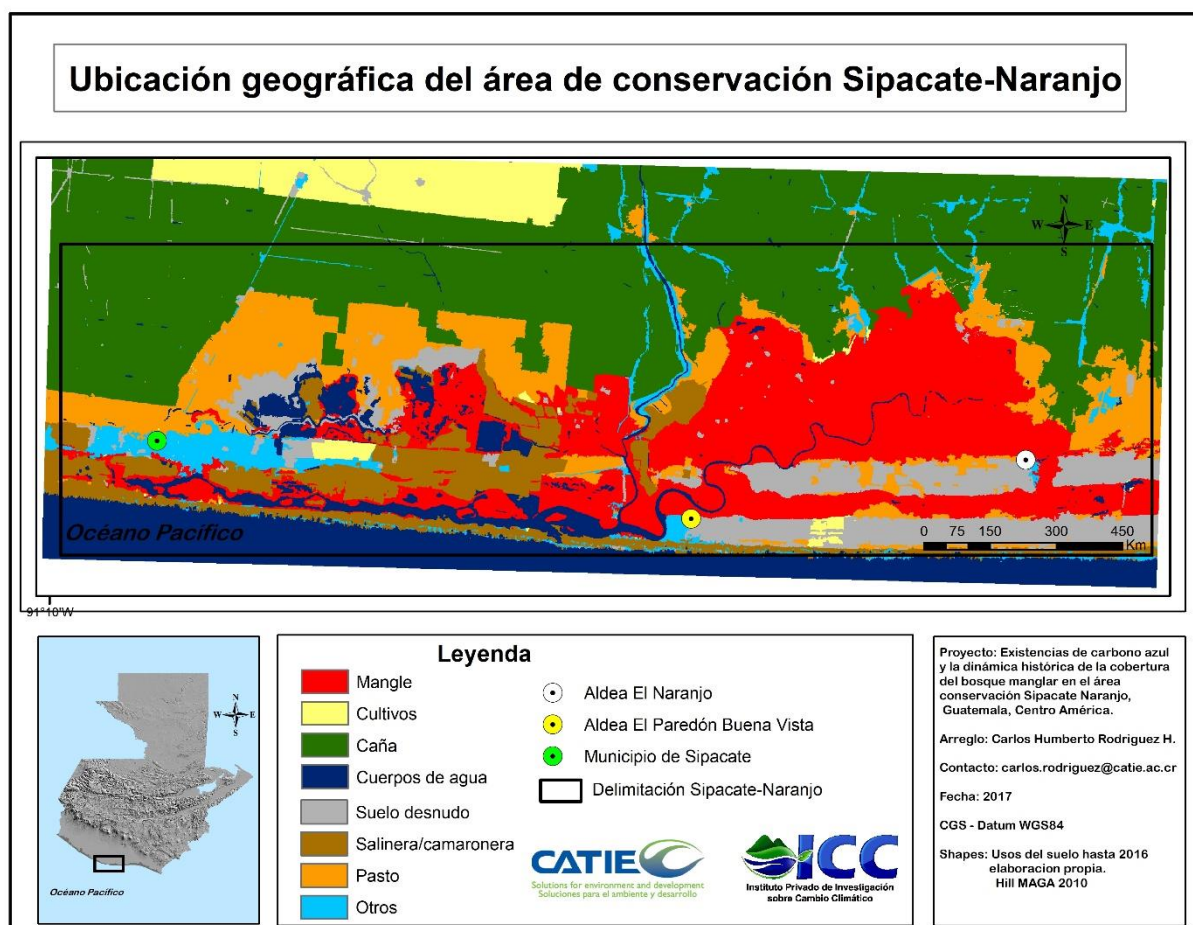
Naranjo con el objetivo de identificar las principales transiciones de mangle a otras coberturas y lo que representan las emisiones de CO_{2e} hacia la atmosfera con respecto a los cambios asociados.

5.2.2 Metodología

5.2.2.1 Área de estudio

El área de conservación Sipacate-Naranjo está ubicada en la zona litoral Pacífico de Guatemala, en las coordenadas geográficas 13°55'58.20" N y 91°3'0.43"W (Figura 9). Perteneció al municipio de Sipacate, departamento de Escuintla y cuenta con un área de 1,682.32 hectáreas (MARN, 2013). Es administrada por el Consejo Nacional de Áreas Protegidas (CONAP 2002). La región donde se ubica es de clima cálido que se caracteriza por dos estaciones, la época seca, se presenta en los meses de noviembre - abril, y la lluviosa de mayo-octubre. La temperatura promedio oscila entre 21.07 y 33.50 °C, la humedad relativa promedio es de 77.14% y la precipitación promedio anual es de 1,673.59 mm (INSIVUMEH citado por CONAP 2002).

Figura 9: Ubicación del área de conservación Sipacate-Naranjo, Guatemala, Centroamérica.



5.2.2.2 Análisis histórico de la cobertura del suelo

Para el análisis de cambio de cobertura del suelo en el área de conservación Sipacate-Naranjo se recolectaron y utilizaron los siguientes datos de imágenes:

- 1) Imagen de satélite Landsat 5 TM (*thematic mapper*) del año 1990 (Glovis USGS), con una resolución espacial de 30 metros.
- 2) Conjunto de 8 ortofotos del área de conservación Sipacate-Naranjo escala 1:10 000 tomadas en el año 2006 por el IGN.
- 3) Imagen de satélite RapidEye del año 2016 (BlackBrige), con una resolución de 5 metros.

Pre-procesamiento de los datos

El componente espectral de la imagen Rapideye fue restablecido mediante el uso de la herramienta *Calibration Utilities* del programa ENVI 5.3. La parte espacial fue corregida mediante la herramienta *Geometric Correction* del programa ERDAS 9.1 y la imagen se volvió a georreferenciar al sistema Universal Transverse Mercator (zona 16N), CGS Datum WGS84. Finalmente, la escena se recortó usando una máscara de aproximadamente 17.65 Km de largo por 6.5 Km de alto, a partir de la línea costera para obtener el área de paisaje para el análisis.

Clasificación de imágenes y detección de cambios de cobertura de la tierra en el área de influencia del área de conservación Sipacate-Naranjo.

Para delimitar la cobertura del mangle y otros usos del suelo alrededor del área de conservación Sipacate-Naranjo se utilizó como año base la imagen RapidEye del año 2016. Para clasificar la imagen se aplicó el método denominado Feature extraction (ENVI 5.3). Ese algoritmo permitió reconocer objetos a partir de características espaciales, espectrales y texturales de la imagen y diferenciar visualmente la cobertura de mangle de otros tipos de vegetación. Se utilizó la combinación de bandas de la imagen satelitales infrarrojo cercano/ infrarrojo medio /rojo. Para resaltar las áreas con mangle y otras coberturas, ya que cada cobertura ofrece un comportamiento espectral típico, por el comportamiento de la absorción o reflectancia de energía en el espectro electromagnético de los diferentes tipos de coberturas.

La capa resultante se sometió a un control visual para asegurar que las coberturas que reconoció el programa (ENVI 5.3) coincidieran con las que se observan en la imagen RapidEye. El procedimiento fue colocar de base la imagen RapidEye y sobreponer la capa que resultó de la clasificación. Para las áreas que no coincidieron, se editó la categoría original y se le asignó el valor de la categoría a la que pertenece. Al final, se obtuvo el mapa corregido de las coberturas para el año 2016, que se utilizó como base para identificar

los cambios en las ortofotos del año 2006 y la imagen Landsat de 1990. Teniendo el polígono de coberturas del 2016, se sobrepuso con las ortofotos del 2006, donde se realizó un proceso de fotointerpretación y digitalización de las imágenes a escala 1:7 000 en las ortofotos y 1:15 000 en la imagen Landsat, donde se editaron los cambios tanto de forma de polígonos, como la aparición o desaparición de los mismos. El proceso se repitió para la imagen de 1990. En esta fase de clasificación y fotointerpretación/digitalización se obtuvieron los mapas del uso del suelo para los años 1990, 2006 y 2016 para determinar los cambios de la cobertura del suelo en los periodos en estudio.

Para estimar la dirección, magnitud y distribución espacial de los cambios de cobertura del suelo, se utilizó el software IDRISI Selva, modulo Land Change Modeler (LCM) los resultados se expresaron en términos relativos y absolutos, según los cambios o la persistencia de superficie asociados a las transiciones observadas. Por último, las distribuciones espaciales de los cambios identificaron las zonas donde han sucedido los cambios, o mantenido los usos durante los periodos de análisis.

5.2.2.3 Inventario de emisiones/remociones de GEI asociados a los cambios de cobertura del suelo en el área de conservación Sipacate-Naranjo, Guatemala, Centroamérica.

Para realizar un inventario de gases de efecto invernadero, según Hewson *et al* 2014 se necesita conocer los datos de actividad y el factor de emisión. Los datos de actividad representan la dinámica de cómo cambian o persisten las coberturas entre dos fechas y el factor de emisión se refiere a la diferencia entre las existencias de carbono en las coberturas identificadas con la cobertura de referencia. Para generar el inventario de gases de efecto invernadero en el área de conservación Sipacate-Naranjo, se utilizó la directriz del IPCC 2006. Según el nivel de complejidad conocidos como “niveles (tiers)” el inventario se realizó bajo un nivel tres, debido a que la información proviene de métodos realizados en la presente investigación y no de información secundaria, lo que nos da un nivel de mayor exactitud y menor incertidumbre. Los datos de actividad se presentan bajo un enfoque nivel tres, ya que la información de conversión de uso la tierra espacialmente explícita, fue obtenida mediante técnicas de mapeo con sensores remotos. El factor de emisión fue determinado directamente en campo mediante la metodología descrita en el artículo uno. Por último, el método utilizado para estimar las emisiones y absorciones de GEI fue por el método de ganancias y pérdidas, el cual permite estimar las emisiones identificando el área de cambio de un tipo de cobertura a otro y las diferencias en las reservas entre esos dos tipos por unidad de área. Aunque los datos de carbono en el suelo mencionados en el artículo uno, produjeron estimados hasta los 2 m de profundidad, los datos utilizados en el inventario de emisiones se presentan hasta 1m de profundidad porque esta es la profundidad es la que se utiliza comúnmente en estudios para hacer comparaciones. Los

valores de carbono se convirtieron a dióxido de carbono equivalente (CO_{2e}) multiplicando por el factor 3,67. (Penman et al. 2003)

5.2.2.4 Escenario de cambio de la cobertura del manglar al 2030 y las emisiones asociadas.

Para la modelación del escenario tendencial al 2030 de la cobertura del mangle, se utilizó el software IDRISI Selva (módulo CA_Markov). Esta función se basa en la función Markov que permite el cálculo de las matrices de probabilidades de transición (Cuadro 19 al 23 en anexos), permite integrar la modelización temporal basándose en un análisis cronológico de la ocupación del suelo con la adición de la lógica basada en la evaluación multicriterio y multiobjetivo (mediante la puesta en relación de las categorías de usos del suelo y un conjunto de variables de diversa naturaleza que pueden explicar o describir su dinámica). Con esto, se complementa el análisis multitemporal con el análisis multivariable para obtener una modelización más ajustada a la dinámica real de los paisajes. Además, la herramienta incorpora un algoritmo de automatismo celular que mide la contigüidad local e incrementa la probabilidad de un uso o categoría de pertenecer a una nueva categoría por vecindad (Cuadro 18) es decir, los modelos asumen explícitamente que las áreas vecinas influyen en la probabilidad de transición del área o celda central (Paegelow *et al.* 2003; García Rubio *et al.* 2005; Almeida *et al.* 2009; Olmedo *et al.* 2010; Gómez-Brito *et al.* 2012).

Los escenarios se crearon a partir de las pérdidas y ganancias de mangle observadas en el periodo 1990-2006 y 2006-2016 (Cuadro 17 en anexos). Únicamente se consideró la transición de manglar a otros usos y viceversa, por ser el objeto de estudio. Al modelo se le agregó variables explicativas del cambio (driving forces). En este caso se hizo uso de la distancia a centros poblados, distancia a carreteras y una capa de la evidencia de probabilidad de los usos del 200. La capa se crea al conocer la frecuencia de cambio de un uso determinado sobre las áreas en transición en el periodo 2006- 2016, y la probabilidad de cambio de este sobre el resto de mapa como si fuera sujeto de transición en su totalidad.

5.2.3 Resultados

El área del paisaje para el estudio lo conforman 11,466.66 hectáreas, donde se observaron 8 categorías de coberturas distintas (Cuadro 7). En esta área, se identificó que la caña comprende el doble de extensión que el mangle, cuerpos de agua y los pastos. Estas categorías representan el 78.21% del área total. El suelo desnudo, salineras/camaroneras, cultivos y otros representan el 21.79% del área.

Cuadro 7: Coberturas del suelo encontradas en el 2016 con un área del paisaje de 11,466.46 hectáreas en el área de conservación Sipacate-Naranjo, Guatemala.

Cobertura	Hectáreas	%
Caña	4,284.07	37.36
Mangle	2,078.28	18.12
Cuerpos de agua (CA)	1,386.79	12.09
Pasto	1,220.53	10.64
Suelo desnudo (SD)	795.00	6.93
Salinera/Camaronera (SC)	779.12	6.79
Cultivos	505.65	4.41
Otros	417.03	3.64
	11,466.46	100

5.2.3.1 Dinámica de la cobertura del suelo con un área de paisaje de 11,466.46 ha en el área de conservación Sipacate-Naranjo, Guatemala, Centroamérica.

El área de mangle durante el periodo de análisis 1990-2016 pasó de 1,867.45 ha en 1990 a las 2,078.28 ha actuales (Cuadro 8). Es decir, el balance para mangle ha sido positivo ya que se tuvo una ganancia neta de 11.28% del área total del manglar con respecto a 1990. En el periodo 1990-2006 (Cuadro 8), coberturas como caña, salinera/camaronera, cultivos y otros, tuvieron considerables ganancias, sin embargo, la que tuvo mayor expansión fueron los cultivos con un incremento del 123.59% con respecto a 1990. Las coberturas que tuvieron considerables pérdidas fueron los pastos y suelo desnudo en un 19.97% y 37.82%, mientras que los cuerpos de agua tuvieron pérdidas en un 5.97%.

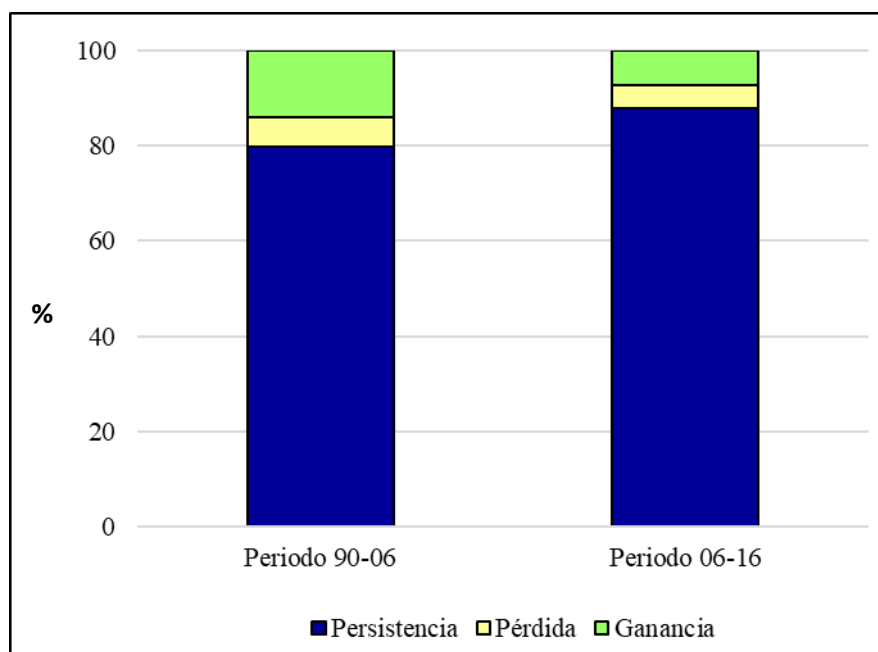
Cuadro 8: Cobertura del suelo y cambio neto del área entre periodos en el área de conservación Sipacate-Naranjo, Guatemala, Centroamérica.

Cobertura	1990 ha	2006 ha	2016 ha	Cambio neto 90-06	Cambio neto 06-16
Mangle	1,867.45	2,031.40	2,078.28	163.95	46.88
Caña	4,154.06	4,571.85	4,284.07	417.78	-287.78
Cuerpos de agua (CA)	1,461.91	1,374.62	1,386.79	-87.30	12.17
Pasto	1,734.89	1,388.35	1,220.53	-346.54	-167.82
Suelo desnudo (SD)	1,233.68	767.13	795.00	-446.55	27.87
Salinera/Camaronera (SC)	634.85	854.49	779.12	219.64	-75.37
Cultivos	30.25	67.64	505.65	37.39	438.02
Otros	329.37	411.00	417.03	81.63	6.03
	11,446.46	11,466.46	11,466.46		

En el periodo 2006-2016 (Cuadro 8) los cuerpos de agua, suelo desnudo y otros, tuvieron un leve incremento en cuanto a su área, sin embargo, los cultivos se incrementaron un poco más de seis veces con respecto al 2006. Para este mismo periodo, las pérdidas se reflejan en los cuerpos de agua (5.09%), en los pastos (32.06%) y el suelo desnudo (34.19%). A pesar de que el balance neto favorece al manglar con ganancia/estabilidad, se encuentra sujeto a presiones como el avance de la frontera agrícola, aprovechamiento de madera/leña entre otros, el cual se consideran pérdidas en la cobertura manglar. Por ende, la identificación de la dinámica de cambio es de mucha importancia para que las autoridades e instituciones que trabajan en beneficio del bosque manglar concentren sus acciones y ayude al recuperar el área.

Entre 1990 y 2006 el área de mangle persistió en un 79.75% y entre 2006-2016 persistió el 87.94% (Figura 10). El resto de las persistencias lo representan transiciones de manglar a otras coberturas del suelo o viceversa. En el primer periodo el 6.37% de las transiciones fueron pérdidas de manglar, mientras que el 13.89% fueron ganancias. En el segundo periodo, la pérdida del manglar fue de 4.96% y la ganancia fue de 7.10% del total de las transiciones. La tendencia indica que, para el segundo periodo, el manglar se ha mantenido estable, a pesar de las intervenciones antropogénicas que sufre la zona.

Figura 10: Relación porcentual entre la pérdida, persistencia y ganancia de mangle para los periodos 1990-2006 y 2006-2016 en el área de conservación Sipacate-Naranjo, Guatemala, Centroamérica.



Los cambios en la cobertura de mangle se observaron espacialmente en áreas específicas a lo largo del área de conservación Sipacate-Naranjo (Figura 11). En general, en los dos periodos las mayores pérdidas se observaron en el sector este y oeste del área; en menor

proporción se ven parches de pérdidas en el sector central del área. Las ganancias, en el periodo 1990-2006 se observó que se dieron en dirección norte y oeste. Entre 2006 y 2016 las mayores ganancias se observaron en dirección al oeste de la zona. La dinámica de pérdidas y ganancias en los dos periodos se dieron generalmente en los bordes externos del manglar, es posible que por la expansión entre coberturas o por la regeneración natural de la vegetación.

En general, en los dos periodos se detectaron procesos de pérdida y ganancia hacia/desde otros usos de suelo (Cuadro 17 en anexos). Los usos del suelo que más aportan a la ganancia del mangle son los pastos, suelo desnudo, cuerpos de agua y salinera/camaronera y las que menos aportan es la caña, cultivos y otros. Las transiciones que más aportan a la pérdida del manglar son la expansión de los pastos, salineras/camaroneras, suelo desnudo, cuerpos de agua y caña, y las que menos aportan son los cultivos y otros. Sin embargo, en los dos periodos se observa que la principal pérdida de la cobertura de mangle se da entre la transición a pasto. Esta transición representa el 42.83% para el primer periodo y el 46.95% para el segundo periodo. La relación entre las pérdidas y ganancias (Figura 12) favorecen a la cobertura de mangle, debido a que el balance neto es positivo. En el primer periodo la ganancia neta fue de 163.95 ha y para el segundo periodo fue de 46.88 ha.

Figura 11: Ubicación espacial de los cambios y persistencias del manglar en los dos periodos evaluados en el área de conservación Sipacate-Naranjo.

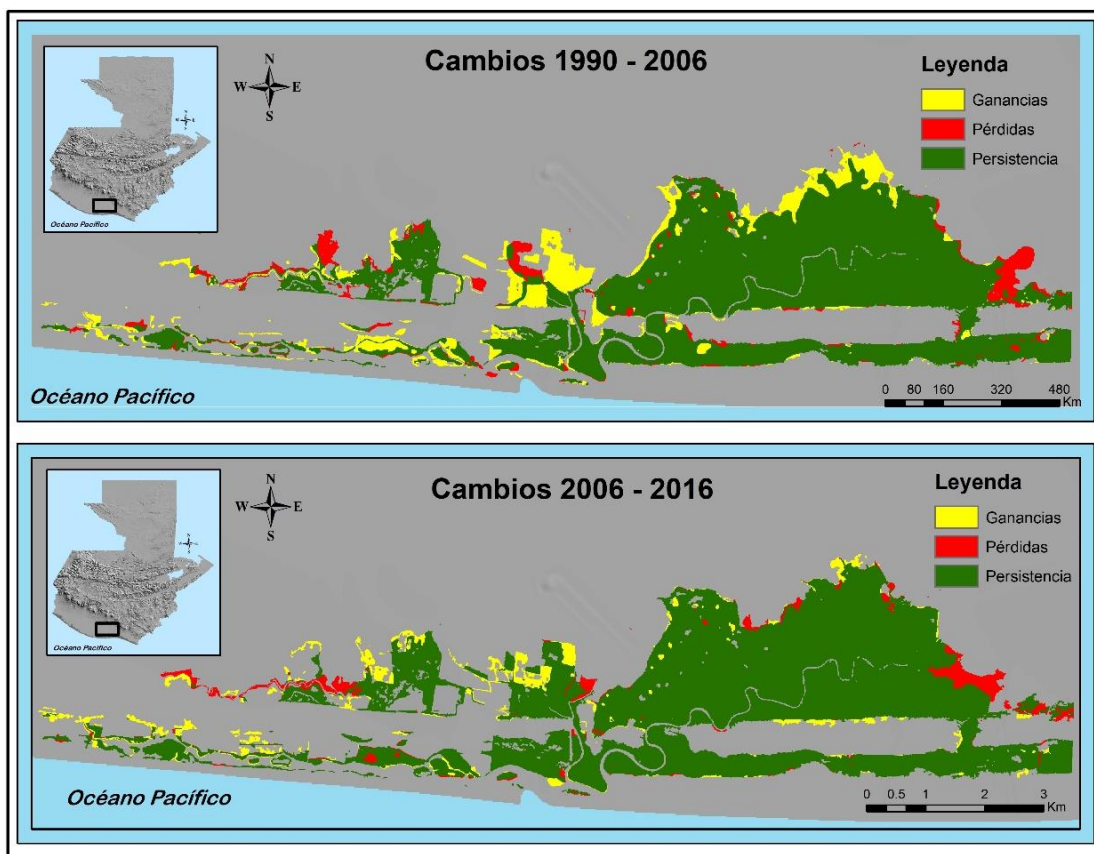
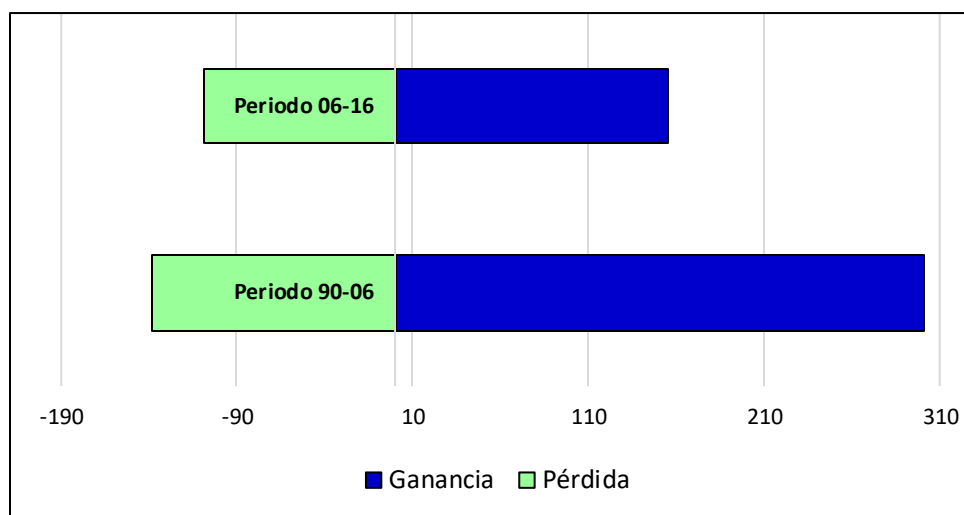


Figura 12: Relación de pérdida y ganancia de la cobertura del mangle en el área de conservación Sipacate-Naranjo, Guatemala Centroamérica.



5.2.3.2 Flujos históricos de emisiones:

Las existencias de carbono se determinaron directamente en campo, detallado en el capítulo uno del presente documento (Cuadro 9).

Cobertura	Total MgC·ha ⁻¹
Mangle	242.36 ± 40.05
Salinera/camaronera	51.94 ± 12.26
Caña	78.09 ± 11.05
Pasto	106.33 ± 13.63
Suelo desnudo	65.38 ± 9.35

Cuadro 9: Existencias de carbono hasta 1 m de profundidad para las coberturas analizadas en el área de conservación Sipacate-Naranjo, Guatemala, Centroamérica.

En el área de estudio se estimó que hay almacenado 3,891,882.75 toneladas de CO_{2e} (Cuadro 10). Del total de CO_{2e} almacenado, el 47.50% corresponden al carbono almacenado en los manglares de Sipacate-Naranjo, el 31.55% en la caña, el 12.24% en los pastos, el 4.90% en los suelos desnudos y el 3.38% en las salineras/camaroneras. Con estos datos, se resalta la importancia de los manglares como depósitos de carbono a nivel local y de todo el paisaje del área de conservación Sipacate-Naranjo.

Cuadro 10: Carbono almacenado en las coberturas de suelo identificadas en un área del paisaje de 11,466.46 ha en el área de conservación Sipacate-Naranjo Guatemala, Centroamérica.

Cobertura	Área (ha)	Carbono (MgC·ha ⁻¹)	Carbono total (Mg C)	Carbono total (Mg CO _{2e})
Manglar	2,078.28	242.36	503,691.94	1,848,549.42
Salinera/camaronera	779.12	51.94	40,467.49	148,515.70
Caña	4,284.07	78.09	334,543.03	1,227,772.91
Pasto	1,220.53	106.33	129,778.95	476,288.76
Suelo desnudo	795.00	65.38	51,977.10	190,755.96
Total	9,157.00*		1,060,458.51	3,891,882.75

Nota: * La discrepancia con el cuadro 7 en cuanto al área total se debe a que el cuadro 9 no se incluyeron las áreas de cuerpos de agua, cultivos y otros.

Entre los años 1990 y 2016 se observó que las áreas de manglar que pasaron a otros usos del suelo como; pasto, salinera/camaronera, suelo desnudo, caña y cultivos, emitieron a la atmosfera un total de 110,932.76 MgCO_{2e}. Sin embargo, la pérdida fue compensada por una remoción de carbono de 198,324.61 MgCO_{2e}. La remoción neta fue de 87,391.85 MgCO_{2e} (Cuadro 11) producto de la recuperación del área de mangle para el mismo periodo. En general, al analizar los periodos 1990-2006 y 2006-2016 (Cuadro11), en el primer periodo las remociones fueron mayores con respecto al segundo. Con estos datos se asume que para el segundo periodo la dinámica en el manglar ha sido estable.

Cuadro 11: Balance de emisiones/remociones (Mg CO_{2e}) en la dinámica de cambio de uso del suelo a partir del manglar en los periodos de 1990-2006 y 2006-2016 en el área de conservación Sipacate-Naranjo Guatemala, Centroamérica.

Periodo 1990-2006			
Cobertura	Emisión	Remoción	Balance neto Mg CO _{2e}
Salinera/camaronera	-17,652.73	23,767.60	6,114.86
Caña	-186.89	596.84	409.95
Pasto	-29,524.47	54,780.52	25,256.05
Suelo desnudo	-16,257.40	51,383.26	35,125.86
	-63,621.49	130,528.22	66,906.72
Periodo 2006-2016			
Cobertura	Emisión	Remoción	Balance neto Mg CO _{2e}
Salinera/camaronera	-3,340.46	29,910.41	26,569.95
Caña	-8,229.19	1,036.94	-7,192.25
Pasto	-25,420.80	26,359.35	938.55
Suelo desnudo	-10,320.82	10,489.69	168.87
	-47,311.27	67,796.39	20,485.13
Total	-110,932.76	198,324.61	87,391.85

5.2.3.3 Escenarios de cambio de la cobertura del manglar al 2030.

Las coberturas que ocuparán mayor área a nivel de paisaje al 2030 será la caña, mangle, cultivos y cuerpos de agua, y los que ocuparán una menor área serán los pastos, suelo desnudo, salinera/camaronera y otros (Cuadro 12). Un aspecto relevante para el 2030 es que en los cuatro escenarios se observa una expansión promedio de 217.46 % de los cultivos. En el 2016 las coberturas que ocupan la mayor área del paisaje es la caña, mangle, pastos y cuerpos de agua. La proyección indica que, al expandirse los cultivos a tal magnitud, será una de las principales categorías a nivel de paisaje, desplazando a los pastos con respecto al área que ocupa en el 2016.

Los escenarios 1 y 2, se elaboraron a partir de la tendencia de pérdidas que tuvo el mangle en los periodos 1990-2006 y 2006-2016. En función a esto, el módulo CA_Markov estima que para el escenario 1 el mangle va aumentar un 10.30% (214.12 ha) y en el escenario 2 un 1.79% (37.26 ha) al 2030 con respecto al área del 2016 (Cuadro 12). Los escenarios 3 y 4 fueron elaborados a partir de las tendencias de ganancias que tuvo el mangle en los periodos mencionados con anterioridad. En este caso, se estima que la cobertura del mangle en el escenario 3 aumente un 16.47% (342.19 ha) y el escenario 4 aumenta un 15.50% (322.21 ha).

A nivel general, los cuatro escenarios estiman que coberturas como la caña, pastos, suelo desnudo y las camaroneras/salineras, disminuirán su cobertura al 2030 con respecto al área del 2016 (Cuadro 13). Las disminuciones de la cobertura ascienden a un 18.11% para caña, 31.33% para pastos, 6.06% para suelo desnudos y 23.97% para salineras/camaroneras.

Cuadro 12: Distribución relativa y absoluta del uso del suelo en el área de conservación Sipacate-Naranjo en el 2030 para cada escenario.

Cobertura	Escenario 1	%	Escenario 2	%	Escenario 3	%	Escenario 4	%
Mangle	2,292.40	19.99	2,115.55	18.45	2,420.47	21.11	2,400.49	20.93
Caña	3,525.52	30.75	3,524.69	30.74	3,480.21	30.35	3,501.76	30.54
CA	1,417.02	12.36	1,462.70	12.76	1,312.22	11.44	1,313.74	11.46
Pastos	755.81	6.59	847.30	7.39	879.93	7.67	869.41	7.58
SD	717.34	6.26	773.19	6.74	741.31	6.47	755.32	6.59
SC	618.03	5.39	608.93	5.31	573.67	5.00	568.83	4.96
Cultivos	1,631.25	14.23	1,631.47	14.23	1,576.12	13.75	1,582.09	13.80
Otros	509.10	4.44	502.62	4.38	482.52	4.21	474.83	4.14
	11,466.46	100	11,466.46	100	11,466.46	100	11,466.46	100

Salinera/Camaronera (SC), Suelo Desnudo (SD), Cuerpos de Agua (CA).

Cuadro 13: Cambio relativo y absoluto por cada escenario al 2030 en función de la cobertura del 2016.

Cobertura	Escenario 1	%	Escenario 2	%	Escenario 3	%	Escenario 4	%
Mangle	214.12	10.30	37.26	1.79	342.19	16.47	322.21	15.50
Caña	-758.54	-17.71	-759.37	-17.73	-803.86	-18.76	-782.31	-18.26
CA	30.23	2.18	75.91	5.47	-74.56	-5.38	-73.05	-5.27
Pastos	-464.73	-38.08	-373.23	-30.58	-340.60	-27.91	-351.13	-28.77
SD	-77.66	-9.77	-21.80	-2.74	-53.69	-6.75	-39.68	-4.99
SC	-161.09	-20.68	-170.19	-21.84	-205.45	-26.37	-210.29	-26.99
Cultivos	1,125.60	222.60	1,125.82	222.65	1,070.47	211.70	1,076.44	212.88
Otros	92.07	22.08	85.59	20.52	65.49	15.70	57.80	13.86

Salinera/Camaronera (SC), Suelo Desnudo (SD), Cuerpos de Agua (CA).

En general, los escenarios muestran que las pérdidas de manglar se darán en el sector norte y oeste del área (Figura 13 y 14). Sin embargo, se observa que los escenarios que consideran una mayor pérdida es el escenario 1 (44.18 ha) y escenario 2 (38.07 ha), mientras que el escenario 3 considera una pérdida de (5.43 ha) y el escenario 4 (5.17 ha) hacia el 2030.

Figura 13: Ubicación espacial de las pérdidas y ganancias del manglar proyectados al 2030 en el área de conservación Sipacate-Naranjo bajo los escenarios 1 y 2.

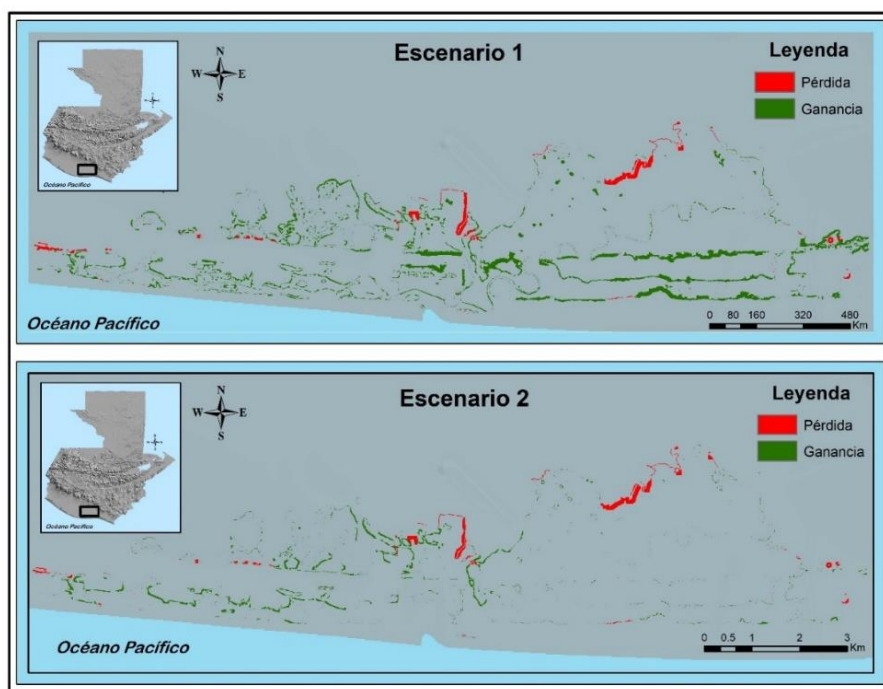
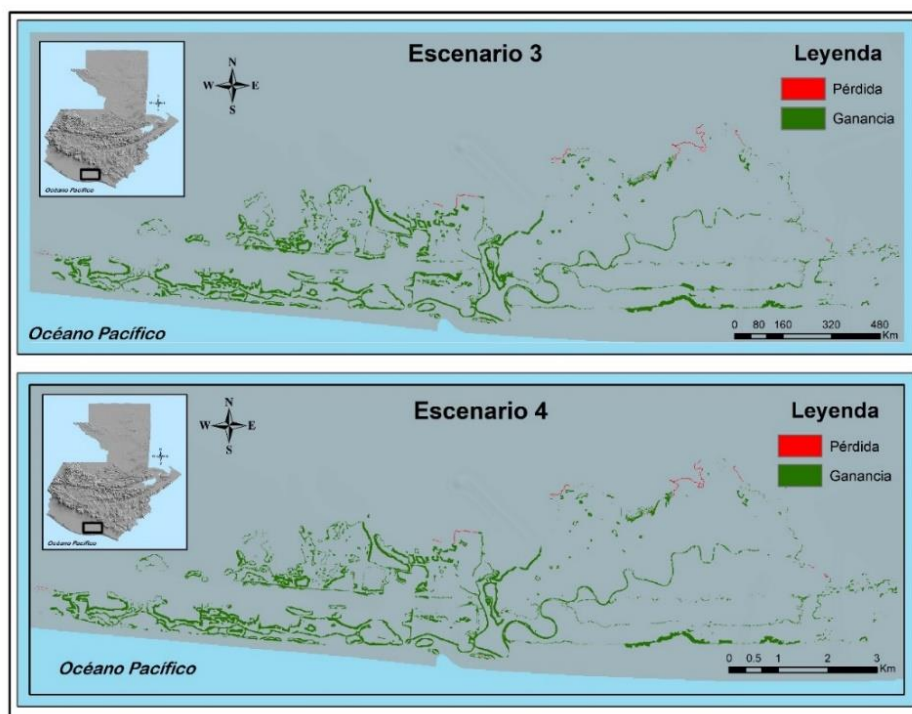


Figura 14: Ubicación espacial de las pérdidas y ganancias del manglar proyectados al 2030 en el área de conservación Sipacate-Naranjo bajo los escenarios 3 y 4.



Las ganancias de la cobertura de mangle se observan agrupadas espacialmente en toda el área bajo los diferentes escenarios. Los que consideran una mayor ganancia son los escenarios 3 y 4 con 347.62 ha y 327.38 ha. Los escenarios 1 y 2 consideran una ganancia de 258.3 ha y 75.93 ha. Las principales ganancias provienen de la transición de pastos, suelo desnudo, salinera/camaronera y cuerpos de agua.

5.2.4 Discusión y conclusiones

A nivel general, el análisis multitemporal indica que en el área de conservación Sipacate-Naranjo el balance de pérdidas/ganancias de la cobertura del mangle ha sido positivo, debido que en el periodo 1990-2006 la ganancia neta fue de 163.95 ha (8.38%) y en el periodo de 2006-2016 fue de 46.88 ha (2.31%). Sin embargo, el proceso subyacente de pérdidas para el primer periodo fue de 138.06 ha, a una tasa anual de 8.62 ha/año y en el segundo periodo fue de 108.43 ha, a una tasa anual de 10.84 ha/año. Según el Instituto de Agricultura, Recursos Naturales y Ambiente de la Universidad Rafael Landívar -IARNA, URL- La tasa de deforestación bruta Guatemala para el período 2006-2010 fue de 132,137 hectáreas anuales o un 1% de pérdida anual con respecto al área del 2006. La pérdida de bosque se ha dado principalmente sobre los bosques latifoliados, seguido por los bosques mixtos, de coníferas y mangle (IARNA, URL 2012). En el caso de Sipacate Naranjo, la pérdida anual está por debajo de la media nacional, porque en el primer periodo la tasa

anual fue de 0.46% y en el segundo periodo de 0.53%, sin embargo, no se deben escatimar esfuerzos para evitar la deforestación en la zona.

Se observó que las mayores pérdidas de la cobertura del mangle en los periodos analizados se localizaron en el sector este y oeste del área. Mientras que las menores pérdidas se observaron en el sector centro. Según Carr 2008, menciona que la deforestación en Guatemala tiene tres factores principales: expansión agrícola, extracción de madera y leña, y desarrollo de infraestructura. En el caso de Sipacate-Naranjo, las principales transiciones de pérdidas en el manglar fueron a pastos, salinera/camaronera, suelo desnudo, cuerpos de agua y en menor proporción a caña, cultivos y otros. Es evidente que el principal factor de pérdida de cobertura del mangle en el área Sipacate-Naranjo se debe a la expansión agrícola, además que el análisis por clase dimétrica nos muestra que el bosque manglar presenta una curva de distribución de J invertida, con presencia de muchos individuos en las clases dimétricas pequeñas y pocos en las clases más grandes, esto nos sugiere que el manglar no está siendo intervenido para extracción de leña, al menos no de forma significativa y que tampoco existe efectos severos sobre la regeneración.

Una de las variables importantes para el cambio de uso del suelo, se debe a los derechos de posesión de la tierra (IARNA, URL 2012), siendo una fuerza impulsora para la deforestación de los bosques. En los sectores donde se observaron las mayores pérdidas, colindan con fincas privadas, siendo los responsables de los cambios en el lugar. A pesar de que el área es administrada por el Consejo Nacional de Área Protegidas, el lugar aún no está declarado como área protegida. Esta situación hace que los propietarios de las fincas deforesten el manglar para fines agrícolas/pecuarios y no se sientan presionados por las leyes forestales que puedan sancionarlos. Sin embargo, en 2016 dio inicio el proyecto: “Elaboración del Estudio Técnico, Iniciativa de Ley, Ficha Informativa RAMSAR y Plan Maestro del área de conservación marino-costera Sipacate-Naranjo, el cual servirá para declarar la zona como área protegida. Con esta estrategia, es probable que la tasa de deforestación disminuya y se recupere periódicamente el ecosistema.

A pesar de que el balance de emisiones asociado a los cambios de uso del suelo en el área de conservación Sipacate-Naranjo es positivo (87,391.85 Mg CO_{2e}), los cambios no dejan de ser importantes para el balance de emisiones a nivel nacional. La razón es que el bosque manglar, aunque ocupa el 0.63% de los bosques de Guatemala, los manglares almacenan dos veces más carbono que los bosques de latifoliadas y coníferas como se mencionó en el capítulo uno. Por lo tanto, la conversión del mangle a otros usos del suelo puede ocasionar que se emitan cantidades significativas de CO_{2e}, por hectárea en comparación con los bosques terrestres de Guatemala.

El Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales -MARN- en la segunda comunicación nacional sobre Cambio Climático hacia la CMNUCC, establece que las categorías clave

para los inventarios de GEI en Guatemala son; el sector Uso de la tierra, Cambio de uso de la tierra y Silvicultura -UTCUTS-, sector agrícola, y sector energía. En el mismo reporte estiman que el sector UTCUTS representa el 27% (8,497.503 Gg de CO_{2e}) de las emisiones totales del país, debido principalmente a la expansión de las áreas agrícolas y ganaderas que se realizan de forma extensiva. Sin embargo, la principal debilidad del inventario se asocia al alto nivel de incertidumbre en los datos de actividad que se emplearon para la elaboración del inventario (MARN 2015).

El resultado logrado en este estudio proporcionará a las autoridades competentes información cuantitativa sobre los datos de actividad en el manglar y el factor de emisión, siendo componentes claves en la elaboración de los inventarios de gases de efecto invernadero por el cambio de uso del suelo. Además, al Consejo Nacional de Áreas Protegidas, el análisis de cambio de uso del suelo, será un instrumento útil para identificar las áreas donde se focalizan las mayores pérdidas en el manglar y centralizar sus esfuerzos para la sostenibilidad, recuperación y manejo de ecosistemas de manglar en la zona.

5.2.5 Referencias

- Almeida, P; Duriavich, M; Napolitano, R; Feoli, E. 2009. Aplicación de técnicas SIG, Sensoramiento Remoto y Análisis Multicriterio para la Detección de Impactos Antropogénicos en la Cobertura de Suelos y su Proyección para el 2010. Caso de estudio: Estuario de Santos (Brasil) Revista Tecnológica-ESPOL 22(1)
- BIOMARCC-SINAC-GIZ. 2012. Evaluación de carbono en el Humedal Nacional Terraba-Sierpe. San José, Costa Rica. 34 p.
- CATHALAC. (2012). Cobertura actual de mangle en Guatemala, a través de técnicas de percepción remota. Panamá.
- Camacho, M; Molero, E; Paegelow, M. 2010. Modelos geomáticos aplicados a la simulación de cambios de usos del suelo. Evaluación del potencial de cambio. In Ojeda, J; Pita, M; Vallejo, I. eds. 2010. Tecnologías de la Información Geográfica: La Información Geográfica al servicio de los ciudadanos. Secretariado de Sevilla, ES., Secretariado de Publicaciones de la Universidad de Sevilla. 658-678 p.
- Carr, D.L. (2008). Farm households and land use in a core conservation zone of the Mayan Biosphere Reserve, Guatemala. Human Ecology 36(2): 231-248.
- Chen, C-F; Son, N-T; Chang, N-B; Chen, C-R; Chang, L-Y; Valdez, M; Centeno, G; Thompson, CA; Aceituno, JL. 2013. Multi-decadal mangrove forest change detection and prediction in Honduras, Central America, with Landsat imagery and a Markov chain model Remote sensing 5(12):6408-6426.
- CONAP (Consejo Nacional de Áreas Protegidas), GT. 2002. Informe técnico: Plan maestro 2002-2006 Parque Nacional Sipacate-Naranjo. Guatemala. 122 p.
- CONAP y MARN. 2009. Biodiversidad Marina de Guatemala: Análisis de Vacíos y Estrategias para su Conservación. Consejo Nacional de Áreas Protegidas, Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales, The Nature Conservancy. Guatemala. 152 p.
- Duke, NC; Meynecke, J-O; Dittmann, S; Ellison, AM; Anger, K; Berger, U; Cannicci, S; Diele, K; Ewel, KC; Field, CD. 2007. A world without mangroves? Science 317(5834):41-42.
- Galicia, L; García, R; Gómez-Mendoza, L; Ramírez, M. 2007. Cambio de uso del suelo y degradación ambiental Ciencia 58(4):50-59.
- García Rubio, G; Schmook, B; Espejel Carvajal, I. 2005. Dinámica en el uso del suelo en tres ejidos cercanos a la ciudad de Chetumal, Quintana Roo Investigaciones geográficas (58):122-139.

- Giri, C; Ochieng, E; Tieszen, LL; Zhu, Z; Singh, A; Loveland, T; Masek, J; Duke, N. 2011. Status and distribution of mangrove forests of the world using earth observation satellite data *Global Ecology and Biogeography* 20(1):154-159.
- Gómez-Brito, R; Chamizo-Pérez, RJ; Escarré-Esteve, A; Figueroa-Reyes, I. 2012. Evaluación de las coberturas vegetales en el litoral Rancho Luna-Pasacaballo utilizando tecnologías de información geográfica.
- Hewson, J., M.K. Steininger y S. Pesmajoglou, eds. 2014. Manual de Medición, Reporte y Verificación (MRV) de REDD+ Versión 2.0. Programa de Carbono Forestal, Mercados y Comunidades financiado por USAID. Washington, DC, Estados Unidos.
- IARNA, URL (Instituto de Agricultura, Recursos Naturales y Ambiente de la Universidad Rafael Landívar). (2012). Análisis sistémico de la deforestación en Guatemala y propuesta de políticas para revertirla. Guatemala. 48 p.
- Jiménez, JA. 1999. Ambiente, distribución y características estructurales en los manglares del Pacífico de Centro América: contrastes climáticos Ecosistemas de manglar en América Tropical. Instituto de Ecología, AC Xalapa México, UICN/ORMA Costa Rica, NOAA/NMFS Silver Spring MD EUA. p:51-70.
- Jiménez, JA. 1999. El Manejo de los Manglares en el Pacífico de Centroamérica: Usos tradicionales y Potenciales Ecosistemas de manglar en América Tropical. Instituto de Ecología, AC, México, UICN/HORMA, Costa Rica, NOAA/NMFS. Silver Spr MD. EUA. p:275-290.
- MARN (Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales), GT. 2013. Informe técnico: Estudio de la cobertura de mangle en la República de Guatemala. Guatemala. 54 p.
- MARN (Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales), GT. 2015. Segunda comunicación nacional sobre Cambio Climático, Guatemala. Guatemala. 250 p.
- Olmedo, MC; Melgarejo, EM; Paegelow, M. 2010. Modelos geomáticos aplicados a la simulación de cambios de usos del suelo. Evaluación del potencial de cambio. Universidad de Sevilla.
- Paegelow, M; Camacho Olmedo, MT; Menor Toribio, J. 2003. Cadenas de Markov, evaluación multicriterio y evaluación multiobjetivo para la modelización prospectiva del paisaje:
- Pérez, R; Valenzuela, L. 2006. Dinámica de los usos del suelo en el litoral de Granada (1956-2000): interpretación para la acción planificadora. *In*. Modelización Espacio Temporal para el Análisis del Territorio, XII Congreso Nacional de Tecnologías de la Información Geográfica. p. 379-393.

- Pineda, N; Bosque, J; Gómez, M; Plata, W. 2009. Análisis de cambio del uso del suelo en el Estado de México mediante sistemas de información geográfica y técnicas de regresión multivariantes: una aproximación a los procesos de deforestación
- Pontius, R.G. Jr and Malanson, J., 2005. Comparison of the structure and accuracy of two land change models. *International Journal of Geographical Information Science*, 19, 243–265.
- PUIRNA (Programa Universitario de Investigación de Recursos Naturales y Medio Ambiente), GT. 2000. Bases ecológicas de las funcionalidades del ecosistema manglar del Pacífico de Guatemala. Guatemala: 79 p.
- Romero-Berny, EI; Acosta-Velázquez, J; Tovilla-Hernández, C; Schmook, B; Gómez-Ortega, R. 2016. Cambios de cobertura y fragmentación de manglares en la región del Soconusco, Chiapas, México, 1994-2011 *Revista Geográfica de América Central* 1(54):153-169.
- Rubio, G; Schmook, B; Espejel, I. 2005. Dinámica en el uso del suelo en tres ejidos cercanos a la ciudad de Chetumal, Quintana Roo. *Investigaciones Geográficas*:122-139.
- SEGEPLAN (Secretaría de Planificación y Programación de la Presidencia, GT). 2010. Informe técnico: Plan de Desarrollo Municipal de la Gomera, Escuintla. Guatemala. 103 p.
- Valiela, I; Bowen, JL; York, JK. 2001. Mangrove Forests: One of the World's Threatened Major Tropical Environments At least 35% of the area of mangrove forests has been lost in the past two decades, losses that exceed those for tropical rain forests and coral reefs, two other well-known threatened environments *Bioscience* 51(10):807-815.

6. ANEXOS

Cuadro 14: Densidades de carbono epigeas por sitio de muestreo en el área de conservación, Sipacate Naranjo, Guatemala, Centroamérica.

Transecto	Componente	Carbono (Mg C ha ⁻¹)		Transecto	Componente	Carbono (Mg C ha ⁻¹)	
1	Árboles en pie	48.53	± 4.47	15	Árboles en pie	74.23	± 11.57
	Regeneración	2.66	± 1.11		Regeneración	1.11	± 0.18
	Madera caída	0.13	± 0.02		Madera caída	0.49	± 0.09
2	Árboles en pie	48.06	± 19.4	16	Árboles en pie	66.05	± 6.73
	Regeneración	1.15	± 0.15		Regeneración	2.71	± 0.92
	Madera caída	0.25	± 0.04		Madera caída	1.08	± 0.2
3	Árboles en pie	47.71	± 18.01	17	Árboles en pie	61.31	± 27.52
	Regeneración	0.72	± 0.28		Regeneración	1.15	± 0.43
	Madera caída	0.27	± 0.05		Madera caída	0.8	± 0.14
4	Árboles en pie	43.25	± 9.75	18	Árboles en pie	87.34	± 31.03
	Regeneración	0.27	± 0.22		Regeneración	2.84	± 1.28
	Madera caída	0.36	± 0.13		Madera caída	0.14	± 0.04
5	Árboles en pie	70.34	± 10.53	19	Árboles en pie	90	± 22.6
	Regeneración	1.52	± 0.2		Regeneración	2.83	± 1.04
	Madera caída	0.32	± 0.11		Madera caída	0.64	± 0.2
6	Árboles en pie	70.58	± 12.9	20	Árboles en pie	87.76	± 7.4
	Regeneración	0.35	± 0.07		Regeneración	1.1	± 0.2
	Madera caída	0.39	± 0.12		Madera caída	0.64	± 0.13
7	Árboles en pie	65.77	± 23.37	21	Árboles en pie	54.35	± 6.22
	Regeneración	1.71	± 0.47		Regeneración	1.21	± 0.3
	Madera caída	1.34	± 0.27		Madera caída	0.5	± 0.09
10	Árboles en pie	26.26	± 3.93	22	Árboles en pie	61.56	± 9.11
	Regeneración	1.51	± 0.95		Regeneración	0.9	± 0.32
	Madera caída	0.33	± 0.05		Madera caída	0.75	± 0.09
11	Árboles en pie	44.37	± 6.26	24	Árboles en pie	51.08	± 7.66
	Regeneración	0.84	± 0.18		Regeneración	0.78	± 0.29
	Madera caída	0.47	± 0.12		Madera caída	0.45	± 0.13
12	Árboles en pie	99.71	± 12.33	25	Árboles en pie	57.28	± 14.07
	Regeneración	1.26	± 0.19		Regeneración	1.03	± 0.23
	Madera caída	0.6	± 0.12		Madera caída	0.77	± 0.28
13	Árboles en pie	63.34	± 12.4	26	Árboles en pie	84.41	± 8.37
	Regeneración	0.78	± 0.27		Regeneración	3.35	± 0.99
	Madera caída	0.39	± 0.06		Madera caída	2.28	± 1.86
14	Árboles en pie	76.02	± 19.83	27	Árboles en pie	55.62	± 12.61
	Regeneración	1.67	± 0.39		Regeneración	2.47	± 1.11
	Madera caída	1.09	± 0.16		Madera caída	0.54	± 0.17

Cuadro 15: Concentraciones de carbono (%) por sitio de muestreo en el área de conservación Sipacate – Naranjo, Guatemala, Centroamérica.

Transecto	Coordenadas UTM		Distancia a la orilla del canal (m)	Especie dominante	Concentración de carbono %		
	X	Y					
27	709771.3	1542554	1511	<i>Rhi</i>	0.59	±	0.24
24	712809.24	1542367	987	<i>Pach</i>	0.72	±	0.30
26	710595.69	1542123	1328	<i>Rhiz</i>	0.93	±	0.31
3	706388.42	1539869	15	<i>Avic</i>	0.96	±	0.06
25	711201.43	1542524	1150	<i>Rhiz</i>	0.97	±	0.36
19	708623.7	1541584	1143	<i>Avic</i>	1.30	±	0.39
18	704930.89	1541669	423	<i>Avic</i>	1.90	±	0.78
12	707942.81	1541049	862	<i>Avic</i>	2.00	±	0.79
2	704165.32	1539988	267	<i>Lag</i>	2.59	±	0.68
11	706622.43	1540919	170	<i>Lag</i>	3.01	±	0.83
10	703955.65	1540830	202	<i>Lag</i>	3.42	±	1.24
5	707980.93	1539950	15	<i>Rhiz</i>	4.97	±	0.66
1	700476.19	1540176	15	<i>Rhiz</i>	5.43	±	0.50
4	707505.64	1539585	15	<i>Rhiz</i>	5.86	±	1.03
14	709580.7	1540753	15	<i>Rhiz</i>	8.07	±	1.14
17	712249.83	1540720	918	<i>Rhiz</i>	9.62	±	3.04
6	708632.12	1539842	15	<i>Rhiz</i>	9.78	±	1.65
21	712064.81	1541748	15	<i>Rhiz</i>	9.87	±	1.83
13	708608.24	1540604	15	<i>Rhiz</i>	10.41	±	1.81
22	712881.2	1541376	15	<i>Rhiz</i>	12.70	±	1.34
20	711332.93	1541412	15	<i>Rhiz</i>	14.89	±	2.84
15	710565.32	1541015	20	<i>Rhiz</i>	16.77	±	2.96
7	709501.9	1539738	15	<i>Rhiz</i>	18.63	±	4.25
16	711222.83	1540934	15	<i>Rhiz</i>	19.77	±	3.14

Nota: Los transectos están ordenados de menor a mayor concentración de carbono.

Lag = *Laguncularia racemosa*; *Rhiz* = *Rhizophora mangle*; *Avic* = *Avicennia germinans*; *Pach* = *Pachira aquatica*

Cuadro 16: Características dasométricas de los puntos de muestreo en el área de conservación Sipacate-Naranjo, Guatemala, Centroamérica.

Transecto	Coordenadas UTM		Especies dominantes	Densidad de árboles ha ⁻¹	Diámetro (cm)	Área basal (m ² ha ⁻¹)
	X	Y				
1	700476.187	1540176.23	<i>Rhiz/Avic</i>	1971 ± 180	9.28 ± 0.3	15.79 ± 0.90
2	704165.317	1539987.74	<i>Lag/Rhiz</i>	1516 ± 188	8.52 ± 0.56	13.83 ± 4.67
3	706388.425	1539868.61	<i>Avic/Lag</i>	1191 ± 108	12.89 ± 0.91	24.08 ± 3.98
4	707505.642	1539584.91	<i>Rhiz/Avic</i>	1776 ± 435	9.03 ± 0.31	13.56 ± 2.38
5	707980.927	1539949.97	<i>Rhiz/Avic</i>	964 ± 115	13.92 ± 0.67	17.63 ± 2.40
6	708632.125	1539842.00	<i>Rhiz</i>	964 ± 165	13.66 ± 0.62	16.71 ± 2.85
7	709501.905	1539737.92	<i>Rhiz</i>	834 ± 138	12.07 ± 0.94	13.89 ± 4.50
10	703955.651	1540829.82	<i>Lag</i>	1657 ± 271	7.26 ± 0.29	8.50 ± 1.29
11	706622.428	1540918.51	<i>Lag/Avic</i>	2090 ± 419	9.27 ± 0.33	17.54 ± 1.36
12	707942.809	1541048.67	<i>Avic/Rhiz</i>	1494 ± 522	12.77 ± 0.82	29.99 ± 3.28
13	708608.243	1540603.62	<i>Rhiz</i>	1158 ± 166	12.51 ± 0.49	16.54 ± 2.89
14	709580.705	1540752.93	<i>Rhiz</i>	812 ± 126	13.59 ± 0.98	16.30 ± 4.38
15	710565.324	1541015.25	<i>Rhiz</i>	1592 ± 317	10.3 ± 0.49	17.71 ± 2.27
16	711222.828	1540934.11	<i>Rhiz</i>	1191 ± 152	11.84 ± 0.53	15.95 ± 1.33
17	712249.826	1540719.5	<i>Rhiz</i>	1483 ± 264	9.16 ± 0.52	14.12 ± 4.98
18	704930.89	1541668.82	<i>Avic/Lag</i>	856 ± 199	14.55 ± 1.26	22.56 ± 6.44
19	708623.701	1541584.3	<i>Avic</i>	1310 ± 255	14.93 ± 0.77	30.23 ± 7.57
20	711332.932	1541411.62	<i>Rhiz</i>	1516 ± 380	11.06 ± 0.57	20.03 ± 1.72
21	712064.809	1541747.75	<i>Rhiz/Lag</i>	2685 ± 531	8.6 ± 0.22	18.11 ± 2.92
22	712881.204	1541376.39	<i>Rhiz/Lag</i>	2328 ± 243	9.09 ± 0.33	19.25 ± 2.16
24	712809.236	1542367.29	<i>Pach/Rhiz</i>	1278 ± 184	11.58 ± 0.6	17.62 ± 2.45
25	711201.431	1542524.32	<i>Rhiz/Lag</i>	1689 ± 372	9.65 ± 0.45	16.45 ± 2.20
26	710595.692	1542123.3	<i>Rhiz/Avic</i>	1159 ± 210	14.62 ± 0.83	26.08 ± 2.84
27	709771.303	1542553.77	<i>Rhiz/Avic</i>	801 ± 189	14.36 ± 0.83	16.17 ± 4.25
				1430 ± 255	11.44 ± 0.61	18.28 ± 3.17

Nota: *Lag* = *Laguncularia racemosa*; *Rhiz* = *Rhizophora mangle*; *Avic* = *Avicennia germinans*; *Pach* = *Pachira aquatica*

Cuadro 17: Dinámica de las ganancias y pérdidas del manglar en los dos periodos evaluados en el área de conservación Sipacate-Naranjo, Guatemala, Centroamérica.

Ganancias 90-06				Ganancias 06-16			
Categoría			Hectáreas	Categoría			Hectáreas
Pasto	a	Mangle	109.73	Pasto	a	Mangle	52.80
SD	a	Mangle	79.11	SC	a	Mangle	42.80
CA	a	Mangle	72.88	CA	a	Mangle	31.78
SC	a	Mangle	34.01	SD	a	Mangle	16.15
Otros	a	Mangle	4.08	Otros	a	Mangle	9.92
Caña	a	Mangle	0.99	Caña	a	Mangle	1.72
Cultivos	a	Mangle	0.28	Cultivos	a	Mangle	0.11
			301.08				155.32
Pérdidas 90-96				Pérdidas 06-2016			
Categoría			Hectáreas	Categoría			Hectáreas
Mangle	a	Pasto	59.14	Mangle	a	Pasto	50.92
Mangle	a	SC	25.26	Mangle	a	SD	15.89
Mangle	a	SD	25.03	Mangle	a	CA	14.09
Mangle	a	CA	19.09	Mangle	a	Caña	13.65
Mangle	a	Otros	9.22	Mangle	a	Otros	5.18
Mangle	a	Caña	0.31	Mangle	a	SC	4.78
Mangle	a	Cultivos	0	Mangle	a	Cultivos	3.90
			138.05				108.44
Cambio neto			163.03	Cambio neto			46.88

Nota: El significado de las letras son: Salinera/Camaronera (SC), Suelo Desnudo (SD), Cuerpos de Agua (CA).

Cuadro 18: Matriz de probabilidad de persistencia de uso para cada categoría. Año2030

Cobertura	Mangle	Caña	CA	Pastos	SD	SC	Cultivos	Otros
Mangle	0.74	0.03	0.03	0.12	0.04	0.01	0.01	0.01
Caña	0.00	0.67	0.00	0.05	0.00	0.00	0.27	0.01
CA	0.15	0.00	0.76	0.01	0.00	0.05	0.00	0.02
Pastos	0.07	0.31	0.00	0.55	0.05	0.00	0.01	0.00
SD	0.10	0.00	0.01	0.10	0.74	0.01	0.01	0.04
SC	0.15	0.00	0.15	0.01	0.00	0.68	0.00	0.01
Cultivos	0.10	0.10	0.00	0.00	0.00	0.00	0.80	0.00
Otros	0.10	0.00	0.01	0.02	0.13	0.01	0.00	0.73

Salinera/Camaronera (SC), Suelo Desnudo (SD), Cuerpos de Agua (CA).

Cuadro 19: Matriz base de cambio de uso del suelo en el área de conservación Sipacate-naranja para el periodo 2016-2030 proyectada por Markov.

Cobertura	Mangle	Caña	CA	Pastos	SD	SC	Cultivos	Otros	2016
Mangle	1540.14	72.58	70.06	245.45	79.62	23.55	21.07	25.81	2078.28
Caña	6.19	2887.55	4.06	202.28	6.31	0.43	1145.07	32.19	4284.07
CA	211.63	0.63	1053.59	12.61	3.49	75.81	1.54	27.50	1386.79
Pastos	89.96	378.77	1.14	673.30	63.07	0.06	9.24	4.99	1220.53
SD	81.28	1.90	3.95	75.61	589.02	7.93	7.28	28.03	795.00
SC	113.24	0.78	116.71	9.35	3.38	529.00	0.10	6.56	779.12
Cultivos	50.96	51.59	0.07	0.33	0.09	0.02	402.55	0.05	505.65
Otros	42.50	0.34	4.19	9.72	52.23	3.47	0.53	304.07	417.03
2030	2135.90	3394.13	1253.77	1228.65	797.19	640.25	1587.36	429.20	11466.45

Salinera/Camaronera (SC), Suelo Desnudo (SD), Cuerpos de Agua (CA).

Cuadro 20: Matriz base para el escenario 1 con las tendencias de ganancias en el periodo 1990-2006.

Cobertura	Mangle	Caña	CA	Pastos	SD	SC	Cultivos	Otros	2016
Mangle	1540.14	72.58	70.06	245.45	79.62	23.55	21.07	25.81	2078.28
Caña	1.49	2892.25	4.06	202.28	6.31	0.43	1145.07	32.19	4284.07
CA	109.32	0.63	1155.91	12.61	3.49	75.81	1.54	27.50	1386.80
Pastos	164.60	378.77	1.14	598.66	63.07	0.06	9.24	4.99	1220.54
SD	118.67	1.90	3.95	75.61	551.63	7.93	7.28	28.03	794.99
SC	51.02	0.78	116.71	9.35	3.38	591.22	0.10	6.56	779.12
Cultivos	0.42	51.59	0.07	0.33	0.09	0.02	453.09	0.05	505.65
Otros	6.12	0.34	4.19	9.72	52.23	3.47	0.53	340.45	417.03
2030	1991.78	3398.83	1356.09	1154.00	759.80	702.47	1637.90	465.58	11466.46

Salinera/Camaronera (SC), Suelo Desnudo (SD), Cuerpos de Agua (CA).

Cuadro 21: Matriz base para el escenario 2 con las tendencias de ganancias en el periodo 2006-2016.

Cobertura	Mangle	Caña	CA	Pastos	SD	SC	Cultivos	Otros	2016
Mangle	1540.14	72.58	70.06	245.45	79.62	23.55	21.07	25.81	2078.28
Caña	2.42	2891.58	4.06	202.28	6.31	0.43	1145.07	32.19	4284.33
CA	44.50	0.63	1221.50	12.61	3.49	75.81	1.54	27.50	1387.57
Pastos	72.88	378.77	1.14	689.33	63.07	0.06	9.24	4.99	1219.49
SD	22.62	1.90	3.95	75.61	647.68	7.93	7.28	28.03	794.99
SC	59.92	0.78	116.71	9.35	3.38	582.34	0.10	6.56	779.14
Cultivos	0.16	51.59	0.07	0.33	0.09	0.02	453.35	0.05	505.65
Otros	13.90	0.34	4.19	9.72	52.23	3.47	0.53	332.67	417.03
2030	1756.54	3398.16	1421.68	1244.67	855.85	693.59	1638.16	457.80	11466.46

Salinera/Camaronera (SC), Suelo Desnudo (SD), Cuerpos de Agua (CA).

Cuadro 22: Matriz base para el escenario 3 con las tendencias de pérdidas en el periodo 1990-2006.

Cobertura	Mangle	Caña	CA	Pastos	SD	SC	Cultivos	Otros	2016
Mangle	1402.09	72.89	89.15	304.59	104.65	48.81	21.07	35.03	2078.28
Caña	6.19	2887.55	4.06	202.28	6.31	0.43	1145.07	32.19	4284.07
CA	211.63	0.63	1053.59	12.61	3.49	75.81	1.54	27.50	1386.79
Pastos	89.96	378.77	1.14	673.30	63.07	0.06	9.24	4.99	1220.53
SD	81.28	1.90	3.95	75.61	589.02	7.93	7.28	28.03	795.00
SC	113.24	0.78	116.71	9.35	3.38	529.00	0.10	6.56	779.12
Cultivos	50.96	51.59	0.07	0.33	0.09	0.02	402.55	0.05	505.65
Otros	42.50	0.34	4.19	9.72	52.23	3.47	0.53	304.07	417.03
2030	1997.85	3394.44	1272.86	1287.79	822.22	665.51	1587.36	438.42	11466.45

Salinera/Camaronera (SC), Suelo Desnudo (SD), Cuerpos de Agua (CA).

Cuadro 23: Matriz base para el escenario 4 con las tendencias de pérdidas en el periodo 2006-2016

Cobertura	Mangle	Caña	CA	Pastos	SD	SC	Cultivos	Otros	2016
Mangle	1431.71	86.24	84.15	296.38	95.51	28.33	24.97	30.99	2078.28
Caña	6.19	2887.55	4.06	202.28	6.31	0.43	1145.07	32.19	4284.07
CA	211.63	0.63	1053.59	12.61	3.49	75.81	1.54	27.50	1386.79
Pastos	89.96	378.77	1.14	673.30	63.07	0.06	9.24	4.99	1220.53
SD	81.28	1.90	3.95	75.61	589.02	7.93	7.28	28.03	795.00
SC	113.24	0.78	116.71	9.35	3.38	529.00	0.10	6.56	779.12
Cultivos	50.96	51.59	0.07	0.33	0.09	0.02	402.55	0.05	505.65
Otros	42.50	0.34	4.19	9.72	52.23	3.47	0.53	304.07	417.03
2030	2027.47	3407.79	1267.86	1279.57	813.08	645.03	1591.26	434.38	11466.45

Salinera/Camaronera (SC), Suelo Desnudo (SD), Cuerpos de Agua (CA).