



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MEXICO
POSGRADO EN GEOGRAFÍA
FACULTAD DE FILOSOFÍA Y LETRAS
INSTITUTO DE GEOGRAFÍA
CENTRO DE INVESTIGACIONES EN GEOGRAFÍA AMBIENTAL

EVALUACIÓN GEOECOLÓGICA DE HUMEDALES COSTEROS COMO
ALMACENES DE CARBONO

TESIS
QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:
DOCTOR EN GEOGRAFÍA

PRESENTA:
CARLOS HUMBERTO TROCHE SOUZA

TUTOR DE TESIS
DR. ÁNGEL G. PRIEGO SANTANDER
CENTRO DE INVESTIGACIONES EN GEOGRAFÍA AMBIENTAL – UNAM

MIEMBROS DEL COMITÉ TUTOR
DR. MANUEL BOLLO MANENT
CENTRO DE INVESTIGACIONES EN GEOGRAFÍA AMBIENTAL - UNAM
DR. RAINER ANDREAS RESSL
COMISION NACIONAL PARA EL CONOCIMIENTO Y USO DE LA
BIODIVERSIDAD (CONABIO)

MORELIA, MICHOACÁN, OCTUBRE 2019



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

Índice general

Índice general.....	i
Índice de tablas.....	iii
Índice de figuras	iv
Resumen.....	1
1. INTRODUCCIÓN	3
1.1. Hipótesis.....	5
1.2. Objetivo general	5
1.3. Justificación.....	6
1.4. Estructura de la tesis	7
2. ANTECEDENTES.....	8
2.1. Humedales costeros y el cambio climático	8
2.2. Metodologías para estimar almacenes de carbono.....	9
2.3. Estimación de carbono en humedales costeros	10
2.4. Distribución espacial de almacenes de carbono en humedales costeros	11
2.5. Análisis paisajístico y almacenes de carbono en humedales costeros	12
2.6. La Geoecología como un enfoque integrador de los elementos naturales	13
2.7. Síntesis del capítulo 2	17
3. MATERIALES Y MÉTODOS	18
3.1. Área de estudio	18
3.2. Trabajo de campo	20
3.3. Generación del mapa de paisajes naturales	20
3.4. Evaluación de la heterogeneidad geoecológica de los paisajes	25
3.5. Antropización de la cobertura vegetal de los paisajes.....	26
3.6. Cálculo de los almacenes de carbono.....	29
3.6.1. Estimación de carbono aéreo en puntos de muestreo	31
3.6.2. Estimación de carbono subterráneo en puntos de muestreo	34
3.6.3. Estimación de los almacenes de carbono	38
3.7. Correlación de los paisajes y almacenes de carbono.....	55
3.8. Síntesis del capítulo 3	56

4.	PAISAJES Y SU HETEROGENEIDAD.....	58
4.1.	Factores diferenciadores del paisaje	58
4.2.	Unidades taxonómicas de los paisajes y su caracterización	59
4.3.	Heterogeneidad Geoecológica de los humedales costeros	64
4.4.	Antropización de la cobertura vegetal de los paisajes	69
4.5.	Síntesis del capítulo 4	75
5.	ALMACENES DE CARBONO.....	76
5.1.	Almacenes de carbono aéreo	76
5.2.	Almacenes de carbono subterráneo	83
5.3.	Almacenes de carbono en humedales costeros	91
5.4.	Síntesis del capítulo 5	95
6.	RELACIÓN PAISAJES–ALMACENES DE CARBONO.....	96
6.1.	Pruebas de normalidad y correlación	96
6.2.	Análisis de regresión entre almacenes de carbono y complejidad tipológica	98
6.3.	Pronósticos de almacenes de carbono en unidades de paisaje	100
6.4.	Correspondencia espacial entre <i>carbono total</i> y <i>complejidad tipológica</i>	105
6.5.	Síntesis del capítulo 6	107
7.	CONCLUSIONES	109
	REFERENCIAS	113
	ANEXOS.....	128
	Anexo 1. Artículo: Mapa de paisajes publicado en “terra digitalis”	128
	Anexo 2. Leyenda Mapa de los Paisajes Físico-Geográficos	134
	Anexo 3. Mapas de índices de heterogeneidad.	139
	Anexo 4. Datos de carbono aéreo obtenidos en campo.	150
	Anexo 5. Datos de carbono subterráneo obtenidos en campo.	152
	Anexo 6. Mapas de almacenes de carbono observados y esperados	153

Índice de tablas

Tabla 1. Definición y criterios de las unidades taxonómicas.	22
Tabla 2. Insumos cartográficos base para la definición de paisajes tipológicos.	22
Tabla 3. Índices empleados para la evaluación de la heterogeneidad geoecológica.....	26
Tabla 4. Ponderación de los tipos de vegetación o uso del suelo para el IACV.	28
Tabla 5. Componentes de un almacén de carbono por cada unidad de paisaje.....	29
Tabla 6. Clasificación de tipos de uso de suelo y vegetación.....	31
Tabla 7. Ecuaciones alométricas para cálculo de biomasa aérea arbórea.	33
Tabla 8. Factores de conversión de biomasa a carbono.	34
Tabla 9. Ecuaciones alométricas y factor de conversión para cálculo de carbono en raíces.	35
Tabla 10. Variables consideradas para estimar almacenes de carbono aéreo.	39
Tabla 11. Imágenes Landsat utilizadas para el cálculo de NDVI.....	45
Tabla 12. Variables consideradas para estimar almacenes de carbono subterráneo.....	48
Tabla 13. Características y organización jerárquica de los paisajes.	59
Tabla 14. Índices de heterogeneidad del área de estudio	65
Tabla 15. Indicadores categorizados de la heterogeneidad de los paisajes.	68
Tabla 16. Definición de los grados de antropización de la cobertura vegetal de los paisajes.	70
Tabla 17. Parámetros, variables y métricas de error del modelo de carbono aéreo.....	78
Tabla 18. Parámetros, variables y métricas de error del modelo de carbono subterráneo.....	85
Tabla 19. Indicadores de heterogeneidad y reservas de carbono por unidad de paisaje.	96
Tabla 20. Prueba de Shapiro-Wilk para conocer normalidad de los datos.....	97
Tabla 21. Matriz de correlación entre heterogeneidad geoecológica y reservas de carbono	98
Tabla 22. Valores observados y esperado de Almacenes de carbono por unidades de paisaje. ..	101
Tabla 23. Clasificación cuantitativa de los almacenes de carbono observados y esperados.	105
Tabla 24. Clasificación cualitativa del Carbono total almacenado.....	105

Índice de figuras

Figura 1. Ubicación del área de estudio.....	19
Figura 2. Esquema de la secuencia metodológica para la elaboración del mapa de paisajes.	21
Figura 3. Esquema para la generación de los mapas de carbono aéreo y subterráneo.	30
Figura 4. Ubicación espacial de los puntos de muestreo de carbono aéreo.	32
Figura 5. Esquema de muestreo en campo para estrato arbóreo.	32
Figura 6. Esquema de muestreo en campo para estratos arbustivos y herbáceos.....	33
Figura 7. Ubicación espacial de los puntos de muestreo de carbono subterráneo.	35
Figura 8. Estimación de carbono subterráneo en suelos.....	36
Figura 9. Perfil vertical de datos Lidar con clasificación original de coberturas.	41
Figura 10. Perfil vertical de datos Lidar con clasificación corregida y original.....	42
Figura 11. Mapa de paisajes del área de estudio.	60
Figura 12. Representación de la dominancia de superficie entre <i>Localidades</i> ,	64
Figura 13. Superficie ocupada (km ²) por clase en cada índice de heterogeneidad.	67
Figura 14. Superficie ocupada por grado de antropización de la cobertura vegetal.	70
Figura 15. Histogramas de composición de tipos de antropización de <i>Parajes Complejos</i>	72
Figura 16. Mapa de Antropización de la cobertura vegetal.	73
Figura 17. Distribución y variación de los valores de carbono aéreo (Mg C ha ⁻¹).	76
Figura 18. Error del modelo de carbono aéreo según el número de árboles generados.	78
Figura 19. Importancia de las variables independientes.....	79
Figura 20. Predicción espacial de los almacenes de carbono aéreo.....	81
Figura 21. Histograma de frecuencias de almacenes de carbono aéreo.	82
Figura 22. Incertidumbre espacial de los almacenes de carbono aéreo.	83
Figura 23. Distribución y variación de los valores de carbono subterráneo (Mg C ha ⁻¹).....	84
Figura 24. Error del modelo de carbono subterráneo según el número de árboles generados.	86
Figura 25. Importancia de las variables independientes.....	86
Figura 26. Predicción espacial de los almacenes de carbono subterráneo.	89
Figura 27. Histograma de frecuencias de almacenes de carbono subterráneo.	89
Figura 28. Incertidumbre espacial de los almacenes de carbono subterráneo.	90
Figura 29. Almacenes de carbono promedio ± desviación estándar por cobertura.	92
Figura 30. Mapa de distribución espacial de los almacenes de carbono.	93
Figura 31. Histograma de frecuencias de almacenes de carbono.....	94
Figura 32. Modelo de regresión exponencial.	99
Figura 33. Visualización de porciones de las unidades de paisaje I.1 y II.2.....	102
Figura 34. Gráfico de íconos de las unidades de paisaje vs atributos individuales.....	103
Figura 35. Cartogramas comparativos de Almacenes de Carbono observado y esperado	106

Resumen

Los humedales costeros son reconocidos a nivel internacional, entre otros, por su importancia como almacenes de carbono y su participación en el ciclo biogeoquímico del carbono. A pesar de su importancia, en México el conocimiento de estos reservorios aún es incipiente, debido principalmente a la poca accesibilidad a estos ecosistemas, el costo/tiempo que representa la obtención de datos y a la variabilidad físico-geográfica del territorio que no permite realizar estimaciones confiables de estos almacenes. Esta falta de conocimiento dificulta la toma de decisiones para acciones de manejo y conservación.

En este estudio se estimó la heterogeneidad del espacio geográfico, a escala 1:250000, en humedales costeros de la región de Laguna de Términos-Campeche, para determinar la relación existente entre la variabilidad de los paisajes y la capacidad de almacenamiento de carbono aéreo y subterráneo hasta un metro de profundidad de estos ecosistemas.

Para realizar esta evaluación se siguió el enfoque ampliamente adaptado y aplicado a México de la Geoecología del paisaje, la cual se basa en primera instancia en la diferenciación objetivamente existente de la esfera geográfica, la cual está formada por complejos naturales de diferentes jerarquías y dimensiones. Para obtener los valores de almacenes de carbono se siguieron metodologías estandarizadas y reconocidas por el Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático.

La determinación objetiva de la relación de las unidades de paisaje con los almacenes de carbono orgánico se realizó a partir del análisis estadístico de correlación entre la heterogeneidad encontrada en el territorio y el almacén total de carbono calculado para cada unidad.

La Complejidad Tipológica es el índice de heterogeneidad del paisaje que mejor explicó la distribución espacial de los almacenes de carbono a partir de un modelo exponencial con alta significancia estadística de r^2 ajustada = 0.83.

Los resultados obtenidos indican que, en el contexto de la elaboración de modelos espaciales de carbono aéreo y subterráneo, el conocimiento de la heterogeneidad de los geocomplejos en humedales costeros tropicales permite predecir valores de sus almacenes de carbono hasta un metro de profundidad para una escala de trabajo de 1:250000 de manera estadísticamente significativa.

En este sentido, el empleo del enfoque geoecológico mediante el análisis de la heterogeneidad de los paisajes físico-geográficos en otras regiones de humedales costeros del país podrá apoyar a las tareas de ordenamiento territorial, priorización de áreas de conservación y manejo dentro y fuera de áreas naturales protegidas.

1. INTRODUCCIÓN

Los humedales costeros, son ecosistemas que a pesar de constituir en muchos casos franjas estrechas en el territorio, son conocidos por su importancia ecológica y económica (Odum, 1993; Morris *et al.*, 2002;)

El reconocimiento de las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) de origen antropogénico y su incidencia en el clima futuro, hizo que el interés sobre el conocimiento de temas relacionados al funcionamiento de los humedales costeros, como ecosistemas en donde se llevan a cabo diferentes ciclos biogeoquímicos, haya ido en aumento de manera sustancial en las últimas dos décadas (Wolanski *et al.*, 2009). Los servicios ambientales que ofrecen las zonas costeras como reservorios de carbono orgánico llaman la atención de la comunidad internacional, principalmente cuando se habla del ciclo biogeoquímico del carbono (Solomon *et al.*, 2007).

Desafortunadamente, estos sumideros y almacenes de carbono están desapareciendo rápidamente debido a ciertas actividades humanas como la deforestación, la contaminación por nutrientes y químicos provenientes de actividades agrícolas e industriales, excediendo de esta manera su capacidad de recuperación, lo cual trasciende en la provisión de los servicios ecosistémicos que nos ofrecen (Nellemann *et al.*, 2009).

Estos hechos, aunados a su elevada vulnerabilidad ecológica y heterogeneidad espacial, han permitido enfocar la atención y esfuerzos de investigación sobre la capacidad de esos ecosistemas de secuestrar carbono de la atmósfera y almacenarlo como biomasa y principalmente como carbono orgánico en sus sedimentos (Nellemann *et al.*, 2009; IPCC, 2013). Generalmente, para reportar un almacén de carbono, todas las mediciones de biomasa de campo son transformadas a unidades de carbono mediante factores de conversión según la parte vegetativa aérea o subterránea y el tipo de vegetación (Fourqurean *et al.*, 2014).

Es así, que las mediciones de biomasa aérea y subterránea en un ecosistema, son cruciales para los estudios del ciclo del carbono y su relación con el cambio climático (Houghton *et al.*, 2009; Fatoyinbo & Simard, 2013). Existen estudios puntuales a nivel mundial y a nivel nacional que evidencian que la biomasa en manglares, otros humedales costeros y sus respectivos sedimentos almacenan grandes concentraciones de carbono, en comparación con otros ecosistemas terrestres (Donato *et al.*, 2011; Pendleton *et al.*, 2012; Adame *et al.*, 2013, 2015; Ezcurra *et al.*, 2016;).

A pesar de su importancia, en México el estado de conocimiento de los flujos y reservorios de carbono en humedales es en general escaso (Gaxiola *et al.*, 2017; Herrera & Teutli, 2017). Los mayores esfuerzos están centrados en los reservorios de biomasa aérea de manglares dejando a otros humedales y sedimentos costeros pobremente comprendidos.

Por otro lado, en la mayoría de los casos, estos estudios son realizados en extensiones territoriales reducidas, debido principalmente a la elevada inversión de tiempo y recursos económicos que se necesitan para la obtención de los datos en campo.

Por lo general, la estimación de estos almacenes de carbono, se realizan a partir de los datos aislados y puntuales de biomasa o carbono orgánico obtenidos en campo, los cuales son extrapolados a áreas contiguas mayores (Donato *et al.*, 2011; Adame *et al.*, 2013; Kauffman *et al.*, 2015) siguiendo en ocasiones algunas variables del medio natural y criterios que son pobremente comprendidos y poco vinculados a los límites naturales o antropo-naturales presentes en la superficie terrestre.

Actualmente, varios métodos de generación cartográfica de los sistemas naturales son empleados para realizar una delimitación geográfica jerárquica natural del territorio (Bocco *et al.*, 2009). Se utilizan enfoques en los que a partir de la integración de atributos o componentes naturales de la superficie terrestre se generan unidades naturales homogéneas donde posteriormente se pueden realizar análisis (Priego-Santander *et al.*, 2001), evaluaciones (PLADEYRA, 2000) y hasta

pronósticos (Priego-Santander *et al.*, 2003; Priego-Santander, 2004; García-Illamas *et al.*, 2018) de manera confiable de los diferentes elementos y procesos de cada unidad natural.

Es en este contexto que el presente trabajo tiene como propósito presentar una propuesta teórico-metodológica para evaluar desde el punto de vista de la heterogeneidad geoecológica a los humedales costeros como almacenes de carbono. El estudio se enfoca en determinar las relaciones entre la configuración estructural de las unidades de paisaje de los humedales costeros para la estimación de su capacidad de almacenar carbono orgánico. Las Áreas Naturales Protegidas, Reserva de la Biósfera Pantanos de Centla y el Área de Protección de Flora y Fauna Laguna de Términos, así como el sitio prioritario de manglar Sabancuy-Chen Kan de la Comisión Nacional para el Conocimiento y uso de la Biodiversidad (CONABIO) fueron elegidas para realizar esta evaluación.

1.1. Hipótesis

Partiendo de las propiedades de integridad, estructura y funcionamiento de los paisajes, los geocomplejos del territorio deben observar una relación espacial y estadísticamente significativa con la capacidad de almacenamiento de carbono orgánico, de modo que debe ser posible predecir, de forma aproximada, pero estadísticamente significativa, el volumen de almacenes fijos totales (aéreos y subterráneos), a través de datos de heterogeneidad geoecológica.

1.2. Objetivo general

Determinar la relación entre la heterogeneidad de los paisajes naturales de los humedales costeros de Pantanos de Centla y Laguna de Términos y su capacidad como almacenes de carbono orgánico a escala 1:250 000.

Objetivos particulares

- ✓ Determinar la configuración estructural de las unidades espaciales del área de estudio a partir de la clasificación tipológica de los paisajes naturales de los humedales costeros de la Reserva de la Biósfera Pantanos de Centla y el Área de Protección de Flora y Fauna Laguna de Términos.
- ✓ Evaluar la heterogeneidad geoecológica para conocer las peculiaridades de su distribución espacial en el área de estudio.
- ✓ Desarrollar un modelo de predicción espacial de almacenes de carbono orgánico aéreo con métodos e insumos de percepción remota y cartografía temática.
- ✓ Desarrollar un modelo de predicción espacial de almacenes de carbono orgánico en suelos a partir de técnicas estadísticas y cartografía temática.
- ✓ Conocer la probable relación estadística entre heterogeneidad de los paisajes naturales de los humedales costeros y su capacidad como almacenes de carbono orgánico.

1.3. Justificación

Un conocimiento adecuado de la relación de los paisajes naturales y el almacenamiento de carbono de humedales costeros a escala 1:250 000 es esencial:

- 1) para desarrollar un entendimiento de los ecosistemas y sus interacciones a escalas medias.
- 2) para proporcionar información de base a escala local que ayude a la generación de modelos de almacenamiento de carbono del ecosistema de una manera efectiva en términos de costos y tiempos.
- 3) para dar seguimiento a los cambios en el paisaje y consecuentes emisiones de gases de efecto invernadero a la atmósfera a escala regional.

1.4. Estructura de la tesis

En esta tesis se presentan en total siete capítulos. Cuatro capítulos de investigación apuntan a alcanzar los objetivos particulares planteados. El **primer capítulo**, introduce al lector a la temática de los humedales costeros, los almacenes de carbono y su predicción, planteando un problema específico, y los objetivos de este estudio. En el **segundo capítulo**, se desarrollan los antecedentes sobre el tema de la estimación de los almacenes de carbono en humedales costeros. Muestra la necesidad de adoptar un enfoque territorial/espacial sólido, que integre los atributos más importantes del territorio. Se introduce al marco conceptual de la Geoecología. El **tercer capítulo** desarrolla el marco teórico-metodológico propuesto en este estudio para comprobar la hipótesis, así como para cumplir con los objetivos planteados. En el **cuarto capítulo** se presenta el mapa tipológico de paisajes y se evalúan las propiedades de su estructura horizontal a través del análisis de la heterogeneidad, así como la antropización del paisaje. De esta forma se conocen las singularidades del territorio estudiado. En el **quinto capítulo**, se presentan los cálculos obtenidos de los almacenes de carbono en campo e información auxiliar. Se realiza la modelación de carbono aéreo y subterráneo en todas las unidades tipológicas de paisaje a partir de las variables explicativas de estos almacenes para el área de estudio. También se hace la síntesis global de los almacenes de carbono (aéreo y subterráneo) de los humedales costeros del territorio. En el **sexto capítulo**, se determina la relación de los almacenes de carbono con las unidades de paisajes naturales y se generan pronósticos de valores de carbono almacenado en las unidades de paisaje. Finalmente, en el **séptimo capítulo**, la tesis concluye con una síntesis de la investigación presentada y expone una mirada al futuro de la evaluación de las propiedades de la estructura de los paisajes naturales y los servicios ambientales, como ser el almacenamiento de carbono orgánico en humedales costeros.

2. ANTECEDENTES

2.1. Humedales costeros y el cambio climático

Desde la década de los años 50, científicos en varias partes del mundo empezaron a recoger datos y demostrar que las concentraciones de dióxido de carbono (CO₂) en la atmósfera iban rápidamente en aumento, planteando amenazas que el efecto invernadero podría generar sobre los procesos ecológicos y actividades humanas. Para 1988, a iniciativa de la Organización Meteorológica Mundial (OMM) y el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA) se establece el Panel Intergubernamental de Cambio Climático (conocido como IPCC por su acrónimo en inglés) conformado por científicos expertos para facilitar evaluaciones integrales del estado de los conocimientos científicos, técnicos y socioeconómicos sobre el cambio climático (IPCC, 2006).

Este grupo, en 1990, presenta el Primer Informe de Evaluación sobre el tema de cambio climático en el que aseguran que las emisiones producidas por las actividades humanas aumentan sustancialmente las concentraciones atmosféricas de los GEI. En el mismo reporte elaboran y muestran escenarios futuros del incremento de las emisiones antropogénicas de CO₂ (IPCC, 1990).

Este informe fue la base para que los gobiernos firmaran en 1992 la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC). En la misma los países firmantes se comprometieron a realizar inventarios nacionales de las emisiones antropogénicas y almacenes de los sumideros de los GEI. También, en el mismo marco, se promueve el apoyo para la conservación y protección de los sumideros y depósitos de estos GEI, incluyendo la biomasa de ecosistemas terrestres, costeros y marinos (UNFCCC, 1992)

Aunque los humedales costeros tienden a almacenar menos carbono en forma de biomasa que otros ecosistemas terrestres, los sedimentos subyacentes a estos geosistemas tienen mucha mayor capacidad de almacenamiento por algunas

razones como: a) Los suelos de humedales costeros se forman por acreción vertical a través del tiempo, haciéndolos dinámicos y adaptándose, en cierta forma, al incremento del nivel del mar (Mudd *et al.*, 2009); b) La salinidad asociada a la naturaleza anaeróbica de los sedimentos de estos ecosistemas permite que la materia orgánica permanezca en estas capas por mucho más tiempo, comparado con ecosistemas terrestres (Livesley & Andrusiak, 2012) y c) Los humedales actúan como trampas de sedimentos para la escorrentía de los sistemas terrestres y otros sólidos en suspensión (Kennedy *et al.*, 2010).

De esta manera se reconoció la necesidad de generar información sobre el territorio para estimar las reservas de carbono, emisiones y secuestro de GEI asociados a las actividades de uso de suelo, cambio de uso y silvicultura (IPCC, 2003).

2.2. Metodologías para estimar almacenes de carbono

Para 1996 se publican las primeras directrices que guían la realización de los inventarios nacionales de gases de efecto invernadero, en el cual se proporcionan indicaciones para la recopilación de datos, sea cual fuere el método empleado para obtener las estimaciones (Dixon *et al.*, 1994; IPCC, 1996).

Diez años más tarde, el IPCC publicó nuevas directrices para la generación de los inventarios nacionales de gases de efecto invernadero en las cuales se identifican tres niveles de detalles que intentan reflejar la certeza o precisión de una evaluación de un inventario de almacenes de carbono. La evaluación nivel 1 o “Tier 1” tiene la menor precisión y certeza y se basa en suposiciones simplificadas y datos publicados que el mismo IPCC propone para cada actividad, para diferentes tipos de almacenes de carbono y factores de emisión. Puede tener un margen de error $\pm 50\%$ para almacenes aéreos y de $\pm 90\%$ para la variable de carbono en suelos.

La evaluación nivel 2 o “Tier 2” incluye algún dato de país o datos específicos del sitio y por lo tanto se incrementa la precisión y resolución. Por ejemplo, para un país se puede saber la media de almacenes de carbono para diferentes tipos de ecosistemas.

La evaluación nivel 3 o “Tier 3” requiere datos muy específicos de almacenes de carbono en cada componente del ecosistema o uso de suelo y medidas repetidas en el tiempo en lugares de almacenes de carbono claves para dar estimaciones de cambio o flujo de carbono dentro y fuera del área. Las estimaciones de flujos de carbono pueden ser realizadas a través de medidas directas en campo o modelación (IPCC, 2014).

A partir de estas directrices se incrementaron los esfuerzos para desarrollar metodologías más confiables para la estimación directa e indirecta de los almacenes de carbono, en diferentes ecosistemas y a diferentes escalas (Bradford *et al.*, 2010; Guo *et al.*, 2010; Murdiyarso *et al.*, 2010).

2.3. Estimación de carbono en humedales costeros

Sabiendo la importancia de los humedales costeros en el tema de la emisión de GEI por sus elevados reservorios de carbono orgánico, el IPCC publica en el 2014 un anexo (IPCC, 2014) para dar pautas sobre la realización de inventarios en humedales a partir, principalmente, de experiencias específicas en manglares y marismas salobres. Debido a las condiciones de campo y el peso de la madera de los manglares se indica que es difícil un estudio preciso sobre biomasa. En general dan como válido el uso de ecuaciones alométricas ya que no es un método destructivo y es por lo tanto útil para la estimación de los cambios temporales de biomasa forestal por medio de mediciones del diámetro normal (dn) o también llamado diámetro a la altura de pecho (DAP) en observaciones subsecuentes.

Por su lado, en los últimos años muchas organizaciones y grupos de investigadores han desarrollado la estimación de almacenes de carbono en humedales costeros (Goetz *et al.*, 2009; Houghton *et al.*, 2009; Murdiyarso *et al.*, 2010; Pendleton *et al.*, 2012; Adame *et al.*, 2013; CEC, 2016a). Entre estos, la Comisión para la Cooperación Ambiental de América del Norte (CEC por sus siglas en inglés) al hablar del tema como carbono azul (CEC, 2016b) menciona que la variabilidad espacial en las reservas de carbono en el suelo tanto en densidad como en

profundidad dentro del mismo ecosistema de humedal supone un reto para poder calcular el total de carbono almacenado (CEC, 2013, 2016b)

En este contexto, la falta de datos geoespaciales precisos y relacionados con los ecosistemas de humedales hicieron que muchos esfuerzos se concentraran en la estimación de biomasa aérea a partir de sensores remotos (Guo *et al.*, 2010; Klemas, 2013a, 2013b). Estas técnicas están permitiendo obtener información útil y confiable para el monitoreo temporal y espacial de la parte aérea de los humedales. Sin embargo, debido a las limitaciones de estos sensores y el costo-beneficio de estas técnicas, la parte de la estimación de biomasa subterránea (Adhikari *et al.*, 2014; Guevara *et al.*, 2018; Vicharnakorn *et al.*, 2014; Zhi *et al.*, 2014) aún tiene sus limitaciones.

Existen lineamientos del IPCC (2014) que permiten relacionar la biomasa aérea con la biomasa subterránea (principalmente raíces). En México se han realizado este tipo de estudios a partir de fórmulas alométricas (Adame *et al.*, 2013, 2015; Kauffman *et al.*, 2015). Sin embargo, los intentos de poder predecir los almacenes aéreos y subterráneos en humedales costeros aún son incipientes y en muchos casos sólo se consideran los elementos de la vegetación (Adame *et al.*, 2015; Pendleton *et al.*, 2012; Kauffman *et al.*, 2015), el tipo de suelo, geomorfología (Stringer *et al.*, 2016) o el régimen hídrico por separado.

2.4. Distribución espacial de almacenes de carbono en humedales costeros

La predicción de la distribución espacial de los almacenes de carbono o también conocida como “escalamiento”, que consiste en generar mapas continuos de áreas más grandes a partir de los datos de campo, utiliza diferentes enfoques para este fin (Baritz *et al.*, 2018). Muchos trabajos continúan con la estimación de la distribución de almacenes totales de carbono (aéreo y subterráneo) en humedales costeros utilizando el enfoque de escalamiento convencional (Adame *et al.*, 2013, 2015, Kauffman *et al.*, 2015, 2018), es decir por coincidencia de clases de otros

mapas (vegetación, tipo de suelos, etc.) o realizan una generalización y delimitación arbitraria de sus áreas de estudio.

Otros enfoques de escalamiento un poco más modernos y estadísticamente más robustos, realizan la predicción de la distribución espacial de estos almacenes a partir de la coincidencia geo-espacial, técnicas de interpolación o minería de datos (Aslan *et al.*, 2016; Guevara *et al.*, 2018; Rajashekar *et al.*, 2018; Sanderman *et al.*, 2018).

Estos esfuerzos, aunque empiezan a considerar elementos del paisaje como variables explicativas de la distribución de los almacenes de carbono (Guevara *et al.*, 2018; Twilley *et al.*, 2018; van Ardenne *et al.*, 2018) aún no presentan una perspectiva integradora entre las diferentes variantes estructurales de los ecosistemas de humedales costeros. Y aunado a esto, al dirigir sus estudios a un solo de tipo de vegetación, que generalmente son los manglares, llegan a perder la capacidad de valoración de la relación entre la configuración espacial del paisaje y los procesos que en este se desarrollan.

2.5. Análisis paisajístico y almacenes de carbono en humedales costeros

Es conocido que la génesis y las funciones del humedal, entre ellas la de almacenamiento de carbono, se relacionan también con otros factores bióticos y abióticos, los cuales deben ser tomados en cuenta para poder tener un conocimiento integral del mismo (Mitsch & Gossilink, 2000; de Groot *et al.*, 2018).

Actualmente, existen numerosos estudios en los que el empleo de indicadores de variabilidad geográfica dentro del análisis de las ciencias del paisaje permitieron establecer relaciones coherentes y en algunos casos estadísticamente significativas con diferentes atributos o funcionalidades del territorio (Romme, 1982; Rowe, 1995; González-Areu, 2000; Priego-Santander *et al.*, 2003; Priego-Santander, 2004; Morales, 2006; Priego-Santander *et al.*, 2013; Klimina & Mirzekhanova, 2014).

Sin embargo, hasta ahora ningún estudio ha relacionado de manera holística la comprensión de la distribución de los almacenes de carbono en humedales costeros.

En México, la generación de cartografía digital sobre la distribución de almacenes de carbono en humedales costeros es escasa (Herrera & Teutli, 2017; Rodríguez *et al.*, 2016). Sin embargo, ya existen ejercicios a nivel mundial o continental de cálculos de almacenes de biomasa aérea o carbono orgánico en suelos (Saatchi *et al.*, 2011; Baccini *et al.*, 2012; Stockmann *et al.*, 2015; Guevara *et al.*, 2018; Sanderman *et al.*, 2018) de manera separada o enfocada a un solo tipo de vegetación de humedal costero (Hu *et al.*, 2016; Rozainah *et al.*, 2018)

A pesar de estos grandes avances, existe una desventaja de este tipo de análisis a nivel global, y es que muchas veces, los modelos tienden a suavizar y homogenizar los valores reales obtenidos en campo. Es decir, eliminan valores extremos de la distribución de datos y por lo tanto la importancia que podría mostrar un sitio como almacén de carbono se ve disminuida.

A nivel local, en las regiones de Pantanos de Centla y Laguna de Términos, se han realizado importantes esfuerzos, principalmente en zonas de manglar, para determinar valores de almacenes de carbono (Guerra-Santos *et al.*, 2014; Kauffman *et al.*, 2015). A pesar de estos esfuerzos, muchos no se encuentran publicados y aún existen vacíos de información en el territorio lo cual no permite realizar una caracterización territorial de estos almacenes.

2.6. La Geoecología como un enfoque integrador de los elementos naturales

Las bases teóricas del concepto de paisaje fueron establecidas en el siglo XIX a partir de los aportes y estudios naturalistas del científico ruso V. V. Dokuchaev y el biogeógrafo alemán A. Humboldt (Mateo, 1984; Kolomyts, 2018).

A finales de los años 30, Carl Troll introdujo el concepto de paisaje y el término de ecología del paisaje como una nueva disciplina de corte biológico que resultaba de

la intersección de la geografía física y la ecología (Bocco, 2003). A partir de ahí, principalmente las ciencias biológicas y las geográficas, han desarrollado el concepto de paisaje como eje central en al menos tres direcciones: (Mateo, 2002)

- ✓ La primera, proveniente de las ciencias biológicas que consolidaron la visión y el enfoque biocéntrico de la ecología del paisaje al considerar el paisaje como la expresión espacial de los ecosistemas. Denominada comúnmente Ecología del Paisaje.
- ✓ La segunda proviene de las ciencias geográficas con una orientación de tipo socio-cultural, que desarrolló el concepto de paisaje a partir de los estudios de Carl Sauer centrado en la dimensión socio-ecológica concibiendo al paisaje como un “*paisaje cultural*”.
- ✓ La tercera también de las ciencias geográficas, con una orientación predominantemente biofísica en la cual y a partir del concepto de geosistema propuesto por Viktor Sochava en los años 60, presentaba el gran reto de interpretar el paisaje con una visión sistémica. Es decir la integración de la dimensión espacial con la funcional formada por cinco atributos básicos (estructura, funcionamiento, dinámica, evolución e información). De esta manera, el concepto de paisaje evolucionó a una visión de complejo natural integral o también definido como “*paisaje natural*” o “*paisaje antroponatural*” según la composición y relación de sus elementos (Mateo, 2002).

En esta última dirección, se desarrolla la noción de que la envoltura geográfica está formada por complejos naturales de diferentes jerarquías, complejidades y dimensiones. Entre la década de los 70s y 80s la Geografía física compleja o Geografía del paisaje incorpora a sus teorías y métodos la aplicación del enfoque de sistemas permitiendo de esta forma desarrollar la taxonomía, clasificación y cartografía de estos geosistemas.

Existen tres categorías de sistemas espaciales de complejos naturales (Haase & Neumeister, 1986): i) el *nivel planetario*, que abarca el planeta Tierra como un todo y se distingue por unidades diferenciadas por factores zonales, latitudinales e hidrotérmicas; ii) el *nivel regional* formado por paisajes de grandes dimensiones y

pueden abarcar estudios continentales, regiones físico- geográficas, ecosistemas, etc. y se caracterizan por sus estructuras complejas, por tener diferentes edades y diferentes estados de desarrollo y iii) el *nivel local*, con unidades de menor dimensión, se distinguen por que en su desarrollo además de los factores planetarios y regionales inciden los resultados de su propio desarrollo a consecuencia de la interacción entre los diversos geocomponentes.

A los niveles regional y local, los paisajes naturales son formados por los factores geológicos, climáticos, de relieve, hídricos, edáficos y bióticos que en su interrelación dialéctica cada uno desempeña un papel en la composición, estructura, funcionamiento, evolución y dinámica del paisaje (Mateo, 2002; Gao *et al.*, 2018; Kolomyts, 2018)

La diferenciación paisajística a estos niveles se refleja en un sistema propio de clasificación jerárquica y taxonómica anidada. Cada nivel está caracterizado por índices diagnósticos que corresponden a un determinado nivel estructuro-funcional del mismo, dependiente de la escala (Verstappen, 1983).

De esta manera, surge un tipo de clasificación de los complejos naturales denominada tipología de los paisajes. La tipología físico-geográfica delimita las unidades por su semejanza y repetitividad en el espacio siguiendo determinados parámetros de homogeneidad estructural relativa (Mateo, 2008). Las unidades de paisajes físico-geográficos están determinadas por la unidad mínima cartografiable de la escala de trabajo.

En los últimos 40 años, el desarrollo de la Geografía del Paisaje y su enfoque físico-geográfico permitió la evolución del estudio de los paisajes físico-geográficos desde su exclusivo enfoque de los elementos naturales a considerar la transformación del territorio por la acción humana en diferentes magnitudes. Esta evolución, permitió el desarrollo de un nuevo enfoque denominado Geoecología o enfoque geoecológico, como parte de las ciencias geográficas, analiza la estructura y función del paisaje reconociendo las interacciones de los paisajes naturales con los

sistemas sociales y las modificaciones que estos últimos generan o pueden generar en los sistemas naturales para formar los sistemas ambientales.

La cartografía de estos geosistemas es tarea de la Geografía del Paisaje, así, se generan los denominados mapas de unidades de paisajes físico-geográficos. La Geoecología utiliza estas unidades espaciales, que son modificadas por la actividad humana, como base para los estudios de la interrelación naturaleza-sociedad como sistemas ambientales o como soporte para el estudio espacial de las métricas en Ecología del paisaje. Por ello, se relacionan con diferentes tipos de investigaciones como los estudios de la heterogeneidad de los paisajes en el análisis ecológico, la planificación, el ordenamiento territorial, la evaluación del estado del ambiente, diagnósticos de degradación del territorio, gestión ambiental así como pronósticos ambientales entre otros (Bollo-Manent, 2018).

En México, el conocimiento geográfico y ecológico del territorio así como la aplicación del enfoque físico-geográfico desde la Geografía del Paisaje y el enfoque geoecológico desde la Geoecología como ciencia geográfica, en diferentes regiones de México (Bollo-Manent *et al.*, 2015; Priego-Santander *et al.*, 2010) ha permitido el desarrollo de una versión propia de unidades taxonómicas dentro de la cartografía de los paisajes físico-geográficos, que se adapta de forma más adecuada a la terminología empleada en el país. Por otro lado, la disponibilidad de cartografía temática de los principales componentes físico-geográficos de los paisajes se encuentra principalmente a escala 1:250 000, siendo esta un parteaguas entre el contexto regional y local de los paisajes.

Finalmente, dentro de los diferentes enfoques de análisis del paisaje, la heterogeneidad del paisaje, estudiada en muchos casos desde el punto de vista biocéntrico (Forman 1995, Kotliar & Wiens, 1990) como el grado de agregación o dispersión de los parches de vegetación o uso del suelo, es reconocida por la Geoecología como heterogeneidad geoecológica (Rowe, 1995). Esta última cuantifica la estructura horizontal de los paisajes físico-geográficos, a partir de la diferenciación espacial de los mismos. Se ha demostrado que el estudio de la heterogeneidad geoecológica puede ser una herramienta útil para el entendimiento

de procesos ecológicos particulares, permitiendo de esta manera hacer relaciones e inferencias de las mismas (García-Illamas *et al.*, 2018; Priego-Santander & Esteve-Selma, 2017; Stein & Kreft, 2014). Es en este contexto, que a partir del conocimiento de la heterogeneidad geoecológica y su relación con la capacidad de almacenamiento de carbono de los ecosistemas costeros, en el cual se enmarca este estudio, se pretende contribuir a una de las principales líneas de aplicación de la Geoecología como es la gestión ambiental. Ya que por medio de la delimitación del territorio de acuerdo a su contenido de carbono orgánico almacenado podrá apoyar a la planificación del uso y conservación de estas áreas desde el punto de vista de emisiones de gases de efecto invernadero, en concordancia con las directrices de la CMNUCC.

2.7. Síntesis del Capítulo 2

- ✓ Se ha demostrado con estudios científicos que datan desde hace más de seis décadas que los humedales costeros juegan un papel importante en la provisión de servicios ecosistémicos.
- ✓ Actualmente el entendimiento del papel que juegan los humedales costeros en el ciclo del carbono, así como la dinámica y distribución de los flujos y almacenes de carbono es de vital importancia para tomar acciones a corto, mediano y largo plazo frente a los procesos de transformación de sus coberturas con la consiguiente liberación de gases de efecto invernadero.
- ✓ La mayoría de los estudios sobre distribución de almacenes de carbono son realizados en extensiones territoriales reducidas, son puntuales, enfocados en un tipo de vegetación que generalmente es arbórea y existe una vinculación mínima con variables del medio natural.
- ✓ La Geoecología como ciencia que llega a integrar los atributos naturales de la superficie terrestre y que como punto de partida delimita de forma jerárquica y taxonómica el territorio puede perfilarse, a partir del análisis de la heterogeneidad geoecológica de las unidades de los paisajes físico-geográficos, como un enfoque útil para la estimación y la predicción de la distribución de los almacenes de carbono.

3. MATERIALES Y MÉTODOS

Esta investigación, al tomar como base la ciencia del paisaje para la evaluación de los almacenes de carbono en humedales costeros, parte de la diferenciación físico-geográfica del área de estudio a través de la sistematización y clasificación de las unidades individuales a escala 1:250 000 (mapa de paisajes naturales).

Los sólidos fundamentos de la Geografía del Paisajes (Mateo, 2002), nos permite utilizar las propiedades y las leyes de diferenciación del paisaje para realizar el estudio de la organización paisajística por medio de una distinción de los tipos encontrados según los criterios de semejanza (clasificación tipológica).

En este estudio, debido a que se realiza la evaluación en un territorio donde los impactos antrópicos directos son muy localizados y mínimos se decidió trabajar las unidades locales con el término de *paisaje natural* que se define según Timashev (1999) como “un área de la superficie terrestre de cualquier dimensión de rasgos comunes, repetibles en el espacio físico-geográfico, formado por la interacción de sus componentes naturales o modificados mínimamente por la actividad antrópica, formando un sistema integrado” (Citado en Mateo, 2002).

3.1. Área de estudio

El área de estudio comprende la parte continental terrestre de los humedales costeros de dos áreas naturales protegidas (ANPs) (CONANP, 2016), Área de Protección de Flora y Fauna Laguna de Términos (APFFLT) y la Reserva de la Biósfera Pantanos de Centla (RBPC) así como el sitio prioritario PY75-CONABIO (Conabio, 2009), situados en el Golfo de México entre los 17.96° y 19.33° de latitud norte y 92.80° y 90.72° de longitud oeste (Figura 1). El sitio prioritario de manglar PY75-CONABIO fue incluido para obtener un análisis más amplio de los humedales costeros que conforman la región de Laguna de Términos. Para términos prácticos, en este documento solo se hará mención de las dos ANPs, entendiéndose que los resultados encontrados en la APFFLT engloban a este sitio prioritario. La parte

marina y cuerpos de agua que se encuentran dentro de los límites de las ANPs mencionadas anteriormente, no fueron tomados en cuenta debido a que la evaluación de almacenes fijos de carbono se concentró en los diferentes tipos de humedales que presentaban algún tipo de vegetación emergente en estos ecosistemas costeros.

En total el área evaluada abarca una superficie de 9,023.6 km² de humedales costeros situados entre los estados de Tabasco y Campeche en México.

El clima costero de esta región es de tipo cálido sub-húmedo con lluvias en verano (García-Conabio, 1998). La precipitación media anual varía entre los 1,686 mm a 2,399 mm, la temperatura media anual oscila entre 21.7 y 24.7 °C. Estos humedales costeros se caracterizan por presentar en su mayor parte planicies y suelos de drenaje deficiente tipo Gleysol, Fluvisol y Solonchak.

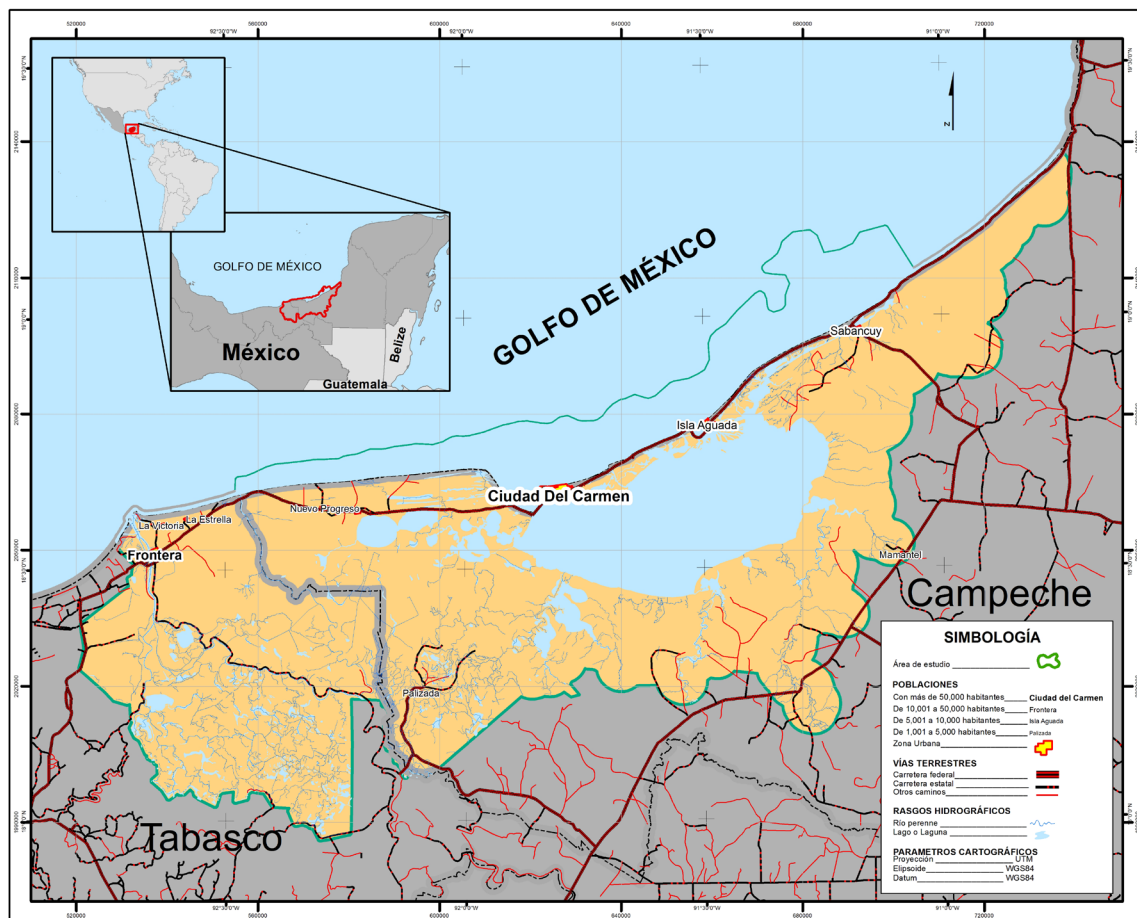


Figura 1. Ubicación del área de estudio

En la cobertura vegetal encontramos comunidades de hidrófitas (*Typha domingensis*, *Cladium mariscus* spp. *jamaicense*, *Cyperus* sp., *Pistia stratiotes*, *Pontederia sagittata*, *Phyllanthus fluitans*, *Nymphaea* sp.), pastos (*Sporobolus spartinae*, *Muhlenbergia* sp.), selvas bajas, selvas medianas subperennifolias de inundación periódica (*Manilkara zapota*, *Bursera* sp.), vegetación riparia (*Pachira aquatica*, *Bucida buceras*), manglares (*Rhizophora mangle*, *Laguncularia racemosa*, *Avicennia germinans* y *Conocarpus erectus*), matorral de mucal (*Mimosa pigra*) y algunos palmares inundables (*Sabal mexicana*) (INEGI, 2013a; 2014; Lot, 2015).

3.2. Trabajo de campo

Se realizaron dos campañas de campo (2015 y 2017) con dos objetivos claros:

a) Para realizar estaciones de paisaje, de las cuales se obtuvo información sobre suelos, periodicidad de inundación y vegetación. Además, en la descripción de cada estación se definió la unidad superior (*Localidad*) y unidad inferior (*Paraje simple*) del paisaje visitado.

Esta información fue útil para la verificación, validación y mejora de la hipótesis cartográfica del mapa de los paisajes naturales.

b) Para la obtención de variables estructurales de la vegetación arbórea, arbustiva y herbácea de los puntos muestreados con el fin de poder determinar en gabinete valores de biomasa aérea y biomasa subterránea. Adicionalmente, cuando fue posible se obtuvieron muestras de suelos para la determinación en laboratorio de carbono orgánico en sedimentos. Las descripciones más detalladas de los métodos empleados para la determinación de biomasa/carbono se encuentran en la sección 3.6 de este capítulo.

3.3. Generación del mapa de paisajes naturales

La elaboración del mapa de los paisajes naturales del área de estudio a una escala 1: 250 000, siguió la propuesta de generación de unidades de paisajes de manera semi-automatizada de Priego *et al.* (2010), con algunas modificaciones de acuerdo a las características del área (Figura 2).

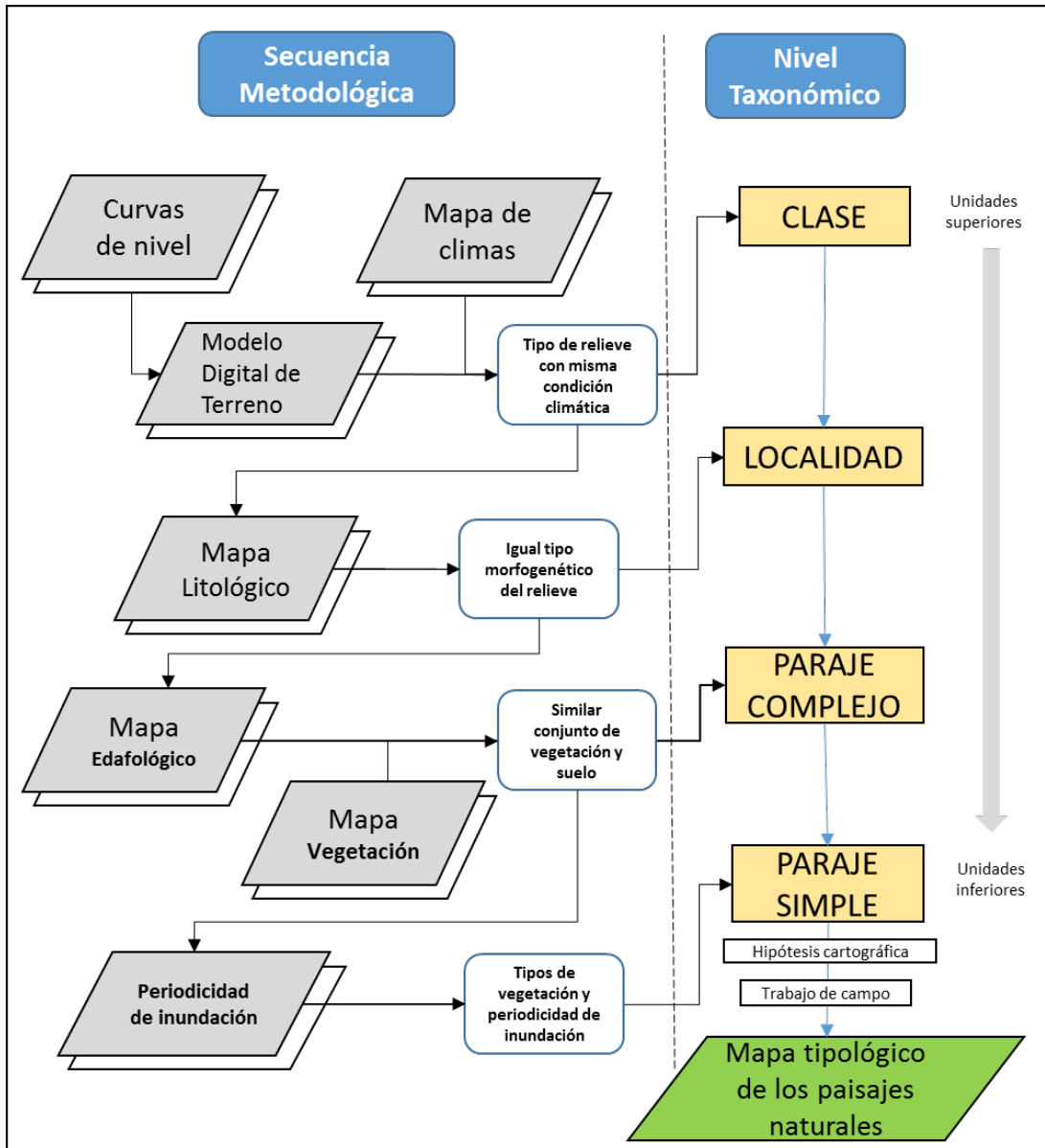


Figura 2. Esquema de la secuencia metodológica para la elaboración del mapa de paisajes.

La delimitación y mapeo de las unidades tipológicas de paisaje se basaron en la definición de una estructura jerárquica con cuatro niveles taxonómicos (Tabla 1) fundamentada en los postulados de la Geografía Física Compleja referidos por Mateo (2002), y que han sido adaptados y usados ampliamente en el contexto geográfico mexicano (Priego-Santander, *et al.*, 2010; Campos & Priego-Santander, 2011; Ramírez, 2013; Flores-Domínguez, *et al.*, 2014; Bollo-Manent *et al.*, 2015; Morales & Priego-Santander, 2017).

Tabla 1. Definición y criterios de las unidades taxonómicas.

Nivel taxonómico	Índices diagnóstico
Clase	Conjunto de morfo-estructuras con tipo específico del relieve en una misma condición climática.
Localidad	Comunidad territorial de igual tipo morfogenético del relieve. Presenta similar homogeneidad litológica o tipo de depósitos.
Paraje Complejo	Asociaciones del mismo conjunto morfológico de mesoformas del relieve. Predominio de iguales agrupamientos de suelos y similar conjunto de formaciones vegetales y tipos de suelo.
Paraje Simple	Misma periodicidad de inundación con mismo tipo de comunidades vegetales y similares grupos y subgrupos de suelo.

Todos los insumos cartográficos utilizados para la realización del mapa de paisajes, así como su escala y su referencia, se encuentran mencionadas en la Tabla 2.

Cada mapa fue homogenizado para que su extensión y límites coincidieran entre sí, utilizando como marco de referencia el mapa de uso de suelo y vegetación de la zona costera de la CONABIO (2016), debido a que se trataba de la cobertura más actualizada de la zona, especialmente para los límites de los cuerpos de agua.

Tabla 2. Insumos cartográficos base para la definición de paisajes tipológicos.

Nombre	Escala	Fuente*
Mapas topográficos digitales de Campeche y Tabasco	1:50 000	INEGI, 2016.
Mapa digital de los climas de México	1: 1 000 000	García – CONABIO, 1998.
Mapas geológicos digitales de Campeche y Tabasco	1 : 250 000	INEGI, 1981; Servicio Geológico Mexicano (SGM), 2004, 2005.
Mapa edafológico de México	1 : 250 000	(INEGI, 2007)
Mapa de uso de suelo y vegetación de la zona costera de Campeche y Tabasco	1 : 50 000	CONABIO, 2016
Mapa digital de áreas de inundación de la Laguna de Términos	1 : 250 000	EPOMEX-IG/UNAM-CONABIO, 2000

* Los claves de todas las cartas vectoriales utilizadas se encuentran en la sección de referencias.

Las etapas para determinar cada nivel taxonómico, según la definición y criterios descritos en la Tabla 1, fueron las siguientes:

1) Nivel Taxonómico: *Clase*.

A partir de las curvas de nivel se generó el modelo digital de elevación con el cual se determinó que morfométricamente el área de estudio se encuentra en planicies (costeras) sub-horizontales según su disección vertical ($Dv \leq 2.5$). Posteriormente se realizó la definición climática de estas planicies con la sobreposición de tipos de clima, cuyo resultado fue de planicies en clima cálido para toda el área. En este punto de la integración del tipo de clima, es necesario realizar las siguientes consideraciones según las premisas de Priego-Santander *et al.*, (2010): a) Aunque el mapa de clima presenta una escala de 1:1 000 000, fue utilizado para este producto de 1:250 000, ya que es la única fuente oficial de climas en el país; b) el clima posee una distribución continua y en la naturaleza la diferenciación entre tipos de clima se realiza de una forma gradual y continua. En excepciones los cambios son abruptos; c) Los tipos de clima ocupan extensas áreas, lo que reduce los errores que se pueden cometer al ampliar un mapa 1:1 000 000 a escalas mayores y d) el área de estudio comprende un solo tipo climático (cálido húmedo), lo que facilita la determinación de esta clase.

2) Nivel Taxonómico: *Localidad*.

La base de este nivel taxonómico estuvo centrada en la determinación de la composición litológica de estas planicies, a partir de la sobreposición de los mapas geológicos del SGM y del INEGI. Se determinaron los tipos litológicos consistentes con la zona y se eliminaron todos los polígonos que no cumplieran con el área mínima cartografiable (1 km²).

El trabajo de campo para validación y/o corrección de las unidades superiores (*Localidades*) del mapa y la leyenda, así como la obtención de información de vegetación y periodicidad de inundación, fueron útiles y muy importantes para la conformación de las unidades intermedias e inferiores.

3) Nivel Taxonómico: Paraje complejo.

Al resultado anterior, se sobrepuso cartográficamente el mapa de uso de suelo y vegetación y posteriormente el mapa edafológico, teniendo como resultado la integración de estas dos capas (vegetación y suelos). De esta manera se generaron las unidades intermedias de paisajes o nivel de Paraje complejo. Posteriormente, se realizó la generalización conceptual y espacial del producto (aplicación del área mínima cartografiable de 1 km²) y se determinó el grupo de vegetación presente y dominante en cada unidad de paisaje.

4) Nivel Taxonómico: Paraje simple.

Para este nivel, las unidades se desagregaron por tipo de vegetación y periodicidad de inundación, obtenida a partir de datos de campo, tipo de vegetación y mapas de inundación del área de estudio. Como mencionan *Priego-Santander et al.* (2010), la periodicidad de inundación es un factor ecológico importante de diferenciación. Estas unidades, según su periodicidad, pueden llegar a ser muy dependientes de la interacción con los usos del territorio adyacente y el gradiente de inundación puede permitir el establecimiento de un continuo entre sistemas lago-humedal-tierra. Por lo anterior, se aplicó la clasificación basada en el periodo de meses en que el suelo está saturado en agua.

Una vez realizada esta integración de los atributos del paisaje se obtuvo la hipótesis cartográfica, con la cual se fue a campo (ver sección 3.2) y donde se realizó una identificación en terreno del tipo de relieve, génesis, clima, suelos, vegetación y periodicidad de inundación.

Una vez en gabinete se procedió a corregir, si era el caso, las unidades que estuvieran mal clasificadas en la hipótesis cartográfica, teniendo en cuenta todas las anotaciones y observaciones realizadas en campo. Finalmente, luego de una depuración final por cambios que pudieran haber sufrido los polígonos se obtuvo el mapa tipológico final de los paisajes naturales del área de estudio a escala 1:250000.

3.4. Evaluación de la heterogeneidad geocológica de los paisajes

Al considerar el paisaje como un sistema integrado, se realizó un análisis de los atributos sistémicos del mapa generado a partir de un enfoque de estructura horizontal que permite una evaluación cuantitativa del grado de complejidad de la estructura espacial paisajística del área de estudio. Esta estructura espacial desde el punto de vista geocológico es un reflejo de la geodiversidad o riqueza de los paisajes (Mateo, 2002) que está estrechamente relacionada con la noción de heterogeneidad. Los efectos de la heterogeneidad son importantes para entender el paisaje ya que, por ejemplo, entre unidades contrastantes puede existir un incremento de intensidad en el intercambio de materia y energía conocido como efecto de borde o geocotono (Smith *et al*, 2014).

Para estudiar la heterogeneidad del paisaje, generalmente se utilizan las particularidades geométricas de la estructura horizontal del paisaje, que se obtienen a partir del cálculo de índices generados específicamente para estos análisis (Snacken & Antrop, 1983) u otros índices generalmente empleados en ecología para conocer diversidad biológica, que fueron aplicados y adaptados para estudios de los paisajes (Priego-Santander *et al.*, 2003; Morales, 2006; Ramírez-Sánchez & Priego-Santander, 2012; Priego-Santander *et al.*, 2013).

En este estudio, se aplicaron diez diferentes índices al mapa de paisaje para explorar la heterogeneidad geocológica. En la siguiente tabla se presentan los índices y las ecuaciones empleadas para los cálculos (Tabla 3).

Con los resultados obtenidos y mediante la clasificación de intervalos con el método de optimización de Jenks (Jenks, 1967), se generaron cartogramas de cada índice con cinco categorías cada uno: Muy Alto, Alto, Medio, Bajo y Muy Bajo. El método de Jenks es un método de agrupamiento diseñado para determinar el mejor arreglo de valores en diferentes clases, el cual minimiza la varianza de las observaciones con relación al promedio dentro de cada grupo y por otro lado maximiza la desviación entre grupos diferentes.

Tabla 3. Índices empleados para la evaluación de la heterogeneidad geocológica.

Índice	Ecuación	Referencia
Complejidad Corológica	$CC = ni/A$	Snacken & Antrop, 1983
Complejidad Tipológica	$CT = ni/Nc$	Snacken & Antrop, 1983
Riqueza de Paisajes	$R = Nc/Nc_{max}$	Romme, 1982; Turner, 1989
Diversidad de McIntosh	$U = \sqrt{\sum ni^2}$	McIntosh, 1991
Diversidad de Shannon-Wiener	$H' = -\sum p_i \ln p_i$	Hutcheson, 1970
Dominancia de McIntosh	$D = (N\sqrt{\sum p_i^2}) / (N - \sqrt{N})$	McIntosh, 1991
Singularidad paisajística	$S = ni/N$	Mateo, 2002
Diversidad máxima	$Hmax = \ln(Nc)$	Turner, 1989
Índice de Diversidad paisajística	$IDP = (ni/A)Nc$	Viktorov, 1986
Fraccionamiento paisajístico	$K = 1/ni$	Viktorov, 1986

ni : Número de polígonos de la clase i (*Paraje simple*) en la unidad (*Paraje complejo*); Nc : número de clases de paisajes (*Parajes simples*) presentes en la unidad (*Paraje complejo*); Nc_{max} : número máximo de clases de paisajes (*Parajes simples*) posibles de ocurrir en la unidad (*Paraje complejo*); A : área de la unidad en km^2 ; p_i : ni/N ; N : número total de polígonos en la unidad (*Paraje complejo*).

3.5. Antropización de la cobertura vegetal de los paisajes

La antropización de los paisajes es el grado de modificación de un ecosistema original por acción directa o indirecta del ser humano, en el cual, los factores de persistencia y tamaño de la modificación son evaluados conjuntamente (Shishenko, 1988)

El análisis y la evaluación cuantitativa de las comunidades vegetales antropizadas en el área de estudio permite conocer el grado de modificación de la composición vegetal y su ubicación espacial. Este análisis permitirá poder relacionar y entender si las modificaciones de tipo antropogénico sobre el paisaje influyen y determinan la distribución y el almacenamiento de carbono orgánico en los humedales costeros.

A pesar de que la mayor parte del área de estudio se encuentra en un aparente buen estado de conservación y mínima influencia humana debido a la presencia de las dos ANPs que cubren aproximadamente el 66% del territorio, la región ha experimentado en los últimos años un fuerte impulso para el desarrollo agrícola. Las principales transformaciones de las coberturas naturales se encuentran fuera de las ANPs, en la parte sur-este de esta región (sitio prioritario PY-75) con modificaciones de selvas subperennifolias inundables para el establecimiento de cultivos de palma africana (*Elaeis guineensis*).

Para conocer cuál es el grado de modificación que presenta la cobertura vegetal, se ha desarrollado, entre otros ((Martínez, 2003; Steinhardt *et al.*, 1999), el Índice de Antropización de la Cobertura Vegetal (IACV) aplicado a geocomplejos ponderando el tipo de uso y cobertura (Shishenko, 1988). Este índice, ha sido adaptado al contexto de los tipos de uso del suelo y vegetación de los paisajes en México (Mathews, 2008; Ramírez, 2013; Flores, 2016) a diferentes escalas geográficas, obteniendo resultados satisfactorios para el análisis y caracterización del paisaje.

El IACV propuesto por Shishenko (1988) fue calculado según la ecuación 1.

$$IACV = \frac{\sum_i^n ri * A_{ij}}{AT} \quad (1)$$

Dónde:

IACV: Índice de Antropización de la Cobertura Vegetal.

ri: Ponderación del grado de transformación antropogénica de los paisajes "i" de cobertura vegetal.

A_{ij}: Área (km²) de uso/cobertura antrópica "i" en el geocomplejo "j".

AT_j: Área total (km²) del geocomplejo "j".

Según este índice, el área de cada tipo de cobertura del suelo de cada unidad de paisaje se pondera con un valor que va entre 0.01 y 0.99. La ponderación se realiza con criterios del grado de naturalidad que puede presentar una cobertura y esta puede variar de acuerdo al territorio. La ponderación propuesta para este estudio (Tabla 4), se realizó según la experiencia ya adquirida de los trabajos mencionados y realizados anteriormente en México y considerando que el objetivo de este análisis

es su relación con los almacenes de carbono. Estos análisis, generalmente utilizan alguna versión de la cartografía de vegetación y uso del suelo del INEGI, debido a que no se producen mapas exclusivos para la generación de este tipo de índices. La ventaja de utilizar los mapas del INEGI para el cálculo del IACV, es que se cuenta con información de la condición de la vegetación (Primaria/Secundaria) así como información a mayor detalle del tipo de uso del suelo, lo cual permite una ponderación más específica del grado de transformación antropogénica. En este estudio se decidió conjuntar la información de coberturas de vegetación a mayor detalle y más actualizadas (CONABIO 2016) utilizadas para la generación del mapa de paisajes y la información de la condición y tipos de uso del INEGI serie V.

Tabla 4. Ponderación de los tipos de vegetación o uso del suelo para el IACV.

	Tipos de vegetación o Uso del suelo	Ponderación del grado de transformación
Vegetación primaria	Humedales herbáceos de tule	0.01
	Humedales herbáceos mixtos* (Tular-Popal)	
	Humedales herbáceos mixtos de pastizales	
	Humedales arbustivos	
	Mangle negro (<i>Avicennia germinans</i>)	
	Mangle botoncillo (<i>Conocarpus erectus</i>)	
	Manglar mixto (<i>Rhizophora mangle</i> + otros)**	
	Selva de galería	
	Selva subperennifolia	
Vegetación secundaria	Mangle negro (<i>Avicennia germinans</i>)	0.15
	Mangle botoncillo (<i>Conocarpus erectus</i>)	0.15
	Manglar mixto (<i>Rhizophora mangle</i> + otros)**	0.15
	Selva de galería	0.20
	Selva subperennifolia	0.20
	Humedales herbáceos de tule	0.20
	Humedales herbáceos mixtos* (Tular-Popal)	0.20
	Humedales herbáceos mixtos de pastizales	0.30
Uso del Suelo	Pastizal inducido	0.40
	Plantación forestal	0.40
	Agricultura	0.75
	Zona Urbana	0.99
Otras categorías	Sin vegetación aparente	0.01

Los resultados son clasificados de tres a cinco categorías (Muy Bajo, Bajo, Medio, Alto y Muy Alto), según el método de rompimiento natural de Jenks explicado anteriormente en el apartado 3.4.

3.6. Cálculo de los almacenes de carbono

En el año 2014 el IPCC publica un anexo para dar pautas sobre la realización de inventarios de carbono para manglares. Debido a las condiciones de campo y el peso de la madera de los árboles se dificulta un estudio preciso sobre biomasa (IPCC, 2014). En general se da como válido el uso de ecuaciones alométricas ya que no es un método destructivo y es por lo tanto útil para la estimación de los cambios temporales de biomasa forestal.

Un año más tarde un grupo de reconocidos investigadores en diferentes tipos de humedales realizaron el esfuerzo de generar una guía de métodos para evaluar almacenes de carbono en el marco de la denominada *Iniciativa del Carbono Azul* (Fourqurean *et al.*, 2014), la cual comprende distintos métodos de estudio para los ecosistemas costeros de manglar, marismas salobres y pastos marinos.

En el presente estudio de evaluación geoecológica de humedales se siguen los métodos para la colecta de campo y análisis en gabinete propuestos por Fourqurean *et al.* (2014) para determinar carbono orgánico. Para fines prácticos en este escrito se considera el término de *Almacén de Carbono* a la suma de las concentraciones de carbono expresadas en *Mega gramos de carbono por hectárea* (Mg C ha^{-1}) y que se encuentran en la parte aérea y subterránea de cada unidad de paisaje (Tabla 5):

Tabla 5. Componentes de un almacén de carbono por cada unidad de paisaje.

Almacén de carbono (por unidad de paisaje)	Almacenes de carbono aéreo	Biomasa aérea viva (árboles, arbustos y herbáceas).
		Biomasa aérea muerta (troncos y ramas caídas frescas o en descomposición).
	Almacenes de carbono subterráneo	Biomasa subterránea de vegetación viva (raíces y rizomas).
		Carbono orgánico en suelos hasta 1m de profundidad.

En la Figura 3 se presenta esquemáticamente los pasos seguidos para la estimación de los almacenes de carbono, tanto aéreo como subterráneo. La estimación se basa en la generación de un modelo de predicción de valores de carbono a partir de datos puntuales de campo y variables independientes previamente seleccionadas y homologadas.

Ambos modelos fueron trabajados con el método de aprendizaje automatizado de *Random forest* (Breiman, 2001) en el software R (2015), que está basado en árboles

de decisión y realiza una validación cruzada para la evaluación de los errores del modelo generado. La ventaja de utilizar este enfoque es que reduce el sobreajuste y por lo tanto es más preciso, comparado con otros métodos de regresión en el plano espacial, como por ejemplo DoKriging (Witten *et al.*, 2013).

Finalmente, para obtener un mapa de carbono del área de estudio se procedió a la unión de los dos mapas resultantes de almacenes de carbono aéreo y subterráneo, en formato raster, mediante la suma aritmética de cada pixel. Este mapa se transformó a formato vector y se obtuvo el valor de almacén de carbono total por unidad de paisaje mediante una operación de identidad en el software QGIS 3.4.4. (QGIS Development Team, 2018)

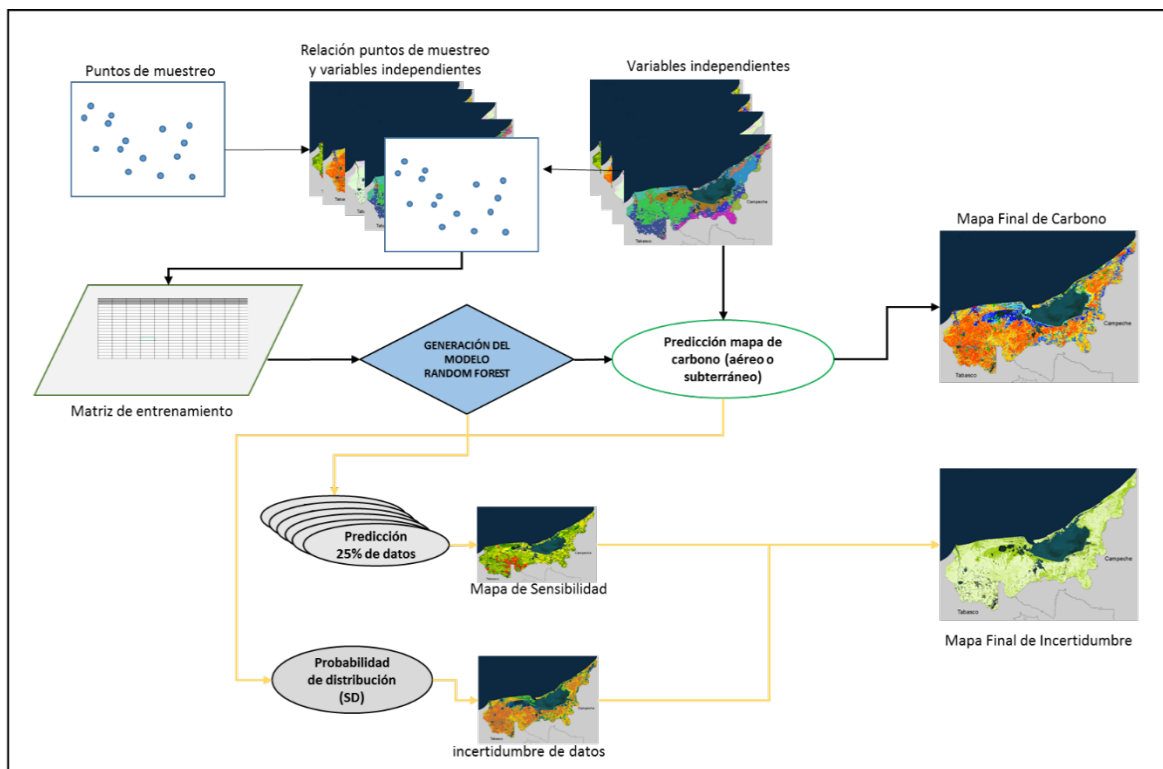


Figura 3. Esquema para la generación de los mapas de carbono aéreo y subterráneo.

A continuación, se explican los procedimientos realizados de manera detallada para obtener los datos de carbono en campo y su posterior extrapolación mediante modelación para el área de estudio.

3.6.1. Estimación de carbono aéreo en puntos de muestreo

Se realizaron dos campañas de campo (2015 y 2017) para obtener datos de biomasa área en diferentes coberturas, realizando un muestreo aleatorio estratificado por el tipo de vegetación y complementando espacialmente los puntos con datos de carbono del Inventario Nacional Forestal (CONAFOR, 2015a) y los datos colectados por Kauffman *et al.* (2015). Para describir las diferentes coberturas se utilizó como referencia una clasificación modificada de los tipos de vegetación del INEGI (2014), dando especial atención a la vegetación de manglar y otros humedales herbáceos por su comprobada importancia y variabilidad en sus almacenes subterráneos. En la Tabla 6 se muestra la clasificación de usos de suelo y vegetación utilizada en este estudio y su homologación con respecto a la clasificación del INEGI.

Tabla 6. Clasificación de tipos de uso de suelo y vegetación.

Tipo de cobertura-uso	Cobertura-uso homologada con INEGI (2014)
Humedales herbáceos de tule	Tular
Humedales herbáceos mixtos* (Tular-Popal)	Tular/Popal
Humedales herbáceos mixtos de pastizales	Vegetación Halófila Hidrófila Pastizal Halófilo
Mangle negro (<i>Avicennia germinans</i>)	
Mangle botoncillo (<i>Conocarpus erectus</i>)	Manglar
Manglar mixto (<i>Rhizophora mangle</i> + otros)**	
Selva de galería	Selva de galería
Selva subperennifolia	Selva Mediana Subperennifolia Selva Baja Subperennifolia
Sin vegetación aparente	Sin vegetación aparente
Cultivos agrícolas	Agricultura de humedad Actividad pecuaria****

* Cobertura de humedales herbáceos mayormente compuesta por vegetación de tular y popal.

** Cobertura de manglar compuesta por dos o más especies de mangle. Generalmente con dominancia de la especie *Rhizophora mangle*.

*** No se pudo diferenciar la actividad pecuaria de la agrícola ya que estas actividades están muy relacionadas en la zona de estudio, por lo tanto, se decidió unir las como un solo tipo de cobertura-uso.

En cada punto de muestreo (Figura 4) se siguió la metodología de diseño de transectos anidados de parcelas (Kauffman & Donato, 2012) tanto para estrato arbóreo como para el arbustivo y el herbáceo.

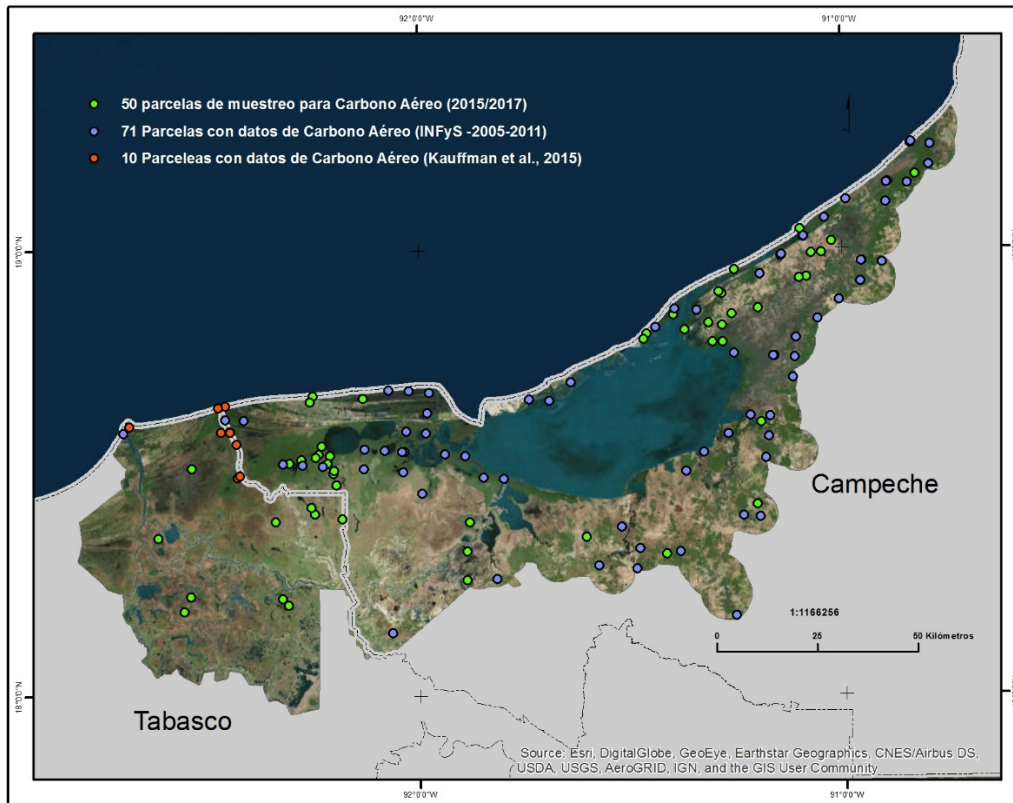


Figura 4. Ubicación espacial de los puntos de muestreo de carbono aéreo.

En estratos arbóreos (Figura 5) se midieron por parcela, individuos vivos (DAP), muertos (DAP), plántulas, pneumatóforos (individuos por m²) y madera muerta (diámetro y estado de descomposición).

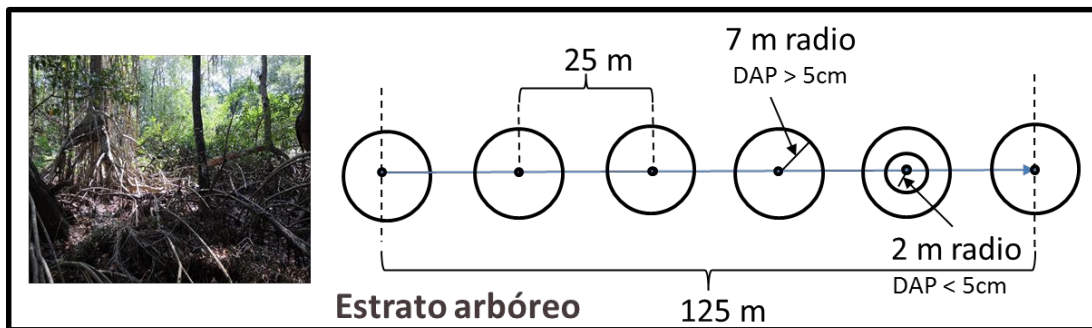


Figura 5. Esquema de muestreo en campo para estrato arbóreo.

En los estratos arbustivos y herbáceos (Figura 6) se colectó todo el material vegetal encontrado en cada subparcela de 0.04 m².

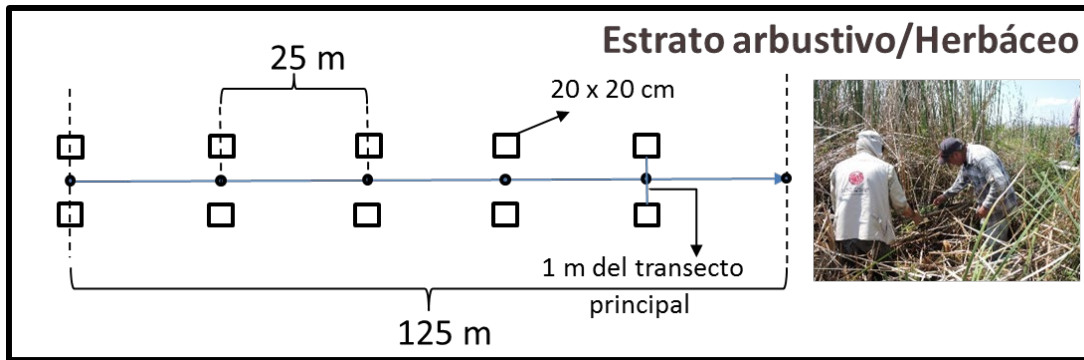


Figura 6. Esquema de muestreo en campo para estratos arbustivos y herbáceos.

El cálculo de biomasa aérea del estrato arbóreo se realizó a partir de la selección de modelos alométricos (Tabla 7) que más se ajustaron a las condiciones de las especies presentes en Laguna de Términos y Pantanos de Centla.

Tabla 7. Ecuaciones alométricas para cálculo de biomasa aérea arbórea.

Especie	Rango DAP	Modelo Alométrico	a	b	Lugar	Referencia
<i>Avicennia germinans</i>	1 - 10	$\log_{10} y = a \log_{10} DAP + b$	2.3023	-1.5852	Laguna de Términos Campeche	(Day <i>et al.</i> , 1987)
<i>Avicennia germinans</i>	> 10	$y = a DAP^b$	0.140	2.4	Everglades USA	(Fromard <i>et al.</i> , 1998)
<i>Laguncularia racemosa</i>	1 - 10	$\log_{10} y = a \log_{10} DAP + b$	2.1924	-1.5919	Laguna de Términos Campeche	(Day <i>et al.</i> , 1987)
<i>Laguncularia racemosa</i>	> 10	$\log_{10} y = a \log_{10} DAP + b$	1.930	-0.441	Everglades USA	(T. J. Smith & Whelan, 2006)
<i>Rhizophora mangle</i>	1 - 10	$\log_{10} y = a \log_{10} DAP + b$	2.5072	-1.5605	Laguna de Términos Campeche	(Day <i>et al.</i> , 1987)
<i>Rhizophora mangle</i>	> 10	$y = a DAP^b$	0.1282	2.6	Guyana Francesa	(Fromard <i>et al.</i> , 1998)
<i>Conocarpus erectus</i>	> 1	$y = \rho * \exp(b + 1.980 \ln DAP + 0.207 (\ln DAP)^2 - 0.0281 (\ln DAP)^3)$	-	-1.349	Sudeste Asiático	(Chave <i>et al.</i> , 2005)
Selva de Galeria y Selva subperennifolia	> 1	$y = \rho * \exp(b + 1.980 \ln DAP + 0.207 (\ln DAP)^2 - 0.0281 (\ln DAP)^3)$	-	-1.239	Sudeste Asiático	(Chave <i>et al.</i> , 2005)
Palmeras	-	$y = (\exp(3.6272 + 0.5768 \ln(DAP^2 H))) 1.02 / 10^{-6}$	-	-	Veracruz México	(Hughes <i>et al.</i> , 1999)
Troncos en pie	-	$y = \pi [(DAP/2)^2] H (0.42)$	-	-	Veracruz México	(Hughes <i>et al.</i> , 2000)

Dónde: y = Biomasa aérea seca (kg); DAP = Diámetro a la altura de Pecho (cm); a = intersepto; b = coeficiente de regresión; ρ = densidad de madera de la especie obtenida de Tamarit & Fuentes-Salinas (2003) y el Global Density Database (Zanne *et al.*, 2009); H = altura total.

Para el cálculo de biomasa del estrato arbustivo y herbáceo las muestras se llevaron a secado (60 °C) a peso constante. Una vez obtenidos los datos de peso seco y peso húmedo se utilizó la siguiente relación (Fourqurean *et al.*, 2014):

$$B_{arb-herb} = (P_{seco_s} / Phúmedo_s) * P_{total} \quad (2)$$

Dónde:

$B_{arb-herb}$: Biomasa aérea arbustiva o herbácea en kg.

P_{seco_s} : Peso seco de la submuestra en kg.

$Phúmedo_s$: Peso húmedo de la submuestra en kg.

P_{total} : Peso total del material vegetal de la sub-parcela en kg.

La suma de los valores de biomasa (kg), obtenidos por unidad (m²) de cada parcela fue escalada a unidades de Mg Biomasa ha⁻¹. Posteriormente estos valores se transformaron a fracción de carbono (Mg C ha⁻¹) por medio de los siguientes factores (Tabla 8):

Tabla 8. Factores de conversión de biomasa a carbono.

Vegetación	Fracción de Carbono	Referencia
Arbórea	0.48	(CONAFOR, 2015b)
Arbustiva y herbácea	0.45	(Hughes <i>et al.</i> , 2000; Jaramillo <i>et al.</i> , 2003; Yereña-Yamallel <i>et al.</i> , 2011)

A los resultados de carbono aéreo de los puntos colectados en campo se agregaron los valores de biomasa del INFyS (CONAFOR, 2015a) transformados a valores de carbono aéreo y los datos de carbono aéreo de Kauffman *et al.* (2015). Estas tres fuentes de información fueron utilizadas conjuntamente en la modelación de esta variable para total del área de estudio.

3.6.2. Estimación de carbono subterráneo en puntos de muestreo

Debido a la extrema dificultad para coleccionar y medir el sistema radicular para la obtención de datos de carbono subterráneo de la vegetación viva, y considerando la escala de trabajo, los tiempos y costos que esto implica se decidió utilizar el método indirecto de cálculo por medio de ecuaciones alométricas (Fourqurean *et al.*, 2014).

Al igual que en el cálculo de carbono aéreo, se decidió utilizar fórmulas alométricas y factores de conversión a unidades de carbono (Tabla 9) considerando las condiciones y especies presentes en el área de estudio.

Tabla 9. Ecuaciones alométricas y factor de conversión para cálculo de carbono en raíces.

Cobertura / Especie(s)	Modelo Alométrico	Factor de conversión (fc)	Referencia
Vegetación arbórea <i>A. germinans</i> , <i>L. racemose</i> <i>C. erectus</i> <i>R. mangle</i> <i>P. aquatica</i>	$R_b = 0.199 * \rho^{0.899} * DAP^{2.22}$	0.39	(R_b : Komiyama <i>et al.</i> , 2005; fc: Fourqurean <i>et al.</i> , 2014)
Selva de Galería y Selva subperennifolia	$R_b = \exp(-1.0587 + 0.8836 * \ln(AGB))$	0.39	(R_b : Cairns <i>et al.</i> , 1997; fc: Fourqurean <i>et al.</i> , 2014)
Vegetación herbácea y arbusativa	$R_b = AGB * 0.58$	0.437	(R_b : Jaramillo <i>et al.</i> , 2003); fc: Hughes <i>et al.</i> , 2000)

Dónde: R_b = Biomasa de raíces (kg); DAP = Diámetro a la altura de Pecho (cm); AGB = Biomasa aérea (Kg).

Para la determinación de carbono orgánico en suelos (COS), en la mayoría de los casos se tomó muestras en los puntos visitados para datos de carbono aéreo en las campañas de 2015 y 2017 (ver Figura 7).

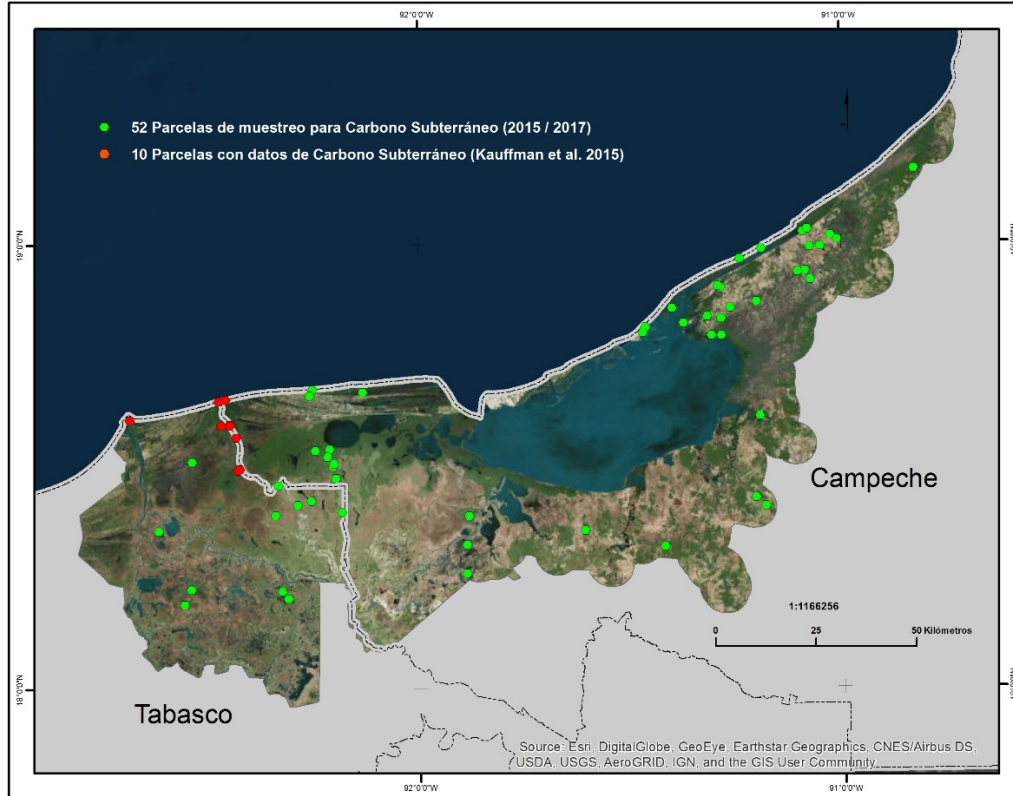


Figura 7. Ubicación espacial de los puntos de muestreo de carbono subterráneo.

En algunos casos solamente se hicieron puntos de muestreo para corroborar el tipo de suelo según mapa del INEGI (2013) y obtener su respectiva muestra para el análisis en laboratorio.

En cada sitio de muestreo o transecto realizado se tomó hasta un máximo de tres muestras de manera aleatoria, cuidando que el sitio no presentara disturbio o modificación superficial. Se siguió la metodología de Kauffman & Donato (2012), en la cual las muestras se obtienen con ayuda de un nucleador de suelos semi-cilíndrico de volumen conocido (Figura 8 A). Se obtuvieron muestras a diferentes profundidades del suelo (0-15 cm, 15-30 cm, 30-45 cm y 45-100 cm) hasta un máximo de un metro o a menor profundidad si se llegaba al material parental.



Figura 8. Estimación de carbono subterráneo en suelos.

A) Obtención de muestras a diferentes profundidades por medio de un nucleador; B) Secado, pesado y estimación de la densidad aparente; C) Homogenización de la muestra; D) Muestras de suelos listas para determinar carbono total y carbono inorgánico; E) Analizador elemental automático.

En laboratorio, cada muestra fue secada a 60 °C (Figura 8 B) hasta llegar a un peso constante. Se obtuvo la densidad aparente de suelo seco por medio de la siguiente ecuación (Ecuación 3) de Flores & Alcalá (2010):

$$\text{Densidad aparente suelo} = \frac{\text{Peso seco de la muestra}}{\text{Volumen total de la muestra}} \quad (3)$$

A continuación, se eliminaron raíces, ramas y otro tipo de material vegetal mediante el tamizado con malla de 2 mm y se procedió a la homogenización con la ayuda de un mortero (Figura 8 C). Finalmente, esas muestras fueron llevadas al Laboratorio Universitario de Nanotecnología Ambiental de la Universidad Nacional Autónoma de México (LUNA-UNAM) para su análisis. Con la ayuda de un analizador elemental automático (Figura 8 D,E), que utiliza la oxidación por combustión asistida catalíticamente a una temperatura de 900 °C se obtuvo el carbono total de la muestra y posteriormente con la obtención del carbono inorgánico por pre-acidificación y combustión a una temperatura aproximada de 250 °C, se realizó una resta aritmética simple para la obtención de carbono orgánico de cada sitio de muestreo.

Una vez obtenidos los datos de porcentaje de carbono orgánico y densidad aparente del suelo, se procedió al cálculo de almacén por cada intervalo de profundidad para cada punto de muestreo según la ecuación 4.

$$C_{org-(x-y)} = Esp_{int(x-y)} * (\rho S_{(x-y)} * (\%C_{org(x-y)}/100)) \quad (4)$$

Dónde:

$C_{org-(x-y)}$: Carbono orgánico del intervalo de profundidad indicado (x-y) (g/cm³).

$Esp_{int-(x-y)}$: Espesor del intervalo calculado (cm).

$\rho S_{(x-y)}$: Densidad del suelo del intervalo calculado (g/cm³).

$\%C_{org(x-y)}$: Porcentaje Carbono orgánico.

Posteriormente, se calculó el almacén total de COS de cada perfil según la ecuación 5. Este cálculo se realiza por la suma algebraica del valor del almacén de carbono de cada intervalo de profundidad (Fourqurean *et al.*, 2014).

$$C_{org-total} = C_{org(0-15)} + C_{org(15-30)} + C_{org(30-45)} + C_{org(45-100)} \quad (5)$$

Dónde:

$C_{org-total}$: Carbono orgánico total del suelo (g/cm²) hasta un metro de profundidad.

Este valor de carbono total del punto muestreado se convirtió a unidades comúnmente utilizadas para la evaluación de almacenes de carbono (Mg C ha⁻¹) mediante los siguientes factores de conversión (ecuación 6):

$$C_{org-total} \left(\frac{MgC}{ha} \right) = C_{org-total} \left(\frac{g}{cm^2} \right) * \left(\frac{1 Mg}{1,000,000 g} \right) * \left(\frac{100,000,000 cm^2}{1 ha} \right) \quad (6)$$

3.6.3. Estimación de los almacenes de carbono

La generación de cartografía digital de los almacenes de carbono se realizó por medio del escalamiento geográfico. Como lo mencionan y aplican varios autores (Hansen *et al.*, 2002; Baccini *et al.*, 2004; Saatchi *et al.*, 2011; Gleason & Im, 2012; Fatoyinbo & Simard, 2013) el enfoque directo es el espacialmente más consistente para producir mapas de almacenes de carbono. El mismo consiste en llevar las mediciones del satélite u otras fuentes cartográficas directamente al mapa, calibrándolos por medio de mediciones en campo. A partir del concepto de minería de datos con estadísticas llamadas técnicas de aprendizaje automatizado como redes neurales o árboles de decisión (Breiman, 2001) se logra implementar este enfoque directo. En este estudio se decidió utilizar el método de aprendizaje automatizado basado en la técnica de árboles de decisión que permite establecer relaciones y patrones entre los atributos de datos cuantitativos y cualitativos para realizar predicciones (Tan *et al.*, 2006). Esta técnica es más robusta comparada con las tradicionales técnicas de interpolación espacial que realizan regresiones simples o múltiples (e.g. Kriging). El algoritmo de aprendizaje basado en árboles permite reducir la varianza de una función estimada de predicción a partir del promedio de muchos modelos que se generan de los mismos datos (Hastie *et al.*, 2009).

La modelación de los almacenes de carbono aéreo y subterráneo se realizó por separado, obteniendo de esta manera un modelo de carbono aéreo y otro de carbono subterráneo. En ambos casos se realizaron los siguientes pasos: i) definición y preparación de variables espaciales, ii) Relación de los puntos de muestreo con las variables espaciales, iii) Estimación del carbono aéreo/ subterráneo y iv) la evaluación de la incertidumbre.

i) Definición y preparación de variables espaciales: Para desarrollar los modelos de almacenes de carbono aéreo y subterráneo del área de estudio se identificaron las principales variables explicativas utilizadas en otros trabajos de estimación de carbono con sensores remotos ya analizadas en el capítulo 2 y que indican que la combinación de diferentes fuentes de datos de percepción remota ayuda a mejorar las predicciones en modelos espaciales. Con base en esta revisión se hizo una pre-

evaluación de las variables a ser utilizadas según la disponibilidad de datos, confiabilidad de la fuente y tipo de información que aporta para entender el fenómeno. En la Tabla 10 y Tabla 12 se muestran las variables consideradas para ser correlacionadas con los valores de campo de carbono aéreo y subterráneo.

3.6.3.1. Variables Carbono aéreo

Inicialmente se utilizaron 15 variables independientes o predictivas, para ser relacionadas con los datos de carbono aéreo, en la Tabla 10 se resumen las características de cada variable utilizada. Posteriormente se realiza una descripción detallada de cada una de ellas.

Tabla 10. Variables consideradas para estimar almacenes de carbono aéreo.

		Variable	Atributo	Unidades	Tipo de dato	Resolución espacial original	Año	Fuente
Variable dependiente		Biomasa estimada con datos de campo	Carbono aéreo en material vegetal	Mg C ha ⁻¹	Numérico	Coordenadas geográficas	2004-2017	CONAFOR (2015a) Kauffman <i>et al.</i> (2015) Datos propios (2015 / 2017)
Variables independientes	Datos Lidar (2)	Modelo Digital de terreno	Alturas de terreno sobre el nivel del mar	Metros	Numérico	5 metros	2010	Cálculos propios a partir de datos del INEGI (2015)
		Modelo de alturas del dosel	Altura de las coberturas					
	Datos Radar (7)	Polarización dual VV+VH	Textura	Sigma nought	Numérico	10 metros	2015	Cálculos propios a partir de Sentinel-1
		Polarización VH /VV						
		Relaciones VV-VH						
	Datos ópticos (4)	Índice de vegetación NDVI	Verdor de la vegetación	Sin unidades	Numérico	30 metros	2015	Cálculos propios a partir de Landsat 8
		Bandas ópticas Landsat (red/SWIR5-7)	Absorción y reflectancia de radiación por diferentes tipos de coberturas	Valores de reflectancia	Numérico	30 metros	2015	Landsat 8
	Productos auxiliares (2)	Cobertura de dosel	Densidad de las coberturas	Porcentaje	Numérico	250 metros	2015	Hansen <i>et al.</i> (2013)
		Mapa de coberturas	Clases de coberturas	Clases	Categorico	10 metros	2015	CONABIO (2016)

Como ya se mencionó, estas variables fueron seleccionadas a partir de la revisión de la disponibilidad de información y su relevancia para el área de estudio de las principales variables utilizadas para este tipo de cálculos (Komiyama *et al.*, 2005; Houghton *et al.*, 2009; Hu *et al.*, 2016; Saatchi *et al.*, 2011; Margolis *et al.*, 2015; Rodríguez-Veiga *et al.*, 2016; García-Llamas *et al.*, 2018; Navarro *et al.*, 2019). Las variables fueron evaluadas según su desempeño en el modelo generado a través de una selección vía correlación cruzada. El modelo final se generó con aquella combinación de variables que presentó la mayor correlación entre la variable dependiente y las predictivas. A continuación, se hace una descripción de las características más relevantes de cada variable pre-seleccionada.

- ✓ *Biomasa estimada con datos de campo*: La metodología utilizada para la estimación de biomasa aérea fue descrita en la sección 3.5.1. Con ella se realizó el cálculo de biomasa en el trabajo de Kauffman *et al.* (2015), así como para la información levantada exclusivamente para este trabajo. La información de biomasa a partir de los datos de la CONAFOR también fue calculada con información dasométrica y fórmulas alométricas. En este último caso, aunque el diseño de levantamiento de parcelas de muestreo es diferente, ya que se sigue un esquema de Unidades de Muestreo Primarias (conglomerados) y Unidades de Muestreo Secundario (sub-parcelas circulares), la información generada es comparable con la obtenida por el presente estudio y el de Kauffman *et al.* (2015) debido a que cuantifican biomasa por unidad de superficie conocida. Todos los datos fueron revisados cuidadosamente, tanto en su ubicación espacial, para evitar errores de localización, como en el valor reportado para no incluir inconsistencias en el modelo. En muchos casos, los puntos fueron eliminados por que el lugar muestreado en años anteriores había sufrido cambios en su cobertura arbórea pasando a un uso agrícola o pecuario. De 106 puntos iniciales de CONAFOR, quedaron 71 puntos utilizables.

Con estas tres fuentes de información se obtuvieron un total de 131 puntos con valores de biomasa en campo (71 puntos de la CONAFOR (2015a), 10 puntos Kauffman *et al.* (2015) y 50 puntos generados en este estudio).

- ✓ *Modelo digital de terreno*: La generación del modelo digital de terreno (MDT) se llevó a cabo a partir de los datos crudos de Lidar que el INEGI tiene disponible de manera gratuita en su portal de internet (INEGI, 2015). En este portal ya existen productos procesados del modelo digital de terreno, sin embargo, al realizar la revisión del tipo de calidad y densidad de los datos Lidar (solo datos del primer retorno con densidad de 0.2 puntos por m²) se identificó que la clasificación de cobertura de los puntos Lidar presentaba errores en el sitio de estudio (ver Figura 9). Los puntos clasificados como suelo por el INEGI, presentaba una variación de hasta 5 metros de altura en una distancia muy pequeña de terreno. Sabiendo que en la realidad este tipo de variación es de apenas unos centímetros se concluyó que el producto disponible clasificaba una mezcla de suelo desnudo, estrato herbáceo, arbustivo y en algún caso arbóreo como nivel de terreno.

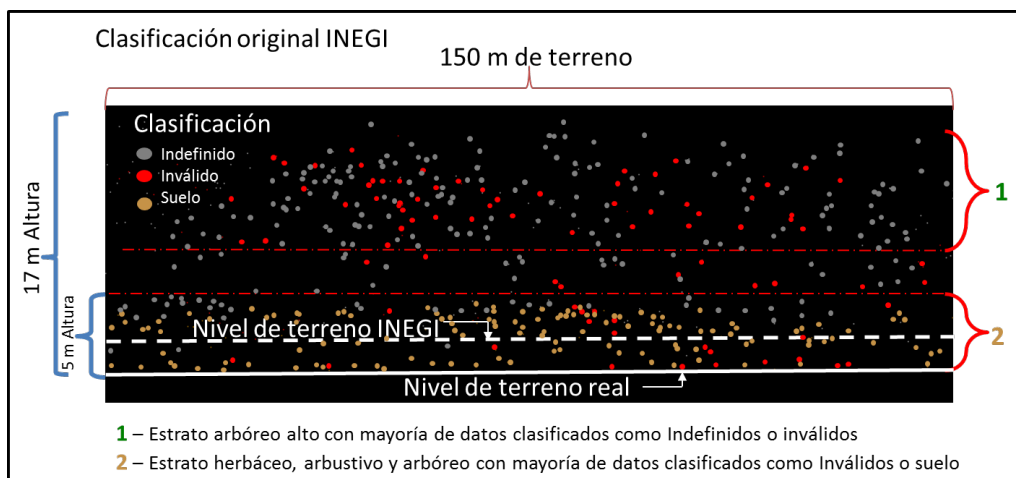


Figura 9. Perfil vertical de datos Lidar con clasificación original de coberturas.

Con el fin de obtener la valiosa información de las alturas de los diferentes tipos de vegetación se procedió a procesar en RStudio (2016) una rejilla del área de estudio con celdas de 90x90 metros. En cada celda se analizaron las alturas de todos los puntos que coincidían en la misma y luego de un análisis con diferentes percentiles (1, 5 y 10) se decidió extraer los valores de alturas hasta el primer percentil. Esto debido a que se encontró que en los valores

del primer percentil la modelación del terreno se realizaba a mejor detalle que los otros percentiles. A estos valores se los clasificó como suelo para la generación del MDT corregido (Figura 10).

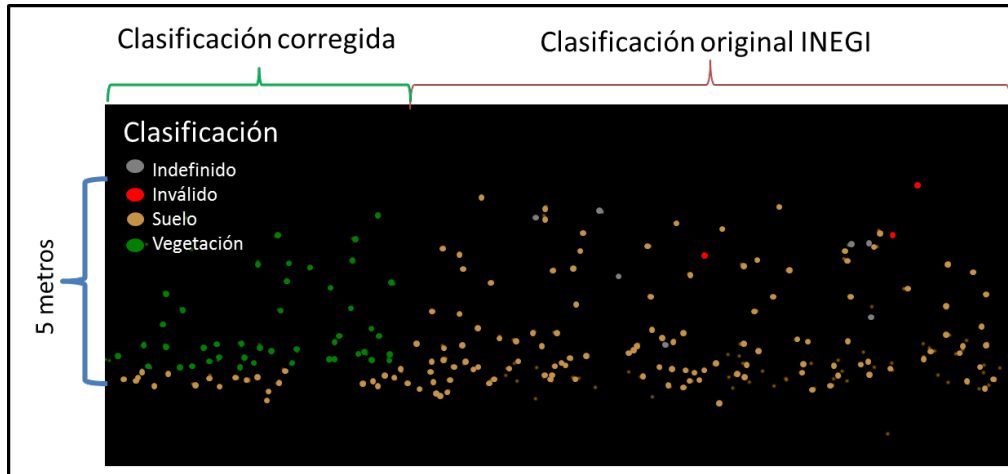


Figura 10. Perfil vertical de datos Lidar con clasificación corregida y original.

Se utilizaron las mismas celdas de análisis para calcular la media de los valores de altura hasta el primer percentil y así generar un archivo raster con una resolución de 90x90 metros.

- *Modelo de alturas del dosel:* La obtención del modelo de alturas del dosel se realizó a partir de los mismos datos Lidar del INEGI (2015) procesados para el modelo digital de terreno. Utilizando la misma rejilla y tamaño de celda (90x90 m) se decidió extraer todos los valores de altura del percentil 90, 95 y 99 para determinar la variación de altura en cada celda y decidir el percentil para ser utilizado en el modelo. Luego del análisis se decidió utilizar el percentil 90 en adelante debido a que el promedio de estos valores en las celdas representaba mejor las alturas medias de la vegetación. El percentil 95 y 99 sesgaban el valor de las alturas por cada celda analizada. Posteriormente se calculó la media aritmética de los valores obtenidos por cada celda para la generación del modelo de alturas de dosel.
- *Polarización dual VV+VH:* Se utilizaron cuatro imágenes del año 2015 de datos interferométricos de radar Banda-C de Sentinel-1, con un ancho de barrido de 250 km a 5 x 20 m de resolución espacial original y un ángulo de

incidencia de 29.1 grados. Los datos están disponibles de manera gratuita en <https://scihub.copernicus.eu/dhus/#/home>. Este producto tiene una doble polarización VV+VH, lo cual significa que para el primer caso (VV) la antena del satélite radar transmite la energía polarizada hacia la tierra de forma vertical y la recibe también de forma vertical, en el segundo caso (VH) la transmisión de la energía polarizada es de forma vertical, pero la recibe de forma horizontal. Este tipo de imágenes polarizadas y otras combinaciones sirven para determinar las propiedades físicas del objeto observado (Vaglio *et al.*, 2018). Estas imágenes fueron manipuladas en el programa SNAP 6.0 de la Agencia Espacial Europea (SNAP - ESA, 2018). En primer lugar, las imágenes fueron calibradas para convertir los valores de retrodispersión (backscattering) en valores Sigma Naught. Posteriormente se aplicó el filtro *Lee sigma speckle* (Lee *et al.*, 2015) para eliminar ruido característico de este tipo de imágenes y se llevó a cabo una corrección de terreno. Como en el caso de datos Lidar, se llevó todo a una resolución de 90x90 utilizando la función promedio.

- *Polarización simple VV y VH*: Estos dos productos tienen la característica de que presentan una polarización única. Es decir que la capacidad de transmisión/recepción del sensor puede ser vertical-vertical (VV) o vertical horizontal (VH). Al igual que en la imagen de polarización dual (VV+VH) estas dos bandas se obtuvieron de <https://scihub.copernicus.eu/dhus/#/home> para la misma fecha. También se procedió a realizar un pre-procesamiento de calibración, filtro *Lee sigma speckle* y remuestreo a 90 metros.
- *Relaciones VV-VH*: Se crearon 15 variables relacionales de las bandas VV y VH mediante operaciones algebraicas. Sin embargo, mediante un análisis de componentes principales se llegaron a seleccionar cuatro de los productos generados. De esta forma se eliminó la correlación que podría existir entre estos productos y afectar al modelo. Los cuatro productos seleccionados fueron: a) relación tipo NDVI_{vh-vv} (ecuación 7); b) relación tipo NDVI_{vv-vh}

(ecuación 8); c) proporción vv-vh (ecuación 9) y d) Diferencia vh-vv (ecuación 10).

$$NDVI_{vh-vv} = \left(\frac{VH-VV}{VV+VH} \right) \quad (7)$$

$$NDVI_{vv-vh} = \left(\frac{VV-VH}{VV+VH} \right) \quad (8)$$

$$Ratio_{vv-vh} = \left(\frac{VV}{VH} \right) \quad (9)$$

$$Diferencia_{vh-vv} = (VH - VV) \quad (10)$$

Al igual que los diferentes índices de vegetación que existen en la actualidad, la intención de obtener estos parámetros a partir de relaciones algebraicas con datos radar, es la de extraer información relacionada a las coberturas existentes, minimizando las diferentes perturbaciones que puedan existir. Y en este caso, el objetivo fue la de obtener información con relación a la textura de los objetos.

- *Índice de vegetación (NDVI)*: El índice de vegetación de diferencia normalizada corresponde a la ecuación propuesta por Rouse *et al.* (1974). En esta ecuación se utiliza la capacidad que tienen las células de las hojas de cualquier vegetación de absorber la luz visible (espectro del rojo que va de 0.4 a 0.7 μm) para la fotosíntesis y por otro lado reflejar fuertemente la luz infrarroja (de 0.7 a 1.1 μm). De esta manera, a partir de la relación que existe entre las bandas de imágenes de satélite con información de la reflectancia en el espectro del rojo y del infrarrojo se obtiene este producto (Tucker, 1979). Se descargaron imágenes Landsat-8 del año 2015 (Tabla 11) para formar un compuesto anual a partir de los promedios mensuales del NDVI obtenido de imágenes mensuales sin nubes y así tener una estimación media de este parámetro para el área de estudio. Una vez obtenido el compuesto medio

anual de NDVI para el 2015 se procedió al cambio de resolución de 90x90 m por pixel para hacerlo compatible con las demás variables utilizadas.

Tabla 11. Imágenes Landsat utilizadas para el cálculo de NDVI.

IMAGEN Path/Row	FECHA ADQUISICIÓN	MES DE COMPUESTO
21/47	31/01/2015	Enero
22/47	22/01/2015	Enero
21/47	16/02/2015	Febrero
22/47	23/02/2015	Febrero
21/47	20/03/2015	Marzo
21/47	05/04/2015	Abril
22/47	12/04/2015	Abril
21/47	07/05/2015	Mayo
22/47	14/05/2015	Mayo
21/47	08/06/2015	Junio
21/47	24/06/2015	Junio
21/47	26/07/2015	Julio
21/47	11/08/2015	Agosto
22/47	02/08/2015	Agosto
21/47	12/09/2015	Septiembre
22/47	03/09/2015	Septiembre
21/47	30/10/2015	Octubre
22/47	05/10/2015	Octubre
21/47	01/12/2015	Diciembre
22/47	24/12/2015	Diciembre

- *Bandas ópticas Landsat-8 (RED/SWIR-5/SWIR-7)*: Existen estudios que demuestran la capacidad de las bandas espectrales originales de los satélites para la estimación de biomasa, presentando buenos resultados, incluso con mejores correlaciones que otros índices generados para estos fines (Avitabile *et al.*, 2012; Lin & Sogt, 2013; Tao *et al.*, 2016; Risdiyanto & Fakhrul, 2017). Es por esta razón que se decidió utilizar las bandas del espectro del rojo (longitud de onda de 0.64 a 0.67 μm), infrarrojo cercano (longitud de onda de 0.85 a 0.88 μm) infrarrojo de onda corta 1 (longitud de onda de 1.57 a 1.65 μm) e infrarrojo de onda corta 2 (longitud de onda de 2.11 a 2.29 μm) que son los más relacionados con vegetación de humedales (arbórea, arbustiva y herbácea). Se utilizaron imágenes del año 2015 (ver Tabla 11) de época seca (abril 2015) y época de lluvias (septiembre 2015) para obtener la variabilidad espectral que nos ofrece la estacionalidad de la vegetación. Utilizando la función promedio se modificó su resolución original de 30x30 m a 90x90 m.
- *Cobertura arbórea de dosel*: Esta variable representa el porcentaje de cobertura de vegetación en un pixel de 30 metros proveniente de imágenes

Landsat (Hansen *et al.*, 2013). El producto se descargó de <http://earthenginepartners.appspot.com/science-2013-global-forest> y al presentar una clasificación de porcentaje de cobertura arbórea nos permite considerar la densidad de la vegetación para una estimación más precisa de carbono aéreo. El producto base es del año 2000, sin embargo, también se descargaron los mapas de pérdidas (2000-2014) y ganancias (2000-2012) de coberturas de los mismos autores. Al realizar una exploración cuantitativa y de ubicación de los mapas de pérdidas y ganancias para el área de estudio, se comprobó que existen cambios mínimos sobre vegetación de humedales. La cobertura que mayor pérdida tuvo fue la de selva subperennifolia en la parte sur del área de estudio. Con la ayuda de estos dos mapas se actualizó el mapa de cobertura base de 2000 obteniendo de esta manera un mapa de porcentajes de cobertura actualizado a 2015. Este mapa base de cobertura arbórea de dosel fue remuestreado a 90 metros.

- *Mapa de coberturas:* Se decidió incluir el mapa de coberturas para que junto a la variable de campos continuos de vegetación ayuden al modelo a una mejor delimitación de los almacenes de carbono según los estratos presentes en el área de estudio. Esta variable es de carácter categórico y fue elaborada a partir de imágenes SPOT-5 del año 2015 por la CONABIO (2016). Al mapa original se realizó una interpretación visual de las categorías que inicialmente pertenecían a las clases “*otra vegetación*” y “*otros humedales*” para obtener un mayor detalle y ajustar la leyenda según la Tabla 6. Debido a que el producto se encontraba en formato vector, se transformó a formato raster con un tamaño de pixel de 90 metros.

3.6.3.2. Variables Carbono subterráneo

En la Tabla 12 se enlista un resumen de las características de las variables utilizadas para la modelación de carbono subterráneo para el sitio de estudio. La selección de variables se obtuvo luego de un pre-análisis por componentes principales de un conjunto mucho mayor de predictores.

Se agruparon en 4 clases de variables: 1) *variables de terreno*, que nos permiten medir principalmente los atributos topográficos primarios (Moore *et al.*, 1991) y que tienen relevancia hidrológica en los procesos de transporte de los sedimentos. Muchos de los índices de este tipo han observado un pobre desempeño en superficies planas (Böhner & Selige, 2006; Guisan *et al.*, 2009) como la del área de estudio, sin embargo se incluyeron las cuatro que mayor explicación representaban en el análisis previo de componentes principales realizado para el tema de acumulación de sedimentos; 2) *variables de vegetación*, que ayudan al modelo a delimitar zonas del territorio con diferentes características de vegetación lo cual influye en la captura y almacenamiento de carbono; 3) *variables de cuenca*, que aportan información de algunos parámetros morfométricos de la cuenca con los cuales se caracteriza en cierto modo el componente hidrológico que tiene un carácter dinámico en humedales costeros y 4) *variables de geología y suelos* que junto a la vegetación son componentes que permiten delimitar de mejor manera en el modelo, los almacenes de carbono.

Todas las variables de terreno, obtenidas a partir de datos de Yamazaki, *et al* (2017), fueron generadas con el software libre SAGA v.2.1.4 (Conrad *et al.*, 2015).

Datos de campo: Las metodologías utilizadas para determinar los valores de carbono orgánico de suelo y de vegetación ya fueron descritas anteriormente (sección 3.6.2.). Estas metodologías fueron utilizadas para el tratamiento de los datos de Kauffman *et al.* (2015) y los 52 datos de campo obtenidos específicamente para este estudio.

Se exploró la posibilidad de incluir datos de los perfiles de suelos utilizados para la generación de los mapas edafológicos de la serie I y la serie II del INEGI (INEGI, 2004, 2007). Sin embargo, los datos no eran compatibles con los de este estudio debido a la diferencia de objetivos y metodologías empleadas. Finalmente, no fueron incluidos en la modelación los 40 perfiles del INEGI que coincidían con el área de estudio.

Tabla 12. Variables consideradas para estimar almacenes de carbono subterráneo.

		Variable	Atributo	Unidades	Tipo de dato	Resolución espacial original	Año	Fuente
Variable dependiente		Datos de campo	Carbono subterráneo en material vegetal y suelos	Mg C ha ⁻¹	Numérico	Coordenadas geográficas	2015-2017	Kauffman <i>et al.</i> (2015) Datos propios (2015 / 2017)
Variables independientes	Terreno (4)	Índice Topográfico de posición	Clasificación del área de estudio por pendiente	Grados	Numérico	5 metros	2017	Cálculos propios a partir de Yamazaki <i>et al.</i> , 2017
		Índice Topográfico de humedad	Contenido de humedad en el terreno	Sin unidades	Numérico	5 metros	2017	Cálculos propios a partir de Yamazaki <i>et al.</i> , 2017
		Índice multiresolución de la planicie del fondo del valle	Detección de áreas de deposición	Sin unidades	Numérico	5 metros	2017	Cálculos propios a partir de Yamazaki <i>et al.</i> , 2017
		Pendiente de la cuenca	Atributo que caracteriza parte de los procesos de erosión	Sin unidades	Numérico	5 metros	2017	Cálculos propios a partir de Yamazaki <i>et al.</i> , 2017
	Vegetación (4)	Índices de vegetación	Verdor de la vegetación	Sin unidades	Numérico	30 metros	2015	NASA
		Alturas	Altura de las coberturas	Metros	Numérico	5 metros	2010	Cálculos propios a partir de datos Lidar
		Mapa de coberturas	Clases de coberturas	Clases	Categorico	10 metros	2015	CONABIO
	Cuenca (4)	Coefficiente de escorrentía	Caracterización del tipo de uso del suelo	Milímetros	Numérico	A nivel subcuenca	2010	INEGI
		Densidad de drenaje	Condiciona la distribución de componentes	Km/Km ²	Numérico	A nivel subcuenca	2010	INEGI
		Coefficiente de compacidad	Parámetro de forma de la cuenca	Sin unidades	Numérico	A nivel subcuenca	2010	INEGI
		Sinuosidad de corriente principal	Tipo y frecuencia de inundación	Sin unidades	Numérico	A nivel subcuenca	2010	INEGI
	Geología Y Suelos (2)	Mapa edafológico	Clases de suelos	Clases	Categorico	1:250 000	2007	INEGI
		Maga geológico	Tipos geológicos	Clases	Categorico	1:250 000	2004-2005	SGM

- ✓ **Índice topográfico de posición:** Esta variable nos permite clasificar el área de estudio en posición de la pendiente y relieve. El índice compara la elevación de cada píxel de un MDT con la elevación media de un vecindario específico alrededor de este píxel (Guisan *et al.*, 2009). Según la magnitud del valor positivo o negativo de este índice identifica las partes altas de la pendiente y las partes más bajas del terreno. Para esta variable se utilizó un vecindario

(radio) de dos píxeles que representaban aproximadamente 180 metros en terreno.

- ✓ *Índice topográfico de humedad:* Este índice caracteriza el contenido de humedad del suelo a partir de las variaciones espaciales determinadas por el terreno. Su cálculo se realiza a partir de la función tangente del ángulo de la pendiente y el área específica de la cuenca (Böhner & Selige, 2006). En este caso esta variable caracteriza la velocidad de flujo superficial y sub-superficial, así como la escorrentía (Moore *et al.*, 1991) que puede influir en la sedimentación o erosión de estas planicies.
- ✓ *Índice multiresolución de la planicie del fondo del valle:* Este índice desarrollado por Gallant & Dowling (2003) identifica y caracteriza los depósitos de sedimentos mediante una clasificación de los grados de la planicie del fondo del valle. Estos grados de planicie pueden estar relacionados con la profundidad del depósito de sedimentos y por lo tanto en la capacidad de almacenamiento de carbono orgánico en los suelos.
- ✓ *Pendiente de la cuenca:* Esta variable es generalmente utilizada en la ecuación universal de pérdida del suelo (USLE por sus siglas en inglés) y por lo tanto está relacionada con la aceleración de flujo superficial y tasas de erosión en una cuenca (Moore *et al.*, 1991; Böhner & Selige, 2006). Esta variable complementará a las anteriormente presentadas, con relación a los procesos de sedimentación, erosión y deposición superficial de sedimentos en el área de estudio, según el tamaño de cada cuenca.
- ✓ *Índices de vegetación:* Se utilizaron dos índices de vegetación, el NDVI descrito en la sección 3.6.3.2. y el índice mejorado de vegetación (EVI por sus siglas en inglés). El EVI es una versión mejora del NDVI, ya que la banda roja utilizada para su cálculo se satura rápidamente en vegetación densa. Es por esta razón que Huete *et al.* (1994) incluyen una corrección de suelo (factor L) y la banda azul para disminuir la influencia de la atmósfera. La

diferencia entre estos dos índices es que el NDVI tiene mayor sensibilidad a los cambios de la clorofila y el EVI por su lado, debido a que tiene una corrección de terreno, tiene un mejor desempeño a las variaciones de la estructura del dosel (Huete *et al.*, 2002). Para preparar el EVI se realizó la solicitud de procesamiento y descarga del índice a partir de imágenes Landsat-8 para el año 2015 libres de nubes. Esta solicitud se llevó a cabo en el portal del sistema de caracterización de productos de la tierra (LPCS por su acrónimo en inglés) <https://lpcsexplorer.cr.usgs.gov/>, dependiente del Servicio Geológico de Estados Unidos (USGS). A partir de estas imágenes (en total 10) se realizó el cálculo del valor promedio para cada pixel y con esto se obtuvo una capa de EVI promedio para el año 2015. De esta manera se incluye un valor representativo de todo el año de cada tipo de vegetación que generalmente presenta valores ondulatorios a lo largo del año. Toda la información que originalmente se encuentra a un tamaño de pixel de 30 metros fue llevado a 90 metros.

- ✓ *Alturas*: Se utilizó el modelo de alturas de dosel generado con datos Lidar (ver sección 3.6.3.1.). Esta variable fue incluida ya que conjuntamente con los valores de los índices de verdor pueden aportar en la explicación de la deposición y acumulación *in situ* de materia orgánica en el suelo.
- ✓ *Mapa de coberturas*: La generación de esta variable fue descrita en la sección 3.6.3.1. y fue incluida para estimación de carbono subterráneo como variable categórica para apoyar la delimitación espacial de los almacenes en el modelo.
- ✓ *Coefficiente de escorrentía*: Esta variable puede caracterizar el tipo de cuenca a partir de la relación entre la lámina de agua precipitada sobre una superficie y la lámina de agua que escurre superficialmente, la cual puede variar en función al tipo de uso de suelo. Los valores de esta variable fueron obtenidos del simulador de flujos de agua de cuencas hidrográficas (SIATL) del INEGI,

disponible en: http://antares.inegi.org.mx/analisis/red_hidro/siatl/#. Se utilizó como base la red hidrográfica a escala 1:50 000 edición 2.0 (INEGI, 2010) que presenta tres niveles de desagregación de la división de aguas superficiales (Región hidrográfica, Cuenca hidrográfica y Subcuenca hidrográfica). En este caso se utilizó la división de subcuencas hidrográficas y se agregó el valor de escorrentía a cada polígono de este mapa. Finalmente se llevó de formato vector a formato raster con un tamaño de pixel de 90 metros.

- ✓ *Densidad de drenaje*: Esta variable también conocida como grado de disección puede condicionar la distribución de elementos que contribuyen al almacenamiento del carbono orgánico en los suelos ya que es una expresión de la textura fluvial del paisaje. Los valores de esta variable fueron obtenidos del SIATL del INEGI http://antares.inegi.org.mx/analisis/red_hidro/siatl/#. Se utilizaron los polígonos de subcuencas de la red hidrográfica (INEGI, 2010). Este mapa fue transformado a formato raster con un tamaño de pixel de 90 metros.
- ✓ *Coefficiente de compacidad*: También conocido como índice de Gravelius (K_c), establece la relación entre el perímetro de la cuenca y el de una circunferencia de área equivalente a la cuenca (Aparicio, 1992). Este coeficiente indica la tendencia de concentrar grandes volúmenes de aguas de escurrimiento, lo cual es importante para los procesos de arrastre de sedimentos a nivel de cuenca. Como en las anteriores variables este coeficiente fue aplicado a los polígonos de las subcuencas presentes en el área de estudio y los datos fueron obtenidos del SIATL (INEGI, 2010).
- ✓ *Sinuosidad de corriente principal*: Esta variable caracteriza la configuración del cauce, el cual es el sector de la superficie terrestre ocupado por la corriente de agua en una cuenca (Seco, 2001). Este elemento del valle fluvial depende de la inclinación del cauce y de la carga de sedimentos que transporta. Un cauce del tipo meándrico mostrará una mayor sinuosidad, la

cual se define como longitud del cauce entre la longitud del eje de la corriente principal. En el área de estudio la diferenciación cuantitativa de este elemento ayudará al modelo a una mejor diferenciación entre la región este y oeste, donde claramente existen contrastes con relación a los cauces existentes. Los valores fueron obtenidos del SIATL (INEGI, 2010), fueron incluidos en los polígonos de subcuencas y posteriormente transformados a formato raster.

- ✓ *Mapa edafológico:* El tipo de suelos es una variable de predicción espacial importante ya que por los diferentes atributos de cada tipo de suelo (e.g. contenido de arcillas, densidad aparente, mineralogía, etc.) se define el contenido potencial de carbono orgánico (Ingram & Fernandes, 2001). La cartografía utilizada para esta variable fue la misma que para la generación del mapa de paisajes (INEGI, 2007) en formato raster a 90 metros de pixel.

- ✓ *Mapa geológico:* El material parental tiene un impacto importante en la formación de suelos, la geoquímica y la física de los suelos (Baritz & Yigini, 2018). La naturaleza de la roca puede determinar la capacidad de intercambio catiónico, la saturación de bases y hasta el almacenamiento de nutrientes. Debido a que el área de estudio se encuentra en una zona de transición entre la plataforma kárstica de la Península de Yucatán al este y la llanura aluvial de los ríos Grijalva y Usumacinta al oeste existe una clara diferencia de material parental que se expresa de alguna forma en la profundidad de suelos existentes. En las llanuras aluviales encontramos suelos más profundos con datos de carbono orgánico hasta el metro de profundidad y por el otro lado profundidades de hasta máximo 30 cm en la plataforma kárstica. De esta forma, se incluye al modelo la variabilidad del territorio que pudiera presentar por tipo de roca y así poder inferir en las limitaciones de profundidad del suelo en las zonas kársticas. El mapa geológico utilizado fue el del SGM (2004, 2005) empleado para el mapa de paisajes.

ii) Relación de los puntos de muestreo y variables espaciales: Para establecer la relación entre datos de campo y las variables espaciales seleccionadas se generaron dos matrices de entrenamiento (*data frame*), una matriz para carbono aéreo y otra para carbono subterráneo. En ambas matrices la primera columna presenta los datos de carbono orgánico obtenidos en campo y en las siguientes columnas se encuentran los valores de cada variable seleccionada (ver secciones 3.6.3.1. y 3.6.3.2.) mediante una operación de extracción/sobreposición de valores realizada en el software ArcGIS10.5.

iii) Estimación del carbono aéreo y subterráneo: En esta etapa se utilizó el software ArcGis v10.5 para la manipulación de la cartografía digital, así como el software estadístico RStudio (RStudio Team, 2016) con el apoyo de las librerías *raster*, *rgdal*, *sp*, *Random forest*, *caret* y *ggplot2*. El método de *Random forest* al realizar la exploración de relaciones estadísticas (lineales y no lineales) entre los datos de campo y las variables explicativas independientes por medio de aprendizaje automático es prácticamente libre de suposiciones. Esto quiere decir que los supuestos de linealidad, normalidad, colinealidad, distribución de los errores y homocedasticidad no requieren ser evaluados previamente (Guevara *et al.*, 2018).

Existen dos parámetros en *Random forest* que pueden ser modificados para un mejor control del modelo: *i) mtry*, que controla el número de factores de predicción utilizados en cada submuestra aleatoria (en cada árbol de decisión) y *ii) ntree*, que controla el número de árboles generados por el modelo. Se utilizó la librería *caret* que utiliza un tipo de validación cruzada para encontrar la mejor combinación de estos dos parámetros para la mejor precisión en las predicciones (Kuhn *et al.*, 2017).

La definición del modelo a ser utilizado se realizó a partir de la evaluación de la correlación de los valores observados y esperados y el promedio absoluto del error de varios modelos generados. Los diferentes modelos se fueron ajustando realizando combinaciones de las variables independientes según la importancia teórica, así como el conocimiento experto del lugar sobre las variables que podrían influir en la distribución espacial de los almacenes de carbono.

Una vez que se definió el mejor modelo se procedió a la predicción de los almacenes de carbono (aéreo y subterráneo) con la función *predict* del paquete *Random forest*. El resultado fue la generación de dos mapas con valores de carbono (aéreo y subterráneo) por pixel según los predictores disponibles.

iv) Evaluación de la incertidumbre: La incertidumbre es un parámetro que llega a caracterizar la dispersión de los valores designados a un fenómeno. Es una medida de la diferencia existente entre el fenómeno modelado y el fenómeno real y puede ser representada mediante un conjunto de posibles estados con sus probabilidades correspondientes (Chiles & Delfiner, 1999). La forma de reportar la incertidumbre de un mapa puede realizarse a partir del cálculo de la raíz del error medio cuadrático, el coeficiente de determinación o las matrices de error (Shekhar & Xiong, 2008). Sin embargo, esta incertidumbre calculada se refiere al global del modelo evaluado. Idealmente un mapa debería incluir métricas explícitas de incertidumbre espacial. Para ello, existen diferentes métodos (Jackknife-after-Bootstrap, U-statistics approach, Monte Carlo simulations y Quantile Regression Forest) que pueden ser utilizados para este fin. En este trabajo se utilizó el método de Quantile Regression Forest (Meinshausen, 2006). Este enfoque nos permite la evaluación de la incertidumbre del modelo, así como la incertidumbre en la variación de los datos disponibles, según la ecuación 12.

$$\%Inc_{total-i} = ((Inc_{mod-i} + Inc_{dat-i}))/ Val_{pred-i} \quad (12)$$

Dónde:

$\%Inc_{total-i}$ = Incertidumbre total en porcentaje del pixel i .

Inc_{mod-i} = Sensibilidad del modelo en el pixel i .

Inc_{dat-i} = Incertidumbre de los datos en el pixel i .

Val_{pred-i} = Valor de carbono predicho para el pixel i .

La sensibilidad y la incertidumbre se obtienen a partir de una validación interna con los mismos datos de entrada, que consiste en utilizar cada vez que genera un modelo una combinación aleatoria diferente de datos para entrenamiento y validación del mismo (Guevara *et al.*, 2018). Para la obtención de la incertidumbre

total se generó un mapa de sensibilidad basado en 10 corridas del mismo, utilizando aleatoriamente el 70% de los datos como entrenamiento y dejando 30% para la validación según se recomienda en la literatura (Kohavi, 1995; Dangeti, 2017).

Para calcular la variación (incertidumbre) de los datos que se generan se estimó la probabilidad de distribución de valores de carbono para cada pixel (mediante el cálculo de la desviación estándar). El resultado es un mapa la desviación estándar que representa los valores extremos que puede tomar un pixel considerando las variables independientes disponibles (Guevara *et al.*, 2018).

Para tener una fácil interpretación de la incertidumbre, se dividió la incertidumbre total con los valores predichos de carbono para obtener un mapa de porcentajes de incertidumbre.

3.7. Correlación de los paisajes y almacenes de carbono

Con el mapa generado de paisajes naturales, según la metodología descrita en la sección 3.3 y evaluada su heterogeneidad (sección 3.4) se procedió a realizar el análisis de correlación entre los índices de heterogeneidad y los resultados obtenidos de los almacenes de carbono para conocer la probable asociación y finalmente aceptar o rechazar la hipótesis planteada en este estudio.

Se utilizó la prueba de Shapiro-Wilks para conocer la normalidad de los datos de los índices de heterogeneidad y almacenes de carbono por unidad de paisaje (*Paraje complejo*). De esta forma se determinó si los datos presentaban una distribución normal para poder proseguir la correlación mediante pruebas paramétricas. A los datos que no presentaban una distribución normal se utilizó una transformación a logaritmo natural (\ln) que en muchos casos permite normalizar la distribución de los datos.

Se seleccionaron las correlaciones (coeficiente de correlación de Pearson) más altas y con significancia estadística ($p < 0.05$), para explorar su relación mediante modelos de regresión. Ya que la correlación de Pearson mide la fuerza de la

asociación entre dos variables se examinaron modelos de diferentes tipos de función para el análisis de regresión.

Posteriormente, a partir del modelo con mayor correlación se realizaron predicciones de los almacenes de carbono en cada *Paraje complejo*. Se compararon los valores predichos con los valores observados para determinar el desempeño que puede llegar a tener el enfoque geocológico de relacionar la heterogeneidad del paisaje con la capacidad de almacenar carbono orgánico hasta un metro de profundidad de los humedales costeros.

3.8. Síntesis del Capítulo 3

- ✓ El territorio estudiado comprende la parte terrestre continental de los humedales costeros de dos Áreas Naturales Protegidas federales (Área de Protección de Flora y Fauna Laguna de Términos, Reserva de la Biósfera Pantanos de Centla) y un sitio prioritario de manglar (PY75-CONABIO) que cubren una extensión de 9,024 km².
- ✓ Se realizaron dos salidas de campo con los objetivos de validar la hipótesis cartográfica del mapa de paisajes y obtener datos de los almacenes de carbono aéreo y subterráneo en diferentes tipos de coberturas según la metodología empleada por Fourqurean *et al.* (2014).
- ✓ Se empleó la metodología de delimitación y mapeo de unidades tipológicas del paisaje basada en una estructura jerárquica de cuatro niveles taxonómicos (*Clase, Localidad, Paraje complejo y Paraje simple*), que se fundamenta en los postulados de la Geografía Física Compleja y adaptada al contexto geográfico mexicano.
- ✓ Las particularidades geométricas de la estructura horizontal del paisaje fueron utilizadas para estudiar la heterogeneidad mediante el cálculo de índices generados específicamente para estos análisis y otros índices ecológicos utilizados para conocer diversidad biológica y que fueron

adaptados a la geodiversidad, sustituyendo especies por clases de paisajes y número de individuos por número de polígonos.

- ✓ El grado de transformación de la cobertura vegetal natural, fue obtenido a partir del cálculo del Índice de Antropización de la Cobertura Vegetal (IACV) propuesto por Shishenko (1988).
- ✓ Los almacenes de carbono aéreo y subterráneo se obtuvieron por separado a partir de la generación de modelos de predicción de valores de carbono utilizando el método de aprendizaje automatizado de *Random forest* (Breinman, 2001) basado en árboles de decisión y la utilización de variables independientes.
- ✓ Se utiliza el método de *Quantile Regression Forest* (Meinshausen, 2006) para estimar la incertidumbre espacial de los modelos predictivos de carbono.
- ✓ Se realizan pruebas de correlaciones estadísticas para observar la relación espacial entre la heterogeneidad de los geocomplejos del territorio y la capacidad de almacenamiento de carbono orgánico.

4. PAISAJES Y SU HETEROGENEIDAD

Como lo mencionan Priego-Santander *et al.* (2010) y Ramírez (2013), la escala 1:250 000 es una escala límite entre el nivel regional y nivel local de paisajes, pudiéndose identificar unidades de nivel regional (Clase) y de nivel local (*Localidades, Paraje complejo y Paraje simple*). En muchos casos y debido a la escala, algunos de los componentes naturales del paisaje no varían de forma significativa en el espacio y dentro de los límites del territorio estudiado.

Es en este sentido que a continuación se caracterizan los paisajes del área de estudio a partir de una descripción de los factores diferenciadores, así como posteriormente se realiza una caracterización general de los tipos de paisajes encontrados.

4.1. Factores diferenciadores del paisaje

Dentro de los factores de diferenciación de los paisajes a escala 1:250 000, la diferencia altitudinal y el clima no juegan un papel preponderante al interior del área de estudio, ya que morfológicamente todo el territorio pertenece a planicies costeras sub-horizontales con una disección vertical muy baja ($D_v < 2.5$) que no permite una diferenciación de pisos térmicos altitudinales. Climáticamente, el área corresponde a climas cálidos húmedos donde la temperatura media es de 22° a 26°C y la precipitación va de 2,000 a 4,000 mm anuales.

Por otro lado, la composición litológica, tipo de depósitos y el componente hidrológico expresado en la periodicidad de inundación son los principales factores de diferenciación de estos paisajes costeros. La parte oeste del área de estudio que comprende la RBPC y parte del APFFLT presenta una fuerte influencia fluvial, que permite la deposición de sedimentos y formación de suelos acumulativos, profundos y ricos en materia orgánica. La génesis del relieve está dominada por procesos exogenéticos. En esta región se pudieron diferenciar planicies formadas por depósitos aluviales y por depósitos biógenos. Los depósitos aluviales son acumulaciones de material detrítico litogénico resultante del movimiento y transporte superficial del agua (Seco, 2001). Los depósitos biógenos son

acumulaciones de sedimentos formados principalmente a partir de partículas de organismos vivos, plantas y animales (Kennett, 1982). En la región este del área de estudio, que comprende parte del APFFLT y el sitio PY75-CONABIO, la influencia fluvial disminuye y existe una interacción de procesos tectónicos, abrasivos y acumulativos de diferentes tipos de depósitos. Los procesos endogenéticos tienen mayor influencia. En muchos sectores de esta región se hace más evidente la presencia de caliza que forma parte de la plataforma de Yucatán.

4.2. Unidades Taxonómicas de los Paisajes y su caracterización

La escala de trabajo (1:250 000) permitió la identificación de cuatro niveles taxonómicos. De estos niveles se pudieron diferenciar una *Clase*, seis *Localidades*, 11 *Parajes complejos* y 61 *Parajes simples*. En la Tabla 13 se presenta la organización jerárquica encontrada en los paisajes del área de estudio y algunas características que nos permitirán posteriormente realizar los análisis de heterogeneidad. La Figura 11 muestra en formato de mapa la distribución espacial de las unidades de paisaje.

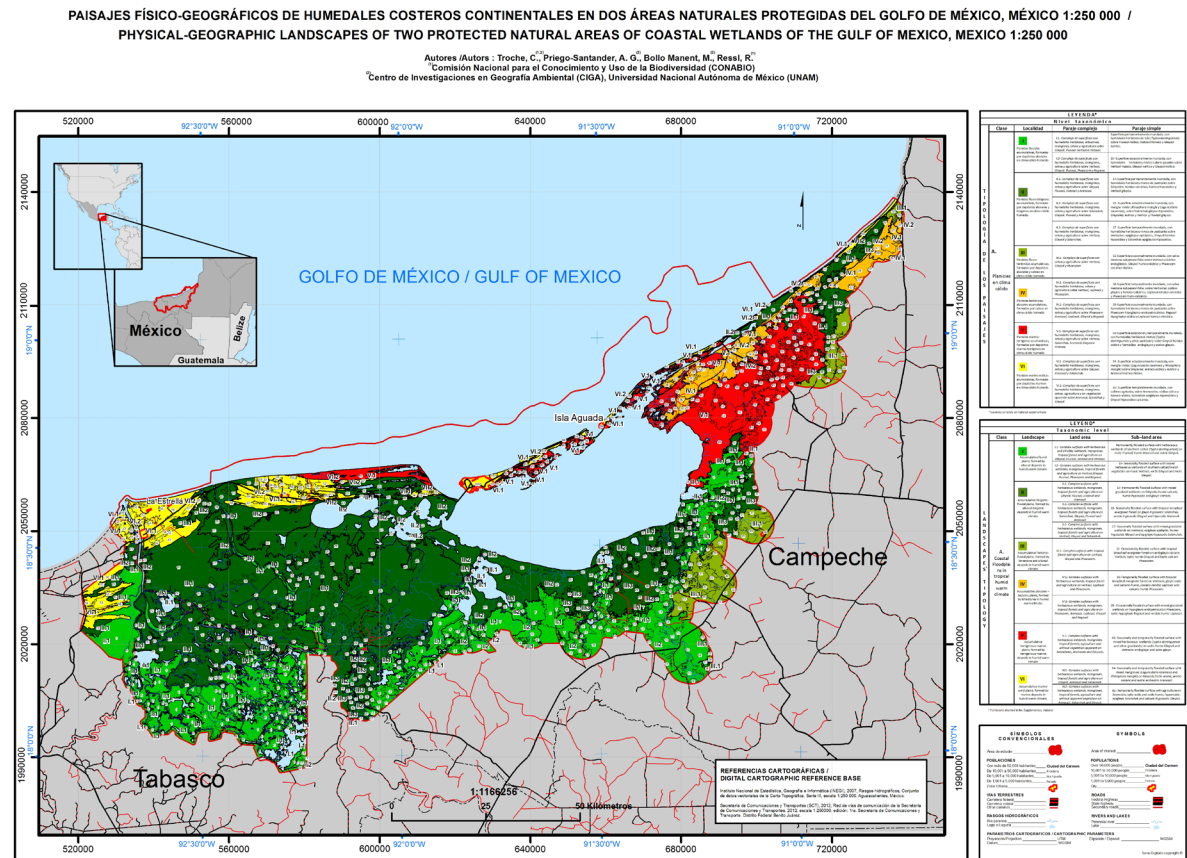
Tabla 13. Características y organización jerárquica de los paisajes.

Clase	Localidad	Paraje Complejo	Parajes Simples	<i>N_c</i>	<i>ni</i>	Área (km ²)
A	I	I.1	1,2,3,4,5,6,7,8	8	196	1,637.4
		I.2	9,10,11,12,13,14	6	82	665.0
	II	II.1	15,16,17,18,19,20,21	7	146	2,692.0
		II.2	22,23,24,25,26	5	74	1,213.8
		II.3	27,28,29,30	4	41	404.5
	III	III.1	31,32,33,34	4	45	413.8
	IV	IV.1	35,36,37	3	25	238.4
		IV.2	38,39,40,41,42	5	17	115.8
	V	V.1	43,44,45,46,47,48,49,50,51,52	10	117	1,017.6
	VI	VI.1	53,54,55,56	4	52	509.3
		VI.2	57,58,59,60,61	5	30	116.0
	Total				61	825

A: Planicies en Clima Cálido; I,...,VI: Numeración para Localidades de paisajes; I.1,...,VI.2: Numeración para Parajes complejos; 1,...,61: Numeración para Parajes simples; *N_c* : Número total de Parajes simples; *ni*: Número total de polígonos.

Para una visualización interactiva del mapa de paisajes, así como para la lectura de la leyenda completa, favor de revisar el artículo elaborado a partir de estos primeros resultados y que fue publicado en la revista electrónica “terra digitalis”, http://terradigitalis.igg.unam.mx/html/ojs3/index.php/terra_digitalis/article/view/41.

También, en Anexo 1 se incluye una copia del artículo, el mapa a mayor resolución y la leyenda ampliada de las unidades de paisaje.



El nivel de *Clase* se representa con las letras del alfabeto (A), las unidades superiores o *Localidades* son representadas con un número romano, las unidades inferiores o *comarcas complejas* se representan por medio de la combinación del número romano de la *Localidad* que pertenece y un número natural. Finalmente, las *comarcas simples* se representan con números naturales. Las principales características de las unidades superiores encontradas en el área de estudio son:

Localidad I: Planicies fluviales acumulativas, formadas por depósitos aluviales en clima cálido húmedo. Estas planicies se localizan principalmente en la parte sur y suroeste del área de estudio y se caracterizan por presentar áreas con gran influencia de los ríos que transportan sedimentos detríticos y son depositados en estas zonas. La fuerza que aún ejerce el movimiento de las masas de agua en la planicie de inundación, especialmente en la época de lluvia, hace que la deposición

y acumulación de material sea principalmente exógeno. Se identificaron dos *Parajes complejos* y ocho *Parajes simples* con una extensión total aproximada de 2,302 km². La mayor parte de los *Parajes complejos* presentes en esta *localidad* se encuentran en superficies permanentemente inundadas con vegetación natural sobre Gleysoles y Fluvisoles de características húmicas. También se encuentran superficies que van de estacionalmente inundadas a temporalmente inundadas sobre Vertisoles donde existen actividades de bajo impacto como agricultura de temporal y pastoreo de ganado.

Localidad II: Planicies fluvio-biógenas acumulativas, formadas por depósitos aluviales y biógenos en clima cálido húmedo. Estas superficies se encuentran principalmente en la parte sur y sur-oeste, limita principalmente con las planicies fluviales de la *localidad I* y las grandes lagunas de contenido salobre (Laguna de Términos) o la parte marina. En esta *Localidad* sigue existiendo la influencia de los grandes ríos de la zona (depósitos aluviales), pero la fuerza del movimiento de las masas de agua es mucho menor. Al encontrarse en la parte terminal de la cuenca y antes de la franja costera que forma una barrera natural al flujo de agua que proviene de cuenca arriba, hace que la circulación sea mínima en muchas zonas, lo que permite caracterizar a esta *Localidad* por la presencia de excesiva humedad, vegetación completamente hidrófila y una mayor acumulación de detritos biógenos, formando depósitos característicos de estas planicies (pantanos). En esta *Localidad* se identificaron tres *Parajes complejos* con 16 *Parajes simples*, los cuales abarcan un total de 4,310 km². Los parajes se caracterizan por presentar mayor cantidad de suelos hídricos como Gleysoles, Histosoles, Fluvisoles y Solonchak. Este último, propio de regiones con influencia salina y en este caso por la influencia mareal y la deposición de cristales de sal de agua de mar. En relación con la vegetación no se encuentran grandes cambios en la composición florística con relación a la ya mencionada *Localidad I*, con excepción de una mayor presencia de individuos de la especie *Avicennia germinans* (mangle negro) la cual tiene mecanismos fisiológicos efectivos para tolerar las altas concentraciones salinas que pueden existir en los suelos. Usualmente estos manglares se presentan en suelos Solonchak que presentan altos contenidos de sulfuros y son altamente reductores (Mckee, 1993).

Localidad III: Planicies fluvio-tectónicas acumulativas, formadas por depósitos aluviales y calizas en clima cálido húmedo. Estas unidades se encuentran ubicadas en la parte sur-este del territorio. No presentan grandes extensiones con relación a las otras localidades y se caracterizan por que en estas regiones ya existe un contacto con la naturaleza cárstica de la Península de Yucatán con influencia de ríos a nivel superficial. Constituyen la unidad de mayor simplicidad estructural y han sido y están siendo ampliamente modificados por la actividad antrópica. Se encontró solamente un *Paraje complejo* compuesto por cuatro *Parajes simples*, abarcando un total de 413.8 km² de superficie en el área de estudio. Estas planicies se caracterizan por presentar superficies anegadas de forma temporal y ocasional. Es decir, que su periodicidad de inundación se da en la estación húmeda y va solamente de uno a seis meses. En relación con los suelos, predominan los Vertisoles y aparecen los Regosoles. La vegetación asociada es de selva subperennifolia que está siendo rápidamente modificada a cultivos agrícolas.

Localidad IV: Planicies tectónicas abrasivo-acumulativas, formadas por calizas en clima cálido húmedo. Estas planicies se ubican en el extremo este del área de estudio ocupando parte de los bloques tectónicos de la Península de Yucatán. Su origen se relaciona principalmente con procesos geológico-geomorfológicos de distribución de rocas carbonatadas y movimientos tectónicos. La influencia fluvial o de aguas superficiales es mínima o inexistente lo cual genera procesos cársticos abrasivos o acumulativos dependiendo de la ubicación y el proceso tectónico ocurrido. En esta *Localidad* se encontraron dos *Parajes complejos* con ocho *Parajes simples* que en su totalidad abarcan 354.2 km². Predominan los suelos de tipo Vertisol, Phaeozem y Arenosol con características carbonatadas. Donde predominan los procesos acumulativos se pueden encontrar suelos hidromórficos con características húmicas. La periodicidad de inundación puede llegar a ser de carácter estacional, temporal u ocasional, sobre tulares, manglares mixtos, selvas inundables y cultivos agrícolas. También es muy característico ver en estas superficies la presencia localizada de vegetación xeromórfica entre los diferentes tipos de vegetación arbórea.

Localidad V: Planicies marino-terrágenas acumulativas, formadas por depósitos marino-terrágenos en clima cálido húmedo. Estas superficies se encuentran principalmente en la parte norte y este de la Laguna de Términos, en contacto directo con agua salobre y poca influencia de agua dulce, principalmente en la parte de sotavento. Solamente se encontró un *Paraje complejo* compuesto por 10 *Parajes simples*, con una superficie ocupada de 1,017.6 km². La influencia marina es significativa, por lo que encontramos suelos hidromórficos con altos contenidos salinos, lo cual condiciona en muchas partes la presencia de solo vegetación halófila herbácea y arbórea (*Avicennia germinans*) tolerantes a estas concentraciones de sales y a la dinámica mareal característica de esta *Localidad*.

Localidad VI: Planicies marino-eólicas acumulativas, formadas por depósitos marinos en clima cálido húmedo. Estas superficies se encuentran distribuidas principalmente a lo largo de la línea de costa en el litoral de barlovento. Son muy características de zonas costeras ya que su génesis se relaciona con procesos acumulativos de depósitos marinos arenosos de sílice y biotrácticos que son distribuidos principalmente por la dinámica de vientos y corrientes en esta *Localidad*. Se identificaron dos *Parajes compuestos* con nueve *Parajes simples*, cubriendo una superficie de 625.3 km². Al igual que en las anteriores *Localidades* las diversas condiciones geocológicas formadoras del paisaje facilitan la presencia de diferentes coberturas de vegetación de costa arenosa, incluyendo matorrales costeros, selvas subperennifolias y comunidades de manglar. También se pueden encontrar muchas de estas formaciones vegetales en suelos de tipo Solonchak y Gleysoles.

El área de estudio se caracteriza por la dominancia de *Localidades* con gran influencia de planicies fluviales (II y I), las cuales ocupan más de 2/3 partes del territorio. Seguido a estas superficies, encontramos la dominancia de planicies con significativa influencia marina, marino-terrágenas (V) y marino-eólicas (VI). Finalmente, en extensión ocupada en el área de estudio, encontramos las planicies con influencia cárstica y con algún tipo de proceso tectónico como son las planicies fluvio-tectónicas (III) y tectónico abrasivo-acumulativas (IV). En la siguiente figura

(Figura 12) se representa esquemáticamente la proporción de territorio que ocupa cada *Localidad*, *Paraje complejo* y *Paraje simple* en el área de estudio. Se puede resaltar que los tres *parajes simples* con mayor superficie en toda el área se caracterizan por ser: Superficies permanentemente inundadas, con humedales herbáceos de tule (*typha dominguensis*) sobre Gleysoles, Histosoles y Fluvisoles (II.1.15 y I.1.1) así como superficies estacionalmente inundadas con manglar mixto (*Rhizophora mangle* y *Laguncularia racemosa*), sobre Solonchak, Gleysoles y Fluvisoles (II.2.23), ver leyenda descriptiva en Anexo 2.

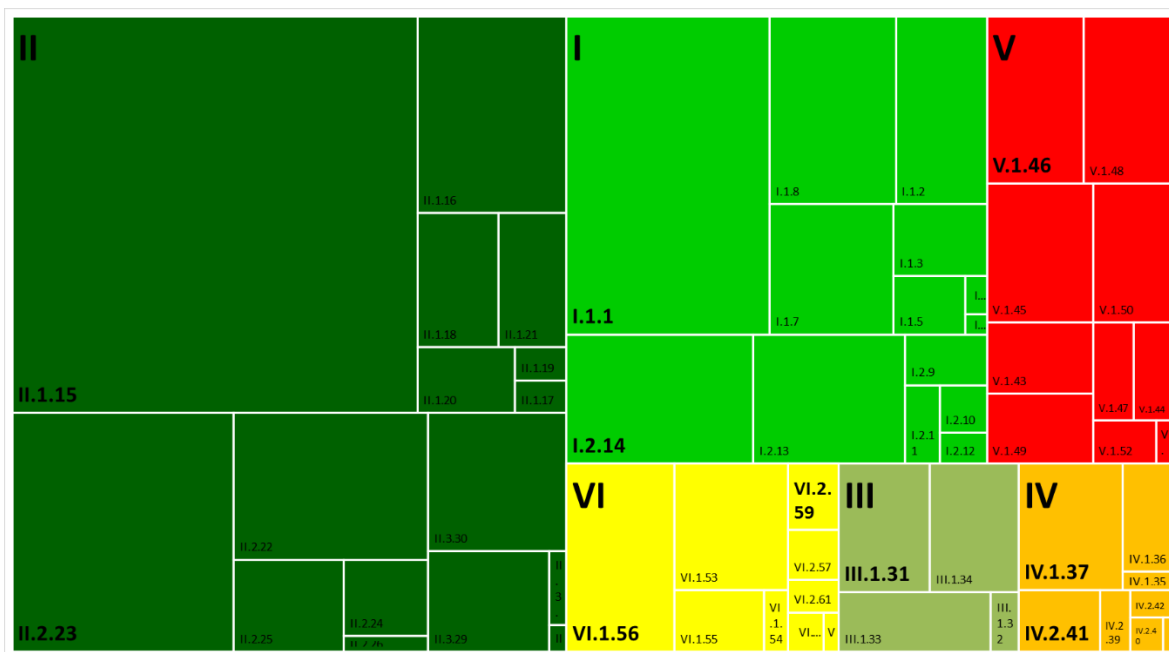


Figura 12. Representación de la dominancia de superficie entre *Localidades*, *Parajes complejos* y *Parajes simples*.

I...VI: Localidades. I.1.1,...II.1.15,..., etc.: Representan los parajes simples con mayor extensión dentro del paraje complejo en el que se encuentran.

4.3. Heterogeneidad Geoecológica de los humedales costeros

Como se mencionó en la sección 3.4 los indicadores de la heterogeneidad geoecológica fueron obtenidas a nivel de *Paraje complejo*. En la siguiente tabla se muestran los valores utilizados para clasificar según el método de optimización de Jenks, cada uno de los indicadores de heterogeneidad seleccionados para este estudio (Tabla 14).

Los mapas generados para cada índice y que muestran la distribución espacial de cada categoría se encuentra en la sección de anexos, al final de este documento (Anexo 3). La Figura 13 muestra los gráficos de superficie ocupada por cada clase de todos los índices calculados para caracterizar la heterogeneidad de los paisajes del área de estudio.

Tabla 14. Índices de heterogeneidad del área de estudio

Clases	Índices									
	CC	CT	R	U	H'	D	S	H _{max}	IDP	K
MA	> 0.15	> 14.8	> 0.8	> 64.5	> 0.59	> 0.98	> 0.18	> 1.95	> 0.96	> 0.033
A	0.12 -0.15	11.7 -14.8	0.6 -0.8	33.2 -64.5	0.38 -0.59	0.73 -0.98	0.10 -0.18	1.61 -1.95	0.44-0.96	0.013-0.033
M	0.11 -0.12	8.3 -11.7	0.4 -0.6	17.0 -33.2	0.35 -0.38	0.62 -0.73	0.06 -0.10	1.39 -1.61	0.38-0.44	0.008-0.013
B	0.06 -0.11	3.4 -8.3	0.3 -0.4	3.61 -17.0	0.17 -0.35	0.1 -0.62	0.04 -0.06	1.10 -1.39	0.31-0.38	0.005-0.008
MB	< 0.06	< 3.4	< 0.3	< 3.61	< 0.17	< 0.1	< 0.04	< 1.10	< 0.31	< 0.005

Clases: MA: Muy Alta; A: Alta; M: Media; B: Baja; MB: Muy Baja.

Índices: CC: Complejidad corológica; CT: Complejidad Tipológica; R: Riqueza de paisajes; U: Diversidad de McIntosh; H': Diversidad de Shannon-Wiener; D: Dominancia de McIntosh; S: Singularidad paisajística; H_{max}: Diversidad máxima de paisajes; IDP: Índice de diversidad paisajística; K: Fraccionamiento paisajístico.

Los resultados indican que más de la mitad del territorio presenta una baja a muy baja complejidad corológica (CC) con 1,566 km² y 3,933 km² respectivamente. Esto representa más del 60% del área de estudio. El 37% corresponde a una complejidad corológica media y tan solo el 2.6% representa a las categorías alta y muy alta. Estas últimas se encuentran ocupando pequeñas porciones un poco detrás y a lo largo de línea costera (Figura 13a).

Por el contrario, el índice de complejidad Tipológica (CT) muestra que las clases alta y muy alta ocupan más del 74% del territorio, estos parches se ubican principalmente en la parte centro y oeste del área de estudio, dejando parches de categoría media (20%), baja y muy baja (5%) con mayor distribución en la parte este y centro sur del área de estudio (Figura 13b).

Con relación a la riqueza de paisajes (R), el 59% de la superficie lo ocupan las clases alta y muy alta, las cuales se distribuyen a lo largo de todo el territorio. El restante 41% se distribuye entre las clases media, baja y muy baja, presentes principalmente en la parte centro y sur del área de estudio (Figura 13c).

El índice de diversidad de McIntosh (U), presenta una distribución más homogénea en el territorio con relación a la cantidad de superficie entre sus clases. La clase que más domina es la alta diversidad con aproximadamente 30% de la superficie y se presenta principalmente en la parte oeste del territorio. Las categorías de baja y muy baja diversidad que ocupan conjuntamente el 39% se encuentran ubicadas principalmente en la parte este y sur (Figura 13d).

En lo que refiere al índice de diversidad de Shannon-Wiener (H'), las clases alta y muy alta representan el 70% de la superficie, distribuyéndose principalmente en la parte centro y oeste del territorio. La diversidad con clase media (12%) se encuentra distribuida en los límites de la parte sur del área de estudio. La clase que representa una diversidad muy baja (13%) se encuentra concentrada principalmente en la parte este, muy cerca de Sabancuy (Figura 13e).

La dominancia de McIntosh (D) nos muestra la existencia de una baja dominancia en más del 64% del territorio, seguida de las categorías muy alta (17%) y alta (14%) respectivamente. Debido al método de rompimientos naturales de Jenks, en este índice no se registró una dominancia con categoría muy baja (Figura 13f).

En la singularidad paisajística (S), las categorías, alta (41%) y muy alta (18%) dominan el territorio. La distribución espacial de estas dos categorías se encuentra especialmente en las partes este y oeste, dejando la parte central del área de estudio singularidades paisajísticas de tipo media (21%) y baja (15%) principalmente (Figura 13g).

El índice de diversidad máxima (H'_{max}) muestra que las clases alta y muy alta concentran más del 76% del territorio, donde la clase alta se concentra especialmente en la parte oeste del área de estudio, mientras que la clase muy alta se distribuye por toda el área (Figura 13h).

Por su parte, el índice de diversidad paisajística (IDP) nos muestra que existen sectores con poca diversificación en el territorio (46% con clases bajas y muy bajas). Esto puede obedecer a que muchas unidades presentan grandes extensiones de

superficies como las planicies fluvio-biógenas acumulativas con homogeneidad litológica y edafológica, lo que introduce poca diversificación (Figura 13i).

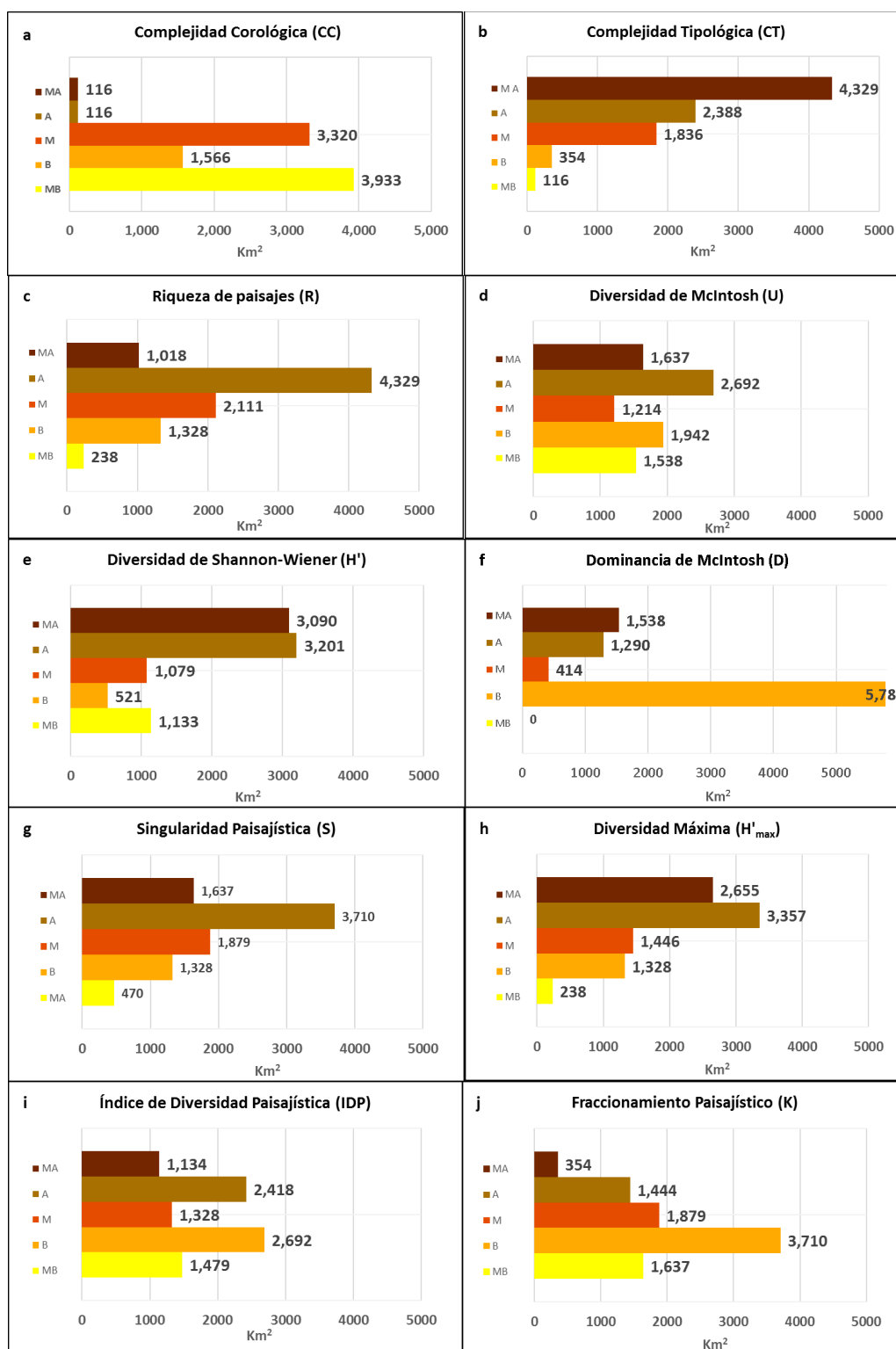


Figura 13. Superficie ocupada (km²) por clase en cada índice de heterogeneidad.
 Nota: MA: Muy alta; A: Alta; M: Media; B: Baja y MB: Muy Baja.

Finalmente, para el índice de fraccionamiento paisajístico (K) predomina el bajo fraccionamiento del paisaje (41%) ubicado en la porción central de la parte oeste, entre las localidades de Palizada y Frontera, así como en la parte este del territorio que colinda con Laguna de Términos. Sigue en dominancia el fraccionamiento muy bajo (18%) y medio (21%) que se encuentran distribuidos de la parte central hacia todo el sur oeste. El fraccionamiento alto (16%) se encuentra en importantes parches en la porción nor-oeste, centro-sur y sur-oeste del área. En último lugar, con relación a superficie ocupada, se encuentra el fraccionamiento paisajístico muy alto (4%) que ocupa la región nor-este del área de estudio (Figura 13j).

Como se podrá observar, en la Figura 13 y en los mapas de distribución espacial de la heterogeneidad, presentados en el Anexo 3, los resultados de los índices de heterogeneidad propuestos, no presentan información repetitiva entre sí, lo cual nos permite cuantificar de diferente manera la estructura de los paisajes en términos de su configuración espacial (Haines-Young & Chopping, 1996).

Haciendo un resumen de la clasificación de todos los índices de heterogeneidad sin tomar en cuenta la superficie ocupada, podemos observar (Tabla 15) que con excepción de los índices de Dominancia de McIntosh y Fraccionamiento paisajístico, la mayoría de los índices presentados, dominan las clases media, baja y muy baja.

Tabla 15. Indicadores categorizados de la heterogeneidad de los paisajes.

PC	Ps	# de Poligonos	Área (km2)	Perímetro (km)	CC	CT	R	U	H'	D	S	Hmax	IDP	K	ks
I.1	8	196	1637.4	3498.2	Medio	Muy alto	Alto	Muy alto	Alto	Bajo	Muy alto	Muy alto	Alto	Muy bajo	Dominante
I.2	6	82	665.0	338.9	Medio	Medio	Medio	Bajo	Medio	Alto	Medio	Alto	Alto	Medio	Subdominante
II.1	7	146	2692.0	4680.3	Muy bajo	Muy alto	Alto	Alto	Alto	Bajo	Alto	Alto	Bajo	Bajo	Dominante
II.2	5	74	1213.8	1111.7	Muy bajo	Alto	Medio	Medio	Muy alto	Bajo	Medio	Medio	Muy bajo	Medio	Dominante
II.3	4	41	404.5	63.0	Bajo	Medio	Bajo	Muy bajo	Bajo	Muy alto	Bajo	Bajo	Medio	Alto	Raro
III.1	4	45	413.8	736.0	Bajo	Medio	Bajo	Bajo	Medio	Medio	Bajo	Bajo	Medio	Alto	Raro
IV.1	3	25	238.4	92.2	Bajo	Bajo	Muy bajo	Bajo	Muy alto	Bajo	Muy bajo	Muy bajo	Muy bajo	Muy alto	Raro
IV.2	5	17	115.8	20.2	Alto	Muy bajo	Medio	Muy bajo	Muy bajo	Muy alto	Muy bajo	Medio	Alto	Muy alto	Único
V.1	10	117	1017.6	390.5	Medio	Medio	Muy alto	Muy bajo	Muy bajo	Muy alto	Alto	Muy alto	Muy alto	Medio	Dominante
VI.1	4	52	509.3	870.0	Bajo	Alto	Bajo	Bajo	Alto	Alto	Bajo	Bajo	Medio	Alto	Subdominante
VI.2	5	30	116.0	272.2	Muy alto	Bajo	Medio	Bajo	Bajo	Alto	Muy bajo	Medio	Muy alto	Alto	Único

Índices: PC: Paraje complejo; Ps: Paraje simple; CC: Complejidad corológica; CT: Complejidad Tipológica; R: Riqueza de paisajes; U: Diversidad de McIntosh; H': Diversidad de Shannon-Wiener; D: Dominancia de McIntosh; S: Singularidad paisajística; H_{max}: Diversidad máxima de paisajes; IDP: Índice de diversidad paisajística; K: Fraccionamiento paisajístico; Ks: Coeficiente de singularidad.

Esto se debe a que nos encontramos frente a grandes extensiones de llanuras fluviales con muy poca diferenciación morfológica, por lo tanto, la mayoría de los

índices refleja esa baja heterogeneidad en el paisaje en la totalidad de sus unidades intermedias.

También se realizó un análisis adicional para conocer la dominancia espacial del paisaje que permite conocer la composición de la estructura paisajística. Se calculó el coeficiente de singularidad ($k_s=1/A$) que se obtiene dividiendo 1 entre el área que ocupa cada *Paraje complejo* (Mateo, 2008). Según muestra la Tabla 15 de los 11 *Parajes complejos* seis tienen categorías *dominantes* y *subdominantes*, eso quiere decir que ocupan la mayor extensión en nuestro sitio de estudio. Existen tres paisajes *raros*, los cuales ocupan áreas limitadas y con pocos polígonos. Finalmente encontramos dos paisajes únicos (IV.2 y VI2) que se encuentran en áreas muy reducidas. El mapa generado para observar la distribución espacial de las clases de este coeficiente (k_s) se encuentra en el Anexo 3.

Esta cuantificación y descripción sobre la heterogeneidad ambiental del territorio será utilizada para determinar su correlación con los almacenes de carbono de los humedales costeros encontrados en el área de estudio. Como en varios casos, si la correlación es significativa, estadísticamente hablando, la información puede ser utilizada para hacer inferencias sobre este proceso ecológico particular dentro del paisaje.

4.4. Antropización de la cobertura vegetal de los paisajes

Los resultados de este análisis, que muestran el grado de transformación de los tipos de cobertura vegetal natural, se pudieron categorizar en cinco diferentes clases.

Las definiciones de los grados de antropización de la cobertura vegetal de los paisajes se muestran en la Tabla 16. El porcentaje de coberturas naturales y semi-naturales es determinado mediante el análisis de estas superficies en el territorio posterior a la selección de clases por rompimiento natural de Jenks.

Tabla 16. Definición de los grados de antropización de la cobertura vegetal de los paisajes.

Grado	Índice	Definición
Muy Alto	$IACV > 0.278$	Unidades de paisaje que mantienen su cobertura natural en un área menor al 20%. Más del 50% se utiliza para actividades agropecuarias o pertenecen a coberturas antrópicas.
Alto	$0.18 < IACV < 0.28$	Unidades de paisaje que mantienen su cobertura natural hasta en un 30% de la superficie. Entre 30 y 40% se utiliza para actividades agropecuarias.
Medio	$0.13 < IACV < 0.18$	Unidades de paisaje que presentan una cobertura seminatural (secundaria) mayor a 50% y hasta un 20% de la superficie se utiliza para actividades agropecuarias.
Bajo	$0.08 < IACV < 0.13$	Unidades de paisaje que mantienen su cobertura natural primaria hasta un 65% de la superficie. Las actividades agrícolas y pecuarias se desarrollan hasta en un 25 % del área total de la unidad.
Muy Bajo	$IACV < 0.08$	Unidades de paisaje que presentan más del 70% del territorio una cobertura natural primaria. Y coberturas menores al 10% con actividades agrícolas y pecuarias.

En general, el territorio se caracteriza por su baja antropización, aproximadamente el 73% de la superficie pertenece a las categorías de índice bajo y muy bajo (ver Figura 14). El establecimiento de dos Áreas Naturales Protegidas y las condiciones naturales de inundación de la zona puede que esté limitando la antropización de estas coberturas y coinciden espacialmente con los grados bajos y muy bajos de este análisis.

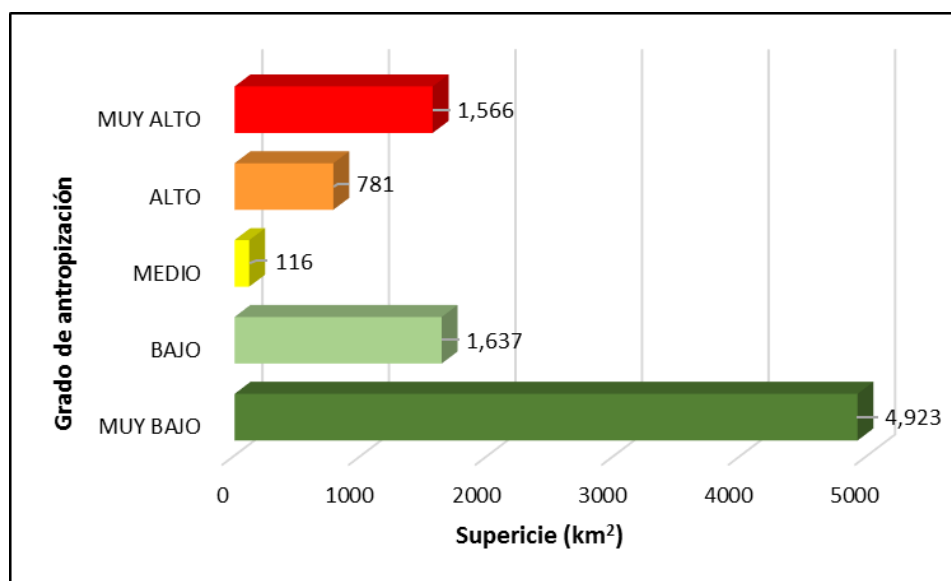


Figura 14. Superficie ocupada por grado de antropización de la cobertura vegetal.

Las áreas núcleo de estas dos ANPs presentan grados muy bajos de antropización, sin embargo, sus límites en la parte sur, así como en el oeste están empezando a sufrir cierto grado de modificación de sus coberturas. Por otro lado, las zonas norte de estas ANPs presentan alteraciones fuertes de sus coberturas naturales y están relacionadas con el paso de una carretera primaria (Villa Hermosa-Ciudad del Carmen).

Las superficies con un grado de antropización medio abarcan tan solo el 1.3% del territorio y se encuentran principalmente distribuidas hacia el lado este del área (ver Figura 14). Estas zonas se caracterizan principalmente por el cambio de coberturas naturales a zonas agrícolas. Áreas con alto y muy alto grado de antropización (26%) presentan mayormente centros poblados (e.g. Ciudad del Carmen) y superficies con actividades agropecuarias donde las cubiertas vegetales naturales se encuentran completamente transformadas.

La composición de tipos de antropización por *Paraje complejo* (ver Figura 15) muestra que las unidades II.1, II.2 y V.1 presentan valores muy bajos del índice de antropización. Estas unidades corresponden a complejos de superficies fluvio-biógenas acumulativas, formadas por depósitos aluviales y biógenos, así como complejos de superficies marino-terrágenas acumulativas formadas por depósitos marino-terrágenos. Presentan vegetación primaria por arriba del 70% de su territorio y llega hasta más de 90% con vegetación secundaria arbórea, dejando un máximo de 10% a actividades agropecuarias.

El grado bajo de antropización está representado en el *Paraje complejo* I.1, que corresponde al complejo de superficies fluviales acumulativas, formadas por depósitos aluviales. Estas superficies se encuentran espacialmente (ver Figura 16) cerca de los límites sur y oeste del área. Los resultados muestran que las actividades agrícolas y pecuarias representan más del 20% de la superficie, dejando superficies primarias y secundarias con un porcentaje menor al 80% del total de la unidad.

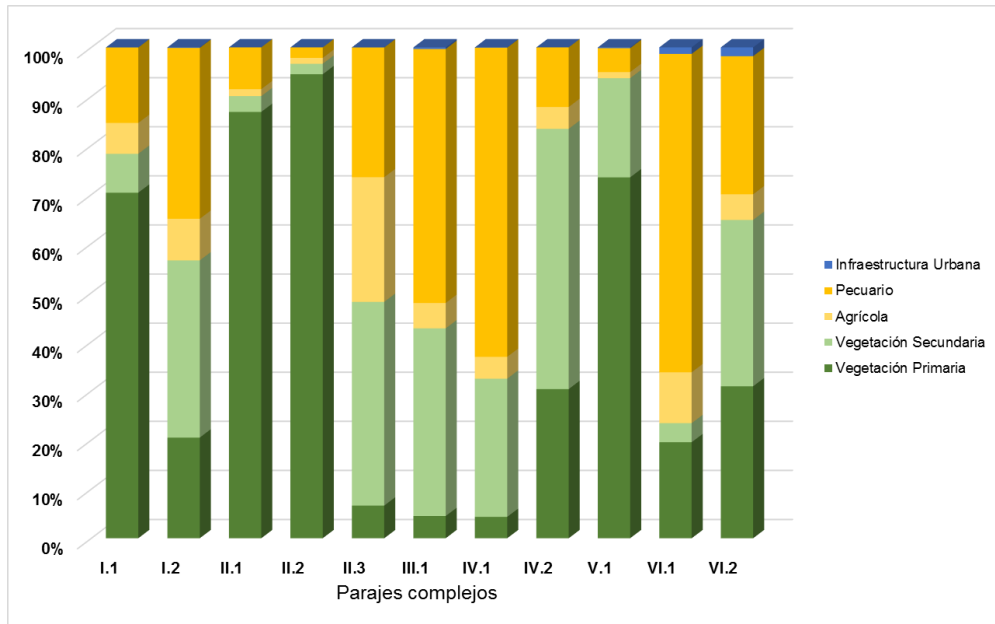


Figura 15. Histogramas de composición de tipos de antropización de *Parajes Complejos*.

Para la antropización de grado medio, apenas 115 km², se encuentran en esta clase y corresponden a la extensión del *Paraje complejo* IV.2 que es un complejo de superficies tectónicas, abrasivo-acumulativas, formadas por calizas. La cual está conformada por menos de 30% de vegetación primaria y más del 55% de vegetación secundaria. Por sus características paisajísticas que comparte con la unidad IV.1 y que pertenecen a la misma *Localidad*, es muy probable que en un futuro esta unidad tenga un mayor grado de transformación antropogénica y siga su degradación de coberturas naturales como ya se presenta el complejo IV.1.

Los *Parajes complejos* I.2 y VI.2 que pertenecen a los complejos de superficies de planicies fluviales acumulativas, formadas por depósitos aluviales y a complejos de superficies marino-eólicas acumulativas formadas por depósitos marinos respectivamente, muestran un grado de antropización alto. El primer complejo (I.2) se encuentra en el sector sur del área de estudio, muy relacionada a la carretera primaria (Villa Hermosa-Escárcega).

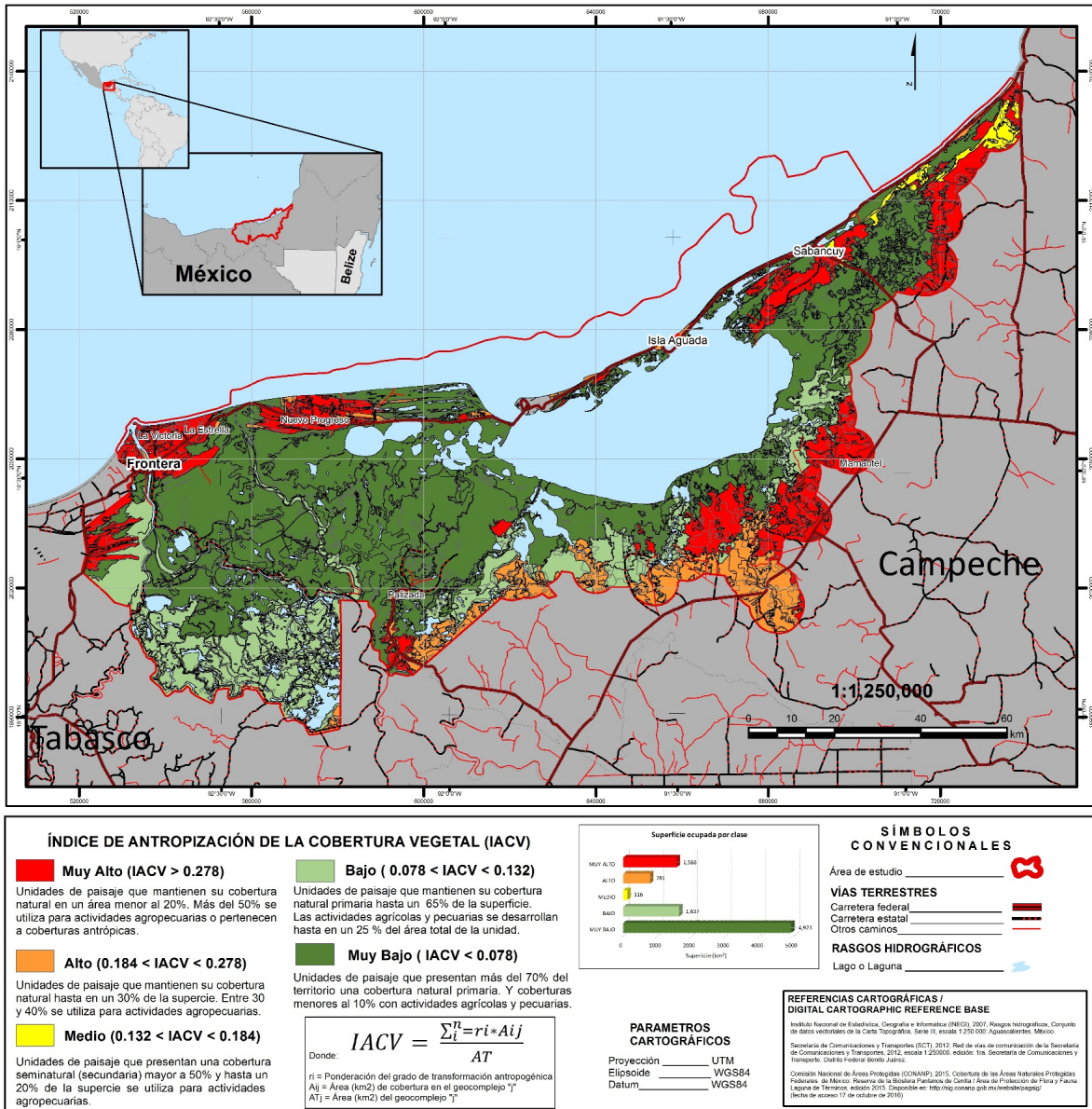


Figura 16. Mapa de Antropización de la cobertura vegetal.

En la mayoría de los casos, el acceso cercano a vías de comunicación favorece al cambio de cobertura y uso de la tierra. Este tipo de complejos se encuentran colindantes a los *Parajes complejos* 1.2 que pertenecen a la misma *Localidad*, y presentan un grado bajo de antropización. Sin embargo, los cambios de cobertura natural van en aumento y el avance de la frontera agrícola en sectores limítrofes de estas dos ANPs ha tenido un repunte notable (CONABIO, 2015; Martínez, 2016) lo cual permite pronosticar que el grado de antropización irá en aumento a corto plazo.

Finalmente, el grado más alto de antropización está presente en cuatro *Parajes complejos* (II.3, III.1, IV.1 y VI.1) de los cuales la unidad de complejos de superficies marino-eólicas acumulativas, formadas por depósitos marinos que son estacionalmente inundadas (VI.1) presentan el porcentaje más alto de superficie modificada por actividades agropecuarias (aproximadamente 80%). Espacialmente estas superficies (VI.1) se encuentran en el extremo nor-oeste del territorio, en el cual la carretera principal (Villa Hermosa-Ciudad del Carmen-Champotón) pasa por estas unidades. Aunque muchas de estas áreas presentan suelos arenosos, la estacionalidad de inundación y su periodo de secas permite llevar a cabo la actividad pecuaria. Por su lado, las otras superficies (III.1 y IV.1) presentes en la parte sur y sur-este, pertenecen a las planicies fluvio-tectónicas acumulativas, formadas por depósitos y calizas, así como a planicies tectónicas, abrasivo-acumulativas formadas por calizas. En ambos complejos se presentan únicamente selvas subperennifolias y actividades agropecuarias. Este proceso de antropización es recurrente en este tipo de complejos fuera del área de estudio, donde la selva es drenada y transformada para darle un uso agrícola. Es tan fuerte la transformación que la lejanía a carreteras principales o la periodicidad de inundación parecen ya no ser factores limitantes o condicionantes de este proceso. Esto se puede apreciar, ya que los complejos II.3 que pertenecen a la *Localidad* de planicies fluvio-biógenas se encuentra en este grupo de alto grado de antropización mientras que los otros *Parajes complejos* (II.1, II.2) se encuentran en el grupo de las unidades con la mayor cobertura natural del sitio de estudio.

Cabe señalar que los resultados mostrados de antropización según la escala utilizada (1:250 000) y el método de agrupación por nivel taxonómico de *Paraje complejo*, pueden encubrir zonas modificadas que no superan el área mínima cartografiable (1 km²), formando polígonos aislados y dispersos en el terreno que no llegan a ser tomados en cuenta en el análisis final y global de la unidad de paisaje. Este tipo de casos se presentan principalmente en aquellos polígonos que coinciden a lo largo de las carreteras secundarias (e.g. Frontera-Jonuta y Escárcega-Sabancuy). Como ya se mencionó, estos paisajes, por el propio contexto socio-económico en que se desarrollan y su accesibilidad con relación a las vías de

comunicación son susceptibles a cambios de la cobertura vegetal y uso del suelo (FAO, 2018). También otro fenómeno que está ocurriendo en la parte sur y sur-este del área de estudio y se refleja en un índice alto y muy alto de antropización es la transformación masiva de complejos naturales homogéneos a cultivos de palma africana (*Elaeis guineensis*), lo cual fue corroborado visualmente en el trabajo de campo.

4.5. Síntesis del Capítulo 4

- ✓ La composición litológica, tipo de depósitos y la periodicidad de inundación son los principales factores de diferenciación de los paisajes costeros analizados.
- ✓ La génesis del relieve está dividida en procesos exogenéticos que dominan la región oeste del área de estudio y procesos endogenéticos hacia la porción este del territorio.
- ✓ Se establecieron cuatro niveles taxonómicos: Una *Clase*, seis *Localidades*, 11 *Parajes complejos* y 61 *Parajes simples*. La *Localidad* dominante espacialmente fue la de planicies fluvio-biógenas acumulativas, formadas por depósitos aluviales y biógenos en clima cálido húmedo. La *Localidad* de menor superficie fue la de planicies marino-eólicas acumulativas, formadas por depósitos marinos en clima cálido húmedo.
- ✓ Los índices de heterogeneidad empleados mostraron diferentes patrones de comportamiento espacial en extensión y distribución.
- ✓ La composición de la estructura paisajística está formada por cuatro paisajes dominantes, dos paisajes subdominantes, tres paisajes raros y dos paisajes únicos.
- ✓ Los patrones de antropización del paisaje coinciden con la existencia de vías cercanas de acceso y tipo de protección (ANPs) de las coberturas naturales. Sin embargo, más del 72% del territorio presenta un grado bajo o muy bajo de antropización.

5. ALMACENES DE CARBONO

Como se mencionó anteriormente, los almacenes de carbono aéreo y subterráneo, se calcularon empleando la misma técnica estadística de *Random forest*, pero a partir de distintas variables dependientes e independientes. En las siguientes dos secciones se detalla la selección final de los modelos para el componente aéreo y subterráneo, así como su posterior predicción para toda la superficie del área de estudio. La tercera sección resume la unificación de los componentes aéreos y subterráneos la cual denominaremos como almacén total de carbono en humedales costeros.

5.1. Almacenes de Carbono Aéreo

Datos de campo (Anexo 4): En total se llegaron a utilizar 131 valores de carbono aéreo obtenidos en campo (50 datos propios, 71 datos CONAFOR, 2015a y 10 datos de Kauffman *et al.*, 2015). En la siguiente figura (Figura 17) se resume las características generales de la distribución y desviación estándar de los valores de carbono aéreo que se obtuvieron in situ.

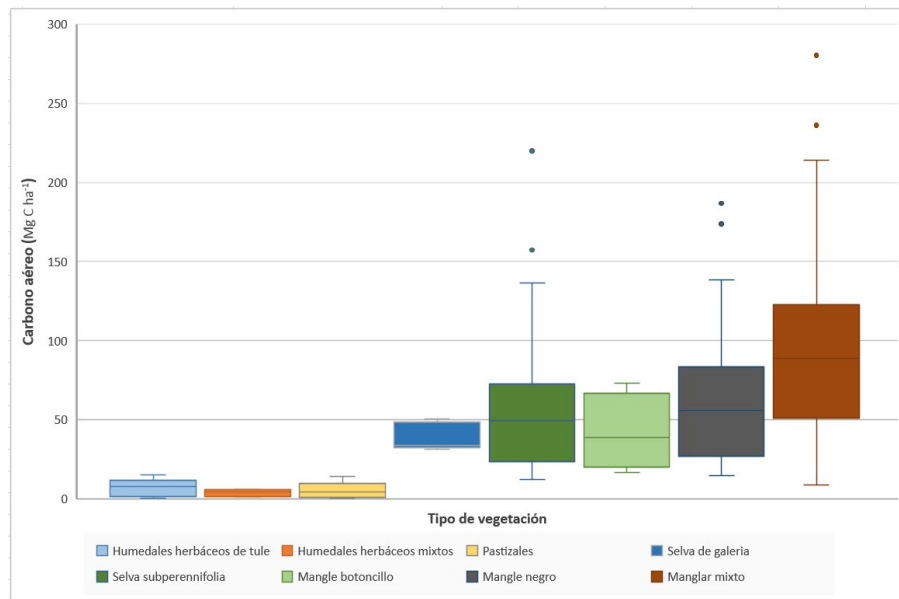


Figura 17. Distribución y variación de los valores de carbono aéreo (Mg C ha⁻¹).

En la figura anterior se observa una diferencia de valores de carbono aéreo que se puede dividir la variación en dos grandes grupos. En el primer grupo se encuentran valores de carbono en vegetación herbácea (humedales de tule, mixtos y pastizales) y en el segundo los valores de vegetación arbórea (selva de galería, subperennifolia y diferentes asociaciones de mangle).

Las variaciones entre las diferentes clases de vegetación herbácea van de 0.24 a un máximo de 15.03 Mg C ha⁻¹ para humedales herbáceos de tule y pastizales. La clase de humedales herbáceos mixtos presenta una distribución y variación menor, con valores mínimos de 1.29 Mg C ha⁻¹ y máximos de 5.84 Mg C ha⁻¹.

En el caso de la vegetación predominantemente arbórea el rango de variación es mucho mayor (8.91 – 280 Mg C ha⁻¹) y se encontró diferencias entre tipos de vegetación. Las coberturas de manglar mixto, predominante de *Rhizophora mangle* presentó los mayores valores promedio de carbono aéreo almacenado (88.96 ± 57.97 Mg C ha⁻¹), seguido de sitios con Mangle negro (56.11 ± 50.93 Mg C ha⁻¹), selva subperennifolia (49.43 ± 49.04 Mg C ha⁻¹), Mangle botoncillo (38.69 ± 24.29 Mg C ha⁻¹) y selva de galería (33.98 ± 9.34 Mg C ha⁻¹).

La alta variación de almacenamiento de carbono que se encontró dentro de las mismas clases de coberturas (e.g. mangle negro, selva subperennifolia) refleja la diversidad de condiciones estructurales que presenta una misma cobertura dentro del área de estudio y es comparable con otros estudios en diferentes regiones del país (Hughes *et al.*, 1999; Adame *et al.*, 2013; Guerra-Santos *et al.*, 2014; Ezcurra *et al.*, 2016; Herrera & Teutli, 2017).

Generación del modelo: Se realizó una selección final de variables predictivas a partir de la obtención del mejor modelo por el método de correlación cruzada, que consiste en la evaluación de la correlación entre valores predichos y observados dependiendo de la combinación de variables utilizadas.

Se definió el modelo con un total de seis variables explicativas que presentaron las mejores métricas de error en las múltiples corridas generadas con las combinaciones posibles según los datos utilizados. A continuación, se presentan los

parámetros y variables explicativas utilizadas, así como las métricas de error obtenidas en el modelo (Tabla 17).

Tabla 17. Parámetros, variables y métricas de error del modelo de carbono aéreo.

Categoría	Indicador	Valor
Parámetros	Total puntos de entrenamiento	131
	Variables explicativas participantes	6
	Número de árboles generados	500
	Tipo de <i>Random forest</i> : regresión	NA
Variables	Modelo de alturas del dosel	NA
	Índice de vegetación NDVI	NA
	Banda óptica RED	NA
	Relación VV-VH: Proporción vv-vh	NA
	Relación VV-VH: Diferencia vh-vv	NA
	Relación VV-VH: Relación NDVI/vv-vh	NA
Métricas de error	Número de variables (candidatas) en cada participación (<i>mtry</i>)	2
	Error cuadrático Medio (ECM)	39.55
	Porcentaje de la variación explicada	61.97
	Correlación (r^2)	0.7082
	Error absoluto medio (EAM)	28.01

Parámetros:

Se utilizaron 131 puntos de entrenamiento y se establecieron seis variables independientes que permitieron alimentar los algoritmos de árboles de decisión (500) para generar el modelo de regresión. En la Figura 18, se muestra la reducción del error del modelo a medida que se van generando los árboles de decisión.

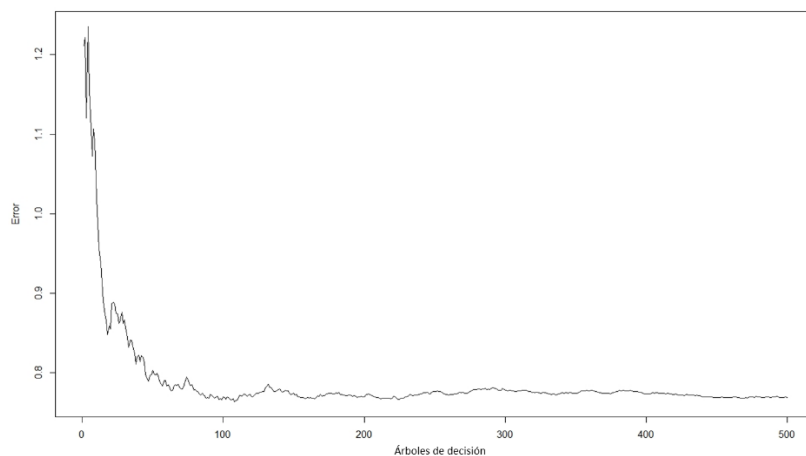


Figura 18. Error del modelo de carbono aéreo según el número de árboles generados.

En los primeros 100 árboles, existe una reducción considerable del error, posteriormente se estabiliza y la variación es mínima hasta llegar a los 400 árboles y de ahí se estabiliza hasta llegar a los 500 árboles. Por lo tanto, la elección de generar hasta 500 árboles de decisión, no afectó en el desempeño del modelo.

Variables:

De las seis variables utilizadas en el modelo (ver Tabla 17), una proviene de datos Lidar (Modelos de alturas de dosel), dos de productos de sensores pasivos (índice de vegetación, banda perteneciente a la porción del rojo del espectro electromagnético) y tres de productos de sensores activos (banda-C, del sensor Sentinel-1, diferentes relaciones de las polarizaciones VV y VH). La importancia de cada variable, que se interpreta como su participación en el modelo, se calculó a partir del índice de Gini (Breiman, 2001). Este índice es una medida de desorden, el cual, en la Figura 19 se interpreta de la siguiente manera: a mayor medida mayor importancia en los modelos creados ya que valores próximos a cero implican un mayor desorden y valores próximos a uno implican un menor desorden. Por lo tanto, al calcular el valor del “decremento” del índice de Gini, cuanto mayor es este valor más variabilidad aporta al entendimiento del cálculo de carbono aéreo.

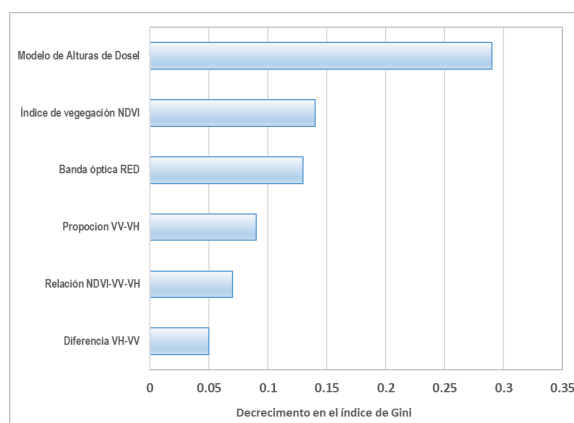


Figura 19. Importancia de las variables independientes en el modelo predictivo de carbono aéreo.

En este sentido, el producto generado a partir de datos Lidar, el modelo de alturas de dosel, es la variable independiente más importante dentro de nuestro modelo.

En segundo y tercer lugar se encuentran los productos obtenidos a partir de imágenes ópticas y las últimas tres variables en importancia son aquellas obtenidas de imágenes radar.

Métricas de error:

Se realizaron pruebas del número máximo de variables a ingresar a cada árbol de decisión y se obtuvo que la participación de dos variables en la construcción de cada árbol era el número que menor error presentaba en el modelo a partir de la selección de diferentes combinaciones ($mtry = 2$). El valor obtenido de 39.55 en el error cuadrático medio (ECM) y 28.01 en el error absoluto medio, nos muestran una variación importante de valores observados con los esperados, lo cual se puede confirmar con la variación de valores encontrados en cada cobertura como muestra la Figura 17.

La correlación obtenida entre los valores observados de carbono aéreo con los valores predichos del algoritmo fue de 0.71. Comparando el valor de correlación del modelo, con trabajos previos de mapeo de carbono aéreo en manglares en México y en el mundo, la correlación obtenida se encuentra en el grupo de las estimaciones con bajo sesgo. Por ejemplo, Cartus *et al.* (2014) utilizando la misma técnica de *Random forest*, encontró en su modelo una correlación muy baja ($r^2 = 0.2$) para manglares en el país. En general, los modelos realizados en humedales costeros presentan bajas correlaciones debido a la dificultad de conseguir puntos de campo para entrenar y verificar el modelo.

Predicción de carbono aéreo e incertidumbre: La Figura 20 muestra los resultados de la aplicación del modelo con los parámetros descritos anteriormente. El producto se enmascaró con la capa de desarrollo urbano para eliminar valores predichos de carbono en estas áreas. Por lo tanto, la predicción nos muestra valores mínimos de 0 a 3.35 Mg C ha⁻¹ y valores máximos de 202.87 Mg C ha⁻¹. El carbono aéreo se encuentra muy relacionada con las características y tipo de vegetación. Como se encontró en la sección anterior, la altura de dosel es una de las principales características de diferenciación de los almacenes de carbono aéreo. También el

tipo de vegetación, herbácea, arbustiva o arbórea, que se refleja de cierta forma en la altura, es otro factor que determina el almacenamiento de carbono aéreo, tal como se corrobora en diferentes trabajos que determinan almacenes aéreos en diferentes estratos (Hughes *et al.*, 1999; Adame *et al.*, 2015; Kauffman *et al.*, 2015)

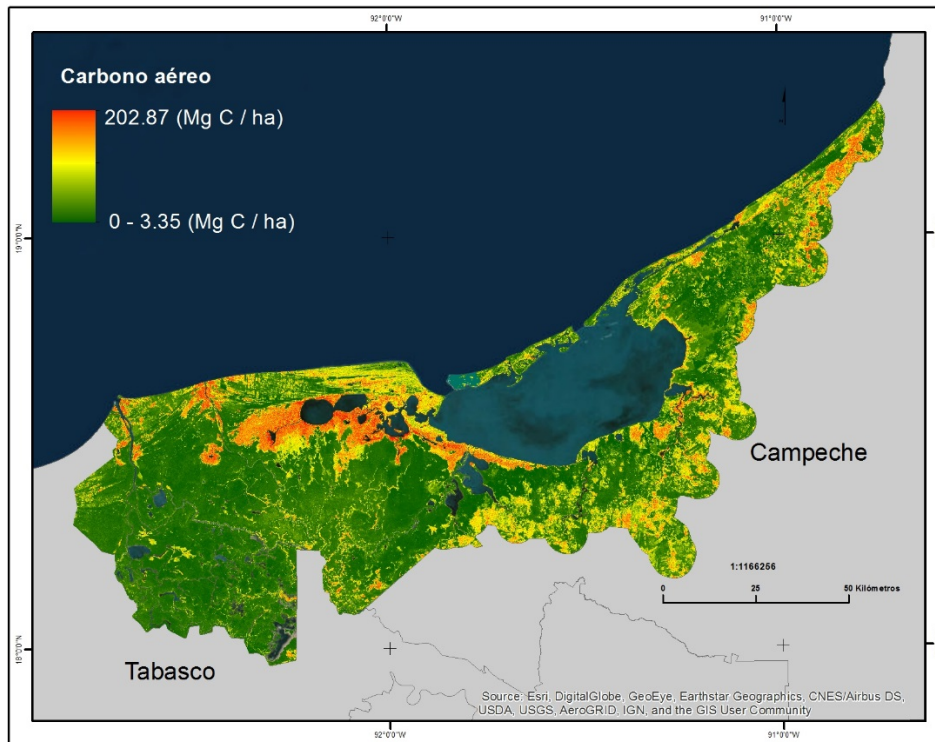


Figura 20. Predicción espacial de los almacenes de carbono aéreo

Agrupando la superficie del territorio por intervalos de carbono aéreo almacenado, observamos en el histograma de frecuencias (Figura 21) que los grupos comprendidos entre 8 y 19 Mg C ha⁻¹ almacenado, ocupan más del 45% del territorio. A medida que los valores de carbono aéreo se incrementa el porcentaje de superficie ocupada en el territorio por estos intervalos disminuye. A partir del intervalo de 140 - 143 Mg C ha⁻¹ la distribución en el territorio de cada intervalo es menor a las 100 ha. Los últimos cuatro intervalos que comprenden de 188 a 203 Mg C ha⁻¹ almacenado, apenas se distribuyen en 13 ha del área de estudio.

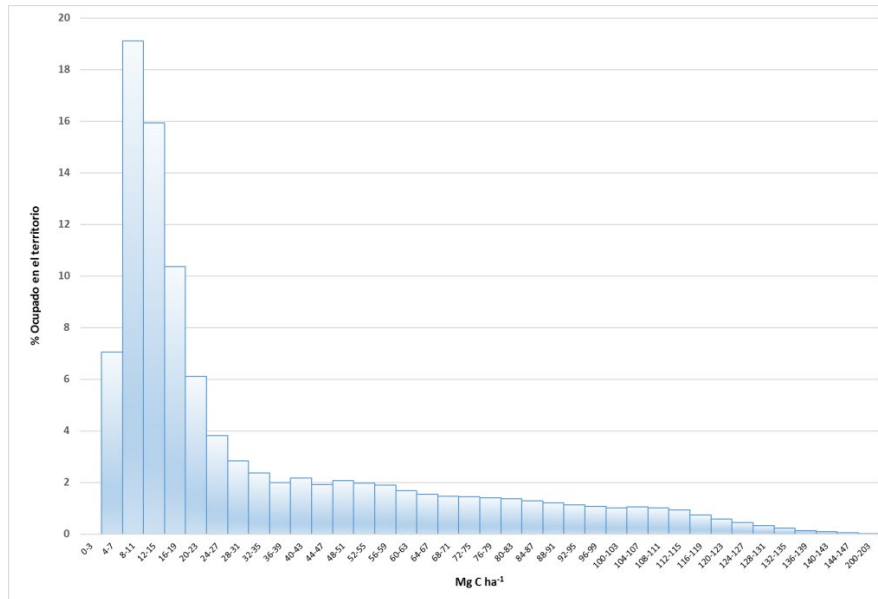


Figura 21. Histograma de frecuencias de almacenes de carbono aéreo.

La incertidumbre espacial que fue obtenida a partir del método propuesto de Quantile Regression Forest (Meinshausen, 2006), nos muestra valores mínimos de 0.3% y máximos de 6.4%. Se observa en la Figura 22, que las zonas con mayor incertidumbre son aquellas que corresponde a coberturas herbáceas del área de estudio (*humedales herbáceos mixtos de pastizales* y *humedales herbáceos de tule*). Esto puede explicarse debido a que el rango que comprende el almacén de carbono herbáceo (0.24-15.03 Mg C ha⁻¹) frente a coberturas arbóreas (8.91 – 280 Mg C ha⁻¹) es mucho menor, por lo que la predicción del valor en estas zonas será más sensible y por lo tanto aumentará la incertidumbre.

Comparando todas las zonas con cobertura de *humedales herbáceos de tule*, resalta que en la parte oeste del cuerpo de agua de Laguna de Términos se encuentran los valores más altos de incertidumbre, para esta cobertura. Es muy probable que, el modelo al no contar con puntos de entrenamiento en esta zona, permitió que la incertidumbre aumentara, aun existiendo otros puntos en el mismo tipo de cobertura.

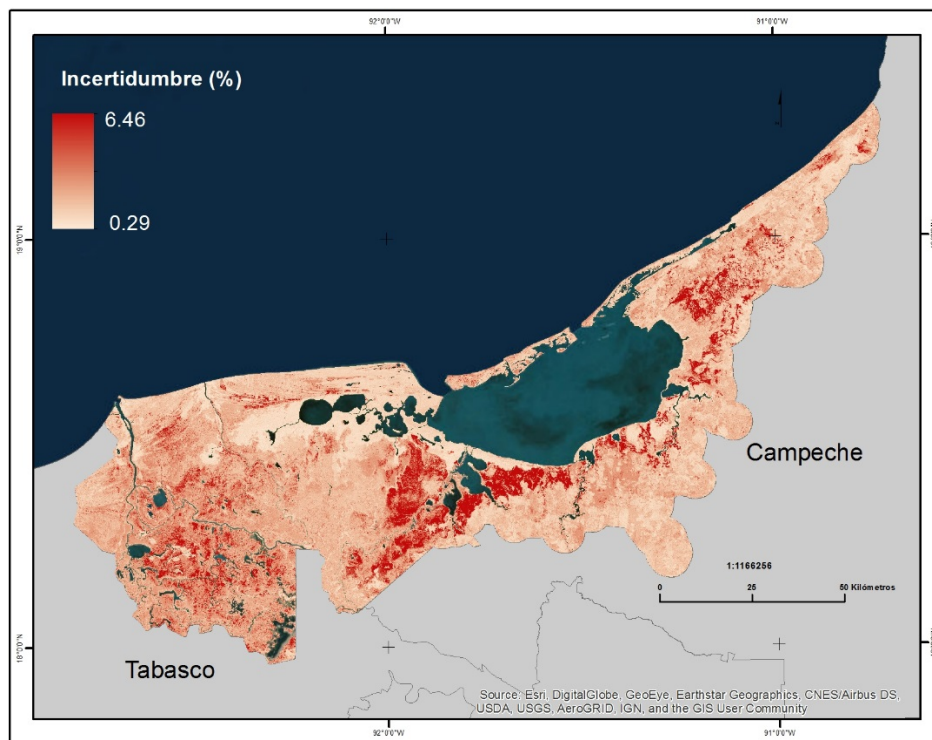


Figura 22. Incertidumbre espacial de los almacenes de carbono aéreo.

5.2. Almacenes de Carbono Subterráneo

Datos de campo (Anexo 5): Debido a la poca disponibilidad de información de carbono subterráneo, ya que supone grandes esfuerzos económicos y de tiempo, se utilizaron los 52 puntos de campo obtenidos en dos salidas de campo (2015-2017) y adicionalmente, los 10 puntos con valores de carbono subterráneo de Kauffman *et al.* (2015) que corresponden al sector norte de los ríos Usumacinta y Grijalva.

La Figura 23 nos muestra las variaciones encontradas de carbono subterráneo hasta un metro de profundidad según el tipo de vegetación. Como se puede observar, la distribución no presenta un patrón definido como lo fue en el caso de carbono aéreo, en el que se pudo agrupar el almacén por estructura herbácea y arbórea. En este caso la vegetación herbácea de tular es la que presentó el mayor rango intercuartil de todas las coberturas muestreadas (234.4 – 716.6 Mg C ha⁻¹). También encontramos dentro de la vegetación arbórea, en la cobertura de manglares mixtos,

los valores más altos de carbono subterráneo con un amplio rango y variabilidad en las concentraciones (273.3 – 536.7 Mg C ha⁻¹). Seguidamente se encuentran las selvas de galería asociadas a la dinámica ribereña de la parte oeste del área de estudio (326.50 – 481.49 Mg C ha⁻¹). También, esta cobertura fue la única que presentó un valor atípico (583.87 Mg C ha⁻¹), muy relacionado a la vegetación de selvas con dominancia de Pukté (*Bucida buseras*) en planicies de inundación del río Grijalba. Las coberturas arbóreas de selva subperennifolia, mangle botoncillo y mangle negro, así como los pastizales, muestran distribuciones muy similares de carbono subterráneo (≈ 60 – 250 Mg C ha⁻¹).

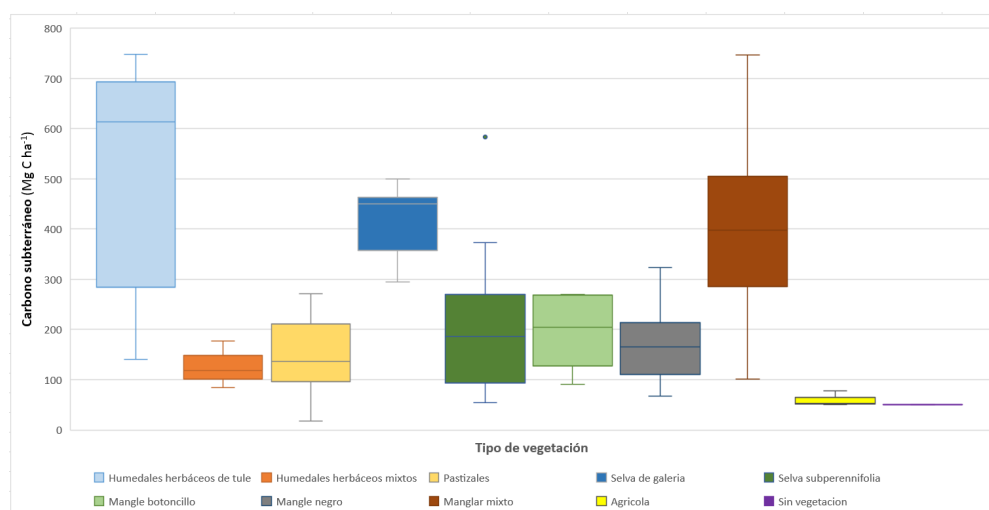


Figura 23. Distribución y variación de los valores de carbono subterráneo (Mg C ha⁻¹) según el tipo de cobertura.

Los humedales herbáceos mixtos (tulares-popales) son los que presentaron la variabilidad más baja de carbono subterráneo almacenado en coberturas naturales (84.8 – 177.2 Mg C ha⁻¹). Los almacenes con los menores contenidos de carbono subterráneo fueron encontrados en sitios donde predominaba la agricultura sobre las orillas de uno de los brazos del río Usumacinta que es el límite fronterizo entre Tabasco y Campeche. También, se realizó un muestreo en suelo desnudo, muy cercano a los límites de la carretera 186, entre los poblados de Mamantel y Nuevo Pital al sur-este del área de estudio, donde se obtuvo la concentración más baja de carbono subterráneo (50.55 Mg C ha⁻¹).

Generación del modelo: Al igual que en la generación del modelo de carbono aéreo se procedió a una selección final de variables predictivas a partir de la evaluación de la correlación de los valores observados y esperados según la combinación de variables empleadas. Finalmente se consideraron nueve variables explicativas que permitieron encontrar los mejores valores y métricas de error. En la Tabla 18 se muestra el resumen de los parámetros y variables utilizadas en el modelo, así como los valores obtenidos en las métricas de error.

Tabla 18. Parámetros, variables y métricas de error del modelo de carbono subterráneo

Categoría	Indicador	Valor
Parámetros	Total puntos de entrenamiento	62
	Variables explicativas participantes	10
	Número de árboles generados	500
	Tipo de <i>Random forest</i> : regresión	NA
Variables	Índice topográfico de posición	NA
	Alturas	NA
	Mapa de coberturas	NA
	Coefficiente de escurrentía	NA
	Densidad de drenaje	NA
	Coefficiente de compacidad	NA
	Sinuosidad de corriente principal	NA
	Mapa edafológico	NA
	Mapa geológico	NA
	Métricas de error	Número de variables (candidatas) en cada participación (<i>mtry</i>)
Error cuadrático Medio (ECM)		157.82
Porcentaje de la variación explicada		38.7
Correlación (r^2)		0.6246
Error absoluto medio (EAM)		132.02

a) Parámetros:

Se utilizaron 62 puntos de entrenamiento y se establecieron nueve variables independientes que permitieron obtener los mejores valores de desempeño del modelo *Random forest*. Se utilizaron 500 árboles de decisión para generar el modelo de regresión. El error del modelo se estabiliza aproximadamente a partir de los 60 árboles y presenta un incremento mínimo hasta llegar a los 500 árboles (Figura 24). Al igual que en el modelo generado para carbono aéreo la decisión del número de árboles construidos fue suficiente para trabajar con el error más bajo generado por este tipo de método (árboles de decisión).

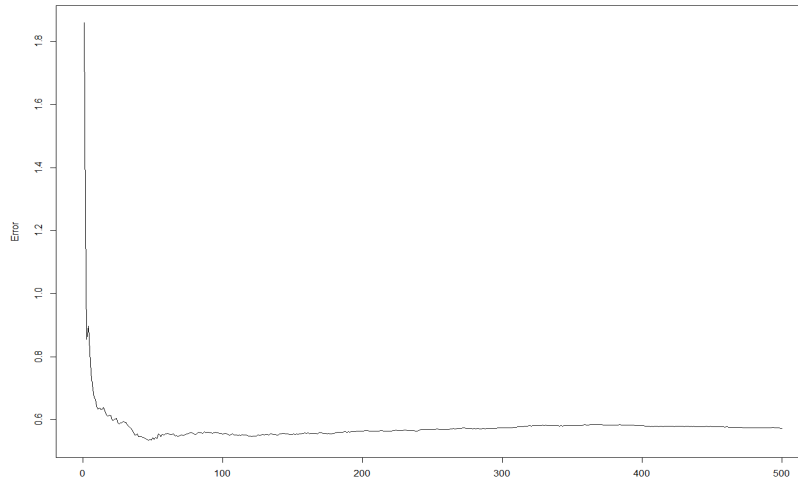


Figura 24. Error del modelo de carbono subterráneo según el número de árboles generados.

b) Variables:

De las nueve variables seleccionadas, para ser utilizadas en el modelo y que no afectaron considerablemente las métricas de error (ver Tabla 18), se encuentran las cuatro relacionadas con los parámetros morfométricos de cuenca (coeficiente de escorrentía, densidad de drenaje, coeficiente de compacidad y sinuosidad de corriente principal). Solamente una variable de terreno (índice topográfico de posición) fue contemplada en el modelo por la importancia que aportó al modelo. Y los últimas cuatro variables fueron el mapa de coberturas, el mapa de alturas, así como el de geología y de suelos.

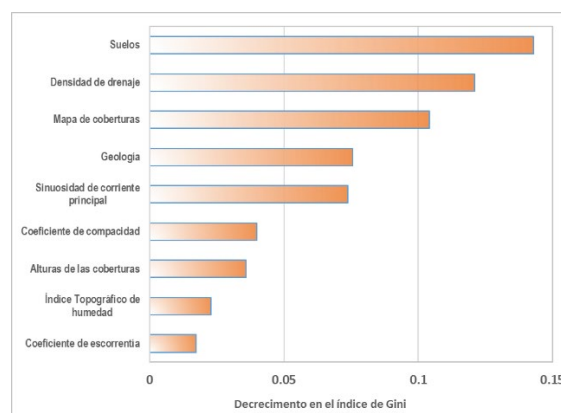


Figura 25. Importancia de las variables independientes en el modelo predictivo de carbono subterráneo

El análisis de Gini, sobre la importancia de las variables en el modelo, nos muestra (ver Figura 25) que los suelos, el tipo de cobertura, geología, así como los parámetros de cuenca son los que más aportan en la explicación del fenómeno. Sin embargo, el porcentaje de importancia de cada variable es bajo comparado con los valores encontrados para la modelación de carbono aéreo. Como se observa la altura de las coberturas de dosel presentes en el área de estudio, así como el índice topográfico de humedad y el coeficiente de esorrentía juegan un papel de menor importancia en el modelo. Aun así, estas variables apoyan en mayor medida a la explicación de los almacenes subterráneos que otras consideradas en análisis previos.

c) Métricas de error:

El resultado de las pruebas del máximo número de variables (candidatas) en la participación de cada árbol fue igual a cinco ($mtry = 5$). Comparado con el modelo de carbono aéreo indica que para la predicción de carbono subterráneo fue necesaria la participación de más variables explicativas. Esto último también se corrobora con los resultados del índice de Gini, en el que se observan valores bajos de importancia en cada variable, por lo que se necesitó un mayor número de variables para cada árbol de decisión. Los valores de ECM y EAM (157.82 y 132.02, respectivamente) muestran una variación mucho mayor que la encontrada en la parte aérea. Como se explicó anteriormente estos valores se deben al amplio rango que se puede encontrar en los almacenes de carbono subterráneo como se muestra en la Figura 23, donde se observa esta distribución por tipo de coberturas.

La correlación obtenida en el modelo de carbono subterráneo fue de $r^2 = 0.63$, lo cual, comparando con otros trabajos de modelación espacial de carbono subterráneo a nivel regional y mundial, nos muestra una correlación aceptable y por encima de la media. Stockmann *et al.* (2015) realiza una evaluación global de cambios en el carbono orgánico en los primeros 10 cm del suelo por tipo de ecosistema. Para manglares utiliza 97 observaciones a nivel mundial y no presenta estimadores de error para sus predicciones. A nivel regional, Guevara *et al.* (2018) genera cartografía digital de carbono de los primeros 30 cm de profundidad para

Latino América empleando entre otras, la técnica de *Random forest*. Se menciona que para países con grandes extensiones de territorio como México la variación en la predicción puede llegar hasta un 300%. La correlación encontrada para el país es cercana a $r^2 = 0.6$, con una explicación aproximada de 39%. Por otro lado, el estudio de Sanderman *et al.* (2018) genera un mapa global de almacenes de carbono en suelos de manglar hasta un metro de profundidad. Obtiene métricas de error para el cálculo de la densidad de carbono en el suelo y la correlación obtenida fue de $r^2 = 0.63$ mencionando que sólo la variable de tipo de suelo representaba el 63% de la variabilidad vertical y horizontal de la densidad de carbono orgánico del suelo. En este punto es importante mencionar que sería un aporte significativo para el tema de modelación, encontrar la forma de incluir una variable independiente que refleje la génesis del relieve, lo cual permitiría incrementar la correlación y la explicación de los almacenes de carbono subterráneo

Predicción de carbono subterráneo e incertidumbre: La distribución espacial de los almacenes de carbono subterráneo se muestra en la Figura 26, en la que se puede apreciar una clara concentración de valores máximos al oeste de la laguna de Términos. Aunque los valores y métricas de error obtenidas en el modelo son aceptables para este tipo de predicciones, espacialmente observamos la clara influencia de las covariables de cuenca utilizadas en el modelo ya que los valores de estos parámetros están generalizados para toda la cuenca.

Los valores de carbono subterráneo van de $85.5 \text{ Mg C ha}^{-1}$ a $666.2 \text{ Mg C ha}^{-1}$. Los valores más bajos se presentan en la parte este y sureste del área de estudio que coincide en muchas partes con las zonas de caliza y sin presencia de actividad fluvial. En estas regiones el suelo alcanza una profundidad aproximada de entre 10 y 20 cm. La porción oeste del área de estudio, en la que se encuentran suelos profundos y mayor actividad fluvial, es la que presenta los valores más altos de carbono. Comparando estos valores con el trabajo de Sanderman *et al.* (2018) según el tipo de ecosistema, encontramos coincidencias y rangos similares en manglares ($94 - 628 \text{ Mg C ha}^{-1}$), y humedales permanentes ($114 - 474 \text{ Mg C ha}^{-1}$).

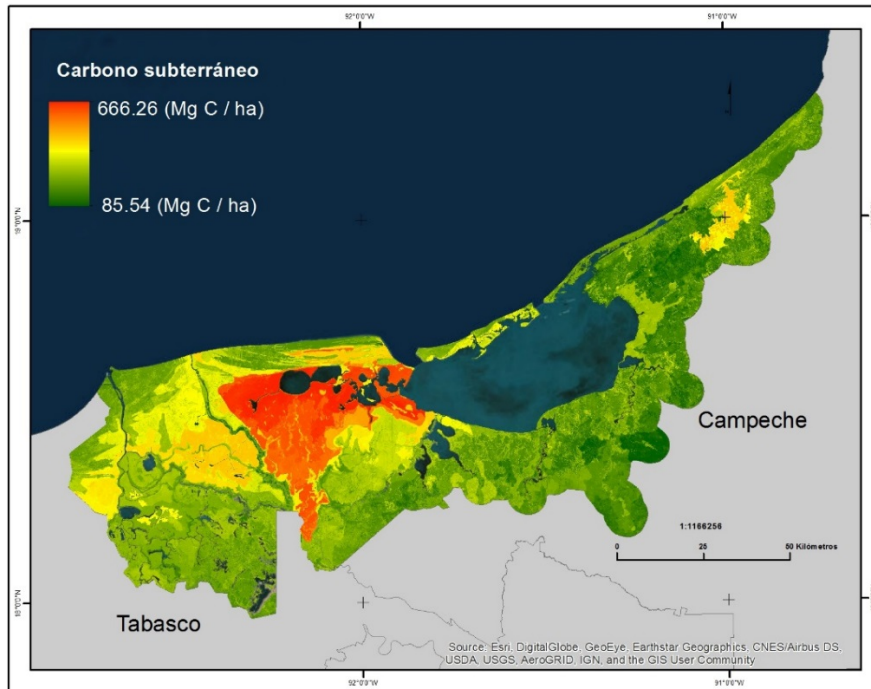


Figura 26. Predicción espacial de los almacenes de carbono subterráneo.

Con relación a la superficie del territorio agrupada por intervalos iguales de almacenes de carbono subterráneo, la Figura 27 nos muestra una distribución con una mayor frecuencia de valores que van de los 200 a 300 Mg C ha⁻¹. Este rango de frecuencias ocupa el 47% del territorio.

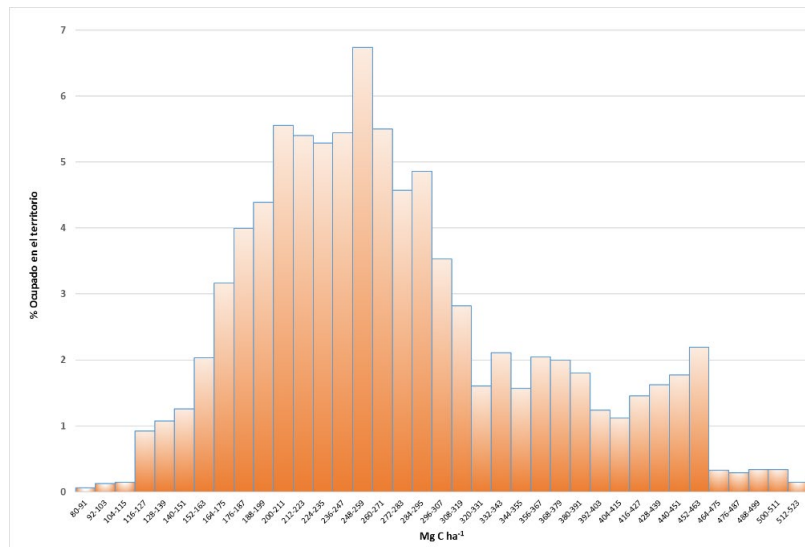


Figura 27. Histograma de frecuencias de almacenes de carbono subterráneo.

En el rango comprendido entre 300 y 460 Mg C ha⁻¹ se presenta una disminución de frecuencias en los valores, llegando a ocupar un total del 20% del territorio con

estos valores. En total la superficie ocupada por almacenes de carbono con valores mayores a 600 Mg C ha^{-1} es de 616 km^2 , es decir el 7.6% del territorio.

Con respecto a los valores obtenidos de incertidumbre espacial (3.51% - 23.96%), podemos mencionar que son mayores a los del modelo de carbono aéreo (0.29% - 6.46%), lo cual era de esperarse debido a las características de la variable que se está prediciendo y a la cantidad de puntos utilizados para entrenar y validar el mapa.

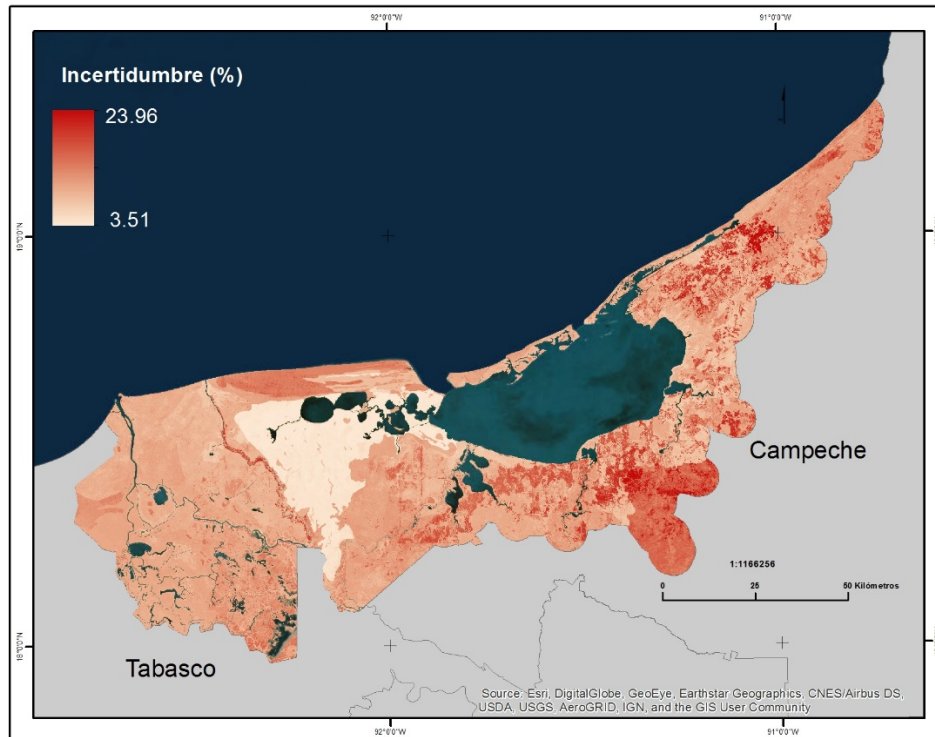


Figura 28. Incertidumbre espacial de los almacenes de carbono subterráneo.

La mayor incertidumbre (Figura 28) se encuentra dispersa al este y sureste del sitio de estudio, coincide con los valores de mayor incertidumbre del modelo de carbono aéreo en la parte oriental, en donde el suelo presenta en gran parte de esta extensión una profundidad que oscila entre 10 y 20 cm.

Las zonas con menor incertidumbre se encuentran relacionadas con los sitios que presentan grandes concentraciones de carbono orgánico en la zona oeste de Laguna de Términos. Esto puede deberse a la densidad de muestreo (ver Figura 7) y a la correspondencia de carbono encontrado con las diferentes variables explicativas empleadas en el modelo.

5.3. Almacenes de Carbono en humedales costeros

Como se mencionó en la sección 3.6, los almacenes de carbono están conformados por los componentes aéreos (biomasa aérea viva y biomasa aérea muerta) y los almacenes subterráneos (biomasa subterránea de vegetación viva y carbono orgánico en suelos). En este apartado se muestra los resultados de la integración de estos componentes en un solo producto, el cual es utilizado en el siguiente capítulo para evaluar la correlación existente entre la heterogeneidad del paisaje y la capacidad de almacenamiento de carbono de estos humedales costeros.

Es importante mencionar que la preselección y la selección final de variables empleadas en la generación de los modelos (aéreo y subterráneo) es una etapa muy importante ya que de cierto modo se elimina la correlación existente entre las variables independientes. Se ha demostrado (Toloşi & Lengauer, 2011) que en este tipo de regresiones (e.g. *Random forest*, *support vector machine*) cuando las variables independientes se encuentran correlacionadas, puede llegar a afectar la modelación, ya que pequeños cambios en los datos provocan grandes cambios en las importancias que cada variable presenta. Al realizar la selección de estas a partir del desempeño con una selección vía correlación cruzada (ver secciones 3.6.3.1 y 3.6.3.2) se redujo esta fuente de sesgo en la modelación.

Al conjuntar ambos almacenes observó que el mayor aporte de carbono siempre lo realiza la parte subterránea (ver Figura 29). En México, aunque hay muchos trabajos realizados para determinar almacenes de carbono en manglares (Herrera-Silveira, *et al.*, 2017) y en humedales costeros de agua dulce (Campos *et al.*, 2011; Salazar-Landero, 2013; Marín-Muñiz, *et al.*, 2014; Adame *et al.*, 2015), la representación y predicción espacial a partir de modelos estadísticos es muy escasa. Como se mencionó, generalmente existen predicciones espaciales a escala regional o mundial y éstas abarcan un solo tipo de almacén (aéreo o subterráneo) y un solo tipo de vegetación (Saatchi *et al.*, 2011; Rodríguez-Veiga *et al.*, 2016; Guevara *et al.*, 2018; Sanderman *et al.*, 2018).

De acuerdo a los trabajos citados anteriormente el valor promedio para almacenes de carbono para las regiones de Península de Yucatán y Golfo de México, en zonas de manglar es de $458.6 \text{ Mg C ha}^{-1}$, con un rango que va de 25 a $2,039 \text{ Mg C ha}^{-1}$. Con relación a humedales arbóreos de agua dulce (selvas inundables) los valores más altos encontrados para Veracruz (sitio más cercano geográficamente) fueron de 390 Mg C ha^{-1} . En el caso de humedales herbáceos los valores se encuentran alrededor de 360 Mg C ha^{-1} (Hernandez, *et al.*, 2015).

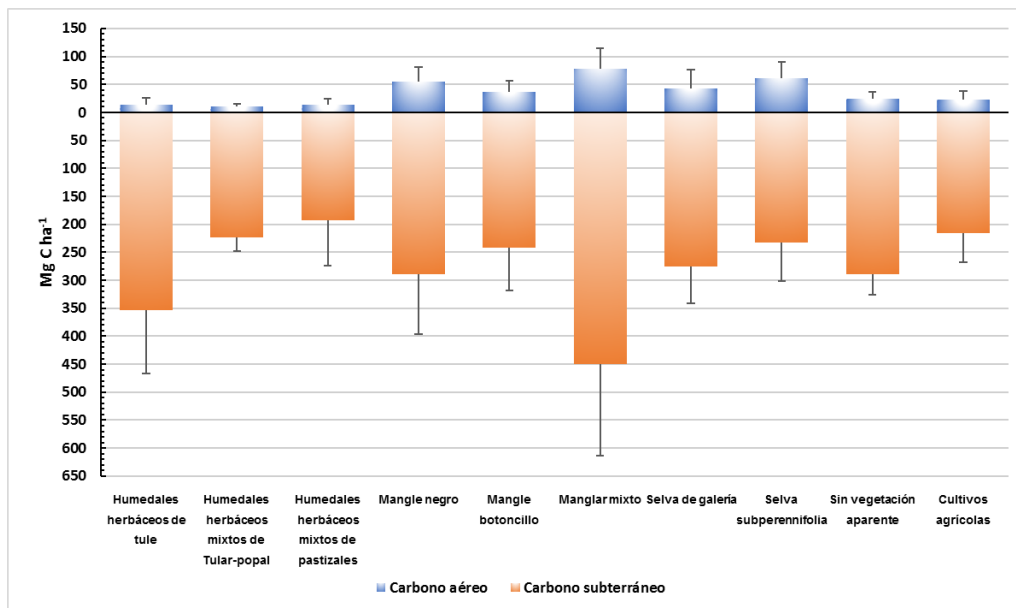


Figura 29. Almacenes de carbono promedio \pm desviación estándar por cobertura.

Los almacenes de carbono encontrados en este estudio, presentan valores promedio similares a los reportados para la región (Figura 29). Los manglares mixtos obtuvieron un valor por encima de la media nacional con 527 Mg C ha^{-1} . La selva de galería, que podrían compararse con los humedales arbóreos de agua dulce de Veracruz, presentaron valores promedios de hasta de 402 Mg C ha^{-1} . Y para humedales herbáceos los valores promedios encontrados fueron de 367 Mg C ha^{-1} con una variación máxima de $\pm 116 \text{ Mg C ha}^{-1}$.

En humedales costeros, generalmente la mayor parte de carbono almacenado (aproximadamente 87%) se reporta en la porción subterránea (Herrera-Silveira *et al.*, 2016). Los resultados de este estudio muestran que la mayor parte de las coberturas arbóreas presentan ese porcentaje de almacén subterráneo con

excepción de las selvas sub-perennifolias que llegan a un promedio de tan solo 79%. Por otro lado, se encontró que los humedales herbáceos (tule, mixtos de tular-popal y pastizales) presentan más de 94% de sus almacenes en la parte subterránea.

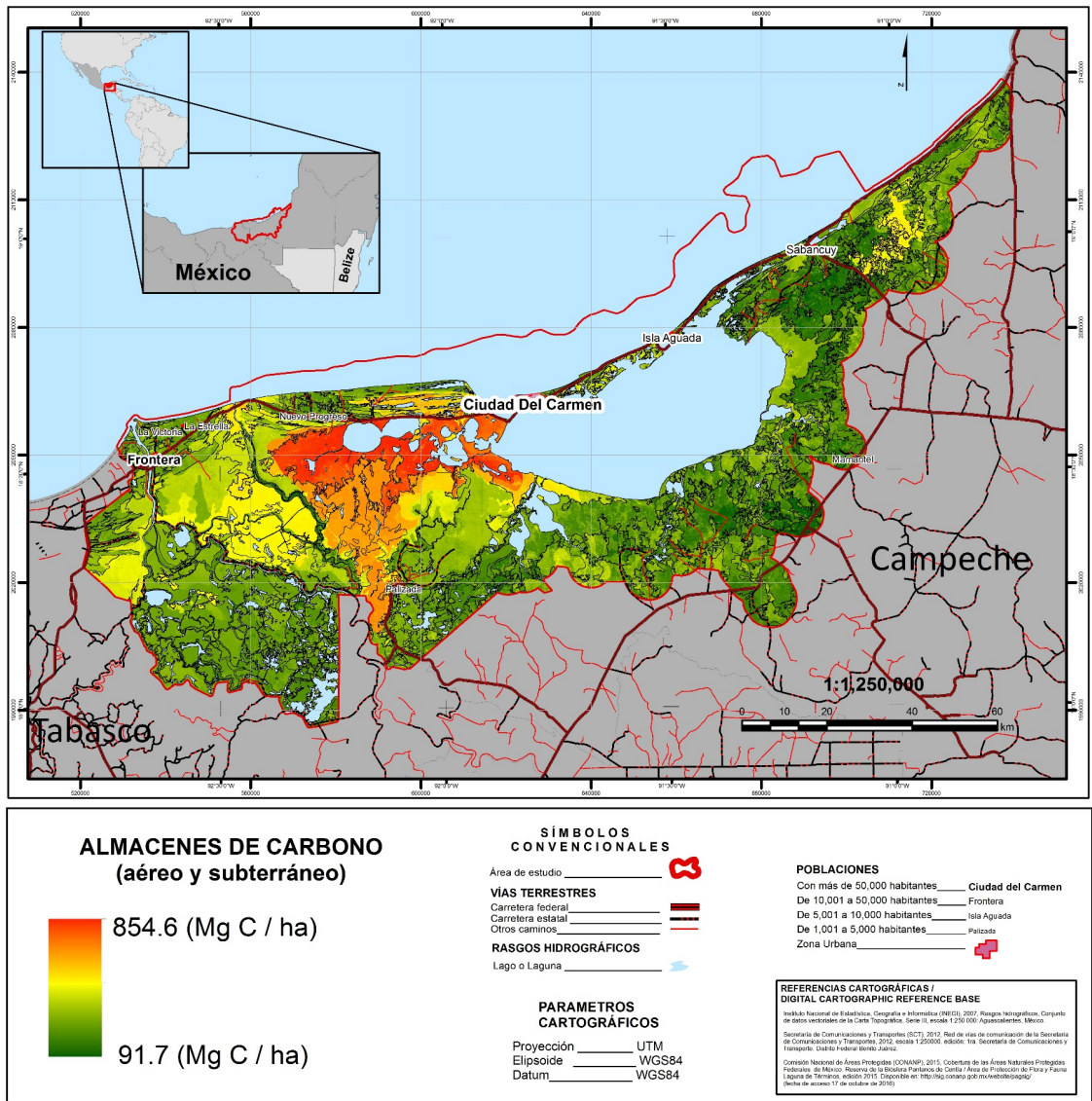


Figura 30. Mapa de distribución espacial de los almacenes de carbono.

Espacialmente, la distribución de los almacenes de carbono, presentan un patrón muy similar al modelo de carbono subterráneo. Los valores más altos se encuentran en la región oeste de Laguna de términos (ver tonos rojos en la Figura 30). Destacan valores medios (tonos amarillos) en la parte noreste y extremo oeste del área de estudio.

En algunos sectores los patrones homogéneos de los almacenes siguen los contornos de las coberturas arbóreas o herbáceas presentes, como es el caso de la parte oriental adjunta al cuerpo de agua de Laguna de Términos.

Con relación a los valores observados de los almacenes de carbono y su ocupación en el territorio (Figura 31) encontramos que los almacenes que contienen entre 238 y 311 Mg C ha^{-1} , se encuentran en más del 34% del área estudiada.

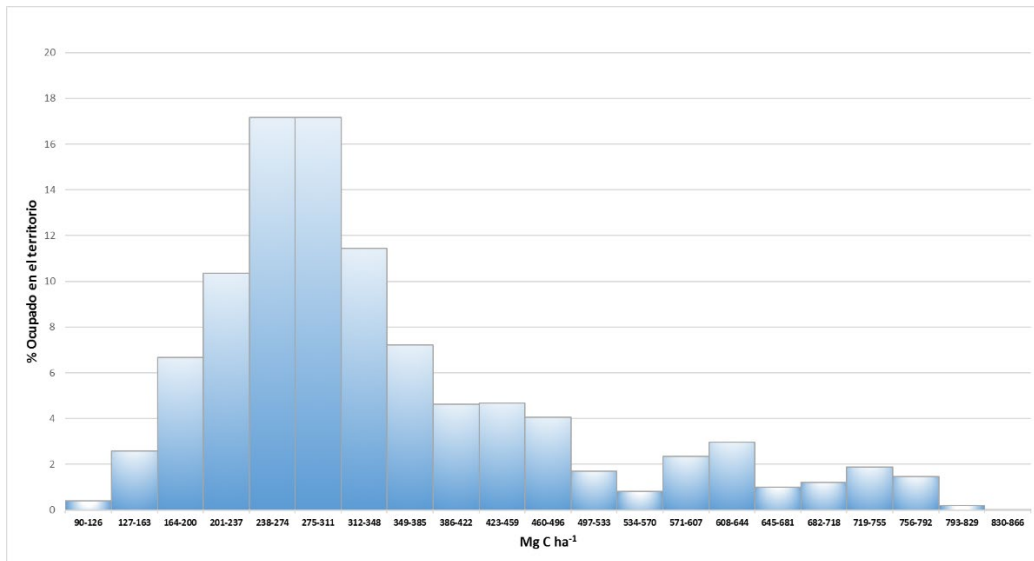


Figura 31. Histograma de frecuencias de almacenes de carbono.

Realizando un análisis de la porción de territorio que comprende valores mayores a la media reportada para la región ($458.6 \text{ Mg C ha}^{-1}$) encontramos que más del 17% se encuentra por encima de este valor, lo cual corresponde a $1,500 \text{ km}^2$ de superficie en el territorio.

Finalmente podemos mencionar que los almacenes de carbono almacenado en humedales costeros del área de estudio a un metro de profundidad suman un total de $375.9 \text{ Tg C ha}^{-1}$.

5.4. Síntesis del Capítulo 5

- ✓ Los valores obtenidos de carbono aéreo y subterráneo por tipo de vegetación se encuentran dentro de los rangos nacionales o ligeramente por encima de estos como es el caso de los manglares mixtos en los que encontramos 527 Mg C ha⁻¹ como promedio en el área de estudio.
- ✓ Las mayores valores y variaciones de almacenes de carbono aéreo y subterráneo se encontraron en vegetación de manglar mixto. Sin embargo, en humedales herbáceos de tule se obtuvieron valores muy similares de carbono subterráneo que a los de manglar mixto.
- ✓ La mayor parte del carbono almacenado se reporta en la porción subterránea con porcentajes que varían desde 79% en selvas subperennifolias, hasta un 94% en humedales herbáceos.
- ✓ Tanto los datos de campo como las predicciones de almacenes de carbono muestran que los valores de carbono orgánico varían independientemente al tipo cobertura vegetal.
- ✓ La incertidumbre espacial de la predicción de los almacenes de carbono es mayor en la parte subterránea que en la aérea. En este caso, la modelación subterránea se podría mejorar con la inclusión de covariables relacionadas a la génesis del relieve.

6. RELACIÓN PAISAJES–ALMACENES DE CARBONO

A continuación, se presentan los resultados obtenidos de los pasos realizados para el análisis de correlación que permitió conocer el grado de asociación entre la heterogeneidad de los paisajes y los almacenes de carbono de los humedales costeros estudiados.

6.1. Pruebas de normalidad y correlación

La Tabla 19 muestra de manera resumida los valores encontrados en este estudio de la heterogeneidad geoecológica (capítulo 4) y de los almacenes de carbono (capítulo 5) por unidad intermedia de paisaje (*Parajes complejos*).

Tabla 19. Indicadores de heterogeneidad y reservas de carbono por unidad de paisaje.

PC	Heterogeneidad Geoecológica										Carbono (Tg ha ⁻¹)
	CC	CT	R	U	H'	D	S	H _{max}	IDP	K	T
I.1	0.12	24.50	0.80	91.09	0.63	0.58	0.24	2.08	0.96	0.01	56.156
I.2	0.12	13.67	0.60	10.44	0.38	0.98	0.10	1.79	0.74	0.01	21.496
II.1	0.05	20.86	0.70	64.54	0.59	0.61	0.18	1.95	0.38	0.01	130.119
II.2	0.06	14.80	0.50	33.24	0.73	0.62	0.09	1.61	0.31	0.01	74.137
II.3	0.10	10.25	0.40	3.61	0.34	1.08	0.05	1.39	0.41	0.02	12.942
III.1	0.11	11.25	0.40	17.00	0.37	0.73	0.05	1.39	0.44	0.02	11.310
IV.1	0.10	8.33	0.30	12.65	0.65	0.62	0.03	1.10	0.31	0.04	6.958
IV.2	0.15	3.40	0.50	1.00	0.17	1.24	0.02	1.61	0.73	0.06	4.162
V.1	0.11	11.70	1.00	3.16	0.13	1.07	0.14	2.30	1.14	0.01	35.182
VI.1	0.10	13.00	0.40	11.70	0.53	0.90	0.06	1.39	0.41	0.02	18.730
VI.2	0.26	6.00	0.50	8.00	0.35	0.90	0.04	1.61	1.29	0.03	4.717

Nota. PC: *Paraje Complejo*; CC: Complejidad Corológica, CT: Complejidad Tipológica, R: Riqueza de Paisajes, U: Diversidad de McIntosh, H': Diversidad de Shannon-Weaner, D: Dominancia de McIntosh, S: Singularidad de los Paisajes, H_{max}: Diversidad máxima de Turner, IDP: Índice de Diversidad Paisajística, K: Fraccionamiento Paisajístico, T: Carbono Total.

A estos valores de heterogeneidad y carbono total se les aplicó la prueba estadística de Shapiro-Wilk que se usa para verificar la normalidad del conjunto de datos, la cual es uno de los supuestos necesarios para realizar la prueba paramétrica de la correlación de Pearson.

La prueba de Shapiro-Wilk (Tabla 20) nos indica que de los diez índices de heterogeneidad utilizados, tres no cumplieron con una distribución normal

(Complejidad Corológica, Diversidad de McIntosh y Fraccionamiento paisajístico) al igual que los datos de Carbono Total, los cuales fueron transformados a logaritmo natural. A pesar de realizar la transformación de estos indicadores para obtener una distribución normal, no se pudo lograr la normalidad de los datos para el índice de Fraccionamiento Paisajístico, por lo que quedó descartado para la prueba de correlación de Pearson.

Tabla 20. Prueba de Shapiro-Wilk para conocer normalidad de los datos.

<i>Indicador</i>	<i>W (Test de Shapiro-Wilk)</i>	<i>p (Significancia)</i>	<i>Distribución Normal</i>	
			<i>Si</i>	<i>No</i>
CC	0.79947	0.00926		X
CT	0.95567	0.71675	X	
R	0.90279	0.19990	X	
U	0.74427	0.00175		X
H'	0.94134	0.53632	X	
D	0.90669	0.22275	X	
S	0.87438	0.08823	X	
H _{max}	0.95908	0.76015	X	
IDP	0.87672	0.09450	X	
K	0.77581	0.00452		X
T	0.77879	0.00495		X
Ln CC	0.91134	0.25293	X	
Ln U	0.97497	0.93181	X	
Ln K	0.84127	0.03281		X
Ln T	0.96379	0.81793	X	

Nota. CC: Complejidad Corológica, CT: Complejidad Tipológica, R: Riqueza de Paisajes, U: Diversidad de McIntosh, H': Diversidad de Shannon-Weaner, D: Dominancia de McIntosh, S: Singularidad de los Paisajes, H_{max}: Diversidad máxima de Turner, IDP: Índice de Diversidad Paisajística, K: Fraccionamiento Paisajístico, T: Carbono Total, Ln CC, Ln U, Ln K: Índices transformados a logaritmo natural, Ln T: valores de almacenes de carbono transformados a logaritmo natural.

Posteriormente al aplicar la correlación de Pearson (r) entre la variable dependiente (Carbono Total) y cada una de las variables independientes (indicadores de heterogeneidad geocológica) que presentaban una distribución normal, se encontró (ver Tabla 21) que la mayor parte de los índices presentaron correlaciones estadísticamente significativas, con excepción de la Diversidad de Shannon-Weaner, Dominancia de McIntosh y la Diversidad Máxima de Turner. Es importante indicar que en esta matriz de correlación se incluyó la variable de Complejidad Tipológica (CT) con una transformación logarítmica. Aunque esta variable ya presentaba una distribución normal, al realizar una correlación de Pearson previa se observó que la máxima relación la presentaba la CT con los valores

transformados de Carbono total. Por lo tanto, se decidió transformar la CT a su logaritmo natural ($W = 0.94914$, $p = 0.63304$) y buscar que las variables ingresadas en la regresión presentaran similar escala de valores.

Finalmente, el indicador de heterogeneidad geocológica seleccionado para continuar con los análisis estadísticos fue el logaritmo natural de CT ($r = 0.88$).

Tabla 21. Matriz de correlación entre heterogeneidad geocológica y reservas de carbono
Los valores marcados (**negritas e inclinadas**) son significativos a $p < 0.05$

Almacenes de Carbono acumulado (Ln T)	Indicadores de Heterogeneidad Geocológica											
	CC	CT	R	U	H'	D	S	H _{max}	IDP	Ln CC	Ln U	Ln CT*
	-0.69	0.88	0.56	0.70	0.49	-0.53	0.81	0.58	0.21	-0.77	0.70	0.88

Nota. CC: Complejidad Corológica, CT: Complejidad Tipológica, R: Riqueza de Paisajes, U: Diversidad de McIntosh, H': Diversidad de Shannon-Weaner, D: Dominancia de McIntosh, S: Singularidad de los Paisajes, H_{max}: Diversidad máxima de Turner, IDP: Índice de Diversidad Paisajística, K: Fraccionamiento Paisajístico, T: Carbono Total, Ln CC, Ln U, Ln K, Ln CT: Índices transformados a logaritmo natural, Ln T: valores de almacenes de carbono transformados a logaritmo natural.

Recordemos que la CT expresa la diversidad de grupos tipológicos en la región, y en nuestro sitio de estudio más del 74% presenta una alta y muy alta complejidad tipológica.

6.2. Análisis de regresión entre almacenes de Carbono y Complejidad Tipológica

Mediante el análisis de regresión se obtuvo el modelo que más se ajustó a los valores observados de Carbono Total el cual fue una función exponencial cuyos valores y representación gráfica se observan en la Figura 32 mostrando una significancia estadística ($p=0.0004$), con un coeficiente de determinación (r^2) igual a 0.85 y su valor ajustado de $r^2 = 0.83$.

Este tipo de ajuste de regresión exponencial para correlacionar valores de heterogeneidad de los paisajes y algún atributo natural ya fue obtenido con alta significancia estadística en los humedales costeros del archipiélago de Camagüey-Cuba (Priego-Santander 2004), por lo que el presente trabajo refuerza este tipo de correlaciones en zonas costeras.

En la Figura 32 se observa que las unidades de paisaje que corresponden por un lado a complejos de planicies fluviales acumulativas formadas por depósitos aluviales (I.1), a complejos de planicies fluvio-biógenas acumulativas formadas por depósitos aluviales y biógenos (II.1 y II.2) y, a complejos de planicies marino-terrágenas acumulativas, formadas por depósitos marino-terrágenos en clima cálido húmedo (V.1), son las unidades que se encuentran más alejadas de la ecuación exponencial estimada.

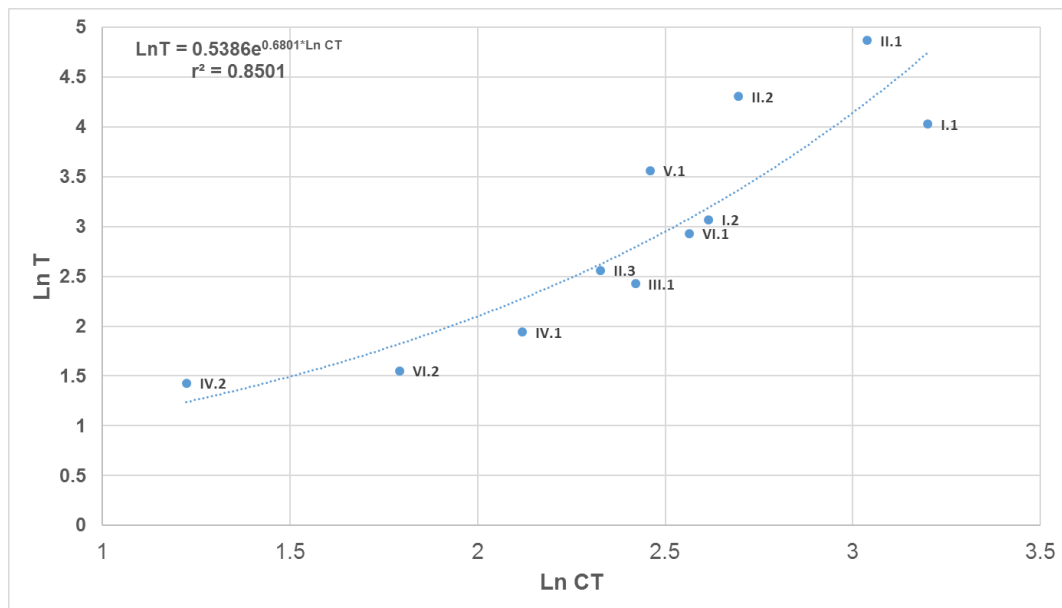


Figura 32. Modelo de regresión exponencial.
Ln de Carbono Total (LnT) y Ln de Complejidad Tipológica (Ln CT)

En el primer caso (unidad I.1) y comparando con el *Paraje complejo* I.2 que se encuentra dentro del mismo nivel taxonómico de *Localidad*, podemos ver que este último se encuentra muy cercano a la curva que define la función exponencial. Observando las características que definen y diferencian estos dos *Parajes complejos* (I.1 y I.2) observamos que la periodicidad de inundación puede estar definiendo el error de ajuste de la unidad I.1 con relación a la curva logarítmica.

En el primer caso (I.1) la periodicidad para todas las unidades inferiores (*Parajes simples*) es de inundación permanente (es decir de 10 a 12 meses con suelos saturados de agua) en la mayoría de sus coberturas naturales a excepción de las selvas subperennifolias y actividades agrícolas. Por otro lado, en las unidades I.2 la periodicidad de inundación es estacional (de seis a ocho meses al año) en sus

coberturas naturales e inundación temporal (de cuatro a seis meses) en coberturas de selva y lugares donde se practica la actividad agrícola-pecuaria.

Los *Parajes complejos* II.1 y II.2 comprenden superficies permanentemente inundadas y superficies estacionalmente inundadas respectivamente. Con relación a la otra unidad que se encuentra en la misma *Localidad* (II.3), esta última presenta un tipo de inundación temporal y el mismo tipo de coberturas naturales que los complejos del mismo nivel taxonómico (II.1 y II.2).

Para el *Paraje complejo* V.1, que se constituye como la única unidad intermedia dentro de la *Localidad* (V), por lo tanto, con una composición físico-geográfica particular, formada por depósitos marino-terrágenos, está estableciendo un comportamiento diferente al propuesto en la ecuación de la función exponencial. Esto podría deberse, a que la variación entre la relación de depósitos marino/terrestres, la cual podría definir la cantidad de almacenes de carbono en la unidad, estén afectando su cercanía a la línea modelada. En este caso las periodicidades de inundación, parecen no ser un factor que esté afectando su ajuste a la curva exponencial como lo observado para las unidades I.1, II.1 y II.2.

Finalmente, se observa en la Figura 32 que el ajuste no es muy bueno con los valores extremos tanto de la variable independiente (Complejidad Tipológica) como con la variable dependiente (Carbono Total), que coinciden con las unidades de paisaje mencionadas con anterioridad. Revisando la Tabla 15, de la sección 4.3 se muestra que la CT en estas cuatro unidades se clasifica dentro de las categorías *muy alta* y *alta*, ya que presentan muchos polígonos dentro del *Paraje complejo* pero con baja diferenciación tipológica. En este caso, la gran cantidad de polígonos se reflejaría en un paisaje en mosaicos y fragmentos lo que parece influir en el ajuste del modelo.

6.3. Pronósticos de almacenes de carbono en unidades de paisaje

Aplicando la fórmula de ajuste exponencial encontrada en la sección 6.2 a los valores observados en cada unidad de paisaje (*Parajes complejos*) se obtuvieron los valores esperados que se presentan en la Tabla 22. Es notoria la sobreestimación

y la subestimación realizada por el modelo en las unidades más alejadas a la línea de la regresión exponencial.

Haciendo un análisis global, y comparando los totales de carbono observado y esperado en el área de estudio se tiene que la predicción llegó al 87% de lo observado. Es decir que hay una subestimación a nivel global. Sin embargo, lo importante es el análisis y diagnóstico individual que se pueda realizar de los tipos de paisajes encontrados y posibles causas de las predicciones no óptimas.

Tabla 22. Valores observados y esperado de Almacenes de carbono por unidades de paisaje.

PC	Variable Dependiente: Carbono Total Almacenado (Tg)			
	Valores observados	Valores esperados según CT	Residual	% Pronosticado
I.1	56.16	114.76	58.60	204.36
I.2	21.50	24.27	2.78	112.92
II.1	130.12	70.20	-59.92	53.95
II.2	74.14	28.97	-45.16	39.08
II.3	12.94	13.77	0.82	106.36
III.1	11.31	16.34	5.03	144.46
IV.1	6.96	9.75	2.79	140.11
IV.2	4.16	3.45	-0.71	82.86
V.1	35.18	17.62	-17.56	50.08
VI.1	18.73	21.81	3.08	116.42
VI.2	4.72	6.18	1.47	131.07

La unidad más alejada en el pronóstico fue la de complejos de planicies fluviales acumulativas (I.1) con una sobreestimación de más del 200%. Sabiendo que la imagen de esta unidad se encuentra conformada por un alto número de polígonos y con un bajo número de clases tipológicas, se realizó una comparación visual/espacial con las otras unidades de mayores subestimaciones (II.1 y II.2) que presentan las mismas características de complejidad tipológica, es decir niveles altos o muy altos de complejidad tipológica. La Figura 33 muestra dos porciones del territorio con las unidades de paisaje A = I.1 y B= II.2.

En la imagen “A” se observa que la densa red hídrica de esta unidad compuesta de canales, arroyos, ríos, es la que está determinando la fragmentación y por lo tanto la gran cantidad de polígonos en esta unidad de paisaje (I.1). La imagen “B” que representa a la unidad de paisaje II.2, así como la unidad II.1 no presentan una red

hídrica densa, aunque se encuentren en superficies con inundación permanente. Un punto importante a considerar es que la red hídrica se obtuvo a partir de la actualización y digitalización visual de todos los cuerpos de agua, canales, arroyos y ríos presentes para la fecha de interpretación de la cobertura vegetal (2015), por lo que la densidad presentada fue mucho mayor a la encontrada en los mapas base utilizados para la generación del mapa de paisajes. En este caso particular podría ser que la actividad humana (canales) influye en los valores del índice de heterogeneidad.

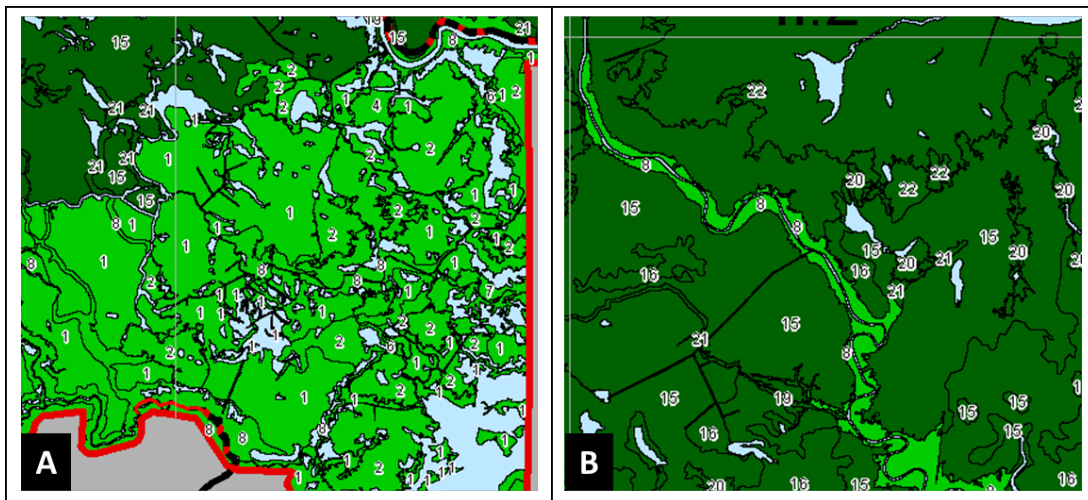


Figura 33. Visualización de porciones de las unidades de paisaje I.1 y II.2.

Con las otras unidades que presentan pronósticos con subestimaciones alrededor de 50% o menos y coincidentemente presentan las mayores concentraciones de carbono (II.1, II.2, V.1), pareciera que se encuentran en un grupo separado a la de otras unidades, pudiendo conformar una segunda ecuación de ajuste, donde el comportamiento sería muy apegado a la función a establecer.

Los demás valores obtenidos en las diferentes unidades de paisaje se encuentran en un rango de valores aceptables para el establecimiento de una primera aproximación, valoración, comprensión y priorización de acciones de manejo, conservación y estudios de los almacenes de carbono en humedales costeros.

También se realizó la exploración del comportamiento del pronóstico de los almacenes de carbono con la actividad humana, a partir de los resultados obtenidos

en la sección 4.4 del IACV. A este análisis se agregaron otros parámetros de carácter cuantitativo obtenidos de la Tabla 13 (sección 4.2) de cada unidad intermedia de paisaje (*Parajes complejos*) que nos permitió observarlos como objetos gráficos (ver Figura 34).

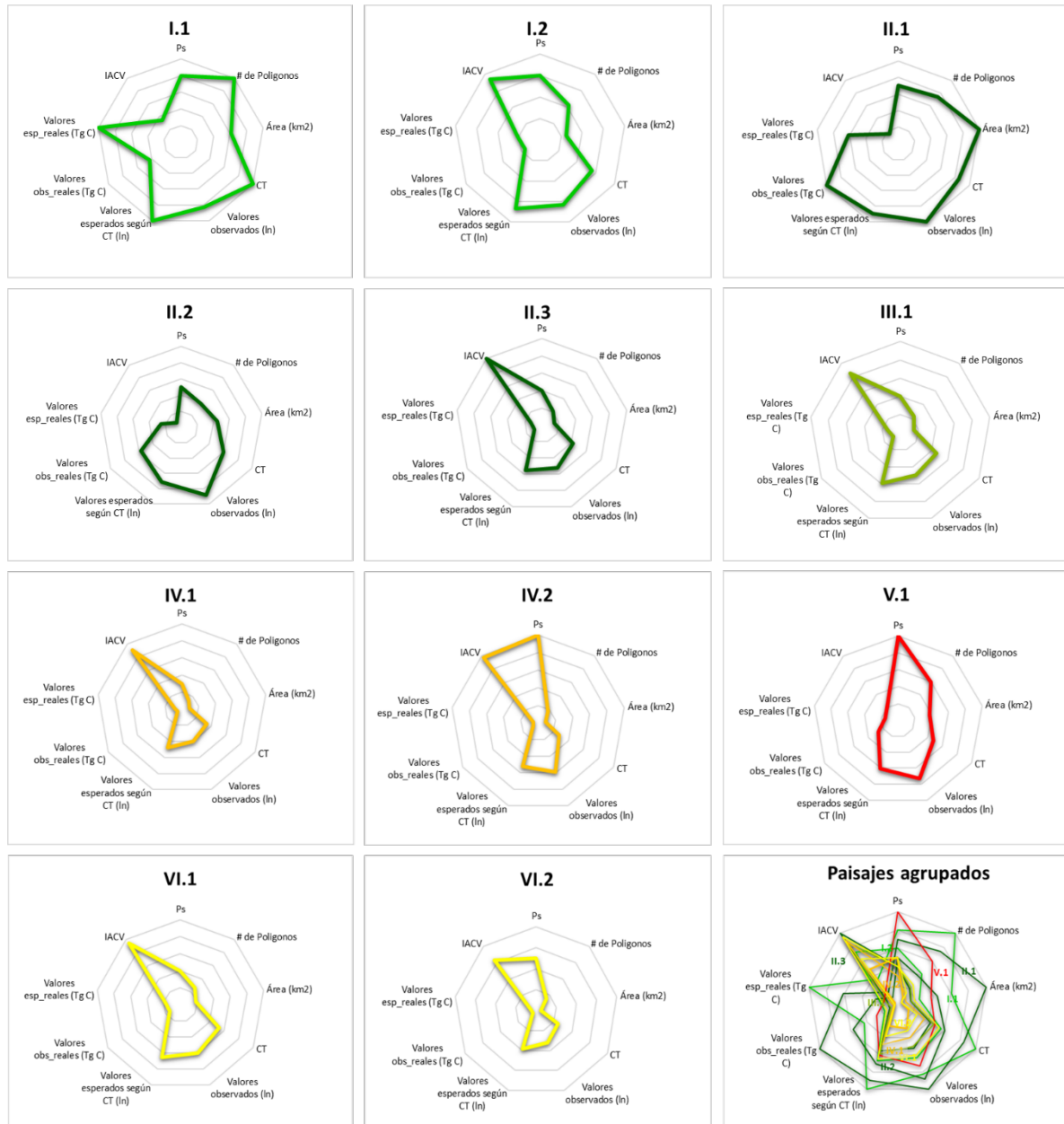


Figura 34. Gráfico de íconos de las unidades de paisaje vs atributos individuales.

Nota: I.1, I.2, II.1, II.2, II.3, IV.1, IV.2, V.1, VI.1, VI.2: Unidades intermedias de paisaje (*Parajes complejos*), IACV: Índice de antropización de la cobertura vegetal, Ps: Número de *Parajes simples*, CT: Complejidad Tipológica.

En el caso específico del IACV, se esperaría tener una relación entre las unidades de paisaje que presentaron los pronósticos más bajos de carbono con un elevado índice de antropización. Sin embargo, estas unidades presentan los valores del IACV más bajo, y no se llega a obtener una clara correlación estadística entre estos dos valores. Esta situación puede deberse al hecho de que se trata de unidades de paisaje de naturaleza acumulativa-biógena, con historial de decenas de miles de años de acumulación de grandes cantidades de materia orgánica que no se ven afectados por la transformación actual de la cobertura vegetal superficial. Como se observa en la Figura 29 la mayor concentración de carbono (del 79% al 94%) se encuentra en la parte subterránea. Por lo tanto, el IACV solo permitiría inferir pérdidas en el carbono aéreo y una pequeña porción de la parte subterránea.

Con relación a los parámetros incluidos en este análisis (Gráfico de íconos), para obtener una dimensión característica de cada paisaje, se seleccionaron aquellos relacionados y que caracterizan cada unidad (número de *Parajes simples*, número de polígonos, área ocupada en el territorio, índice de complejidad tipológica, y los valores observados y esperados de los almacenes de carbono). Es interesante observar, que las unidades I.2, II.1 y II.2, con menor ajuste en el modelo de regresión exponencial, presentan las dimensiones más amplias y formas que más difieren con el resto de las unidades de paisaje (ver recuadro inferior derecho de la Figura 34).

Por otro lado, se observa que hay muchas unidades que, aunque pertenecen a un nivel taxonómico diferente (*Localidades*) presentan una configuración similar de forma y tamaño. Esto puede reforzar la idea de que las unidades de paisaje identificadas a partir de una diferenciación taxonómica sólida, escala geográfica determinada y basada en la descripción de las propiedades y atributos fundamentales de estos sistemas territoriales naturales nos permite comprender y explicar en gran medida fenómenos que pueden estar ocurriendo en el territorio.

6.4. Correspondencia espacial entre *Carbono total y Complejidad Tipológica*

La correspondencia espacial se obtuvo a partir de la clasificación, en cinco categorías por el método de rompimiento natural de Jenks, de los valores observados y los valores esperados por cada unidad de paisaje (*Paraje complejo*). Se trabajó con los valores directos de la regresión, es decir el logaritmo natural del almacén de carbono observado y esperado, así como con los valores ya transformados a unidades reales (Tera gramos de carbono: Tg C). En la Tabla 23 se presentan los rangos de los valores agrupados, así como en la Tabla 24 la clasificación categórica de los paisajes con relación a los valores observados y esperados.

Tabla 23. Clasificación cuantitativa de los almacenes de carbono observados y esperados.

Almacén Total de Carbono	Valores Observados (Tg C)	Valores Esperados según CT (Tg C)	Valores Observados en unidades de Ln	Valores esperados en unidades de Ln
<i>Muy Bajo</i>	≤ 12.94	≤ 7.24	≤ 4.305916	≤ 4.095600
<i>Bajo</i>	12.50 – 21.50	7.24 – 19.90	3.56535 – 4.305915	2.990448 – 4.095599
<i>Medio</i>	21.50 – 35.18	19.90 – 36.39	2.560479 – 3.56534	2.592172 – 2.990447
<i>Alto</i>	35.18 – 74.14	36.39 – 60.08	1.551174 - 2.560478	1.233838 – 2.592171
<i>Muy Alto</i>	≥ 74.14	≥ 60.08	≥ 1.551173	≥ 1.233837

Se observa que la mayoría de los rangos de valores esperados no coinciden con los rangos de las categorías de valores observados. El rango de categoría *Medio* es el que mayor coincidencia presenta entre valores observados (21.5 a 35.2 Tg C) y los valores esperados (19.9 a 36.4 Tg C). Es decir que la categorización cuantitativa, aunque nos da un estimado numérico predictivo de los almacenes de carbono, no llega a reflejar de una manera precisa los valores reales observados en el área de estudio.

Tabla 24. Clasificación cualitativa del Carbono total almacenado de valores observados y esperados según la Complejidad Tipológica.

	Unidades de Paisajes										
	I.1	I.2	II.1	II.2	II.3	III.1	IV.1	IV.2	V.I	VI.1	VI.2
<i>C_obs</i>	A	B	MA	A	MB	MB	MB	MB	M	B	MB
<i>C_esp</i>	MA	M	A	M	B	B	MB	MB	B	M	MB
<i>Ln C_obs</i>	A	M	MA	A	B	B	B	MB	M	M	MB
<i>Ln C_esp</i>	A	M	MA	A	B	B	B	B	A	B	MB

Nota1: Letras en **negritas** presentan la coincidencia de categoría entre valores esperados y observados.

Nota2: *C_obs*: Carbono observado, *C_esp*: Carbono esperado según la Complejidad Tipológica, *Ln C_obs*: Carbono observado con valores de logaritmo natural, *Ln C_esp*: Carbono esperado con valores de logaritmo natural según la Complejidad Tipológica, MB: Muy Bajo, B: Bajo, M: Medio, A: Alto, MA: Muy Alto.

Sin embargo, al realizar el análisis cualitativo de tipos de almacenes de carbono según su cantidad (*Muy alto*, *Alto*, *Medio*, *Bajo* y *Muy bajo*) vemos que la clasificación realizada con los valores de logaritmo natural, reflejan de mejor manera la semejanza entre valores observados y esperados por unidad de paisaje (ver Tabla 24). Se obtiene la misma categorización en ocho de las 11 unidades. En las tres unidades restantes la variación de la predicción solo fue de una categoría ya sea superior o inferior según lo observado.

En la Figura 35 se puede observar la correspondencia espacial obtenida a partir de los valores reales de los almacenes de carbono observados (A) y esperados (B) expresados en Tg. Por otro lado, como se mencionó, el logaritmo natural de los valores de carbono observados y esperados que se muestran en los recuadros C y D respectivamente de la Figura 35 muestran una mejor correspondencia a la mostrada entre A y B.

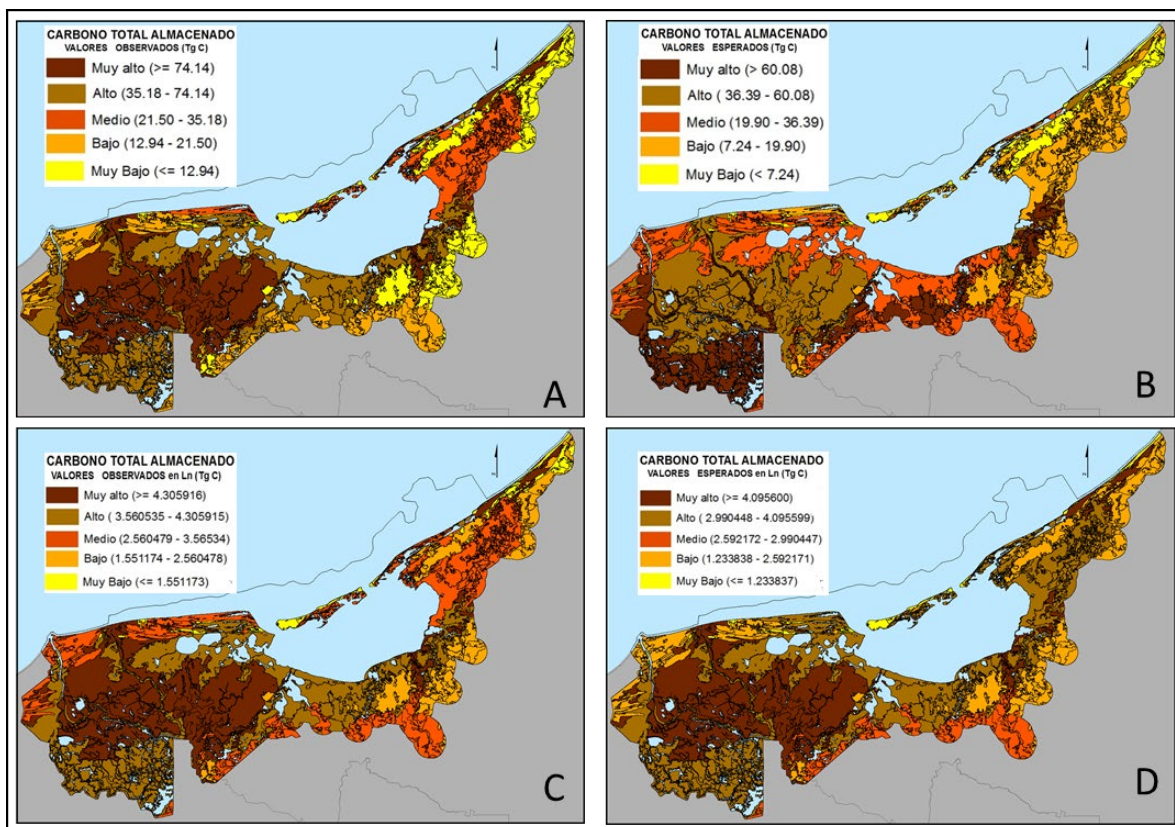


Figura 35. Cartogramas comparativos de Almacenes de Carbono. A) Carbono **observado** con valores en Tg; B) Carbono **esperado** con valores en Tg; C) Carbono **observado** con valores de logaritmo natural y D) Carbono **esperado** con valores de logaritmo natural.

Finalmente, se decidió incluir estos dos mapas de predicción de almacenes de carbono (recuadros B y D de la Figura 35) debido a que ambos aportan el mejor conocimiento cuantitativo y cualitativo respectivamente de la correlación entre la heterogeneidad de los paisajes y el almacenamiento de carbono. Esto puede ser importante y útil al momento de hacer cuantificaciones (mapa del recuadro B) o tomar decisiones de manejo y protección en ciertas zonas del territorio (mapa del recuadro D).

Los cuatro mapas completos de los almacenes de carbono observados y esperados por unidad de paisaje mostrados en la Figura 35 se encuentran en el Anexo 6 de este documento.

6.5. Síntesis del Capítulo 6

- ✓ La Complejidad Tipológica y la Singularidad de los Paisajes fueron los índices de heterogeneidad que presentaron mayor correlación ($r = 0.88$ y $r = 0.81$ respectivamente) con los almacenes de carbono acumulado en los humedales costeros estudiados.
- ✓ El modelo de función exponencial cuya fórmula $\text{LnT} = 0.5386e^{0.6901 \cdot \text{LnCT}}$, con un valor de r^2 ajustada = 0.83 es el que mejor ajuste obtuvo en la relación de Complejidad Tipológica (LnCT) y Almacenes de Carbono (LnT). Los valores de carbono y Complejidad Tipológica fueron transformados a logaritmo natural para asegurar su distribución normal.
- ✓ Se observó que aquellas unidades de paisaje que presentaban una periodicidad de inundación superior a los ocho meses (unidades I.1, II.1 y II.2) mostraban el menor ajuste en el modelo para la predicción de almacenes de carbono.
- ✓ Se observa que no existe una relación entre el índice de antropización de la cobertura vegetal (IACV) y el grado de sobreestimación o subestimación de los almacenes de carbono. Esto debido a la génesis de las unidades de paisaje y a la naturaleza de estos almacenes, donde más del 79% del

almacén es subterráneo y el IACV refleja la transformación antropogénica principalmente de la parte aérea.

- ✓ Se generaron cartogramas partiendo de la clasificación de rangos de valores observados y esperados del carbono total por unidad de paisaje. Se encontró que los cartogramas generados con los valores reales en teragramos de carbono (Tg C) son útiles para mostrar cuantitativamente la estimación de carbono total. Por otro lado, los cartogramas generados con los valores de logaritmo natural presentaron una mejor correspondencia espacial que permiten tener una aproximación cualitativa de los almacenes de carbono en el territorio.

7. CONCLUSIONES

- ✓ Desde el punto de vista teórico-metodológico, el análisis de la heterogeneidad de los paisajes de los humedales costeros de Pantanos de Centla, Laguna de Términos (Tabasco-Campeche) y el sitio prioritario de manglar Sabancuy - Chen Kan, a escala 1:250 000, permite establecer una relación estadísticamente significativa con los almacenes de carbono orgánico hasta un metro de profundidad de estos ecosistemas.
- ✓ La propuesta metodológica consistió, en tres grandes actividades a) La generación del mapa de paisajes naturales, análisis de heterogeneidad y antropización de la cobertura vegetal; b) la construcción de modelos predictivos de carbono aéreo y subterráneo del área de estudio, con su respectivo análisis de incertidumbre espacial y c) la generación de un modelo de correlación y predicción entre el índice de heterogeneidad y los almacenes de carbono orgánico total.
- ✓ En el área de estudio se llegaron a identificar cuatro niveles taxonómicos: Una *Clase*, seis *Localidades*, 11 *Parajes complejos* y 61 *Parajes simples*. Predominan espacialmente las *Localidades* de planicies fluvio-biógenas acumulativas, formadas por depósitos aluviales y biógenos en clima cálido húmedo.
- ✓ Las condiciones del relieve (planicies sub-horizontales) en las que se desarrollan estos paisajes, muestran unidades, con poca heterogeneidad y con una relación muy fuerte entre sus componentes, donde la periodicidad de inundación juega un papel determinante.
- ✓ Los modelos generados de carbono aéreo y subterráneo utilizando variables independientes locales, presentan correlaciones de $r^2 = 0.71$ y 0.62

respectivamente, los cuales se encuentran dentro de los rangos encontrados en otros estudios realizados local y regionalmente.

- ✓ La Complejidad Tipológica de los paisajes fue el índice que mostró mayor correlación con los valores totales de carbono orgánico y permitió obtener un modelo de función exponencial con una r^2 ajustada de 0.83. Con este modelo, la predicción de carbono orgánico según el *Paraje complejo* puede llegar a sobreestimar hasta un 204% o subestimar hasta un 39% del total según la unidad de paisaje analizada.
- ✓ Aunque la actividad modificadora de los paisajes de este territorio es evidente, a partir del análisis del Índice de Antropización de la Cobertura Vegetal, no se encontró correlación de este factor con la baja capacidad de predicción del modelo de carbono de ciertas unidades de paisaje. Esto se cree que es debido a que la modificación antropogénica generalmente se realiza en la parte aérea y hasta en un máximo de 30 cm de profundidad. Lo cual no llega a reflejarse en los grandes almacenes subterráneos de hasta un metro de profundidad que en muchos casos representan de un 79% a un 94% del carbono total almacenado.
- ✓ Los humedales costeros estudiados constituyen ecosistemas de gran importancia por el enorme potencial de sus almacenes de carbono ya sean coberturas arbóreas o herbáceas. En la superficie del área de estudio (9,023.6 km²) se encontró un total de 376 Tg de carbono aéreo y subterráneo, hasta un metro de profundidad y mediante el análisis geoecológico de la heterogeneidad de los paisajes se logró pronosticar 327 Tg, es decir un 87% del total.
- ✓ La hipótesis probada en este estudio, permite postular que el enfoque utilizado puede ser de gran utilidad para explicar la distribución espacial de los almacenes de carbono orgánico hasta un metro de profundidad en humedales costeros.

RETOS A FUTURO

Por otro lado, al obtener los resultados y algunas conclusiones de esta Tesis, nuevos retos y preguntas de investigación surgieron y que permitirán seguir ampliando y mejorando el conocimiento de las relaciones de la heterogeneidad de los paisajes, otros aspectos de la Geoecología y los almacenes de carbono en humedales costeros.

- En este estudio se trabajó con 10 índices de heterogeneidad y se observó que cuatro presentaban una correlación significativa y se utilizó el índice de mayor significancia. Sin embargo, sería importante explorar la funcionalidad de otros indicadores de heterogeneidad que existen en la literatura y que posiblemente permitan una mayor explicación con relación al almacenamiento de carbono total.
- Otro elemento importante es la exploración a futuro de la estructura vertical de los paisajes. De esta manera se caracterizará la composición e interrelaciones entre los elementos y componentes del paisaje en el sentido vertical (Mateo 2002). Esto permitirá conocer las relaciones entre los diferentes componentes del paisaje.
- Con la experiencia adquirida en la modelación de carbono, especialmente de la parte subterránea en la zona de estudio, es necesario encontrar la forma de incluir dentro de las variables independientes la génesis del relieve lo cual podría mejorar la predicción y disminuir la incertidumbre espacial, ya que, en muchos casos este elemento podría explicar las concentraciones de carbono orgánico presentes en el territorio.
- La réplica de esta experiencia a humedales costeros del pacifico mexicano, podrá servir para explorar la posibilidad de encontrar regularidades geográficas en el territorio mexicano.
- La generación de cartografía a nivel nacional a escala 1:250 000 de los paisajes de ecosistemas costeros de México y mejorar o generar mapas de periodicidad de inundación permitirá seguir evaluando y mejorando las

ecuaciones que expliquen desde el punto de vista geoecológico y de manera regional el carbono total acumulado.

- Finalmente, la exploración de esta metodología a mayor detalle (1:50 000), lo cual implicará mayor esfuerzo en campo, permitirá el conocimiento de las singularidades del paisaje con relación a la acumulación diferenciada de carbono y reconocer áreas más específicas para acciones de conservación, restauración y manejo.

REFERENCIAS

- Adame, M. F., Kauffman, J. B., Medina, I., Gamboa, J. N., Torres, O., Caamal, J. P., ... Herrera-Silveira, J. a. (2013). Carbon stocks of tropical coastal wetlands within the karstic landscape of the Mexican Caribbean. *PLoS One*, *8*(2), e56569. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0056569>
- Adame, M. F., Santini, N. S., Tovilla, C., Vazquez-Lule, A., Castro, L., & Guevara, M. (2015). Carbon stocks and soil sequestration rates of tropical riverine wetlands. *Biogeosciences*, *12*(12), 3805–3818. <https://doi.org/10.5194/bg-12-3805-2015>
- Adhikari, K., Hartemink, A. E., Minasny, B., Bou Kheir, R., Greve, M. B., & Greve, M. H. (2014). Digital mapping of soil organic carbon contents and stocks in Denmark. *PLoS ONE*, *9*(8). <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0105519>
- Aparicio, F. J. (1992). *Fundamentos de hidrología de superficie* (Primera; G. Noriega, Ed.). Retrieved from http://webdelprofesor.ula.ve/ingenieria/adamoreno/HIDRO/Fundamentos_de_hidrologia_de_superficie_-_Aparicio.pdf
- Aslan, A., Rahman, A. F., Warren, M. W., & Robeson, S. M. (2016). Mapping spatial distribution and biomass of coastal wetland vegetation in Indonesian Papua by combining active and passive remotely sensed data. *Remote Sensing of Environment*, *183*(September), 65–81. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2016.04.026>
- Avitabile, V., Baccini, A., Friedl, M. A., & Schmullius, C. (2012). Capabilities and limitations of Landsat and land cover data for aboveground woody biomass estimation of Uganda. *Remote Sensing of Environment*, *117*, 366–380. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2011.10.012>
- Baccini, A., Friedl, M., Woodcock, C., & Warbington, R. (2004). Forest biomass estimation over regional scales using multisource data. *Geophysical Research Letters*, *31*, 4. <https://doi.org/10.1029/2004GL019782>
- Baccini, A., Goetz, S. J., Walker, W. S., Laporte, N. T., Sun, M., Sulla-Menashe, D., ... Houghton, R. A. (2012). Estimated carbon dioxide emissions from tropical deforestation improved by carbon-density maps. *Nature Climate Change*, *2*(3), 182–185. <https://doi.org/10.1038/nclimate1354>
- Baritz, R., Guevara, M., Mulder, V. L., Olmedo, G. F., Thine, C., Vargas, R., & Yigini, Y. (2018). Mapping methods. In FAO (Food and Agriculture Organization of the United Nations) (Ed.), *Soil Organic Carbon Mapping Cookbook* (2nd ed., pp. 83–108). Rome.
- Baritz, R., & Yigini, Y. (2018). Preparation of spatial covariates. In FAO (Food and Agriculture Organization of the United Nations) (Ed.), *Soil Organic Carbon Mapping Cookbook* (2nd ed., pp. 35–49). Rome.
- Bocco, G. (2003). Carl Troll y la ecología del paisaje. *Gaceta Ecológica*, *68*, 69–70.
- Bocco, G., Mendoza, M., Priego, A., & Burgos, A. (2009). *La cartografía de los sistemas naturales como base geográfica para la planeación territorial* (1ra edició). Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales.

- Böhner, Jürgen, & Selige, T. (2006). Spatial prediction of soil attributes using terrain analysis and climate regionalisation. In J. Böhner, K. R. McCloy, & J. Strobl (Eds.), *SAGA - Analyses and Modelling Applications: Göttinger Geographische Abhandlungen* (Vol. 115, pp. 13–28). <https://doi.org/10.1186/1471-2288-4-5>
- Bollo-Manent, M. (2018). *La Geografía del Paisaje y la Geoecología: Teoría y enfoques. En: Paisaje: métodos de análisis y reflexiones. Ed. Ediciones del Lirio-Editorial UAM. ISBN:978-607-28-1169-0.*
- Bollo-Manent, M., Hernández-Santana, J. R., Priego-Santander, A. G., Zaragoza-Álvarez, A. G., Ortiz-Rivera, A., Espinoza-Maya, A., & Ruíz-López, R. (2015). *Una propuesta de regionalización físico-geográfica de México* (p. 59). p. 59. Morelia, Michoacán: Editorial CIGA-UNAM.
- Bradford, J. B., Weishampel, P., Smith, M.-L., Kolka, R., Birdsey, R. A., Ollinger, S. V., & Ryan, M. G. (2010). Carbon pools and fluxes in small temperate forest landscapes: Variability and implications for sampling design. *Forest Ecology and Management*, 259(7), 1245–1254. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.foreco.2009.04.009>
- Breiman, L. (2001). *Machine Learning*. <https://doi.org/https://doi.org/10.1023/A:1010933404324>
- Cairns, M. A., Brown, S., Helmer, E. H., & Baumgardner, G. A. (1997). Root Biomass Allocation in the World's Upland Forests. *Oecologia*, 111(1), 1–11. <https://doi.org/10.1007/s004420050201>
- Campos C., A., Hernández, M. E., Moreno-Casasola, P., Cejudo Espinosa, E., Robledo R., A., & Infante Mata, D. (2011). Soil water retention and carbon pools in tropical forested wetlands and marshes of the Gulf of Mexico. *Hydrological Sciences Journal*, 56(8), 1388–1406. <https://doi.org/10.1080/02626667.2011.629786>
- Campos, M., & Priego-Santander, A. G. (2011). Biophysical landscapes of a coastal area of Michoacán state in Mexico. *Journal of Maps*, 7(January 2011), 42–50. <https://doi.org/10.4113/jom.2011.1098>
- Cartus, O., Kelldorfer, J., Walker, W., Franco, C., Bishop, J., Santos, L., & Fuentes, J. M. M. (2014). A national, detailed map of forest aboveground carbon stocks in Mexico. *Remote Sensing*, 6(6), 5559–5588. <https://doi.org/10.3390/rs6065559>
- CEC. (2013). *North American Blue Carbon Scoping Study. Montreal, Canada: Commission for Environmental Cooperation*. 43 pp.
- CEC. (2016a). *Blue Carbon Storage Variability in Eelgrass Meadows on the Pacific Coast of Canada. Montreal, Canada: Commission for Environmental Cooperation*. Retrieved September 16, 2017, from <http://www3.cec.org/islandora/en/item/11722-blue-carbon-storage-variability-in-eelg>
- CEC. (2016b). *North America's Blue Carbon: Assessing Seagrass, Salt Marsh and Mangrove Distribution and Carbon Sinks. Montreal, Canada: Commission for Environmental Cooperation*. Retrieved August 24, 2017, from <http://sierraclub.bc.ca/wp-content/uploads/2015/08/Blue-Carbon-British-Columbia%0A-Report.pdf>
- Chave, J., Andalo, C., Brown, S., Cairns, M. a., Chambers, J. Q., Eamus, D., ... Yamakura, T. (2005). Tree allometry and improved estimation of carbon stocks and balance in tropical forests.

Oecologia, 145, 87–99. <https://doi.org/10.1007/s00442-005-0100-x>

- Chiles, J. P., & Delfiner, P. (1999). *Geostatistics: Modeling Spatial Uncertainty*. Wiley, New York.
- Conabio. (2009). *Sitios prioritarios de Manglar*. Retrieved from <https://www.biodiversidad.gob.mx/ecosistemas/manglares2013/sitioGolfoMex.html>
- Conabio. (2016). *Mapa de uso del suelo y vegetación de la zona costera asociada a los manglares de México en 2015, escala: 1:50 000*. Retrieved from <http://www.conabio.gob.mx/informacion/gis/>
- CONABIO. (2015). Atlas de naturaleza y sociedad, CONABIO, México D.F. Retrieved May 15, 2019, from <https://www.biodiversidad.gob.mx/atlas/>
- CONAFOR. (2015a). *Inventario Nacional Forestal y Suelos: Base de datos de biomasa (2004-2011)*. Zapopan, Jalisco, México: Comisión Nacional Forestal.
- CONAFOR. (2015b). *Protocolo: Estimación de las Reservas de Carbono en la Biomasa Forestal en México*. Zapopan, Jalisco, México.
- CONANP. (2016). *Buscador de datos por Área Natural Protegida*. Retrieved from <http://sig.conanp.gob.mx/website/pagsig/>
- Conrad, O., Bechtel, B., Bock, M., Dietrich, H., Fischer, E., Gerlitz, L., ... Böhner, J. (2015). *System for Automated Geoscientific Analyses (SAGA) v. 2.1.4, Geosci. Model Dev., 8, 1991-2007*. <https://doi.org/10.5194/gmd-8-1991-2015>
- Dangeti, P. (2017). *Statistics for Machine Learning*. Retrieved from <https://books.google.com.mx/books?id=C-dDDwAAQBAJ&pg=PA34&lpg=PA34&dq=training+point+70+30%25&source=bl&ots=j17v0qo-Xx&sig=ACfU3U3LHXbcFwRpmSs-WXvhOqIDQIDpEg&hl=es-419&sa=X&ved=2ahUKEwjg3Nq9g7XhAhUBYawKHeL7Bc0Q6AEwCnoECAcQAQ#v=onepage&q=training point 70>
- Day, J. W., Conner, W. H., Ley-Lou, F., Day, R. H., & Machado, A. (1987). The Productivity and Composition of mangrove forest, Laguna de Términos, Mexico. *Aquatic Botany*, 27, 267–284.
- de Groot, D., Brander, L., & Finlayson, M. (2018). Wetland Ecosystem services. In C. M. Finlayson, M. Everard, K. Irvine, R. J. McInnes, B. A. Middleton, A. A. van Dam, & N. C. Davidson (Eds.), *The Wetland Book* (pp. 323–333). [https://doi.org/De Groot, D., Brander, L., & Finlayson, C. M. \(2018\). Wetland Ecosystem Services. The Wetland Book, 323–333. doi:10.1007/978-90-481-9659-3_66](https://doi.org/De Groot, D., Brander, L., & Finlayson, C. M. (2018). Wetland Ecosystem Services. The Wetland Book, 323–333. doi:10.1007/978-90-481-9659-3_66)
- Dixon, R. K., Solomon, A. M., Brown, S., Houghton, R. A., Trexler, M. C., & Wisniewski, J. (1994). Carbon Pools and Flux of Global Forest Ecosystems. *Science*, 263(5144), 185–190. <https://doi.org/10.1126/science.263.5144.185>
- Donato, D. C., Kauffman, J. B., 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. <https://doi.org/10.1038/ngeo1123>
- EPOMEX-IG/UNAM-CONABIO. (2000). *Áreas de inundación de la Laguna de Términos, Campeche*:

Extraído del proyecto N011, Actualización del Mapa de Uso del Suelo, Vegetación y Hábitats Críticos y Elaboración de una Base Cartográfica Digital del Área Protegida de la Laguna de Términos. Escala. México. D.F.: Centro EPOMEX, Instituto de Geografía-UNAM, CONABIO, Financiado por la Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO).

- Ezcurra, P., Ezcurra, E., Garcillán, P. P., Costa, M. T., & Aburto-Oropeza, O. (2016). Coastal landforms and accumulation of mangrove peat increase carbon sequestration and storage. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*. Retrieved from <http://dx.doi.org/10.1073/pnas.1519774113>
- FAO. (2018). *El estado de los bosques del mundo. Las vías forestales hacia el desarrollo sostenible*. (p. 153). p. 153. Retrieved from <http://www.fao.org/3/I9535ES/i9535es.pdf>
- Fatoyinbo, T. E., & Simard, M. (2013). Height and biomass of mangroves in Africa from ICESat/GLAS and SRTM. *International Journal of Remote Sensing*, 34(2), 668–681. <https://doi.org/10.1080/01431161.2012.712224>
- Flores-Domínguez, A., Priego-Santander, A. G., Ruiz-Careaga, J., & Astier, M. (2014). Mapa de Paisajes físico-geográficos del Estado de Puebla, México a escala 1:250 000 marco atípico: Morelia-Michoacán. Retrieved October 2, 2018, from http://www.ciga.unam.mx/publicaciones/index.php?option=%0Acom_abook&view=book&catid=12%253Acoleccionesciga&id=71%25%0A3Amapa-de-paisaje-fisico-geografico-del-estado-de-puebla&%0AItemid=16%0A
- Flores, A. D. (2016). *Evaluación de la Sustentabilidad Ambiental de los paisajes agrícolas del estado de Puebla, México. Tesis de doctorado en Geografía. Posgrado en Geografía-CIGA, UNAM. 109 pp.*
- Flores, L., & Alcalá, J. R. (2010). *Manual de Precedimientos Analíticos: Laboratorio de Física de Suelos* (p. 56). p. 56. Distrito Federal, México: Instituto de Geología, UNAM.
- Fourqurean, J., Johnson, B., B, K. J., Kennedy, H., Lovelockand, C., Megonigal, P., ... Simard, M. (2014). *Carbon: Methods for assessing carbon stocks and emissions factors in mangroves, tidal salt marshes, and seagrass meadows*. Arlington, Virginia, USA: Conservation International, Intergovernmental Oceanographic Commission of UNESCO, International Union for Conservation of Nature.
- Fromard, F., Puig, H., Mougin, E., Marty, G., Betoulle, J. L., & Cadamuro, L. (1998). Structure, above-ground biomass and dynamics of mangrove ecosystems: New data from French Guiana. *Oecologia*, 115(1–2), 39–53. <https://doi.org/10.1007/s004420050489>
- Gallant, J. C., & Dowling, T. I. (2003). A multiresolution index of valley bottom flatness for mapping depositional areas. *Water Resources Research*, 39(12), 1–13. <https://doi.org/10.1029/2002WR001426>
- Gao, H., Sabo, J. L., Chen, X., Liu, Z., Yang, Z., Ren, Z., ... Yang, H. G. Á. Z. (2018). Landscape heterogeneity and hydrological processes : a review of landscape-based hydrological models. *Landscape Ecology*, 33(9), 1597–1616. <https://doi.org/10.1007/s10980-018-0690-4>
- García-Llamas, P., Calvo, L., De la Cruz, M., & Suárez-seoane, S. (2018). Landscape heterogeneity as

- a surrogate of biodiversity in mountain systems : What is the most appropriate spatial analytical unit ? *Ecological Indicators*, 85(October 2017), 285–294.
- García, E., & Conabio. (1998). “Climas” (*clasificación de Köppen, modificado por García*). Escala 1:1000000. México. Retrieved from <http://www.conabio.gob.mx/informacion/gis/>
- Gaxiola, G., Hernandez, J., Lara, R., Sosa, R., & Cepeda, A. (2017). Importancia del intercambio y reservorios de carbono en los mares y costas mexicanas. *Elementos Para Políticas Públicas*, 1(1), 13–24.
- Gleason, C. J., & Im, J. (2012). Forest biomass estimation from airborne LiDAR data using machine learning approaches. *Remote Sensing of Environment*, 125, 80–91. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2012.07.006>
- Goetz, S. J., Baccini, A., Laporte, N., Johns, T., Walker, W., Kelldorfer, J., ... Sun, M. (2009). Mapping and monitoring carbon stocks with satellite observations: a comparison of methods. *Carbon Balance and Management*, 4(1), 2. <https://doi.org/10.1186/1750-0680-4-2>
- González-Areu, A. V. (2000). *Heterogeneidad del paisaje y su relación con la riqueza florística en cayo Guillermo. Tesis de Maestría. Centro de Estudios Tropicales del Instituto de Ecología y Sistemática de Cuba, Ciudad de la Habana* (p. 66). p. 66.
- Gross, M. F., Hardisky, M. A., Wolf, P. L., & Klemas, V. (1991). Relationship between aboveground and belowground biomass of *Spartina alterniflora* (smooth cordgrass). *Estuaries*1, 14, 180–191.
- Guerra-Santos, J. J., Cerón-Bretón, R. M., Cerón-Bretón, J. G., Damián-Hernández, D. L., Sánchez-Junco, R. C., & Carrió, E. del C. G. (2014). Estimation of the carbon pool in soil and above-ground biomass within mangrove forests in Southeast Mexico using allometric equations. *Journal of Forestry Research*, 25(1), 129–134. <https://doi.org/10.1007/s11676-014-0437-2>
- Guevara, M., Olmedo, G. F., Stell, E., Yigini, Y., Aguilar Duarte, Y., Arellano Hernández, C., ... Vargas, R. (2018). No Silver Bullet for Digital Soil Mapping: Country-specific Soil Organic Carbon Estimates across Latin America. *SOIL Discussions*, (August), 1–20. <https://doi.org/10.5194/soil-2017-40>
- Guisan, A., Weiss, S. B., & Weiss, A. D. (2009). *GLM versus CCA Spatial Modeling of Plant Species Distribution Stable URL : http://www.jstor.org/stable/20050798 GLM versus CCA spatial modeling of plant species distribution. 143(1), 107–122.*
- Guo, Z., Fang, J., Pan, Y., & Birdsey, R. (2010). Inventory-based estimates of forest biomass carbon stocks in China: A comparison of three methods. *Forest Ecology and Management*, 259(7), 1225–1231. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.foreco.2009.09.047>
- Haase, G., & Neumeister, H. (1986). Some methodological outlines of landscape ecological research. In *Landscape synthesis foundations, classification and management* (pp. 5–22). Haale, Germany.
- Haines-Young, R., & Chopping, M. (1996). Quantifying landscape structure: a review of landscape indices and their application to forested landscapes. *Progress in Physical Geography*, 20, 418–445.

- Hansen, M. C., DeFries, R. S., Townshend, J. R. G., Sohlberg, R. A., DiMiceli, C., & Carroll, M. L. (2002). Towards an operational MODIS continuous field of percent tree cover algorithm: examples using AVHRR and MODIS data. *Remote Sensing of Environment*, *83*, 303–319.
- Hansen, M. C., Potapov, P. V., Moore, R., Hancher, M., Turubanova, S. a, Tyukavina, a, ... Townshend, J. R. G. (2013). High-Resolution Global Maps of. *Science (New York, N.Y.)*, *850*(November), 2011–2014. <https://doi.org/10.1126/science.1244693>
- Hastie, T., Tibshirani, R., & Friedman, J. (2009). *The elements of statistical learning* (Second Edi; S. S. in Statistics, Ed.).
- Hernandez, M. E., Marín-Muñiz, J. L., Moreno-Casasola, P., & Vázquez, V. (2015). Comparing soil carbon pools and carbon gas fluxes in coastal forested wetlands and flooded grasslands in Veracruz, Mexico. *International Journal of Biodiversity Science, Ecosystem Services and Management*, *11*(1), 5–16. <https://doi.org/10.1080/21513732.2014.925977>
- Herrera-Silveira, J. A., Camacho-Rico, A., Medina, I., Ramírez-Ramírez, J., López, M., & Morales, S. M. (2017). *Síntesis basada en el análisis y diagnóstico documental sobre Carbono Azul en México. PNUD CSP-2016-057. Programa Mexicano del Carbono-CINVESTAV-IPN.*
- Herrera-Silveira, J. A., Camacho-Rico, A., Pech, E., Pech, M., Ramírez, J., & Teutli, C. (2016). Carbon Dynamics (Stocks and Fluxes) in Mangroves of Mexico. *Terra Latinoamericana*, *34-I*, 61–72.
- Herrera, J., & Teutli, C. (2017). Carbono azul, Manglares y Política Pública. *Elementos Para Políticas Públicas*, *1*(1), 43–52.
- Houghton, R. A., Hall, F., & Goetz, S. J. (2009). Importance of biomass in the global carbon cycle. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, *114*(G2), 13. <https://doi.org/10.1029/2009JG000935>
- Hu, T., Su, Y., Xue, B., Liu, J., Zhao, X., Fang, J., & Guo, Q. (2016). Mapping global forest aboveground biomass with spaceborne LiDAR, optical imagery, and forest inventory data. *Remote Sensing*, *8*(7). <https://doi.org/10.3390/rs8070565>
- Huete, A., Justice, C., Liu, H. (1994). Development of Vegetation and Soil Indices for MODIS-EOS. *Remote Sensing of Environment*, *49*, 224–234.
- Huete, A., Didan, K., Miura, T., Rodriguez, E. , Gao, X., Ferreira, L. . G., ... Ferreira, L. . G. (2002). Overview of the radiometric and biophysical performance of the MODIS vegetation indices. *Remote Sensing of Environment*, *83*(1–2), 195–213. [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(02\)00096-2](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(02)00096-2)
- Hughes, R. Flint, Kauffman, J. B., & Jaramillo, V. J. (2000). Ecosystem-scale impacts of deforestation and land use in a humid tropical region of Mexico. *Ecological Applications*, *10*(2), 515–527. [https://doi.org/10.1890/1051-0761\(2000\)010\[0515:ESIODA\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1890/1051-0761(2000)010[0515:ESIODA]2.0.CO;2)
- Hughes, R F, Kauffman, J. B., & Jaramillo, V. J. (1999). Biomass , Carbon , and Nutrient Dynamics of Secondary ´ Xico Forests in a Humid Tropical Region of Me. *Ecology*, *80*(6), 1892–1907. [https://doi.org/10.1890/0012-9658\(1999\)080\[1892:bcando\]2.0.co;2](https://doi.org/10.1890/0012-9658(1999)080[1892:bcando]2.0.co;2)
- Hughes, R Flint, Kauffman, J. B., & Jaramillo, V. J. (2000). Ecosystem-Scale Impacts of Deforestation

and Land Use in a Humid Tropical Region of Mexico Published by : Ecological Society of America
ECOSYSTEM-SCALE IMPACTS OF DEFORESTATION AND LAND USE IN A HUMID TROPICAL
REGION OF MEXICO. *Ecological Applications*, 10(2), 515–527.

Hutcheson, K. (1970). A test for comparin diversities based on the Shannon formula. *Journal of Theoretical Biologi*, 29(1), 151–154.

INEGI. (2004). *Conjunto de datos alfanuméricos edafológicos, escala 1:250 000, serie I*. Aguascalientes, México: Instituto Nacional de Estadística y Geografía.

INEGI. (2007). *Conjunto de datos vectoriales de edafología Serie II, 1:250 000*. Aguascalientes, México: Instituto Nacional de Estadística y Geografía.

INEGI. (2010). Documento Técnico Descriptivo De La Red Hidrográfica Escala 1:50 000 (Edición 2.0). *Dirección General de Geografía y Medio Ambiente*, 1–106. Retrieved from http://www.inegi.org.mx/geo/contenidos/recreat/clima/doc/dd_climaticos_1m_250k.pdf

INEGI. (2013). Conjunto de datos vectoriales de uso de suelo y vegetación escala 1:250000, serie V (capa unión), Edición: 2ª, Instituto Nacional de Estadística y Geografía, Aguascalientes, México. Retrieved October 2, 2018, from Conjunto de datos vectoriales de uso de suelo y vegetación escala 1:250000, serie V (capa unión), Edición: 2ª website: <http://www.beta.inegi.org.mx/temas/mapas/usosuelo/>

INEGI. (2014). *Guía para la interpretación de cartografía: uso del suelo y vegetación: escala 1:250 000: serie V* (p. 195). p. 195. Retrieved from http://www.beta.inegi.org.mx/contenidos/temas/mapas/usosuelo/metadatos/guia_interuso_suelov.pdf

INEGI. (2015). Modelos Digitales de Elevación de Alta Resolución LiDAR. Retrieved October 20, 2016, from www.inegi.org.mx/geo/contenidos/datosrelieve/continental/presentacion.aspx

Ingram, J. S. I., & Fernandes, E. C. M. (2001). Managing carbon sequestration in soils: concepts and terminology. *Journal of Agriculture, Ecosystems and Environment*, 87, 111–117.

Instituto Nacional de Estadística Geografía e Información (INEGI). (1981). Conjunto de Datos Geológicos Vectoriales, cartas E1503, E1505, E1506, E1508 a Escala 1:250000. Serie I, Aguascalientes, Ags., México. Retrieved June 8, 2016, from <http://www.inegi.org.mx/geo/contenidos/recreat/geologia/Default.aspx>

Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). (2016). Conjunto de Datos Vectoriales de información topográfica, cartas E15B37, E15B46, E15B47, E15B55, E15B56, E15B57, E15B61, E15B62, E15B64, E15B65, E15B71, E15B72, E15B73, E15B74, E15B75, E15B76, E15B81, E15B82, E15B83, E15B84, E15B85, E15B86, E15D12, E15D13. Retrieved October 6, 2016, from <http://www.inegi.org.mx/geo/contenidos/topografia/default.aspx>

IPCC. (1990). *Primer informe de Evaluación del IPCC: Panorama general*. Retrieved from <http://www.ipcc.ch/ipccreports/1992> IPCC Supplement/IPCC_1990_and_1992_Assessments/Spanish/ipcc_90_92_assessments_far_overview_sp.pdf

IPCC. (1996). *Directrices del IPCC para los inventarios de gases de efecto invernadero, versión*

- revisada en 1996. (Vol. 1).
- IPCC. (2002). *Cambio Climático y Biodiversidad* (H. Gitay, A. Suárez, R. T. Watson, & D. J. Dokken, Eds.).
- IPCC. (2003). *Good Practice Guidance for Land Use, Land-Use Change and Forestry*. Hayama, Japan: IPCC National Greenhouse Gas Inventories Programme 295 pp. Hayama, Japan.
- IPCC. (2006). Task Force on National Greenhouse Gas Inventories. Retrieved November 24, 2017, from <https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp>
- IPCC. (2013). *2013 Supplement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories: Wetlands*. Retrieved from http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/wetlands/pdf/Wetlands_separate_files/WS_Chp4_Coastal_Wetlands.pdf
- IPCC. (2014). *2013 Supplement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories: Wetlands*. Hiraishi, T., Krug, T., Tanabe, K., Srivastava, N., Baasansuren, J., Fukuda, M. and Troxler, T.G. (eds): (T. Hiraishi, T. Krug, K. Tanabe, N. Srivastava, J. Baasansuren, M. Fukuda, & T. G. Troxler, Eds.). Retrieved from <http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/wetlands/>
- Jaramillo, V. J., Ahedo-Hernández, R., & Kauffman, J. B. (2003). Root biomass and carbon in a tropical evergreen forest of Mexico: Changes with secondary succession and forest conversion to pasture. *Journal of Tropical Ecology*, 19(4), 457–464. <https://doi.org/10.1017/S0266467403003493>
- Jenks, G. F. (1967). The data model concept in statistical mapping. In *International Yearbook of Cartography* (Vol. 7, p. 186).
- Kauffman, J. B., Bernardino, A. F., Ferreira, T. O., Giovannoni, L. R., de O Gomes, L. E., Romero, D. J., ... Ruiz, F. (2018). Carbon stocks of mangroves and salt marshes of the Amazon region, Brazil. *Biology Letters*, 14(9), 20180208. <https://doi.org/10.1098/rsbl.2018.0208>
- Kauffman, J. B., & Donato, D. C. (2012). *Protocols for the Measurement, Monitoring, & Reporting of Structure, Biomass and Carbon Stocks in mangrove Forests* (p. 40). p. 40. Working paper 86. Center for International Forest Research. 40 p.
- Kauffman, J. B., Hernandez Trejo, H., García, M. del C. J., Heider, C., & Contreras, W. (2015). Carbon stocks of mangroves and losses arising from their conversion to cattle pastures in the Pantanos de Centla, Mexico. *Wetlands Ecology and Management*, 1–14. <https://doi.org/10.1007/s11273-015-9453-z>
- Kennedy, H., Beggins, J., Duarte, C. M., Fourqurean, J. W., Holmer, M., Marbá, N., & Middelburg, J. J. (2010). Seagrass sediments as a global carbon sink: Isotopic constraints. *Global Biogeochemical Cycles*, 24(4), 1–8. <https://doi.org/10.1029/2010GB003848>
- Kennett, J. P. (1982). *Marine Geology*. New York, USA: Prentice Hall.
- Klemas, V. (2013a). Remote Sensing of Coastal Wetland Biomass: An Overview. *Journal of Coastal Research*, 290, 1016–1028. <https://doi.org/10.2112/JCOASTRES-D-12-00237.1>
- Klemas, V. (2013b). Remote sensing of emergent and submerged wetlands: an overview.

International Journal of Remote Sensing, 34(18), 6286–6320.
<https://doi.org/10.1080/01431161.2013.800656>

- Klimina, E. M., & Mirzekhanova, Z. G. (2014). Developing the system of regional indices of landscape diversity for poorly developed territories. *Geography and Natural Resources*, 35(1), 88–93.
- Kohavi, R. (1995). A study of cross-validation and bootstrap for accuracy estimation and model selection. *Proceedings of the 14th International Joint Conference on Artificial Intelligence - Volume 2*, 2(0), 1137–1143.
- Kolomyts, E. G. (2018). *Environmental Problems Introduction to Experimental Geocology : Results of a Scientific Inquiry*. 88(6), 482–493. <https://doi.org/10.1134/S1019331618060084>
- Komiyama, A., Pongpan, S., & Kato, S. (2005). Common allometric equations for estimating the tree weight of mangroves. *Journal of Tropical Ecology*, 21(4), 471–477. <https://doi.org/10.1017/S0266467405002476>
- Kuhn, M., Wing, J., Weston, S., Williams, A., Keefer, C., Engelhart, A., ... Hunt, T. (2017). *Caret: Classification and regression training*. 2016. R package version, 4.
- Lee, J. S., Ainsworth, T. L., Wang, Y., & Chen, K. S. (2015). Polarimetric SAR Speckle Filtering and the Extended Sigma Filter. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 53, 1150–1160.
- Lin, C., & Sogt, K. (2013). *Modeling Forest Stand Structures and Aboveground Biomass Estimation Using Landsat TM Imagery in Mongolia. a. Ph.D. Program of Agriculture Science [Disertasi] China (CN)*. National Chiayi University.
- Livesley, S. J., & Andrusiak, S. M. (2012). Temperate mangrove and salt marsh sediments are a small methane and nitrous oxide source but important carbon store. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 97, 19–27. <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2011.11.002>
- Lot, A. (2015). *Catálogo de la flora y vegetación de los humedales mexicanos* (Universidad Nacional Autónoma de México, Ed.). Universidad Nacional Autónoma de México.
- Margolis, H. A., Nelson, R. F., Montesano, P. M., Beaudoin, A., Sun, G., Andersen, H.-E., & Wulder, M. A. (2015). Combining satellite lidar, airborne lidar, and ground plots to estimate the amount and distribution of aboveground biomass in the boreal forest of North America¹. *Canadian Journal of Forest Research*, 45(7), 838–855. <https://doi.org/10.1139/cjfr-2015-0006>
- Marín-Muñiz, J. L., Hernández, M. E., & Moreno-Casasola, P. (2014). Comparing soil carbon sequestration in coastal freshwater wetlands with various geomorphic features and plant communities in Veracruz, Mexico. *Plant and Soil*, 378(1/2), 189–203. Retrieved from <http://www.jstor.org/stable/42952791>
- Martínez, A. (2016). *Análisis cuantitativo sobre las causas y los agentes de la deforestación para la región Calakmul Sur. Contrato: CGCRB/CONABIO-UICN/035/2015 INFORME FINAL* (p. 32). p. 32.
- Martínez, W. A. (2003). *Diversidad y distribución horizontal de Calliphoridae (Insecta: Dipter) en un valle interandino con diferentes grados de antropización (Popayán-Colombia)*. Tesis de Licenciatura en Biología. Facultad de Ciencias Naturales, Exactas y de la Educación. Univer (p.

142 p). p. 142 p.

- Mateo, Jose. (1984). *Apuntes de Geografía de los Paisajes. Facultad de Geografía de la Universidad de La Habana*. Ciudad de La Habana, Cuba: Edit. André Voisin, Empresa Nacional de Producción y Servicios del Ministerio de Educación Superior de Cuba.
- Mateo, José. (2002). *Geoecología de los Paisajes: Bases para la Planificación y Gestión Ambiental Universidad de La Habana, Cuba*. 205p.
- Mateo, José. (2008). *Geografía de los paisajes, segunda parte: paisajes naturales, Editorial Universitaria, La Habana*.
- Mathews, J. (2008). *Evaluación de la modificación Edafo-biógena de los paisajes de la Región Sierra-Costa de Michoacán, México. Tesis de Maestría en Geografía. Universidad Nacional Autónoma de México*. (p. 64 p.). p. 64 p. Morelia, Michoacán.
- McIntosh, R. P. (1991). Concept and terminology of homogeneity and heterogeneity. In J. Pickett & S. T. A. Kolasa (Eds.), *Ecological Heterogeneity* (pp. 24–26). Nueva York: Springer-Verlag.
- Mckee, K. L. (1993). Soil physicochemical patterns and mangrove species distribution - reciprocal effects? *Journal of Ecology*, *81*, 477–487.
- Meinshausen, N. (2006). Quantile Regression Forests. *Journal of Machine Learning Research*, *7*, 983–999. <https://doi.org/10.1016/j.jmva.2014.06.005>
- Mitsch, W. J., & Gossilink, J. G. (2000). The value of wetlands: Importance of scale and landscape setting. *Ecological Economics*, *35*(1), 25–33. [https://doi.org/10.1016/S0921-8009\(00\)00165-8](https://doi.org/10.1016/S0921-8009(00)00165-8)
- Moore, I. D., Grayson, R. B., & Ladson, A. R. (1991). Digital terrain modelling: A review of hydrological, geomorphological, and biological applications. *Hydrological Processes*, *5*, 3–30. <https://doi.org/10.1002/hyp.3360050103>
- Morales, Hector, & Priego-Santander, A. G. (2017). Los paisajes físico-geográficos del estado de Chiapas, México a escala 1:250 000. *Terra Digitalis*, *1*(1). <https://doi.org/10.22201/igg.terradigitalis.2017.1.8.71>
- Morales, Horacio. (2006). *Evaluación de la Heterogeneidad de los Paisajes y su Relación con la Distribución de la Biodiversidad en la Cuenca Lerma-Chapala, México*. Universidad Nacional Autónoma de México.
- Morris, J. T., Sundareshwar, P. V., Nietch, C. T., Kjerfve, B., & Cahoon, D. R. (2002). RESPONSES OF COASTAL WETLANDS TO RISING SEA LEVEL. *Ecology*, Vol. 83, pp. 2869–2877. [https://doi.org/10.1890/0012-9658\(2002\)083\[2869:ROCWTR\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1890/0012-9658(2002)083[2869:ROCWTR]2.0.CO;2)
- Mudd, S. M., Howell, S. M., & Morris, J. T. (2009). Impact of dynamic feedbacks between sedimentation, sea-level rise, and biomass production on near-surface marsh stratigraphy and carbon accumulation. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, *82*(3), 377–389. <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2009.01.028>
- Murdiyarsa, D., Donato, D., Kauffman, J. B., Kurnianto, S., Stidham, M., & Kanninen, M. (2010). Carbon storage in mangrove and peatland ecosystems: a preliminary account from plots in Indonesia. In *CIFOR Working Paper* (No. 48).

<https://doi.org/http://dx.doi.org/10.17528/cifor/003233>

Navarro, J. A., Algeet, N., Fernández-Landa, A., Esteban, J., Rodríguez-Noriega, P., & Guillén-Climent, M. L. (2019). Integration of UAV, Sentinel-1, and Sentinel-2 data for mangrove plantation aboveground biomass monitoring in Senegal. *Remote Sensing*, 11(1), 1–23. <https://doi.org/10.3390/rs11010077>

Nellemann, C., Corcoran, E., Duarte, C. M., Valdés, L., De Young, C., Fonseca, L., & Grimsditch, G. (2009). Blue Carbon. The Role of Healthy Oceans in Binding Carbon. A rapid response assessment. In *Environment*. Retrieved from <http://books.google.com/books?id=onCVCHQl4RoC>

Odum, E. P. (1993). *Ecology and Our Endangered Life-Support Systems* (Segunda ed; M. S. A. Sunderland, Ed.).

Pendleton, L., Donato, D. C., Murray, B. C., Crooks, S., Jenkins, W. A., Megonigal, P., ... Baldera, A. (2012). Estimating Global “ Blue Carbon ” Emissions from Conversion and Degradation of Vegetated Coastal Ecosystems. *PLoS ONE*, 7(9). <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0043542>

Pendleton, L., Donato, D. C., Murray, B. C., Crooks, S., Jenkins, W. A., Sifleet, S., ... Baldera, A. (2012). Estimating global “blue carbon” emissions from conversion and degradation of vegetated coastal ecosystems. *PloS One*, 7(9), e43542. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0043542>

PLADEYRA. (2000). *Ordenamiento ecológico de la cuenca de los ríos Filobobos y Solteros, Veracruz a escala 1:100 000. Planificación, Desarrollo y Recuperación Ambiental. Gobierno del Estado de Veracruz, México.*

Priego-Santander, Angel G., Velázquez-Montes, A., & Enríquez-Guadarrama, C. (2001). *El análisis de modificación geoecológica como herramienta del Ordenamiento territorial: caso de estudio de la cuenca Lerma-Chapala, México.* 1, 22.

Priego-Santander, Angel Guadalupe. (2004). *Relación entre la heterogeneidad geoecológica y la biodiversidad en ecosistemas costeros tropicales.* Tesis para obtener el título de doctor en Ecología. Instituto de Ecología, A.C.

Priego-Santander, Angel Guadalupe, Bocco, G., Mendoza, M., & Garrido, A. (2010). *Propuesta para la Generación Semiautomatizada de Unidades de Paisaje. Fundamentos y Métodos: Serie Planificación Territorial, Semarnat-INE-CIGA.*

Priego-Santander, Angel Guadalupe, Campos, M., Bocco, G., & Ramírez-Sánchez, L. G. (2013). Relationship between landscape heterogeneity and plant species richness on the Mexican Pacific coast. *Applied Geography*, 40, 171–178.

Priego-Santander, Angel Guadalupe, & Esteve-Selma, M. A. (2017). Análisis de la complejidad y heterogeneidad de los paisajes de México. *Papeles de Geografía*, 63(8701), 7–20. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.6018/geografia/2017/259991>

Priego-Santander, Angel Guadalupe, Moreno-Casasola, P., Palacio-Prieto, J., López-Portillo, J. A., & Geissert-Kientz, D. (2003). Relación entre la heterogeneidad del paisaje y la riqueza de especies de flora en cuencas costeras del estado de Veracruz, México. *Investigaciones Geográficas*, 52,

- QGIS Development Team. (2018). *QGIS Geographic Information System. Open Source Geospatial Foundation Project*. <https://qgis.org>.
- Rajashekar, G., Fararoda, R., Reddy, R. S., Jha, C. S., Ganeshaiyah, K. N., Singh, J. S., & Dadhwal, V. K. (2018). Spatial distribution of forest biomass carbon (Above and below ground) in Indian forests. *Ecological Indicators*, 85(Supplement C), 742–752. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2017.11.024>
- Ramírez-Sánchez, L. G., & Priego-Santander, A. G. (2012). Heterogeneidad geoecológica de los paisajes del estado de Michoacán, México. *IV Congreso de Geografía Tropical, Convención Geotrópico*, 12. Ciudad de La Habana, Cuba: ISBN: 978-959-282-079-1.
- Ramírez, L. (2013). Evaluación de la heterogeneidad geoecológica de los paisajes físico-geográficos de Michoacán: Morelia, Michoacán, Universidad Nacional Autónoma de México, tesis doctoral.
- Risdiyanto, I., & Fakhrul, M. (2017). *Examination of Multi-Spectral Radiance of the Landsat 8 Satellite Data for Estimating Biomass Carbon Stock at Wetland Ecosystem*. <https://doi.org/10.20944/PREPRINTS201704.0020.V1>
- Rodríguez-Veiga, P., Saatchi, S., Tansey, K., & Balzter, H. (2016). Magnitude, spatial distribution and uncertainty of forest biomass stocks in Mexico. *Remote Sensing of Environment*, 183, 265–281. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2016.06.004>
- Romme, W. H. (1982). Fire and landscape diversity in subalpine forest of Yellowstone National Park. *Ecological Monographs*, 52, 199–221.
- Rouse, J. J. W., Hass, R., Schell, J., & Deering, D. (1974). *Monitoring vegetation systems in the great plains with ERTS. In: Third ERTS symposium, NASA SP-351*. Washington.
- Rowe, J. S. (1995). *Eco-Diversity, the key to Biodiversity, pp: 2-9 In: A protected areas gap analysis methodology. WWF Canada Discussion Paper (p. 68)*. p. 68.
- Rozainah, M. Z., Nazri, M. N., Sofawi, A. B., Hemati, Z., & Juliana, W. A. (2018). Estimation of carbon pool in soil, above and below ground vegetation at different types of mangrove forests in Peninsular Malaysia. *Marine Pollution Bulletin*, 137(July), 237–245. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2018.10.023>
- RStudio Team. (2016). *RStudio: Integrated Development for R. RStudio, Inc., Boston, MA*. Retrieved from <http://www.rstudio.com>
- Saatchi, S. S., Harris, N. L., Brown, S., Lefsky, M., Mitchard, E. T. A., Salas, W., ... Morel, A. (2011). Benchmark map of forest carbon stocks in tropical regions across three continents. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 108(24), 9899–9904. <https://doi.org/10.1073/pnas.1019576108>
- Salazar-Landero, A. (2013). *Secuestro de Carbono en selvas y potreros inundables en las localidades de la Mancha y Jamapa, Veracruz. Tesis de Ingeniero Forestal. Facultad de Ingeniería Forestal. Instituto Tecnológico de Zacpoaxtla*.

- Sanderman, J., Hengl, T., Fiske, G., Solvik, K., Adame, M. F., Benson, L., ... Landis, E. (2018). A global map of mangrove forest soil carbon at 30 m spatial resolution. *Environmental Research Letters*. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/aabe1c>
- Seco, R. (2001). *Geomorfología*. La Habana, Cuba: Facultad de Geografía, Universidad de La Habana.
- Servicio Geológico Mexicano (SGM). (2004). *Carta Geológica – Minera Frontera E15-5, Tabasco, Campeche., Esc. 1:250,000: Serie I. Pachuca, Hidalgo, México.*
- Servicio Geológico Mexicano (SGM). (2005). *Carta Geológica – Minera Ciudad del Carmen E15-6, Campeche E15-3, Villahermosa E15-8, Esc. 1:250,000. Serie I, Pachuca, Hidalgo, México.*
- Shekhar, S., & Xiong, H. (2008). *Encyclopedia of Geographical Information Sciences* (Springer, Ed.). Berlin, Germany.
- Shishenko, P. G. (1988). *Estabilidad de los paisajes a las cargas económicas. Geografía física Aplicada* (p. 195 p). p. 195 p. Kiev, Ucrania: Editorial de la Escuela Superior.
- Smith, T. J., & Whelan, K. R. T. (2006). Development of allometric relations for three mangrove species in South Florida for use in the Greater Everglades Ecosystem restoration. *Wetlands Ecology and Management*, 14(5), 409–419. <https://doi.org/10.1007/s11273-005-6243-z>
- Smith, T. M., Smith, R. L., & Waters, I. (2014). *Elements of Ecology, 1st Canadian Edition*. Pearson Canada Inc., Don Mills, Ontario. 645 pp.
- Snacken, F., & Antrop, M. (1983). Structure and dynamics of landscape systems. In *Landscape synthesis and geoecological foundations of the complex landscape management* (pp. 10–30). Bratislava: Veda Publications.
- SNAP - ESA. (2018). *Sentinel Application Platform v2.0.2*, <http://step.esa.int>.
- Solomon, S., Quin, D., Manning, M., Alley, R. B., Berntsen, T., Bindoff, N. L., ... Wratt, D. (2007). *Technical Summary*. In *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Editado por S. Solomon, D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K. B.
- Stein, A., & Kreft, H. (2014). Terminology and quantification of environmental heterogeneity in species-richness research. *Biological Reviews*, 90(3), 815–836.
- Steinhardt, U., Herzog, F., Lausch, A., Müller, E., & Lehmann, S. (1999). Hemeroby index for landscape monitoring and evaluation. In Y. Pykt, D. Hyatt, & R. Lenz (Eds.), *Environmental indices, system analysis approach* (pp. 237–254). Oxford, United Kingdom: EOLSS Publications.
- Stockmann, U., Padarian, J., McBratney, A., Minasny, B., de Brogniez, D., Montanarella, L., ... Field, D. J. (2015). Global soil organic carbon assessment. *Global Food Security*, 6, 9–16. <https://doi.org/10.1016/j.gfs.2015.07.001>
- Stringer, E. C., Trettin, C., & Zarnoch, S. J. (2016). Soil properties of mangroves in contrasting geomorphic settings within the Zambezi River Delta, Mozambique. In *Wetlands Ecology and Management* (Vol. 24). <https://doi.org/10.1007/s11273-015-9478-3>
- Tamarit-Urias, J. C., & Fuentes-Salinas, M. (2003). Parámetros de humedad de 63 maderas

- latifoliadas mexicanas en función de su densidad básica. *Revista Chapingo. Serie Ciencias Forestales y Del Ambiente*, 9(2), 155–164.
- Tan, P.-N., Steinbach, M., & Kumar, V. (2006). *Introduction to data mining* (P. Addison-Wesley, Ed.). The United States of America.
- Tao, S., Guo, Q., Wu, F., Li, L., Wang, S., Tang, Z., ... Fang, J. (2016). Spatial scale and pattern dependences of aboveground biomass estimation from satellite images: a case study of the Sierra National Forest, California. *Landscape Ecology*, 31(8), 1711–1723. <https://doi.org/10.1007/s10980-016-0357-y>
- Toloşi, L., & Lengauer, T. (2011). Classification with correlated features: Unreliability of feature ranking and solutions. *Bioinformatics*, 27(14), 1986–1994. <https://doi.org/10.1093/bioinformatics/btr300>
- Tucker, C. J. (1979). Red and Photographic Infrared Linear Combinations for Monitoring Vegetation. *Remote Sensing of Environment*, 8(2), 127–150.
- Turner, M. G. (1989). Landscape Ecology: The effect of pattern on process. *Annual Review of Ecology and Systematics*, 20, 171–197.
- Twilley, R. R., Rovai, A. S., & Riul, P. (2018). Coastal morphology explains global blue carbon distributions. *Frontiers in Ecology and the Environment*, (C), 1–6. <https://doi.org/10.1002/fee.1937>
- UNFCCC. (1992). *Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático: Documento del convenio marco* (p. 26). p. 26. United Nations Framework Convention on Climate Change.
- Vaglio, G., Balling, J., Corona, P., Mattioli, W., Papale, D., Puletti, N., ... Urban, M. (2018). Aboveground biomass prediction by Sentinel-1 multitemporal data in central Italy with integration of ALOS2 and Sentinel-2 data. *Journal of Applied Remote Sensing*, 12(1), 016008. <https://doi.org/10.1117/1.JRS.12.016008>.
- van Ardenne, L. B., Jolicouer, S., Bérubé, D., Burdick, D., & Chmura, G. L. (2018). The importance of geomorphic context for estimating the carbon stock of salt marshes. *Geoderma*, 330(October 2017), 264–275. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2018.06.003>
- Verstappen, H. T. (1983). *Applied geomorphology. Geomorphological Surveys for environmental development*. Ansterdanm Holand: Elsevier.
- Vicharnakorn, P., Shrestha, R., Nagai, M., Salam, A., & Kiratiprayoon, S. (2014). Carbon Stock Assessment Using Remote Sensing and Forest Inventory Data in Savannakhet, Lao PDR. *Remote Sensing*, 6(6), 5452–5479. <https://doi.org/10.3390/rs6065452>
- Viktorov, A. S. (1986). *La imagen del paisaje* (p. 179). p. 179. Moscú: Editorial Misl.
- Witten, D., Hastie, T., & Tibshirani, R. (2013). Tree-Based Methods. In *An Introduction to Statistical Learning with Applications in R* (p. 431 p.).
- Wolanski, E., Brinson, M. M., Cahoon, D. R., & Perillo, G. M. E. (2009). Coastal Wetlands : A Synthesis. In M. B. Gerardo M.E. Perillo, Eric Wolanski, Donald R. Cahoon (Ed.), *COASTAL WETLANDS: An Integrated Ecosystem Approach* (First edit, pp. 1–62). <https://doi.org/10.1016/B978-0-444->

53103-2.00001-6

- Yamazaki, D., Ikeshima, D., Tawatari, R., Yamaguchi, T., O'Loughlin, F., Neal, J. C., ... Bates, P. D. (2017). A high-accuracy map of global terrain elevations. *Geophysical Research Letters*, *44*(11), 5844–5853. <https://doi.org/10.1002/2017GL072874>
- Yerena-Yamallel, J. I., Jiménez-Pérez, J., Aguirre-Calderón, O. A., & Treviño-Garza, E. J. (2011). Concentración De Carbono En La Biomasa Aérea Del Matorral Espinoso Tamaulipeco. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales Y Del Ambiente*, *XVII*(2), 283–291. <https://doi.org/10.5154/r.rchscfa.2010.02.004>
- Zanne, A. E., Lopez-Gonzalez, G., Coomes, D. A., Llic, J., Jansen, S., Lewis, S. L., ... Chave, J. (2009). *Global Wood Density Database*. Retrieved from <http://hdl.handle.net/10255/dryad.235>
- Zhi, J., Jing, C., Lin, S., Zhang, C., Liu, Q., DeGloria, S. D., & Wu, J. (2014). Estimating soil organic carbon stocks and spatial patterns with statistical and GIS-based methods. *PLoS ONE*, *9*(5), 30–33. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0097757>

ANEXOS

Anexo 1. Artículo Mapa de paisajes publicado en “terra digitalis”.

http://terradigitalis.igg.unam.mx/html/ojs3/index.php/terra_digitalis/article/view/41.

Received: 20 Oct. 2017, Accepted: 27 Mar. 2018

Published online: 30 Apr. 2018

DOI: 10.22201/igg.terradigitalis.2018.1.41.92

Volume: 2, Issue: 1, Pages: 1-6



Paisajes físico-geográficos de humedales costeros continentales en dos áreas naturales protegidas del Golfo de México[☆]

Physical-geographic landscapes of two protected natural areas of coastal wetlands of the Gulf of Mexico

Carlos Troche^{a,b}, Ángel Guadalupe Priego-Santander^{a*}, Manuel Bollo Manent^a, Rainer Ressler^b

^aCentro de Investigaciones en Geografía Ambiental (CIGA), Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), Campus Morelia, Antigua Carretera a Pátzcuaro No. 8701, Ex-hacienda de San José de La Huerta, C.P. 58190, Morelia Michoacán, México

^bComisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO), Av. Liga Periférico-Insurgentes Sur 4903, Col. Parques del Pedregal, Del. Tlalpan, C.P. 14010, Ciudad de México, Mexico

Resumen

Los humedales costeros de Pantanos de Centla y Laguna de Términos en el Golfo de México, constituyen parte del complejo ecológico de la planicie costera más importante de Mesoamérica por su productividad natural. El objetivo del presente trabajo es el de clasificar y cartografiar, a escala 1:250 000, los paisajes naturales de estos humedales a partir del análisis de los componentes naturales del territorio. El enfoque utilizado para esta aproximación es el de la geografía física compleja que permite un arreglo tipológico y clasificación jerárquica del territorio. El mapa resultante presenta la distribución espacial de los paisajes físico-geográficos de la parte terrestre de la Reserva de la Biósfera Pantanos de Centla, del Área de Protección de Flora y Fauna Laguna de Términos y el sitio prioritario de manglar Sabancuy-Chen Kan de la Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO). La falta de cartografía precisa de los componentes naturales del territorio condicionó a un extenso trabajo de campo. En el área se definieron geocomplejos a nivel de Localidades, Parajes complejos y Parajes simples. En el territorio existe un predominio de los geocomplejos de planicies fluvio-biógenas. Los resultados son importantes para estudios de ordenamiento territorial y evaluaciones de servicios ecosistémicos.

Palabras clave: Paisaje; Ecosistemas costeros; Humedales; Pantanos de Centla; Laguna de Términos; México

Abstract

Due to their natural productivity, the coastal wetlands of “Pantanos de Centla” and “Laguna de Términos”, in the Gulf of Mexico, form part of the ecological complex of the most important coastal plain of Mesoamerica. The objective of this work is to classify and map, at 1: 250 000 scale, the natural landscapes of these wetlands applying analysis of the natural components of the territory. The approach is based on an approximation of the complex physical geography that allows a typological arrangement and hierarchical classification of the territory. The resulting map presents the spatial distribution of the physical-geographic landscapes of the terrestrial parts of the “Pantanos de Centla Biosphere Reserve”, the “Laguna de Términos Flora and Fauna Protection Area” and the priority site of the National Commission for the Knowledge and Use of Biodiversity (CONABIO) “Sabancuy-Chen Kan”. The lack of precise cartography of the natural components of the territory conditioned an extensive field work. In the area, geo-complexes were defined at the level of landscape, land area and sub-land area. As a result, we found, that in the territory there is a predominance of the geo-complexes of fluvio-biogenic plains. The results are important for land use studies and ecosystem service assessments.

Keywords: Landscape; Coastal ecosystems; Wetlands; Pantanos de Centla; Laguna de Términos; Mexico

1. Introducción

En las últimas décadas se ha retomado la idea de que la delimitación de los espacios naturales en unidades homogéneas debe realizarse de manera holística. De esta forma se podrían entender mejor las propiedades, funciones y condiciones que estos sistemas presentan. También se podrían evaluar e identificar muchos de los servicios ambientales que estos brindan al ser humano (Priego-Santander et al., 2003; Termorshuizen & Opdam, 2009). La ecología del paisaje, con sus diferentes escuelas, pretende ser ese instrumento integrador que permite, a partir de un enfoque interdisciplinario, la solución al enfrentarse a la heterogeneidad espacial de los paisajes. Una de las escuelas más antiguas, que es la Geografía Física Compleja o Geografía del Paisaje, basada en contribuciones de V.V. Dokuchaev y A. Humbolt (Mateo, 2002), tiene como metas principales el conocimiento de la génesis y estructura para la comprensión de la evolución y dinámica de los paisajes (Bocco et al., 2010). A partir de este enfoque, el arreglo geográfico de los paisajes está constituido por una tipología que permite clasificarlos por niveles jerárquicos, relacionados entre sí por parámetros o variables descriptivas esenciales de los paisajes (Priego-Santander et al., 2010).

Esta tipificación del paisaje, que permite la delimitación de unidades espaciales homogéneas, es útil para realizar diferentes tipos de análisis en el territorio. Muchos estudios utilizan este tipo de caracterización territorial para la planificación y manejo del paisaje (Palacio, 2006), predicción y relación con la biodiversidad (Priego-Santander et al., 2013), evaluaciones de degradación de los ambientes naturales (Mathews, 2008), entre otros. Los paisajes costeros, al constituirse en zonas terminales de las cuencas hidrográficas y encontrarse en zonas de transición entre la parte terrestre y marina, presentan una dinámica muy particular en comparación con otros ambientes. Es importante mencionar que para la evaluación de muchos procesos costeros es necesario, no solamente la delimitación espacial de unidades terrestres o marinas, sino también la definición de fronteras y delineación de unidades donde interactúan los componentes del ambiente costero (Palacio, 2006). En estos paisajes, generalmente planos, la parte hidrológica expresada en la periodicidad de inundación, se vuelve un factor de diferenciación ecológica muy importante (Priego-Santander et al., 2010). La región que comprende las áreas naturales protegidas de Pantanos de Centla y Laguna de Términos es de especial interés, desde el punto de vista físico-geográfico, por sus procesos costeros y la particularidad de sus sedimentos debido a dos causas principales: a) los procesos y tipos de sedimentación costera y; b) la

transición existente entre la plataforma de la Península de Yucatán, que aporta sedimentos de tipo carbonatado y la región de los ríos Grijalva-Usumacinta, Candelaria, Palizada, entre otros, que aportan con sus sedimentos de tipo fluvio-terrestres (de distinta composición químico-mineralógica) a estos humedales costeros (Yáñez-Correa, 1971).

Como menciona Palacio (2006), en su estudio del paisaje costero de Laguna de Términos, existe una transformación constante de las fronteras de las unidades debido a la fluctuación rítmica de los niveles de marea, los regímenes de oleaje, corrientes de deriva litoral, así como las modificaciones en los aportes y distribución sedimentaria. Esto, aunado a los cambios y modificaciones en las coberturas naturales, nos indica que la actualización de los límites de las unidades de paisaje en estos ambientes es necesaria como base para cualquier tipo de evaluación.

El presente estudio tiene como objetivo el conocimiento de la distribución espacial y heterogeneidad físico-geográfica actual de una parte del complejo de humedales costeros más importante de Mesoamérica, presente en el Golfo de México, desde el punto de vista de biodiversidad, productividad y descarga de agua dulce y sedimentos. Este trabajo se realizó utilizando los límites de la Reserva de la Biosfera Pantanos de Centla (RBPC), el Área de Protección de Flora y Fauna Laguna de Términos (APFFLT) y el sitio prioritario de manglar "Sabancuy-Chen Kan" de la Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la biodiversidad (PY75-CONABIO) a una escala de 1:250 000 (ver Lámina 1).

La originalidad de esta investigación consiste en que, por vez primera, se logra el levantamiento, clasificación y cartografía de paisajes en humedales costeros tropicales de México a escala 1:250 000. El valor teórico del trabajo radica en el aporte de la taxonomía de ecosistemas a nivel geográfico para el área de estudio, pero su importancia práctica puede ser mucho mayor, pues se aportan las bases biofísicas para los procesos de ordenamiento ecológico del territorio y evaluaciones de servicios ecosistémicos.

2. Métodos

2.1. Área de estudio

El área de estudio se encuentra entre 17.96° y 19.33° de latitud norte y 92.80° y 90.72° de longitud oeste. Comprende la parte continental terrestre de la RBPC, APFFLT y el sitio prioritario PY75-CONABIO (CONABIO, 2009; CONANP, 2016). La parte marina y cuerpos de agua, no fueron clasificados tipológicamente debido a que el mapa de paisajes físico-geográficos fue elaborado para la evaluación de almacenes fijos de carbono de diferentes tipos de humedales en estos ecosistemas costeros. En total el área cartografiada y clasificada tipológicamente abarca una superficie de 9,050.6 km², situados entre los estados de Tabasco y Campeche, México.

El clima costero de esta región es de tipo cálido sub-húmedo con lluvias en verano (García-CONABIO, 1998). La precipitación media anual va de 1,686 mm a 2,399 mm, la temperatura

*© C. Troche, A. G. Priego-Santander, M. Bollo Manent, Rainer Ressler. Published by Terra Digitalis.

This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>), which permits non-commercial sharing of the work and adaptations, provided the original work is properly cited and the new creations are licensed under identical terms.

*E-mail address: apriego@ciga.unam.mx

media anual oscila entre 21.7 y 24.7 °C. Estos humedales costeros se caracterizan por presentar mayoritariamente planicies y suelos de drenaje deficiente tipo Gleysol, Fluvisol y Solonchak. En la cobertura vegetal encontramos comunidades de hidrófitas (*Typha dominguensis*, *Cladium jamaicense*, *Cyperus sp.*, *Pistia stratiotes*, *Pontederia sagittata*, *Phyllanthus fluitans*, *Nymphaea sp.*), pastos (*Spartina spartinae*, *Muhlenbergia sp.*), selvas bajas, selvas medianas subperennifolias de inundación periódica (*Manilkara zapota*, *Bursera sp.*), vegetación riparia (*Pachira aquatica*, *Bucida buceras*), manglares (*Rhizophora mangle*, *Languncularia racemosa*, *Avicennia germinans* y *Conocarpus erectus*), matorral de mucal (*Mimosa pigra*) y algunos palmares inundables (*Sabal mexicana*) (INEGI, 2014; Lot, 2015).

2.2. Mapeo de paisajes

La delimitación y mapeo de las unidades tipológicas de paisaje se basaron en la definición de una estructura jerárquica con cuatro niveles taxonómicos (Tabla 1), fundamentada en los postulados de la Geografía Física Compleja, referidos por Mateo (2002), adaptados y usados ampliamente en el contexto geográfico mexicano (Priego et al., 2016; Morales et al., 2017).

Tabla 1: Definición y criterios de las unidades taxonómicas
Table 1. Taxonomic units definition and criteria

Nivel taxonómico	Índices diagnóstico
Clase	Conjunto de morfo-estructuras con tipo específico de relieve en una misma condición climática.
Localidad	Comunidad territorial de igual tipo morfogenético de relieve. Presenta similar homogeneidad litológica o tipo de depósitos.
Paraje Complejo	Asociaciones del mismo conjunto morfológico de mesoformas del relieve. Predominio de iguales agrupamientos de suelos y similar conjunto de formaciones vegetales y tipos de suelo.
Paraje Simple	Misma periodicidad de inundación con mismo tipo de comunidades vegetales y similares grupos y sub-grupos de suelo.

La elaboración del mapa de los paisajes físico-geográficos del área de estudio a escala 1: 250 000, siguió la propuesta de generación de unidades de paisajes, de manera semi-automatizada de Priego et al. (2010), con algunas modificaciones de acuerdo a las características del área de estudio. Los insumos cartográficos utilizados para realización del mapa de paisajes fueron los siguientes:

- Mapas topográficos digitales de Campeche y Tabasco a escala 1:50 000 (INEGI, 2016).
- Mapa digital de los climas de México a escala 1:1 000 000 (García-CONABIO, 1998).

- Mapas geológicos digitales de Campeche y Tabasco a escala 1:250 000 (INEGI, 1981; SGM, 2004, 2005)
- Mapa digital edafológico de México a escala 1:250 000 (INEGI, 2013)
- Mapa de uso de suelo y vegetación de la zona costera a escala 1:50 000 (CONABIO, 2016)
- Mapa digital de áreas de inundación de la Laguna de Términos a escala 1:250 000 (EPOMEX-IG/UNAM-CONABIO, 2000)

Cada mapa fue homogenizado para que su extensión y límites coincidieran entre sí, utilizando como marco de referencia el mapa de uso de suelo y vegetación de la zona costera de la CONABIO (2016). Las etapas para determinar cada nivel taxonómico, según la definición y criterios descritos en la Tabla 1, fueron las siguientes:

1. Nivel Taxonómico: Clase.

A partir de las curvas de nivel, se generó el modelo digital de elevación con el cual se determinó que morfológicamente el área de estudio se encuentra en planicies costeras sub-horizontales, según su disección vertical ($Dv \leq 2.5m/km^2$). Posteriormente se realizó la definición climática de estas planicies con la sobreposición de tipos de clima, cuyo resultado fue de planicies en clima cálido para toda el área. En este punto de la integración del tipo de clima, es necesario realizar las siguientes consideraciones según las premisas de Priego et al. (2010): a) Aunque el mapa de clima presenta una escala de 1: 1 000 000, fue utilizado para este producto de 1:250 000, ya que es la única fuente oficial de climas en el país; b) el clima posee una distribución continua y en la naturaleza la diferenciación entre tipos de clima se realiza de una forma gradual y continua. En excepciones los cambios son abruptos; c) Los tipos de clima ocupan extensas áreas, lo que reduce los errores que se pueden cometer al ampliar un mapa 1:1 000 000 a escalas mayores; d) el área de estudio comprende un solo tipo climático (cálido húmedo), lo que facilita la determinación de esta clase.

2. Nivel Taxonómico: Localidad.

La base de este nivel taxonómico estuvo centrada en la determinación de la composición litológica de estas planicies, a partir de la sobreposición de los mapas geológicos del Servicio Geológico Mexicano (SGM) y del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). Se determinaron los tipos litológicos consistentes con la zona y se eliminaron todos los polígonos que no cumplieran con el área mínima cartografiable (1 km²). El trabajo de campo para validación y/o corrección de las unidades superiores del mapa y la leyenda, así como la obtención de

información de vegetación y periodicidad de inundación, fueron útiles y muy importantes para la conformación de las unidades intermedias e inferiores.

3. Nivel Taxonómico: Paraje complejo.

Al resultado anterior, se sobrepuso cartográficamente el mapa de uso de suelo y vegetación y posteriormente el mapa edafológico, teniendo como resultado la integración de estas dos capas (vegetación y suelos). De esta manera se generaron las unidades intermedias de paisajes o nivel de Paraje complejo. Posteriormente, se realizó la generalización conceptual y espacial del producto (aplicación del área mínima cartografiable de 1 km²) y se determinó el grupo de vegetación presente en cada unidad de paisaje.

4. Nivel Taxonómico: Paraje simple.

Para este nivel, las unidades se desagregaron por tipo de vegetación y periodicidad de inundación, obtenida a partir de datos de campo, vegetación y mapas de inundación del área de estudio. Como mencionan Priego et al. (2010), la periodicidad de inundación es un factor ecológico importante de diferenciación. Estas unidades, según su periodicidad, pueden llegar a ser muy dependientes de la interacción con los usos del territorio adyacente y el gradiente de inundación puede permitir el establecimiento de un continuo entre sistemas lago-humedal-tierra. Por lo anterior, se aplicó la clasificación basada en el periodo de meses en que el suelo está saturado en agua.

Para la representación cartográfica se empleó el método del fondo cualitativo para las Localidades (Lámina 1. La leyenda ampliada puede consultarse en la sección: Material suplementario) y símbolos numéricos para los Parajes simples. Los Parajes complejos se representan indirectamente, a través de sus unidades inferiores.

3. Conclusiones

Este estudio presenta una metodología para la identificación espacial de unidades naturales del paisaje en humedales costeros, en el que la génesis del relieve y la periodicidad de inundación son criterios importantes en la diferenciación de unidades inferiores.

Como limitaciones de la investigación, se puede señalar la falta de información cartográfica precisa sobre los componentes naturales del territorio, lo cual condicionó un intenso trabajo de campo. Esta falta de información precisa, parece ser una peculiaridad de los humedales costeros en gran parte del territorio nacional.

En áreas tan extensas de humedales costeros, el trabajo de campo se convierte en algo fundamental para eliminar incon-

gruencias cartográficas encontradas al momento de la integración de los diferentes atributos del territorio. Por otro lado, también sirve para la verificación y validación de la hipótesis cartográfica realizada.

En el área de estudio se pudieron identificar tres niveles taxonómicos de nivel local; i) 6 localidades; ii) 11 parajes complejos y iii) 61 parajes simples.

Las planicies fluvio-biógenas acumulativas presentan el mayor porcentaje de superficie con 48 % del total del área de estudio. Le siguen las planicies fluviales acumulativas con 25 %, las planicies marino-terrágenas acumulativas con 11 %, las planicies marino-eólicas acumulativas con 7 %, las planicies fluvio-tectónicas con 5 % y las planicies acumulativas con 4 %. De las dos áreas naturales protegidas, la Reserva de la Biósfera Pantanos de Centla presenta tres Localidades con fuerte predominio de la dinámica fluvial. El 58 % de esta reserva presenta planicies fluvio-tectónicas acumulativas, formadas por depósitos aluviales y calizas en clima cálido húmedo. Posteriormente, se encuentran las planicies fluviales acumulativas, formadas por depósitos aluviales en clima cálido húmedo con 36 % y el restante 6 % se compone de planicies tectónicas abrasivo-acumulativas, formadas por calizas en clima cálido húmedo.

En el Área de Protección de Flora y Fauna Laguna de Términos se encuentran representadas 5 localidades. Al igual que en Pantanos de Centla, las planicies fluvio-biógenas acumulativas y las planicies fluviales se encuentran ampliamente distribuidas con 61 % y 11 % respectivamente. Las planicies marino-eólicas se encuentran en 9 % del territorio. Finalmente, el entendimiento de la composición y estructura físico-geográfica del área de Pantanos de Centla y Laguna de Términos, así como la comprensión de su heterogeneidad podrá ayudar a realizar evaluaciones espaciales integrales. Estas evaluaciones son útiles para sentar las bases biofísicas en procesos de ordenamiento ecológico del territorio, así como evaluaciones de diferentes tipos de servicios que estos ecosistemas nos brindan.

4. Software

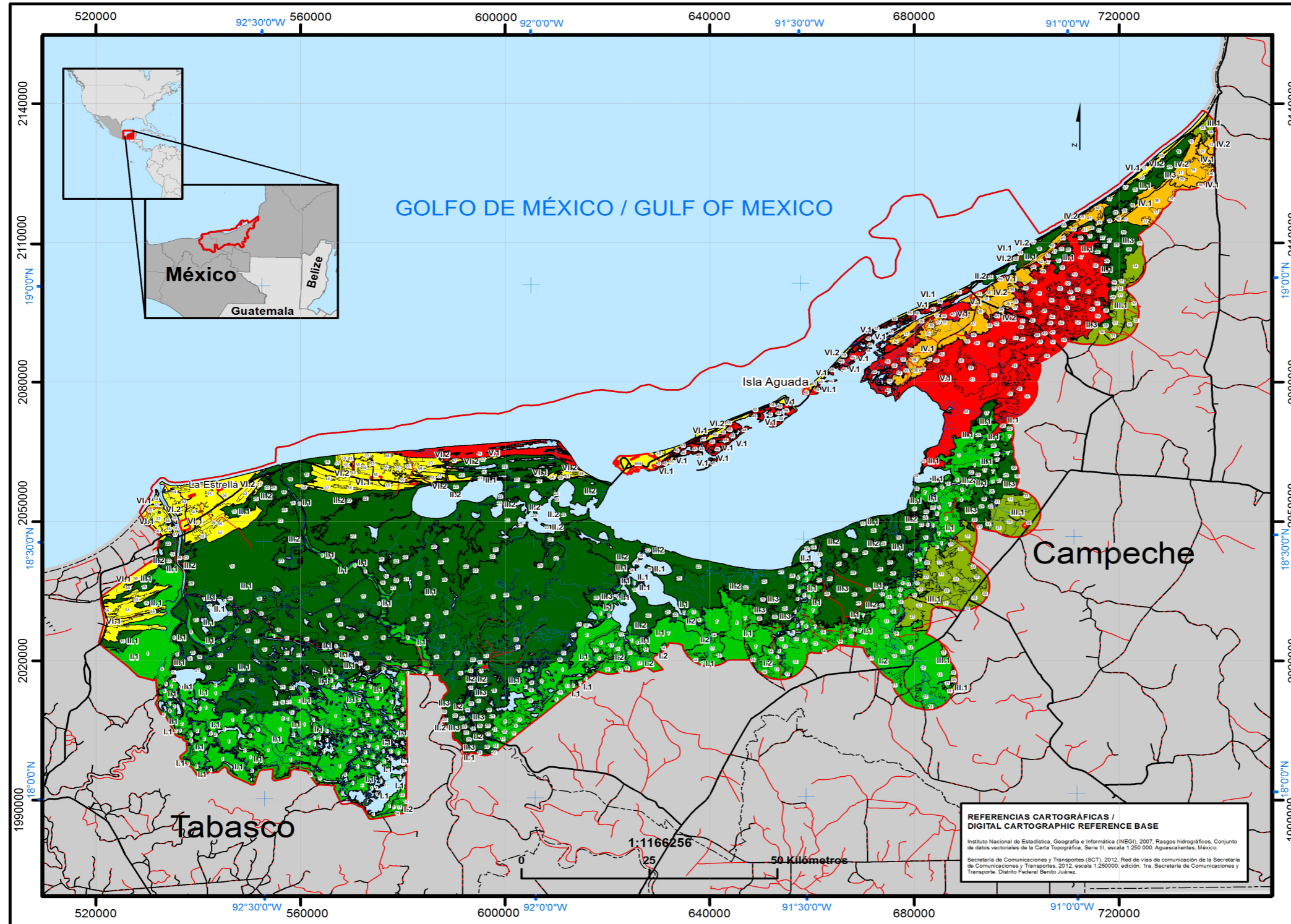
La integración, generalización y composición del mapa se llevó a cabo usando Esri ArcGis 10.3.1. Los metadatos se pueden consultar en la sección: Material suplementario.

Agradecimientos

Este estudio fue financiado por la Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO), así como el posgrado de Geografía de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM). Queremos agradecer en particular al Dr. José Sarukhán por el apoyo incondicional del fortalecimiento de capacidades institucionales. También agradecemos a la sub-coordinación de Percepción Remota de la CONABIO por el uso de sus instalaciones. A la Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas (CONANP) por el apoyo en campo y logístico brindado en la Reserva de la Biósfera Pantanos de Centla y Reserva de Flora y Fauna Laguna de Términos.

PAISAJES FÍSICO-GEOGRÁFICOS DE HUMEDALES COSTEROS CONTINENTALES EN DOS ÁREAS NATURALES PROTEGIDAS DEL GOLFO DE MÉXICO, MÉXICO 1:250 000 /
 PHYSICAL-GEOGRAPHIC LANDSCAPES OF TWO PROTECTED NATURAL AREAS OF COASTAL WETLANDS OF THE GULF OF MEXICO, MEXICO 1:250 000

Autores /Autors : Troche, C.^(1,2), Priego-Santander, A. G.⁽²⁾, Bollo Manent, M.⁽²⁾, Ressi, R.⁽¹⁾
⁽¹⁾Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO)
⁽²⁾Centro de Investigaciones en Geografía Ambiental (CIGA), Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM)



LEYENDA*

Clase	Localidad	Paraje complejo	Paraje simple
A. Planicies en clima cálido	I	I.1. Complejo de superficies con humedales herbáceos, manglares, marismas y agricultura sobre el nivel del mar.	Superficie permanentemente inundada, con humedales herbáceos de alta productividad sobre el nivel del mar, vegetación de manglar y agricultura.
		I.2. Complejo de superficies con humedales herbáceos, manglares, marismas y agricultura sobre el nivel del mar.	Superficie estacionalmente inundada, con humedales herbáceos de alta productividad sobre el nivel del mar, vegetación de manglar y agricultura.
	II	II.1. Complejo de superficies con humedales herbáceos, manglares, marismas y agricultura sobre el nivel del mar.	Superficie permanentemente inundada, con humedales herbáceos de alta productividad sobre el nivel del mar, vegetación de manglar y agricultura.
		II.2. Complejo de superficies con humedales herbáceos, manglares, marismas y agricultura sobre el nivel del mar.	Superficie estacionalmente inundada, con humedales herbáceos de alta productividad sobre el nivel del mar, vegetación de manglar y agricultura.
	III	III.1. Complejo de superficies con humedales herbáceos, manglares, marismas y agricultura sobre el nivel del mar.	Superficie permanentemente inundada, con humedales herbáceos de alta productividad sobre el nivel del mar, vegetación de manglar y agricultura.
		III.2. Complejo de superficies con humedales herbáceos, manglares, marismas y agricultura sobre el nivel del mar.	Superficie estacionalmente inundada, con humedales herbáceos de alta productividad sobre el nivel del mar, vegetación de manglar y agricultura.
IV	IV.1. Complejo de superficies con humedales herbáceos, manglares, marismas y agricultura sobre el nivel del mar.	Superficie permanentemente inundada, con humedales herbáceos de alta productividad sobre el nivel del mar, vegetación de manglar y agricultura.	
	IV.2. Complejo de superficies con humedales herbáceos, manglares, marismas y agricultura sobre el nivel del mar.	Superficie estacionalmente inundada, con humedales herbáceos de alta productividad sobre el nivel del mar, vegetación de manglar y agricultura.	

LEYENDA*

Class	Landscape	Taxonomic level	Sub-land area
A. Coastal floodplains in tropical humid warm climate	I	I.1. Complex surface with herbaceous wetlands, mangroves, marshes and agriculture on the level of the sea.	Permanently flooded surface with herbaceous wetlands of southern origin (Panicum aduncum) on the level of the sea, mangroves, marshes and agriculture on the level of the sea.
		I.2. Complex surface with herbaceous wetlands, mangroves, marshes and agriculture on the level of the sea.	Seasonally flooded surface with mixed herbaceous wetlands of southern origin (Panicum aduncum) on the level of the sea, mangroves, marshes and agriculture on the level of the sea.
	II	II.1. Complex surface with herbaceous wetlands, mangroves, marshes and agriculture on the level of the sea.	Permanently flooded surface with mixed grassland wetlands on the level of the sea, mangroves, marshes and agriculture on the level of the sea.
		II.2. Complex surface with herbaceous wetlands, mangroves, marshes and agriculture on the level of the sea.	Seasonally flooded surface with mixed grassland wetlands on the level of the sea, mangroves, marshes and agriculture on the level of the sea.
	III	III.1. Complex surface with herbaceous wetlands, mangroves, marshes and agriculture on the level of the sea.	Permanently flooded surface with mixed grassland wetlands on the level of the sea, mangroves, marshes and agriculture on the level of the sea.
		III.2. Complex surface with herbaceous wetlands, mangroves, marshes and agriculture on the level of the sea.	Seasonally flooded surface with mixed grassland wetlands on the level of the sea, mangroves, marshes and agriculture on the level of the sea.
IV	IV.1. Complex surface with herbaceous wetlands, mangroves, marshes and agriculture on the level of the sea.	Permanently flooded surface with mixed grassland wetlands on the level of the sea, mangroves, marshes and agriculture on the level of the sea.	
	IV.2. Complex surface with herbaceous wetlands, mangroves, marshes and agriculture on the level of the sea.	Seasonally flooded surface with mixed grassland wetlands on the level of the sea, mangroves, marshes and agriculture on the level of the sea.	

SÍMBOLOS CONVENCIONALES

Área de estudio	Área de interés
POBLACIONES Con más de 50,000 habitantes De 10,001 a 50,000 habitantes De 5,001 a 10,000 habitantes De 1,001 a 5,000 habitantes Zona Urbana	POBLACIONES Over 50,000 people 10,001 to 50,000 people 5,001 to 10,000 people 1,001 to 5,000 people City
VÍAS TERRESTRES Carretera federal Carretera estatal Otros caminos	ROADS Federal Highway State Highway Secondary roads
RASBOS HIDROGRÁFICOS Río principal Lago o Laguna	RIVERS AND LAKES Principal river Lake
PARÁMETROS CARTOGRÁFICOS / CARTOGRAPHIC PARAMETERS Proyección/Projection Datum	UTM WGS84 Epsw: / Epswid WGS84

Lámina 1: Mapa de los paisajes físico-geográficos de humedales costeros continentales en dos áreas naturales protegidas del Golfo de México.
 Plate 1: Map of the physical-geographic landscapes of two protected natural areas of coastal wetlands of the Gulf of Mexico

Referencias

- Bocco, G., Mendoza, M., Priego, A., Burgos, A., 2010. La cartografía de los sistemas naturales como base geográfica para la planeación territorial: Una revisión bibliográfica. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, Instituto Nacional de Ecología, Universidad Nacional Autónoma de México, Centro de Investigaciones en Geografía Ambiental. México. 72 pp.
- Centro EPOMEX, Instituto de Geografía-UNAM, CONABIO, 2000. Áreas de inundación de la Laguna de Términos, Campeche: Extraído del proyecto N011, Actualización del Mapa de Uso del Suelo, Vegetación y Hábitats Críticos y Elaboración de una Base Cartográfica Digital del Área Protegida de la Laguna de Términos. Escala 1:250 000. Centro EPOMEX, Instituto de Geografía-UNAM, CONABIO. México. D.F.
- Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas (CONANP), 2016. Áreas Naturales Protegidas Federales de la República Mexicana, (en línea), <<http://sig.conanp.gob.mx/websit/pagsig/>>, consulta: 18 de agosto de 2017.
- Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO), 2009. Sitios de manglar con relevancia biológica y con necesidades de rehabilitación ecológica, (en línea), <<http://www.conabio.gob.mx/informacion/gis/>>, consulta: 6 de octubre de 2017.
- Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO), 2016. Mapa de uso del suelo y vegetación de la zona costera asociada a los manglares de México en 2015, escala: 1:50 000: (en línea), <<http://www.conabio.gob.mx/informacion/gis/>>, consulta: 16 de diciembre de 2016.
- García, E., Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO), 1998. Climas (clasificación de Köppen, modificado por García). Escala 1:1 000 000. México.
- Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Información (INEGI), 1981. Conjunto de Datos Geológicos Vectoriales, cartas E1503, E1505, E1506, E1508 a Escala 1:250000. Serie I, Aguascalientes, Ags., México, (en línea), <<http://www.inegi.org.mx/geo/contenidos/reclnat/geologia/Default.aspx>>, consulta: 8 de junio, 2016.
- Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Información (INEGI), 2013. Conjunto de Datos Vectorial Edafológico, cartas E1503, E1505, E1506, E1508 a Escala 1:250000, Serie II, Aguascalientes, México, (en línea), <<http://www.inegi.org.mx/geo/contenidos/reclnat/edafologia/Default.aspx>>, consulta: 14 de julio, 2016.
- Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Información (INEGI), 2014. Guía para la interpretación de cartografía: uso del suelo y vegetación: escala 1:250 000: serie V / Instituto Nacional de Estadística y Geografía. México, (en línea), <<http://www.inegi.org.mx/geo/contenidos/reclnat/default.aspx>>, consulta: 03 de octubre, 2017.
- Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Información (INEGI), 2016. Conjunto de Datos Vectoriales de información topográfica, cartas E15B37, E15B46, E15B47, E15B55, E15B56, E15B57, E15B61, E15B62, E15B64, E15B65, E15B71, E15B72, E15B73, E15B74, E15B75, E15B76, E15B81, E15B82, E15B83, E15B84, E15B85, E15B86, E15D12, E15D13 a Escala 1:50 000, Serie III, Aguascalientes, México, (en línea), <<http://www.inegi.org.mx/geo/contenidos/topografia/default.aspx>> consulta: 10 de octubre, 2016.
- Lot, A., 2015. Catálogo de la flora y vegetación de los humedales mexicanos. Universidad Nacional Autónoma de México, México D.F., 172 pp.
- Mateo, J., 2002. Geoeología de los Paisajes: Bases para la Planificación y Gestión Ambiental. Universidad de La Habana, MES, Cuba, 205 pp.
- Mathews, J., 2008. Evaluación de la modificación edafo-biógena de los Paisajes de la Región Sierra-Costa de Michoacán, México. Tesis de maestría en Geografía. Universidad Nacional Autónoma de México, Morelia-Michoacán, 64 pp.
- Morales, H., Priego-Santander, A., Bollo, M., 2017. Los paisajes físico-geográficos del estado de Chiapas, México a escala 1:250 000. Terra Digitalis 1(1), 1–7, doi:10.22201/igg.terradigitalis.2017.1.8.71.
- Palacio, A. G., 2006. Ecología del Paisaje costero en Laguna de Términos, Campeche. Diagnóstico Ambiental para el Manejo. Tesis doctoral. Universidad Nacional Autónoma de México, México, D.F., 136 pp.
- Priego-Santander, A. G., Bocco, G., Mendoza, M., Garrido, A., 2010. Propuesta para la Generación Semiautomatizada de Unidades de Paisaje. Fundamentos y Métodos. Serie Planificación Territorial, Semarnat-INE-CIGA, 104 pp.
- Priego-Santander, A. G., Bocco-Verdinelli, G., 2016. Paisajes Naturales. En Moncada-Moya, O. y López-López, A. (Coordinadores): Geografía de México. Una reflexión espacial contemporánea, Tomo I. Universidad Nacional Autónoma de México, 375 p.
- Priego-Santander, A. G., Campos, M., Bocco, G., Ramírez-Sánchez, L. G., 2013. Relationship between landscape heterogeneity and plant species richness in the Mexican Pacific coast. Applied Geography 40, 171–178.
- Priego-Santander, A. G., Moreno-Casadola, P., Palacio-Prieto, J. L., López-Portillo, J., Geissert-Kientz, D., 2003. Relación entre la heterogeneidad del paisaje y la riqueza de especies de flora en cuencas costeras del estado de Veracruz, México. Investigaciones Geográficas 52, 31–52.
- Servicio Geológico Mexicano (SGM), 2004. Carta Geológica-Minera Frontera E15-5, Tabasco, Campeche., Esc. 1:250,000. Serie I. Pachuca, Hidalgo, México.
- Servicio Geológico Mexicano (SGM), 2005. Carta Geológica-Minera Ciudad del Carmen E15-6, Campeche E15-3, Villahermosa E15-8, Esc. 1:250,000. Serie I, Pachuca, Hidalgo, México.
- Termorshuizen, J., Opdam, P., 2009. Landscape services as a bridge between landscape ecology and sustainable development. Landscape Ecology 24, 1037–1052, doi:10.1007/s10980-008-9314-8.
- Yañez-Correa, A., 1971. Procesos costeros y sedimentos recientes de la plataforma continental al sur de la Bahía de Campeche. Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana 32 (2), 75–115.

This article accompanies the following material:

- HTML: DOI: 10.22201/igg.terradigitalis.2018.1.41.87
 Static map: DOI: 10.22201/igg.terradigitalis.2018.1.41.88
 Interactive map: DOI: 10.22201/igg.terradigitalis.2018.1.41.89
 Supplementary Material 1: DOI: 10.22201/igg.terradigitalis.2018.1.41.90
 Supplementary Material 2: DOI: 10.22201/igg.terradigitalis.2018.1.41.91

Anexo 2. Leyenda Mapa de los Paisajes Físico-Geográficos de ecosistemas costeros tropicales en el Golfo de México a escala 1:250 000.

A- Planicies en Clima Cálido.



I- Planicies fluviales acumulativas, formadas por depósitos aluviales en clima cálido húmedo.

I.1- Complejo de superficies con humedales herbáceos y arbustivos, manglares, selvas y agricultura sobre Gleysol, Fluvisol, Vertisol e Histosol.

- 1- Superficie permanentemente inundada, con humedales herbáceos de tule (*Typha dominguensis*) sobre Fluvisol móllico, Histosol húmico y Gleysol éútrico.
- 2- Superficie permanentemente inundada, con humedales herbáceos mixtos de tulares-popales sobre Gleysoles; húmico y éútrico y Fluvisol gléyico.
- 3- Superficie permanentemente inundada, con humedales herbáceos mixtos de pastizales, sobre Gleysoles; húmico, hiposálico-calcárico e hiposódico-arénico y Fluvisol gléyico.
- 4- Superficie permanentemente inundada, con humedales arbustivos de *Mimosa pigra* sobre Gleysoles; húmico y éútrico y Fluvisol gléyico.
- 5- Superficie permanentemente inundada, con bosque de manglar mixto (*Rhizophora mangle* y *Laguncularia racemosa*) sobre Gleysoles; hístico y éútrico e Histosol fluvi-húmico.
- 6- Superficie permanentemente inundada, con selva de galería y mangle sobre fluvisol móllico y Gleysol éútrico.
- 7- Superficie estacionalmente inundada, con selva subperennifolia sobre Fluvisoles; gléyico y gléyico-móllico y Gleysoles; sódico, vértico y éútrico.
- 8- Superficie estacionalmente inundada, con cultivos agrícolas sobre Fluvisol éútrico y Gleysol éútrico.

I.2- Complejo de superficies con humedales herbáceos, manglares, selvas y agricultura sobre Vertisol, Gleysol, Fluvisol, Phaeozem y Regosol.

- 9- Superficie estacionalmente inundada, con humedales herbáceos de tule (*Typha dominguensis*) sobre Vertisol másico-epigléyico, Gleysol vértico y Fluvisol gléyico.
- 10- Superficie estacionalmente inundada, con humedales herbáceos mixtos (tulares-popales) sobre Vertisol másico, Gleysoles; vértico y móllico.
- 11- Superficie estacionalmente inundada, con humedales herbáceos mixtos de pastizales, sobre Vertisol másico epigléyico, Gleysol vértico y Fluvisol gléyico.
- 12- Superficie estacionalmente inundada, con selva de galería sobre Vertisol pélico-epigléyico, Phaeozem húmico-gleyico y Gleysol sódico.
- 13- Superficie temporalmente inundada, con selva subperennifolia sobre Vertisoles; pélico-epigléyico y húmico-endogléyico y Phaeozem húmico-endogléyico.
- 14- Superficie temporalmente inundada, con cultivos agrícolas sobre Vertisol pélico-epigléyico, Regosol arénico-endogléyico y Gleysol arénico-plíntico.

II.1- Complejo de superficies con humedales herbáceos, manglares, selvas y agricultura sobre Gleysol, Fluvisol, Histosol, Vertisol y Arenosol.

- 15- Superficie permanentemente inundada, con humedales herbáceos de tule (*Typha dominguensis*) sobre Gleysoles; éútrico y móllico, Histosoles; fíbrico y húmico y Fluvisoles; gléyico y móllico.
- 16- Superficie permanentemente inundada, con humedales herbáceos mixtos (tulares-popales) sobre Gleysoles; móllico, éútrico e hiposálico y Fluvisol gléyico.
- 17- Superficie permanentemente inundada, con humedales herbáceos mixtos de pastizales sobre Gleysoles; húmico-calcárico, húmico-hiposódico y Vertisol gléyico.
- 18- Superficie estacionalmente y temporalmente inundada con bosque de manglar mixto sobre Gleysoles; hístico, éútrico y húmico-calcárico, Histosoles; sódico-sálico y fluvi-húmico y Arenosol éútrico.
- 19- Superficie permanentemente inundada, con selva de galería y bosque de manglar mixto sobre Fluvisol móllico y Gleysol éútrico.
- 20- Superficie estacionalmente inundada, con selva subperennifolia, sobre Gleysoles; hiposálico-calcárico, vértico-sódico y húmico-hiposódico y Vertisoles; epigléyico y húmico-endogléyico.
- 21- Superficie estacionalmente inundada, con cultivos agrícolas, sobre Gleysoles; éútrico, sódico y móllico, Vertisol éútrico y Fluvisol gléyico.

II.2- Complejo de superficies con humedales herbáceos, manglares, selvas y agricultura sobre Solonchak, Gleysol, Fluvisol y Arenosol.

- 22- Superficie estacionalmente inundada, con humedales herbáceos de tule (*Typha dominguensis*) sobre Gleysoles; móllico y éútrico y Fluvisol gléyico.
- 23- Superficie estacionalmente inundada, con manglar mixto (*Rhizophora mangle* y *Laguncularia racemosa*), sobre Solonchak gléyico-hiposódico, Gleysoles; éútrico y móllico y Fluvisol gléyico.
- 24- Superficie estacionalmente inundada mangle negro (*Avicennia germinans*) sobre Solonchak gléyico-hiposódico, Gleysoles; éútrico y móllico y Fluvisol gléyico.
- 25- Superficie estacionalmente inundada, con selva subperennifolia, sobre Solonchak gléyico-hiposódico, Gleysol hiposódico-arénico y Arenosol hiposódico.
- 26- Superficie temporalmente inundada, con cultivos agrícolas, sobre Gleysoles: éútrico e hiposódico, Solonchaks: epigléyico y sódico y Arenosol sódico.

II.3- Complejo de superficies con humedales herbáceos, manglares, selvas y agricultura sobre Vertisol, Gleysol, Solonchack y Phaeozem.

- 27- Superficie temporalmente inundada, con humedales herbáceos mixtos de pastizales sobre Vertisoles; epigléyico-epiléptico, Gleysol húmico-hiposódico y Solonchak epigléyico-hiposódico.
- 28- Superficie temporalmente inundada, con manglar mixto, sobre Vertisoles; epigléyico-epiléptico y sódico-gléyico y Gleysoles; húmico-sódico e hiposálico-calcárico.

- 29- Superficie temporalmente inundada, con selva subperennifolia, sobre Vertisoles; éútrico-mázico y sódico-gléyico y Gleysoles; húmico-sódico e hiposálico-calcárico.
- 30- Superficie temporalmente inundada, con cultivos agrícolas, sobre Vertisol epigléyico-epiléptico; Gleysol hiposálico-calcárico y Phaeozem calcárico.

III- Planicies fluvio-tectónicas acumulativas, formadas por depósitos aluviales y calizas en clima cálido húmedo.

III.1- Complejo de superficies con selvas y agricultura sobre Vertisol, Gleysol, Phaeozem y Regosol.

- 31- Superficie temporalmente inundada, con selva subperennifolia sobre Vertisoles; pélico-epigléyico y húmico-endogléyico y Phaeozem húmico-endogléyico.
- 32- Superficie ocasionalmente inundada, con selva subperennifolia sobre Vertisol calcárico-endogléyico, Gleysol húmico-léptico y Phaeozem calcárico-léptico.
- 33- Superficie temporalmente inundada, con cultivos agrícolas sobre Vertisol pélico-epigléyico, Regosol arénico-endogléyico y Gleysol arénico-plíntico.
- 34- Superficie ocasionalmente inundada, con cultivos agrícolas sobre Vertisoles; hiposálico-endogléyico y calcárico-epigléyico, Gleysoles; húmico e hiposálico y Phaeozems; húmico-léptico y calcárico-léptico.

IV- Planicies tectónicas, abrasivo-acumulativas, formadas por calizas en clima cálido húmedo.

IV.1- Complejo de superficies con selvas y agricultura sobre Vertisol, Leptosol, Phaeozem, Gleysol, Arenosol y Solonchak.

- 35- Superficie temporalmente inundada, con humedales de tule (*Typha dominguensis*) sobre Vertisol epigléyico-endoleptico, Gleysol hiposálico-epiléptico y Solonchak epigléyico-hipersódico.
- 36- Superficie temporalmente inundada, con selva subperennifolia, sobre Vertisoles; sódico-gléyico y húmico-calcárico, Leptosol rénzico-calcárico y Phaeozem humi-calcárico.
- 37- Superficie temporalmente inundada, con cultivos agrícolas, sobre Vertisoles; epigléyico-endoléptico, húmico-calcárico y sódico-gléyico, Gleysol húmico-hipersódico y Phaeozem gléyico-petrocálico.

IV.2- Complejo de superficies con humedales herbáceos, manglares, selvas y agricultura sobre Phaeozem, Arenosol, Leptosol, Gleysol y Regosol.

- 38- Superficie estacionalmente inundada, con manglar mixto, sobre Solonchak epigléyico-hiposódico, Arenosoles; sódico-sálico, hiposódico-calcárico y Gleysol sálico-calcárico.

- 39- Superficie ocasionalmente inundada, con humedales herbáceos mixtos de pastizales sobre Phaeozem hipoglético-endopetrocálcico, Regosol hipoglético-sódico y Leptosol húmico-réndzico.
- 40- Superficie ocasionalmente inundada, con manglar mixto sobre Phaeozems; hipoglético-sódico y húmico-léptico, Leptosol húmico-réndzico y Gleysol húmico-hipersódico.
- 41- Superficie ocasionalmente inundada, con selva subperennifolia sobre Phaeozems; hipoglético-endopetrocálcico y húmico-léptico y Leptosol húmico-réndzico.
- 42- Superficie ocasionalmente inundada, con cultivos agrícolas sobre Phaeozem hipoglético-endopetrocálcico y Leptosol; húmico-réndzico y húmico-lítico.

V-

Planicies marino-terrágenas acumulativas, formadas por depósitos marino-terrágenos en clima cálido húmedo.

V.1- Complejo de superficies con humedales herbáceos, manglares, selvas y agricultura sobre Vertisol, Solonchak, Arenosol, Gleysol e Histosol.

- 43- Superficie estacional y temporalmente inundada, con humedales herbáceos mixtos (*Typha dominguensis* y otros pastizales) sobre Gleysol húmico sódico y Vertisoles: endogleyco y sódico-gleyco.
- 44- Superficie temporalmente inundada, con humedales herbáceos mixtos de pastizales (*Spartina spartinae* y otros) sobre Vertisol epiglético-endoléptico, Gleysol húmico-calcárico y Solonchak sódico-hístico.
- 45- Superficie estacionalmente inundada, con humedales herbáceos mixtos de pastizales sobre Solonchak epiglético-hiposódico, Vertisoles; epiglético-epiléptico y sódico-glético y Gleysoles: hiposódico-calcárico, húmico calcárico e hiposálico-sódico.
- 46- Superficie estacionalmente inundada, con mangle negro (*Avicennia germinans*), sobre Solonchak glético-hiposódico y Gleysoles; éutrico y móllico.
- 47- Superficie permanentemente inundada, con manglar mixto (*Rhizophora mangle*, *Laguncularia racemosa* y *Conocarpus erectus*) sobre Gleysoles; hístico, éutrico y húmico-calcárico, Histosoles; sódico-sálico y fluvio-húmico y Arenosol éutrico.
- 48- Superficie estacionalmente inundada, con manglar mixto (*A. germinans*, *L. racemosa* y *R. mangle*), sobre Solonchak epiglético-hiposódico, Arenosoles; sódico-sálico e hiposódico-calcárico y Gleysoles; sálico-calcárico, éutrico y móllico.
- 49- Superficie temporalmente inundada, con mangle botoncillo (*Conocarpus erectus*) sobre Vertisoles; epiglético-endoléptico y húmico léptico, Gleysol húmico-hiposódico y Solonchak sódico-hístico.
- 50- Superficie estacionalmente inundada, con selva subperennifolia sobre Gleysoles: hiposálico-calcárico y húmico hiposódico, Vertisoles; epiglético-epiléptico y sódico-glético y Solonchak glético-hiposódico.
- 51- Superficie estacionalmente inundada, de cultivos agrícolas, sobre Gleysoles: hiposálico-calcárico y húmico-hiposódico, Vertisoles epiglético-epiléptico, húmico-léptico y hiposódico-epiglético y Solonchak epiglético-hipersódico.
- 52- Superficie temporalmente inundada, con cultivos agrícolas sobre sobre Vertisol epiglético-endoléptico, Gleysol húmico-hiposódico y Solonchak sódico-hístico.

VI- Planicies marino-eólicas acumulativas, formadas por depósitos marinos en clima cálido húmedo.

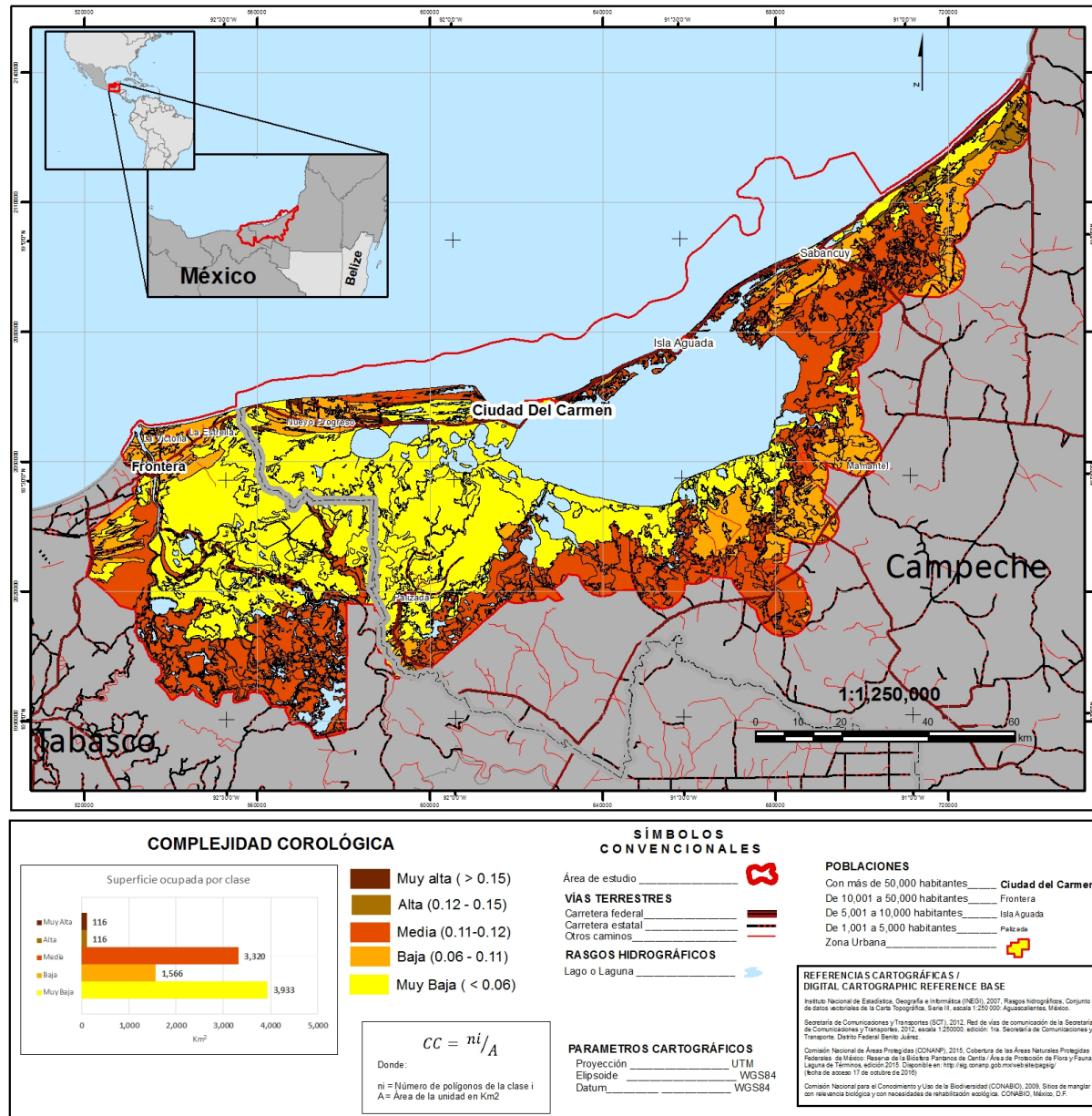
VI.1- Complejo de superficies con humedales herbáceos, manglares, selvas y agricultura sobre Gleysol , Arenosol y Solonchak.

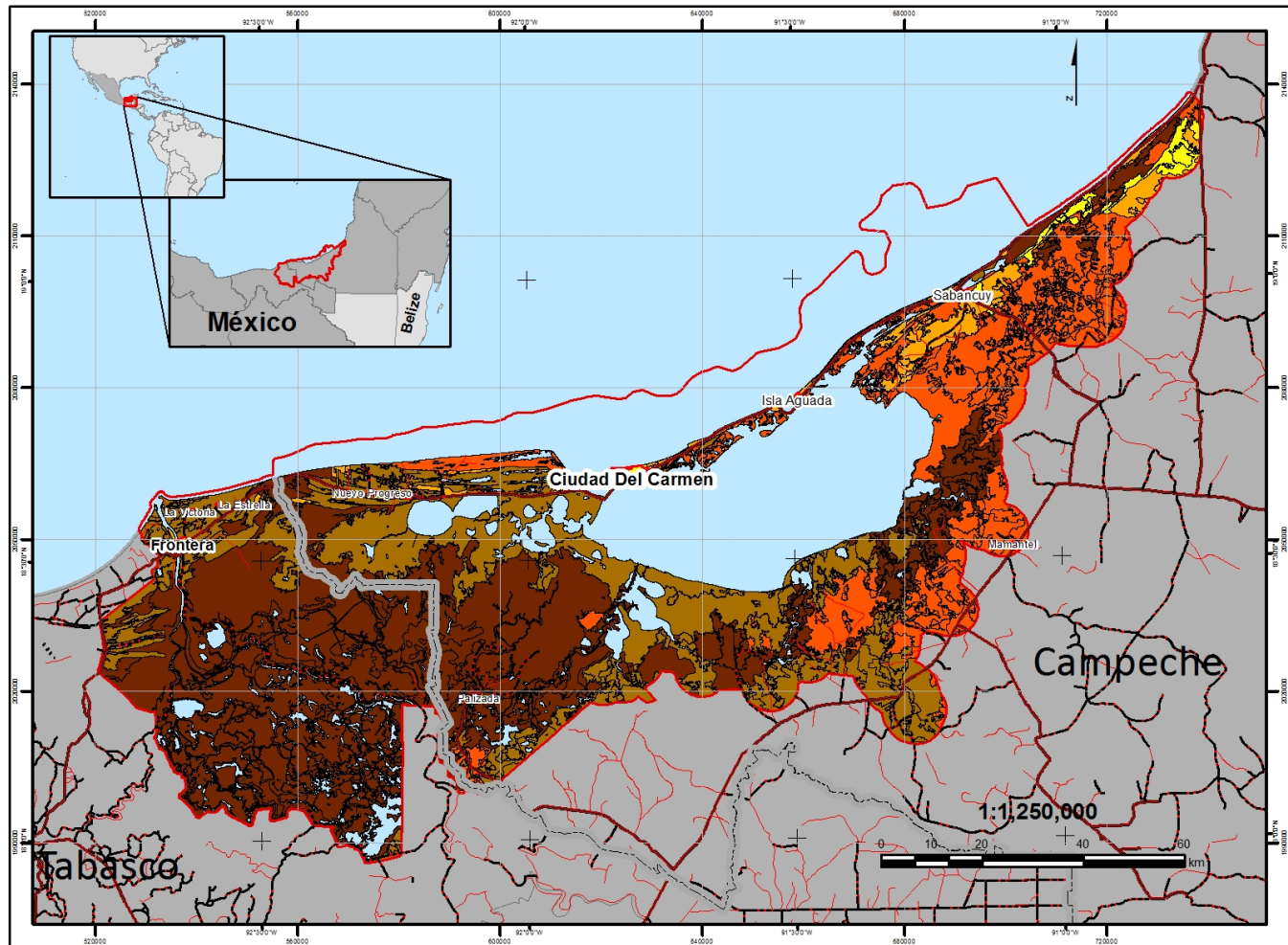
- 53- Superficie estacionalmente inundada, con humedales herbáceos mixtos de pastizales sobre Gleysoles; éutico, arénico-sálico y arénico-sódico y Arenosol éutrico-endogléyico.
- 54- Superficie estacionalmente inundada, con manglar mixto (*Laguncularia racemosa* y *Rhizophora mangle*) sobre Gleysoles; arénico-sódico y éutrico y Arenosol éutrico-hístico.
- 55- Superficie estacionalmente inundada, con selva subperennifolia sobre Arenosoles; hiposódico-hipercalcárico, calcárico-gléyico y éutrico-endogléyico, Solonchaks; arénico-endosódico y epigléyico-hiposódico y Gleysoles; arénico-sálico, húmico-hiposódico y éutrico.
- 56- Superficie estacionalmente inundada, con cultivos agrícolas sobre Arenosoles; éutrico-húmico, éutrico-endogléyico y calcárico-gléyico y Gleysoles; éutrico, arénico-sálico y arénico-sódico.

VI.2- Complejo de superficies con humedales herbáceos, manglares, selvas, agricultura y sin vegetación aparente sobre Arenosol, Solonchak y Gleysol.

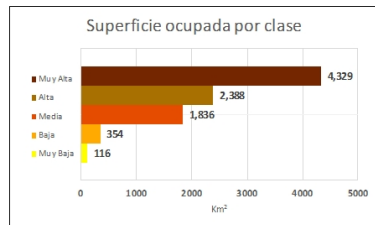
- 57- Superficie temporalmente inundada, con humedales herbáceos de tule (*Typha dominguensis*) sobre Gleysol éutrico y Solonchak sódico.
- 58- Superficie temporalmente inundada, con manglar mixto, sobre Gleysoles; húmico-hipersódico, calcárico-arénico, arénico-sálico, Solonchak gléyico y Arenosol hiposódico-calcárico.
- 59- Superficie temporalmente inundada, con selva subperennifolia, sobre Arenosol húmico-hipersódico, Solonchak hipogléyico-hipersódico y Gleysol arénico-sálico.
- 60- Superficie ocasionalmente inundada, sin vegetación aparente, sobre Arenosol hiposódico calcárico y Solonchak epigléyico-hipersódico.
- 61- Superficie temporalmente inundada, con cultivos agrícolas, sobre Arenosoles; sódico-sálico y húmico-sódico, Solonchak epigléyico-hipersódico y Gleysol hiposódico-calcárico.

Anexo 3. Mapas de Índices de Heterogeneidad.





COMPLEJIDAD TIPOLÓGICA



- Muy alta (> 14.8)
- Alta (11.7 - 14.8)
- Media (8.3 - 11.7)
- Baja (3.4 - 8.3)
- Muy Baja (< 3.4)

$$CT = \frac{ni}{N}$$

Donde:
 ni = Número de polígonos de la clase i
 N = Número total de polígonos en la unidad

SÍMBOLOS CONVENCIONALES

- Área de estudio
- VÍAS TERRESTRES**
- Carretera federal
 - Carretera estatal
 - Otros caminos
- RASGOS HIDROGRÁFICOS**
- Lago o Laguna
- POBLACIONES**
- Con más de 50,000 habitantes Ciudad del Carmen
 - De 10,001 a 50,000 habitantes Frontera
 - De 5,001 a 10,000 habitantes Isla Aguada
 - De 1,001 a 5,000 habitantes Palizada
 - Zona Urbana

- PARAMETROS CARTOGRÁFICOS**
- Proyección UTM
 - Elipsoid WGS84
 - Datum WGS84

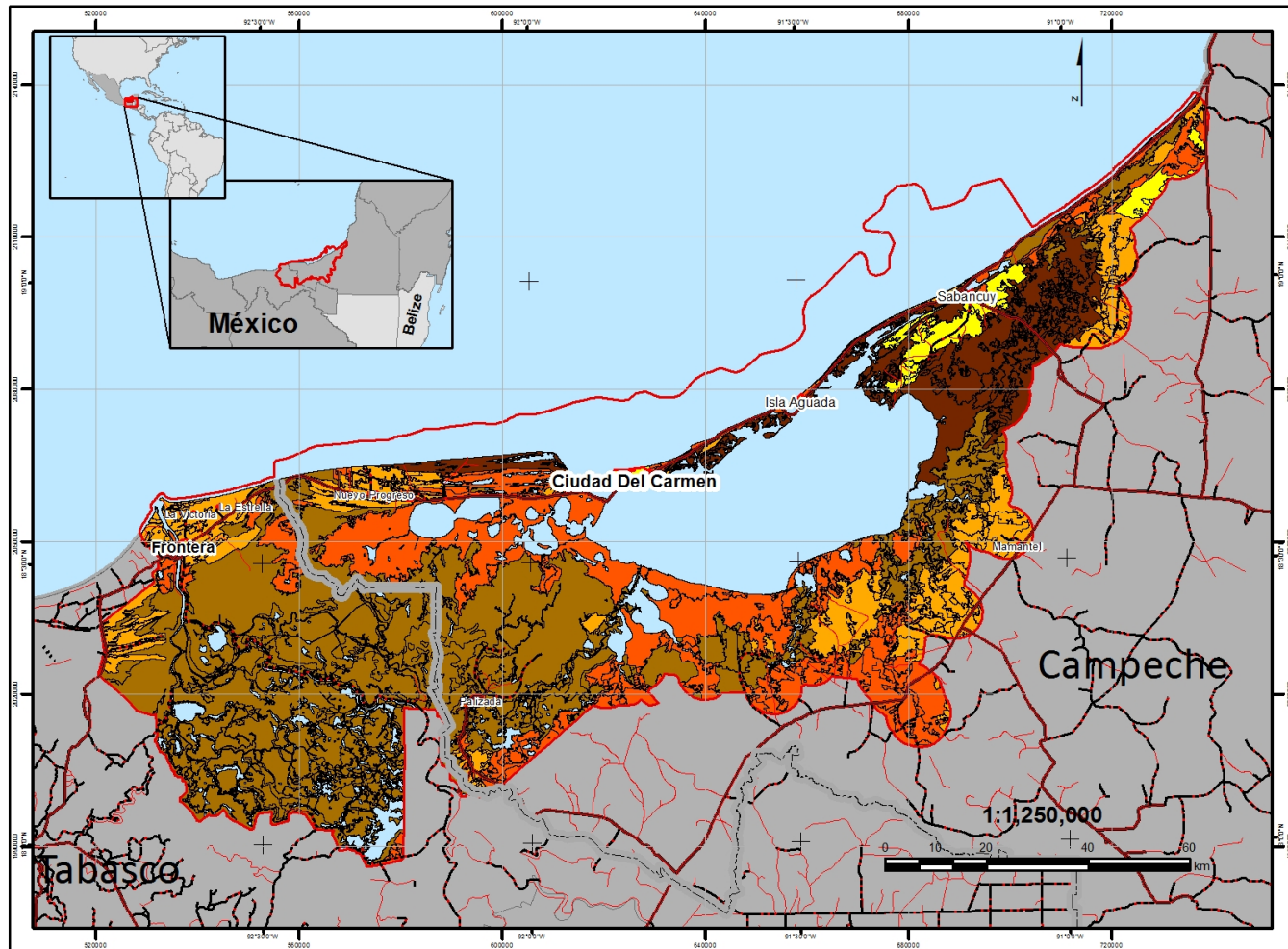
REFERENCIAS CARTOGRÁFICAS / DIGITAL CARTOGRAPHIC REFERENCE BASE

Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI), 2007. Rasgos hidrográficos. Conjunto de datos vectoriales de la Carta Topográfica, Serie II, escala 1:250,000. Aguascalientes, México.

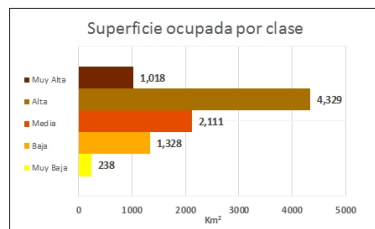
Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT), 2012. Red de Vías de comunicación de la Secretaría de Comunicaciones y Transportes, 2012, escala 1:200,000. edición. 1ra. Secretaría de Comunicaciones y Transportes. Distrito Federal, México.

Comisión Nacional de Áreas Protegidas (CONANP), 2015. Cobertura de las Áreas Naturales Protegidas Federales de México: Reserva de la Biosfera Pantanos de Centla (Área de Protección de Flora y Fauna Laguna de Términos, edición 2015). Disponible en: <http://ag.conanp.gob.mx/web/stepag/> (Fecha de acceso: 17 de octubre de 2016)

Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO), 2009. Sitios de manglar con relevancia biológica y con necesidades de rehabilitación ecológica. CONABIO, México, D.F.



RIQUEZA DE PAISAJES



- Muy alta (> 0.8)
- Alta (0.6 - 0.8)
- Media (0.4 - 0.6)
- Baja (0.3 - 0.4)
- Muy Baja (< 0.3)

$$R = \frac{N_c}{N_{c_{max}}}$$

Donde:
 N_c = Número de clases de paisajes
 $N_{c_{max}}$ = Número máximo de clases de paisajes

SÍMBOLOS CONVENCIONALES

- Área de estudio
- VÍAS TERRESTRES**
- Carretera federal
 - Carretera estatal
 - Otros caminos
- RASGOS HIDROGRÁFICOS**
- Lago o Laguna

POBLACIONES

- Con más de 50,000 habitantes Ciudad del Carmen
- De 10,001 a 50,000 habitantes Frontera
- De 5,001 a 10,000 habitantes Isla Aguada
- De 1,001 a 5,000 habitantes Palizada
- Zona Urbana

REFERENCIAS CARTOGRÁFICAS / DIGITAL CARTOGRAPHIC REFERENCE BASE

Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI), 2007. Puntos Hidrográficos. Conjunto de datos vectoriales de la Carta Topográfica, Serie II, escala 1:200,000, Aguascalientes, México.

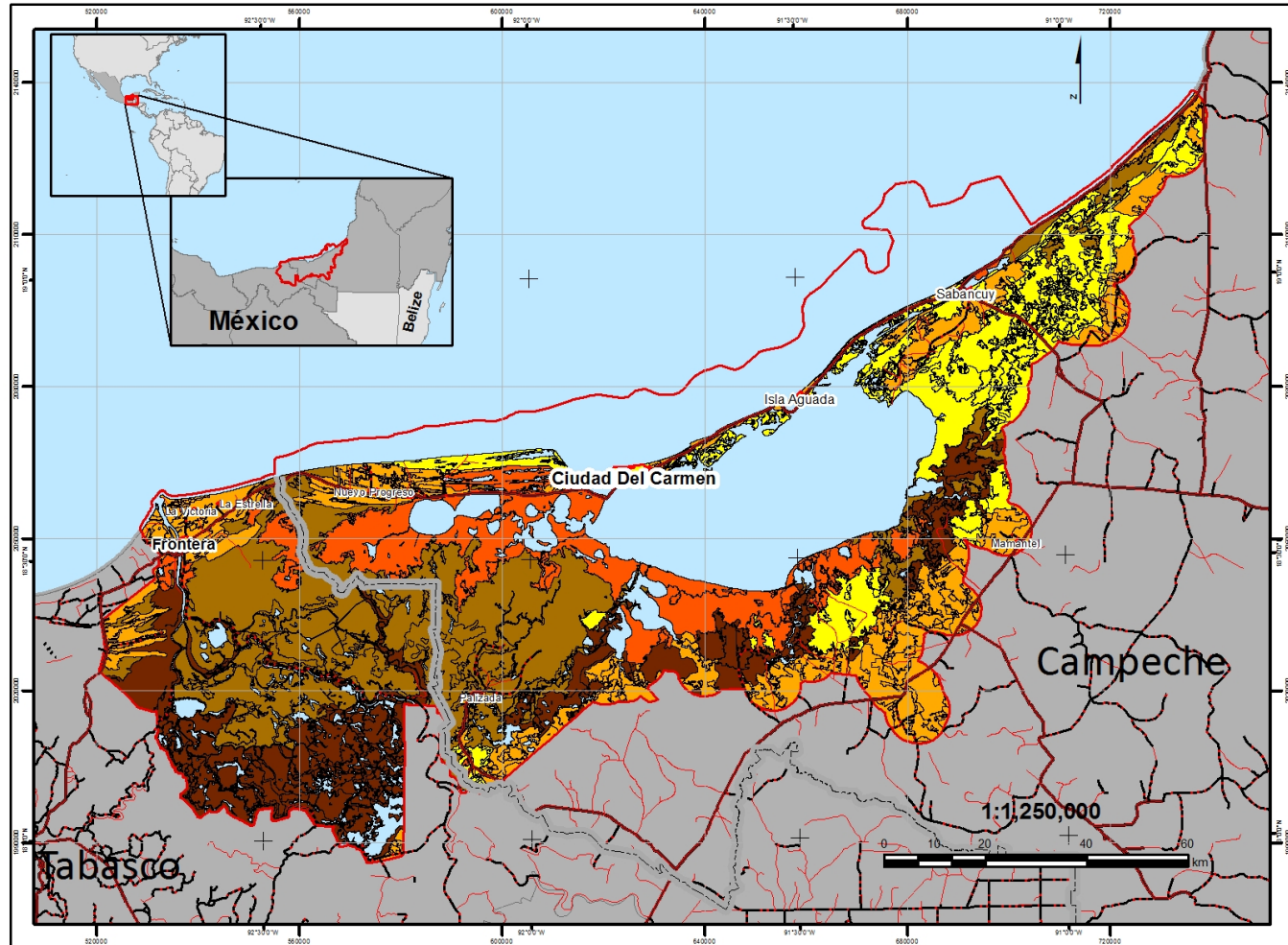
Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT), 2012. Red de vías de comunicación de la Secretaría de Comunicaciones y Transportes, 2012, escala 1:250,000, edición: 1ra. Secretaría de Comunicaciones y Transportes, Distrito Federal, México, Juárez.

Comisión Nacional de Áreas Protegidas (CONANP), 2015. Cobertura de las Áreas Naturales Protegidas Federales de México. Reserva de la Biosfera Pantanos de Centla / Área de Protección de Flora y Fauna Laguna de Términos, edición 2015. Disponible en: <http://ing.conanp.gob.mx/web/areasppag/> (fecha de acceso: 17 de octubre de 2016).

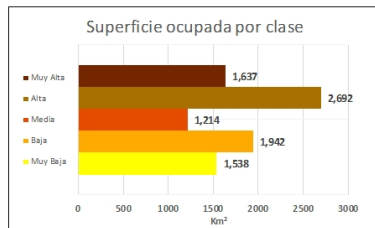
Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO), 2009. Sitios de manglar con relevancia biológica y con necesidades de rehabilitación ecológica. CONABIO, México, D.F.

PARAMETROS CARTOGRÁFICOS

Proyección UTM
 Elipsoide WGS84
 Datum WGS84



DIVERSIDAD DE McINTOSH



- Muy alta (> 64.5)
- Alta (33.2 - 64.5)
- Media (17.0 - 33.2)
- Baja (3.61 - 17.0)
- Muy Baja (< 3.6)

$$U = \sqrt{\sum ni^2}$$

Donde:
Ni = Número de polígonos de la clase i

SÍMBOLOS CONVENCIONALES

- Área de estudio
- VÍAS TERRESTRES**
- Carretera federal
 - Carretera estatal
 - Otros caminos
- RASGOS HIDROGRÁFICOS**
- Lago o Laguna

POBLACIONES

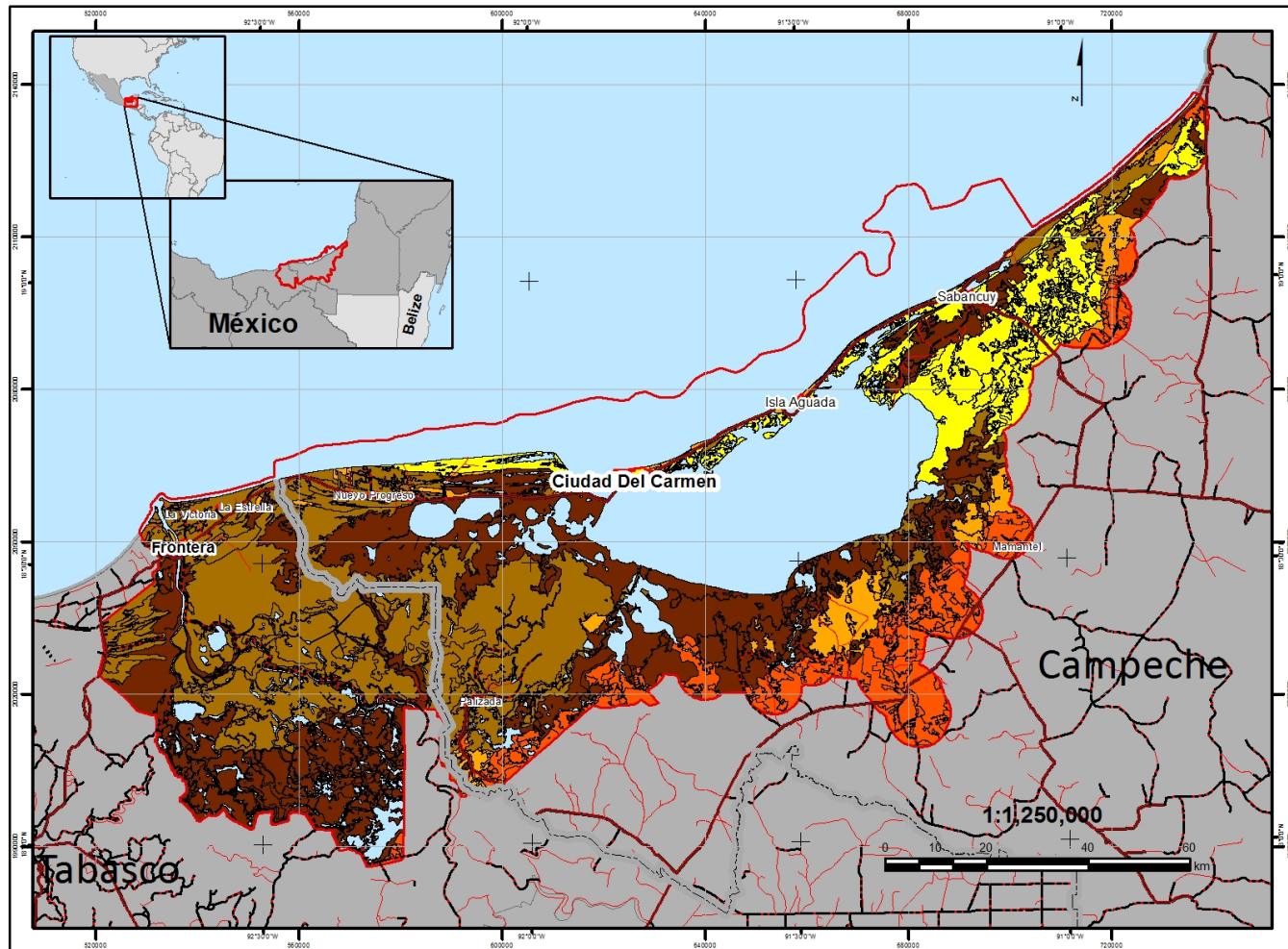
- Con más de 50,000 habitantes Ciudad del Carmen
- De 10,001 a 50,000 habitantes Frontera
- De 5,001 a 10,000 habitantes Isla Aguada
- De 1,001 a 5,000 habitantes Palizada
- Zona Urbana

REFERENCIAS CARTOGRÁFICAS / DIGITAL CARTOGRAPHIC REFERENCE BASE
 Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI). 2001. Rasgos Hidrográficos. Conjunto de datos vectoriales de la Carta Topográfica, Serie II, escala 1:250,000. Aguascalientes, México.

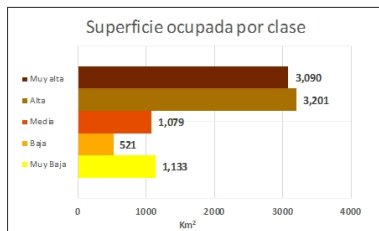
Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT), 2012. Red de vías de comunicación de la Secretaría de Comunicaciones y Transportes, 2012, escala 1:250,000, edición: 1ra. Secretaría de Comunicaciones y Transportes. Distrito Federal, México.

Comisión Nacional de Áreas Protegidas (CONANP), 2015. Cobertura de las Áreas Naturales Protegidas Federales de México. Reserva de la Biosfera Pantanos de Centla/ Área de Protección de Flora y Fauna Laguna de Términos edición 2015. Disponible en: <http://sig.conanp.gob.mx/web/areaspag/> (fecha de acceso: 17 de octubre de 2016)

Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO), 2009. Sitios de manglar con relevancia biológica y con necesidades de rehabilitación ecológica. CONABIO, México, D.F.



DIVERSIDAD DE SHANNON-WIENER



- Muy alta (> 0.59)
- Alta (0.38 - 0.59)
- Media (0.35 - 0.38)
- Baja (0.17 - 0.35)
- Muy Baja (< 0.17)

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

Donde,
 $p_i = n_i/N$
 n_i = Número de polígonos de la clase i
 N = Número total de polígonos en la unidad

SÍMBOLOS CONVENCIONALES

- Área de estudio
- VÍAS TERRESTRES**
- Carretera federal
 - Carretera estatal
 - Otros caminos
- RASGOS HIDROGRÁFICOS**
- Lago o Laguna

PARAMETROS CARTOGRÁFICOS

Proyección _____ UTM
 Elipsoide _____ WGS84
 Datum _____ WGS84

POBLACIONES

- Con más de 50,000 habitantes Ciudad del Carmen
- De 10,001 a 50,000 habitantes Frontera
- De 5,001 a 10,000 habitantes Isla Aguada
- De 1,001 a 5,000 habitantes Palizada
- Zona Urbana

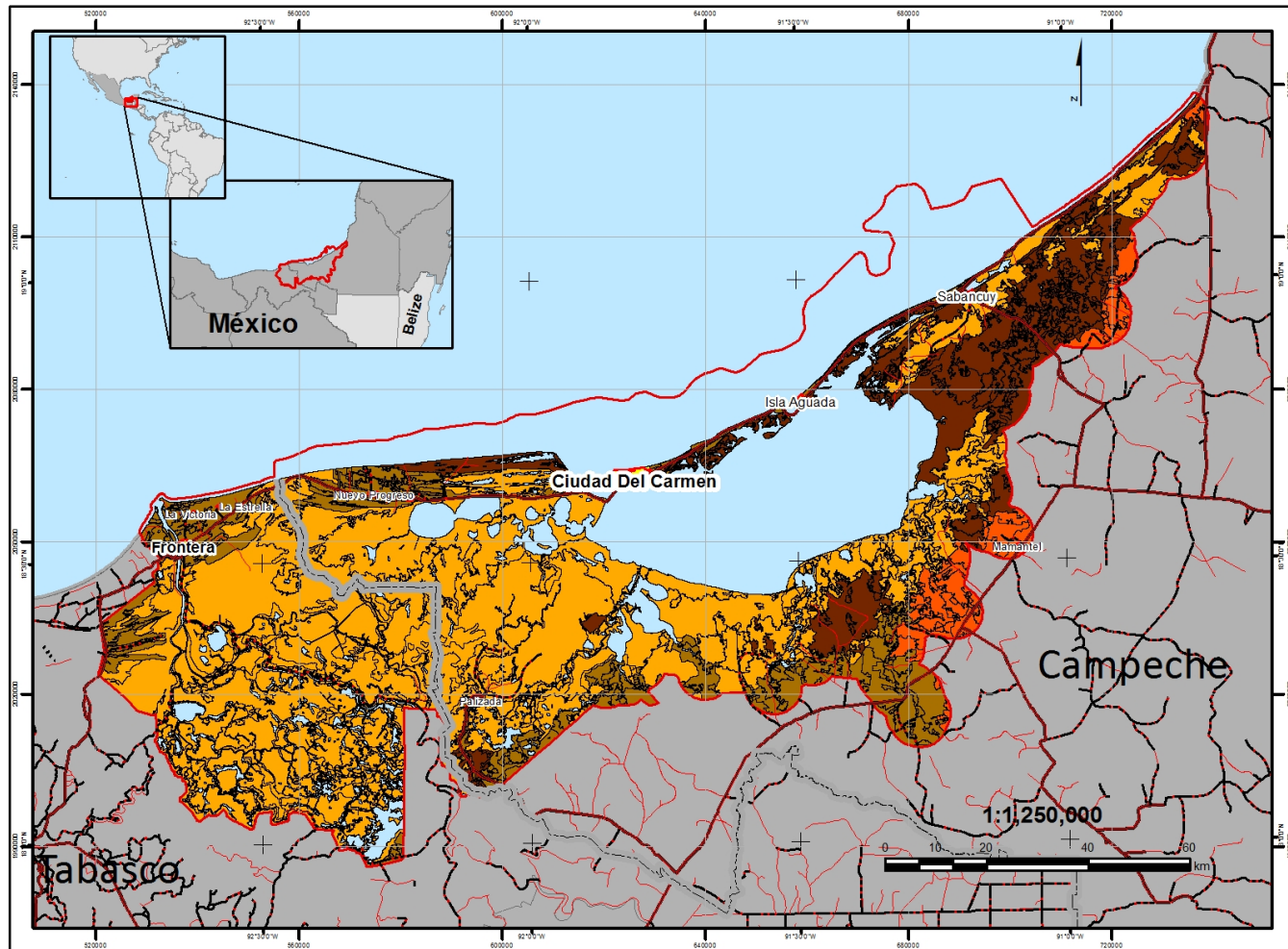
REFERENCIAS CARTOGRÁFICAS / DIGITAL CARTOGRAPHIC REFERENCE BASE

Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI), 2007. Puntos Hidrográficos. Conjunto de datos vectoriales de la Carta Topográfica, Serie II, escala 1:200,000, Aguascalientes, México.

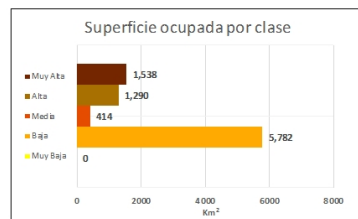
Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT), 2012. Red de vías de comunicación de la Secretaría de Comunicaciones y Transportes, 2012, escala 1:250,000, edición: 1ra. Secretaría de Comunicaciones y Transportes, Distrito Federal, México.

Comisión Nacional de Áreas Protegidas (CONANP), 2015. Cobertura de las Áreas Naturales Protegidas Federales de México. Reserva de la Biosfera Pantanos de Centla / Área de Protección de Flora y Fauna Laguna de Términos, edición 2015. Disponible en: <http://ing.conanp.gob.mx/web/areasppag/> (Fecha de acceso: 17 de octubre de 2016).

Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO), 2009. Sitios de manglar con relevancia biológica y con necesidades de rehabilitación ecológica. CONABIO, México, D.F.



DOMINANCIA DE McINTOSH



- Muy alta (0.98-1.24)
- Alta (0.73-0.98)
- Media (0.62-0.73)
- Baja (0.1-0.62)
- Muy Baja (0.0-0.1)

$$D = \left(\frac{\sum p_i^2}{N} \right) / (N - \sqrt{N})$$

Donde:
 Pi = ni/N
 ni = Número de polígonos de la clase i en la unidad
 N = Número total de polígonos en la unidad

SÍMBOLOS CONVENCIONALES

- POBLACIONES**
- Con más de 50,000 habitantes Ciudad del Carmen
 - De 10,001 a 50,000 habitantes Frontera
 - De 5,001 a 10,000 habitantes Isla Aguada
 - De 1,001 a 5,000 habitantes Palizada
 - Zona Urbana
- VÍAS TERRESTRES**
- Carretera federal
 - Carretera estatal
 - Otros caminos
- RASGOS HIDROGRÁFICOS**
- Lago o Laguna

- PARAMETROS CARTOGRÁFICOS**
- Proyección UTM
 - Elipsoide WGS84
 - Datum WGS84

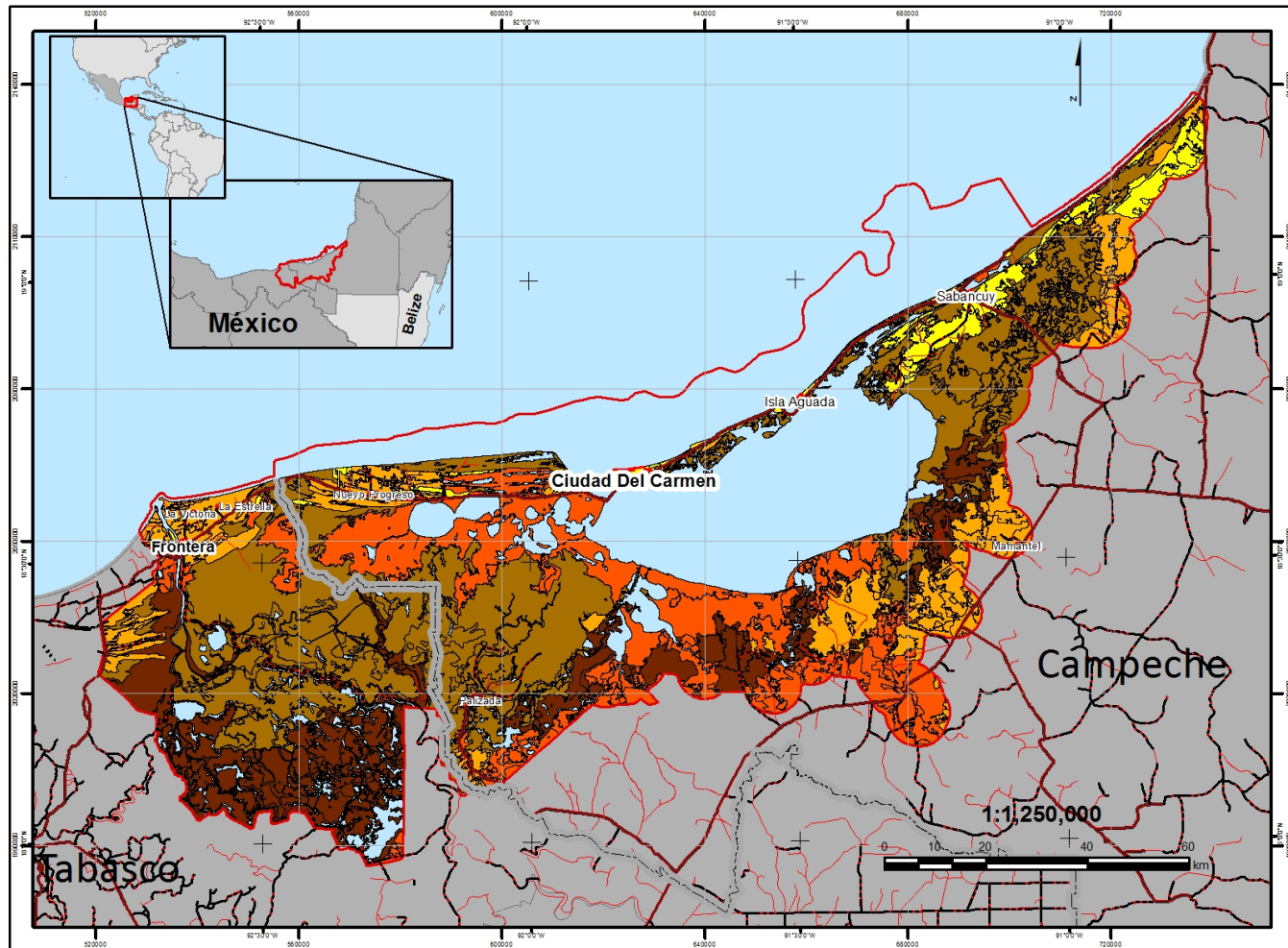
REFERENCIAS CARTOGRÁFICAS / DIGITAL CARTOGRAPHIC REFERENCE BASE

Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI), 2007. Puntos hidrográficos. Conjunto de datos vectoriales de la Carta Topográfica, Serie II, escala 1:200,000, Aguascalientes, México.

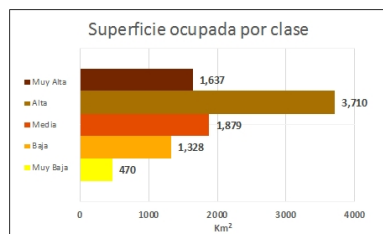
Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT), 2012. Red de vías de comunicación de la Secretaría de Comunicaciones y Transportes, 2012, escala 1:250,000, edición: 1ra. Secretaría de Comunicaciones y Transportes, Distrito Federal, México, Juárez.

Comisión Nacional de Áreas Protegidas (CONANP), 2015. Cobertura de las Áreas Naturales Protegidas Federales de México. Reserva de la Biosfera Pantanos de Centla / Área de Protección de Flora y Fauna Laguna de Términos, edición 2015. Disponible en: <http://ing.conanp.gob.mx/web/areapagp/> (fecha de acceso: 17 de octubre de 2016).

Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO), 2009. Sitios de manglar con relevancia biológica y con necesidades de rehabilitación ecológica. CONABIO, México, D.F.



SINGULARIDAD PAISAJÍSTICA



- Muy alta (> 0.18)
- Alta (0.10 - 0.18)
- Media (0.06 - 0.10)
- Baja (0.04 - 0.06)
- Muy Baja (< 0.04)

$$S = \frac{ni}{N}$$

Donde:
 Ni = Número de polígonos de la clase i
 N = Número total de polígonos en la unidad

SÍMBOLOS CONVENCIONALES

- Área de estudio
- VIAS TERRESTRES**
- Carretera federal
 - Carretera estatal
 - Otros caminos
- RASGOS HIDROGRÁFICOS**
- Lago o Laguna

POBLACIONES

- Con más de 50,000 habitantes: Ciudad del Carmen
- De 10,001 a 50,000 habitantes: Frontera
- De 5,001 a 10,000 habitantes: Isla Aguada
- De 1,001 a 5,000 habitantes: Palizada
- Zona Urbana

REFERENCIAS CARTOGRÁFICAS / DIGITAL CARTOGRAPHIC REFERENCE BASE

Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI), 2007. Rasgos hidrográficos. Conjunto de datos vectoriales de la Carta Topográfica, Serie II, escala 1:250,000. Aguascalientes, México.

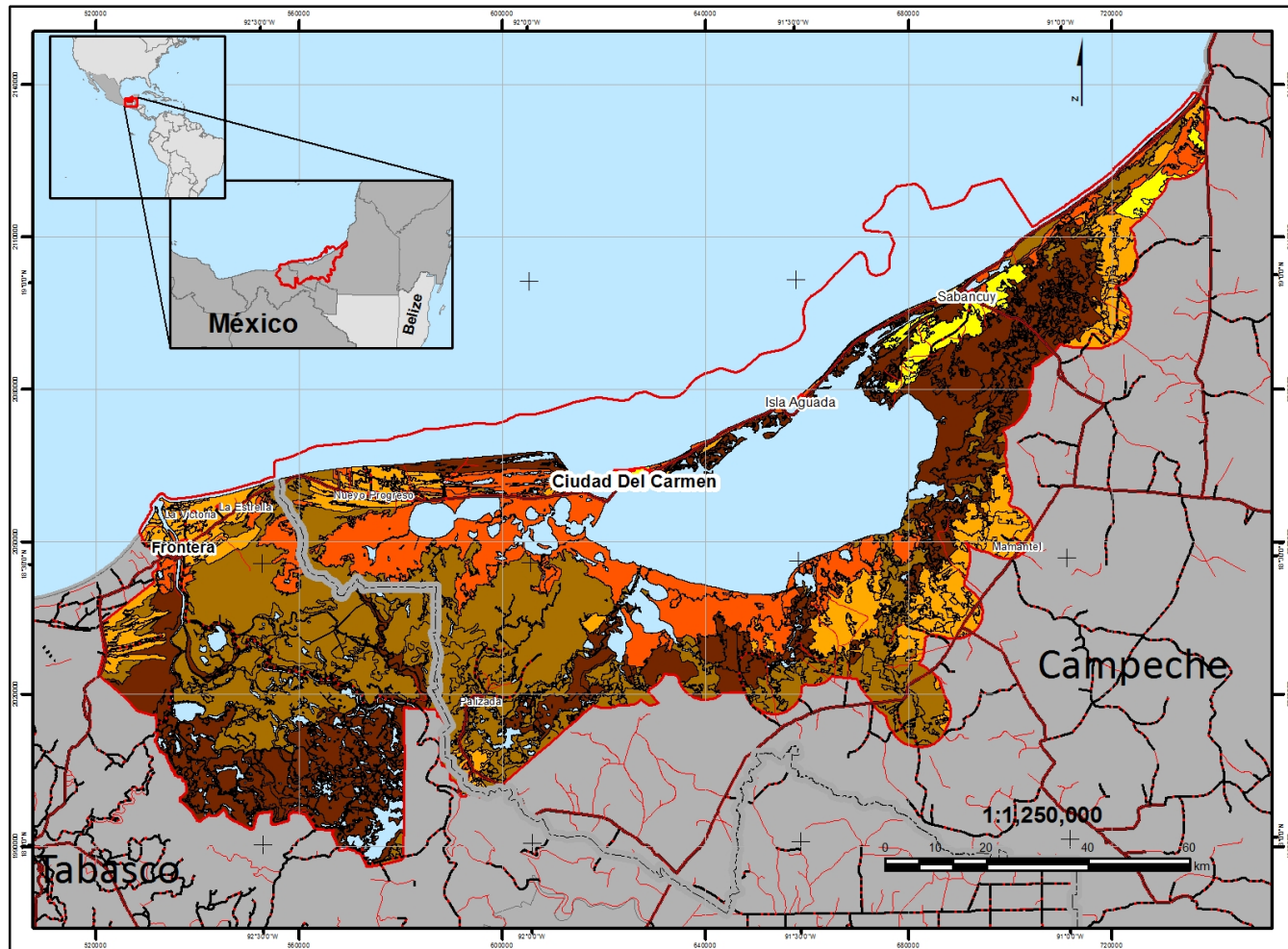
Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT), 2012. Red de Vías de comunicación de la Secretaría de Comunicaciones y Transportes, 2012, escala 1:200,000. edición: 1ra. Secretaría de Comunicaciones y Transportes. Distrito Federal, México.

Comisión Nacional de Áreas Protegidas (CONANP), 2015. Cobertura de las Áreas Naturales Protegidas Federales de México: Reserva de la Biosfera Plantones de Centa / Área de Protección de Flora y Fauna Laguna de Términos, edición 2015. Disponible en: <http://ag.conanp.gob.mx/web/steapag/> (Fecha de acceso: 17 de octubre de 2016)

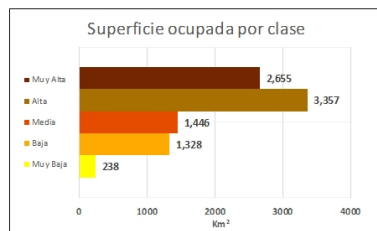
Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO), 2009. Sitios de manglar con relevancia biológica y con necesidades de rehabilitación ecológica. CONABIO, México, D.F.

PARAMETROS CARTOGRÁFICOS

Proyección: UTM
 Elipsoidal: WGS84
 Datum: WGS84



DIVERSIDAD MÁXIMA



- Muy alta (> 1.95)
- Alta (1.61 - 1.95)
- Media (1.39 - 1.61)
- Baja (1.10 - 1.39)
- Muy Baja (< 1.10)

$$H'_{max} = \ln(Nc)$$

Donde:
Nc = Número de clases de paisajes

SÍMBOLOS CONVENCIONALES

- Área de estudio
- VÍAS TERRESTRES**
- Carretera federal
 - Carretera estatal
 - Otros caminos
- RASGOS HIDROGRÁFICOS**
- Lago o Laguna

POBLACIONES

- Con más de 50,000 habitantes Ciudad del Carmen
- De 10,001 a 50,000 habitantes Frontera
- De 5,001 a 10,000 habitantes Isla Aguada
- De 1,001 a 5,000 habitantes Palizada
- Zona Urbana

REFERENCIAS CARTOGRÁFICAS / DIGITAL CARTOGRAPHIC REFERENCE BASE

Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI), 2007. Puntos Hidrográficos. Conjunto de datos vectoriales de la Carta Topográfica, Serie II, escala 1:200,000. Aguascalientes, México.

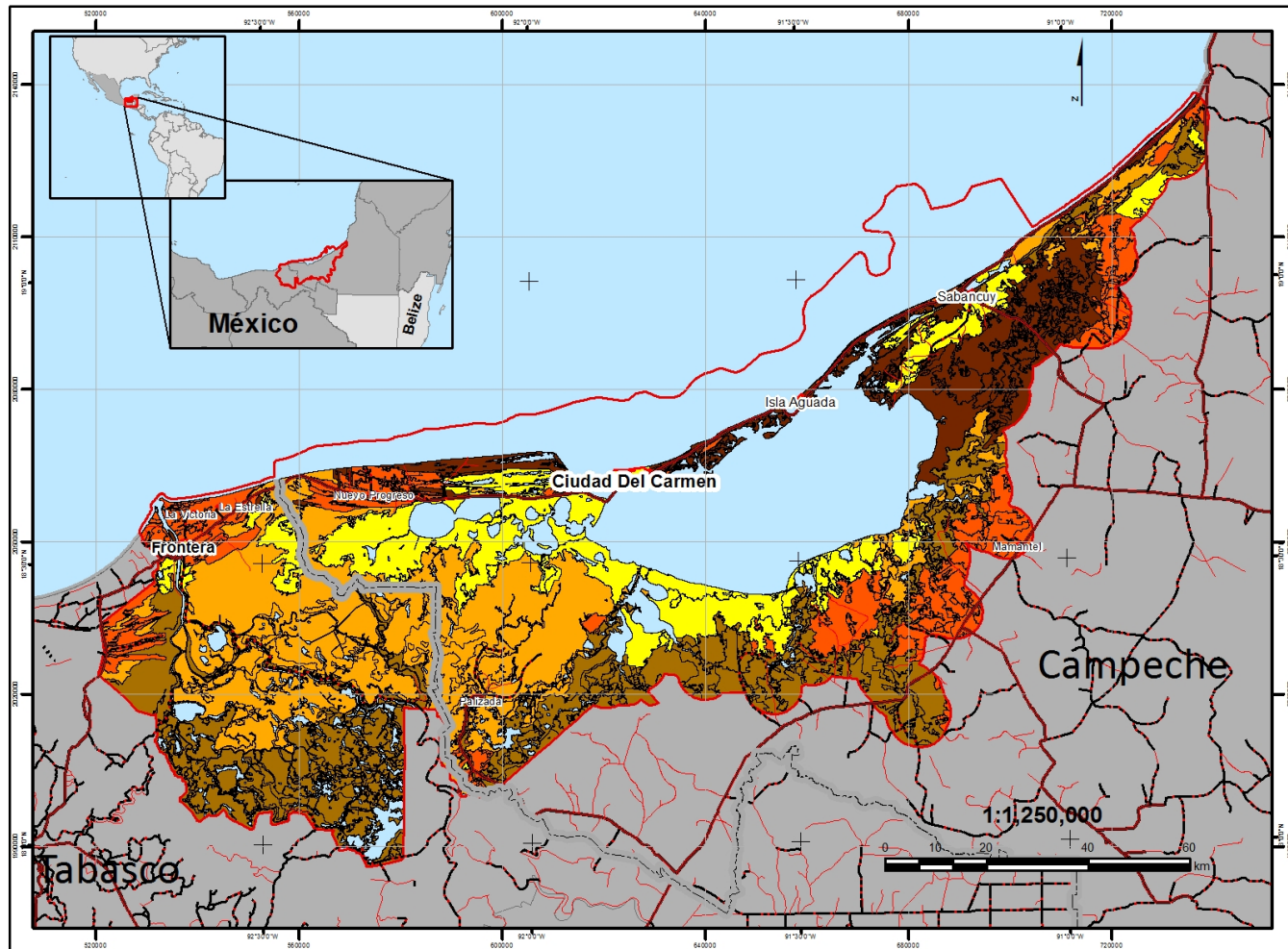
Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT), 2012. Red de vías de comunicación de la Secretaría de Comunicaciones y Transportes, 2012, escala 1:250,000, edición: 1ra. Secretaría de Comunicaciones y Transportes, Distrito Federal, México.

Comisión Nacional de Áreas Protegidas (CONANP), 2015. Cobertura de las Áreas Naturales Protegidas Federales de México. Reserva de la Biosfera Pantanos de Centla / Área de Protección de Flora y Fauna Laguna de Términos, edición 2015. Disponible en: <http://ing.conanp.gob.mx/web/areasppag/> (fecha de acceso: 17 de octubre de 2016).

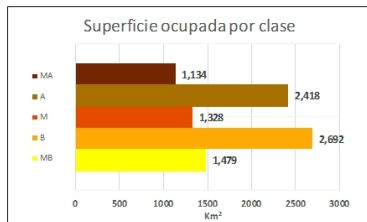
Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO), 2009. Sitios de manglar con relevancia biológica y con necesidades de rehabilitación ecológica. CONABIO, México, D.F.

PARAMETROS CARTOGRÁFICOS

Proyección UTM
Elipsoide WGS84
Datum WGS84



ÍNDICE DE DIVERSIDAD PAISAJÍSTICA



- Muy alta (> 0.96)
- Alta (0.44 - 0.96)
- Media (0.38 - 0.44)
- Baja (0.31 - 0.38)
- Muy Baja (< 0.31)

$$IDP = \left(\frac{n_i}{A}\right) N_c$$

Donde:
 A = Área de la unidad en km²
 n_i = Número de polígonos de la clase i
 N_c = Número de clases de paisajes

SÍMBOLOS CONVENCIONALES

- Área de estudio
- VÍAS TERRESTRES**
- Carretera federal
 - Carretera estatal
 - Otros caminos
- RASGOS HIDROGRÁFICOS**
- Lago o Laguna

POBLACIONES

- Con más de 50,000 habitantes Ciudad del Carmen
- De 10,001 a 50,000 habitantes Frontera
- De 5,001 a 10,000 habitantes Isla Aguada
- De 1,001 a 5,000 habitantes Palizada
- Zona Urbana

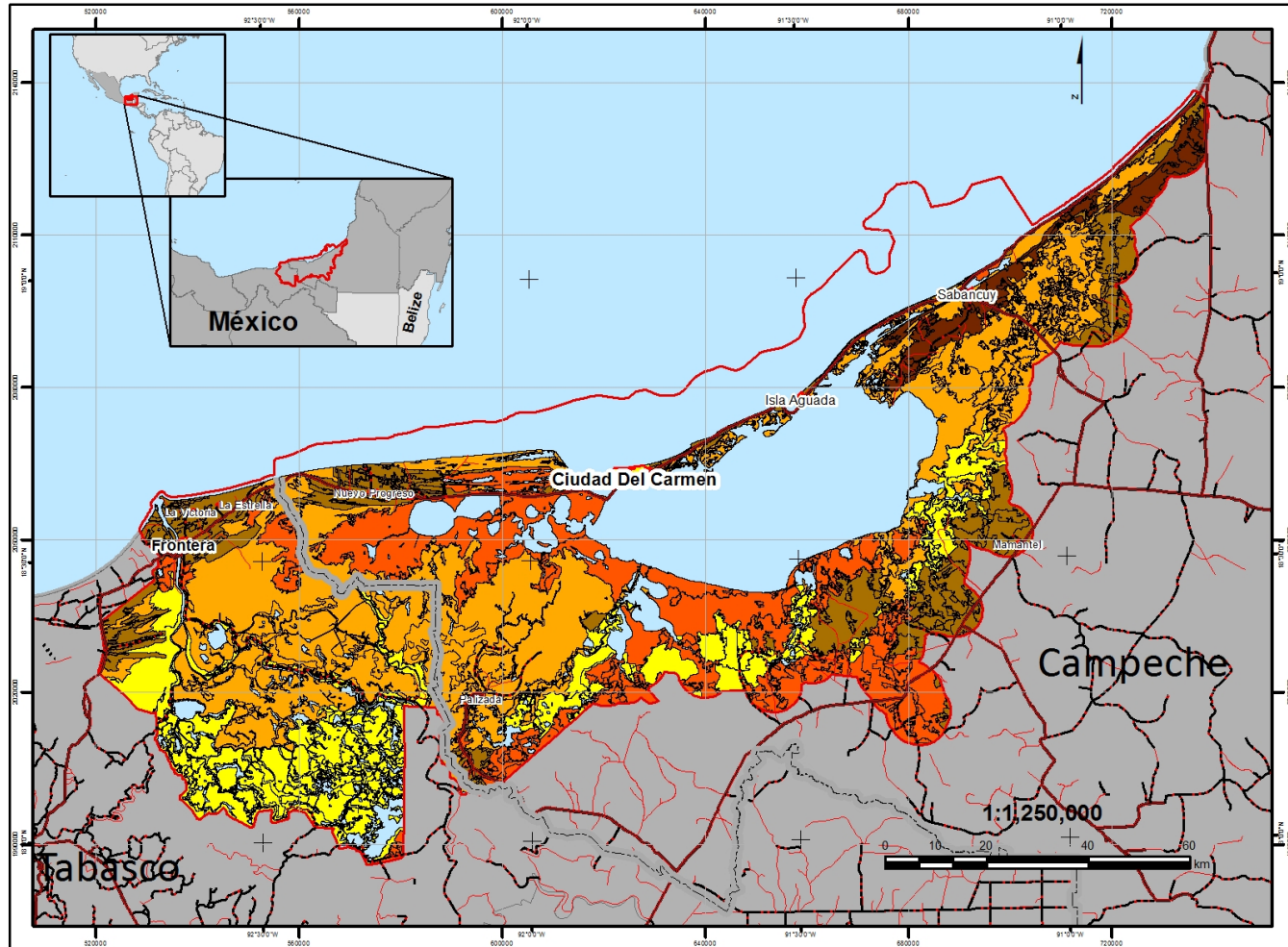
REFERENCIAS CARTOGRAFICAS / DIGITAL CARTOGRAPHIC REFERENCE BASE

Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI), 2007. Puntos Hidrográficos. Conjunto de datos vectoriales de la Carta Topográfica, Serie II, escala 1:200,000, Aguascalientes, México.

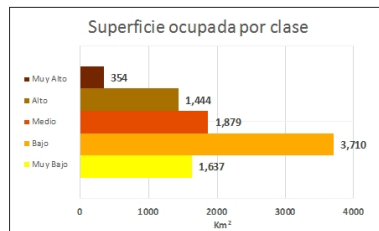
Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT), 2012. Red de vías de comunicación de la Secretaría de Comunicaciones y Transportes, 2012, escala 1:250,000, edición: 1ra. Secretaría de Comunicaciones y Transportes, Distrito Federal, México, Juárez.

Comisión Nacional de Áreas Protegidas (CONANP), 2015. Cobertura de las Áreas Naturales Protegidas Federales de México. Reserva de la Biosfera Pantanos de Centla / Área de Protección de Flora y Fauna Laguna de Términos, edición 2015. Disponible en: <http://ing.conanp.gob.mx/web/areasppag/> (Fecha de acceso: 17 de octubre de 2016).

Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO), 2009. Sitios de manglar con relevancia biológica y con necesidades de rehabilitación ecológica. CONABIO, México, D.F.



FRACCIONAMIENTO PAISAJÍSTICO



- Muy alto (> 0.033)
- Alto (0.013 - 0.033)
- Medio (0.008 - 0.013)
- Bajo (0.005 - 0.008)
- Muy Bajo (< 0.005)

$$K = \frac{1}{ni}$$

Donde:
ni = Número de polígonos de la clase i

SÍMBOLOS CONVENCIONALES

- Área de estudio
- VÍAS TERRESTRES**
- Carretera federal
 - Carretera estatal
 - Otros caminos
- RASGOS HIDROGRÁFICOS**
- Lago o Laguna

POBLACIONES

- Con más de 50,000 habitantes: Ciudad del Carmen
- De 10,001 a 50,000 habitantes: Frontera
- De 5,001 a 10,000 habitantes: Isla Aguada
- De 1,001 a 5,000 habitantes: Palizada
- Zona Urbana

REFERENCIAS CARTOGRÁFICAS / DIGITAL CARTOGRAPHIC REFERENCE BASE

Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI), 2007. Puntos Hidrográficos. Conjunto de datos vectoriales de la Carta Topográfica, Serie II, escala 1:200,000, Aguascalientes, México.

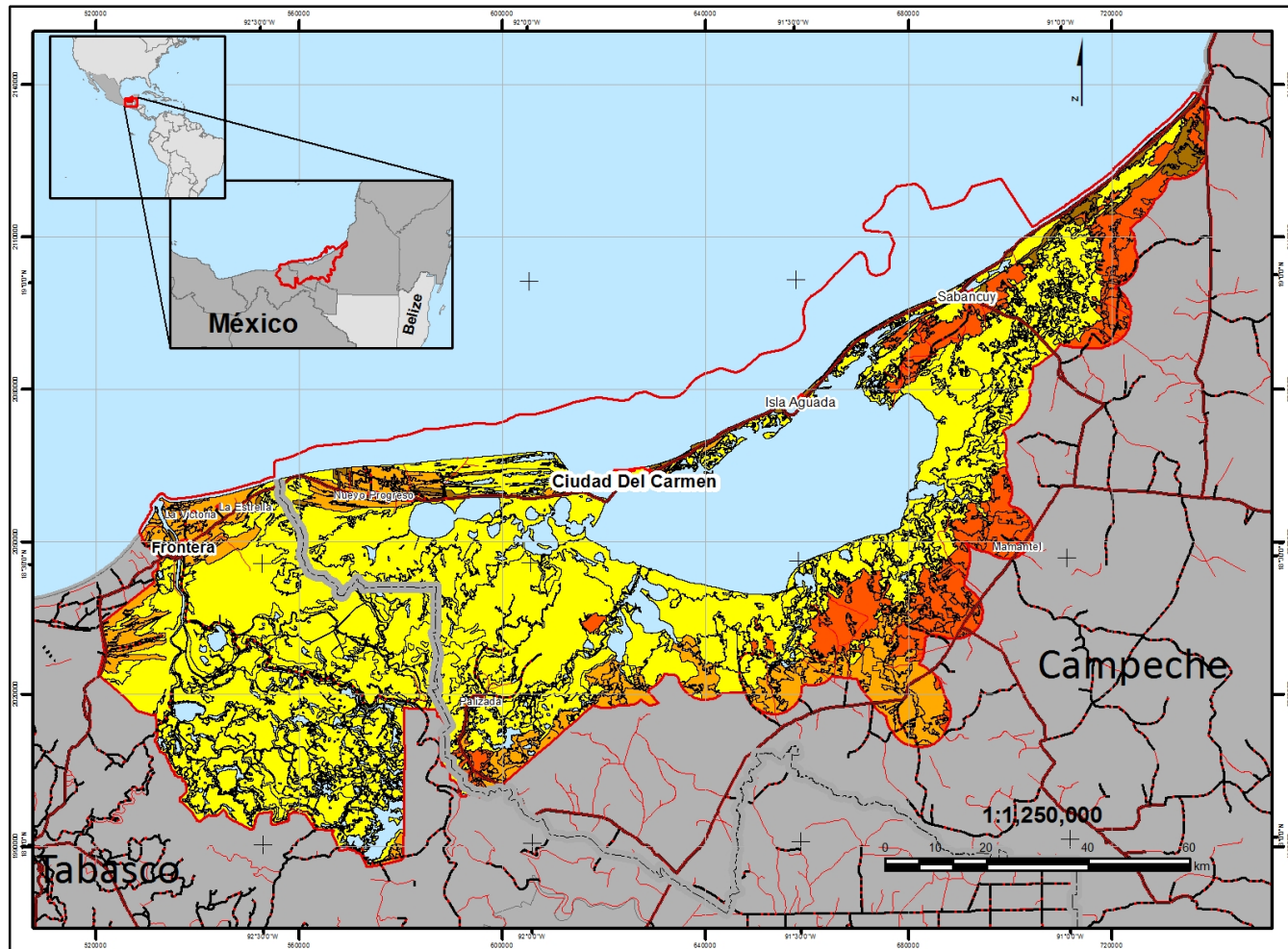
Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT), 2012. Red de vías de comunicación de la Secretaría de Comunicaciones y Transportes, 2012, escala 1:250,000, edición: 1ra. Secretaría de Comunicaciones y Transportes, Distrito Federal, México, México.

Comisión Nacional de Áreas Protegidas (CONANP), 2015. Cobertura de las Áreas Naturales Protegidas Federales de México. Reserva de la Biosfera Pantanos de Centla / Área de Protección de Flora y Fauna Laguna de Términos, edición 2015. Disponible en: <http://ing.conanp.gob.mx/web/areasppag/> (Fecha de acceso: 17 de octubre de 2016).

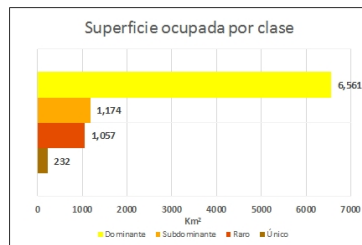
Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO), 2009. Sitios de manglar con relevancia biológica y con necesidades de rehabilitación ecológica. CONABIO, México, D.F.

PARAMETROS CARTOGRÁFICOS

Proyección: UTM
Elipsoide: WGS84
Datum: WGS84



COEFICIENTE DE SINGULARIDAD



- Único (> 0.004196)
- Raro (0.001964 - 0.004195)
- Subdominante (0.000984-0.001963)
- Dominante (< 0.000983)

$$Ks = \frac{1}{A}$$

Donde:
A = Área de la unidad en km²

SÍMBOLOS CONVENCIONALES

- Área de estudio
- VÍAS TERRESTRES**
 - Carretera federal
 - Carretera estatal
 - Otros caminos
- RASGOS HIDROGRÁFICOS**
 - Lago o Laguna
- PARAMETROS CARTOGRÁFICOS**
 - Proyección: UTM
 - Elipsoide: WGS84
 - Datum: WGS84

POBLACIONES

- Con más de 50,000 habitantes: Ciudad del Carmen
- De 10,001 a 50,000 habitantes: Frontera
- De 5,001 a 10,000 habitantes: Isla Aguada
- De 1,001 a 5,000 habitantes: Palizada
- Zona Urbana

REFERENCIAS CARTOGRÁFICAS / DIGITAL CARTOGRAPHIC REFERENCE BASE
 Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI), 2007. Puntos Hidrográficos. Conjunto de datos vectoriales de la Carta Topográfica, Serie II, escala 1:200,000, Aguascalientes, México.
 Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT), 2012. Red de vías de comunicación de la Secretaría de Comunicaciones y Transportes, 2012, escala 1:250,000, edición: 1ra. Secretaría de Comunicaciones y Transportes, Distrito Federal, México.
 Comisión Nacional de Áreas Protegidas (CONANP), 2015. Cobertura de las Áreas Naturales Protegidas Federales de México. Reserva de la Biosfera Pantanos de Centla / Área de Protección de Flora y Fauna Laguna de Términos, edición 2015. Disponible en: <http://ing.conanp.gob.mx/web/areasppag/> (fecha de acceso: 17 de octubre de 2016).
 Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO), 2009. Sitios de manglar con relevancia biológica y con necesidades de rehabilitación ecológica. CONABIO, México, D.F.

Anexo 4. Datos de carbono aéreo obtenidos en campo.

# Punto	IDENTIFICADOR	AÑO COLECTA	Cobertura	AGC	STDV	x	y	REFERENCIA
1	2010_5_m_x_conabio	2010	Manglar mixto	106.85	4.20	573101.38	2048199.94	DATOS PROPIOS
2	2010_6_m_x_conabio	2010	Manglar mixto	65.91	1.65	576107.05	2049057.20	DATOS PROPIOS
3	2010_7_m_x_conabio	2010	Manglar mixto	132.71	5.38	580483.39	2050516.40	DATOS PROPIOS
4	2010_8_m_x_conabio	2010	Manglar mixto	280.45	6.15	581176.16	2052568.10	DATOS PROPIOS
5	2015_1_h_s_conabio	2015	Humedales herbáceos de tule	11.82	4.32	547145.76	2011316.65	DATOS PROPIOS
6	2015_2_s_s_conabio	2015	Selva de galería	33.98	6.03	548776.94	2015076.53	DATOS PROPIOS
7	2015_3_m_s_conabio	2015	Mangle botoncillo	72.98	22.60	540600.88	2029544.68	DATOS PROPIOS
8	2015_4_s_s_conabio	2015	Selva subperennifolia	22.04	2.62	548874.71	2046848.09	DATOS PROPIOS
9	2015_5_h_s_conabio	2015	Humedales herbáceos mixtos	1.29	0.66	571555.78	2014637.40	DATOS PROPIOS
10	2015_6_h_s_conabio	2015	Humedales herbáceos de tule	1.93	0.74	573065.04	2012903.82	DATOS PROPIOS
11	2015_7_h_s_conabio	2015	Humedales herbáceos mixtos	5.84	3.33	617513.67	2019283.69	DATOS PROPIOS
12	2015_8_h_s_conabio	2015	Humedales herbáceos mixtos	4.48	0.98	617518.21	2026414.58	DATOS PROPIOS
13	2015_9_m_s_conabio	2015	Manglar mixto	23.37	4.02	618074.07	2033666.05	DATOS PROPIOS
14	2015_10_s_s_conabio	2015	Selva subperennifolia	51.15	3.75	647012.63	2030102.68	DATOS PROPIOS
15	2015_11_s_s_conabio	2015	Selva subperennifolia	68.59	11.96	667029.24	2026071.86	DATOS PROPIOS
16	2015_12_m_s_conabio	2015	Manglar mixto	113.00	16.50	690541.48	2058831.60	DATOS PROPIOS
17	2015_13_s_s_conabio	2015	Selva subperennifolia	106.16	16.16	689645.58	2038455.49	DATOS PROPIOS
18	2015_14_h_s_conabio	2015	Pastizales	4.44	3.61	705334.62	2101148.59	DATOS PROPIOS
19	2015_15_m_s_conabio	2015	Mangle botoncillo	29.95	3.07	702796.24	2100943.94	DATOS PROPIOS
20	2015_16_m_s_conabio	2015	Mangle negro	98.68	19.24	680526.87	2090749.90	DATOS PROPIOS
21	2015_17_s_s_conabio	2015	Selva subperennifolia	71.67	11.03	728619.11	2120662.13	DATOS PROPIOS
22	2015_18_m_s_conabio	2015	Mangle negro	186.85	31.11	591434.76	2064361.59	DATOS PROPIOS
23	2017_2_h_s_conabio	2017	Humedales herbáceos de tule	9.73	0.47	569795.17	2033648.34	DATOS PROPIOS
24	2017_4_h_x_conabio	2017	Humedales herbáceos de tule	11.07	9.78	579527.13	2035587.47	DATOS PROPIOS
25	2017_5_s_s_conabio	2017	Selva subperennifolia	20.88	5.26	578674.99	2037212.22	DATOS PROPIOS
26	2017_6_h_s_conabio	2017	Humedales herbáceos de tule	8.70	4.90	586351.59	2034409.21	DATOS PROPIOS
27	2017_7_x_s_conabio	2017	Manglar mixto	109.53	6.14	579639.09	2049678.66	DATOS PROPIOS
28	2017_8_x_s_conabio	2017	Manglar mixto	214.26	20.39	583217.27	2050082.90	DATOS PROPIOS
29	2017_9_x_s_conabio	2017	Manglar mixto	137.21	5.02	582696.19	2048241.39	DATOS PROPIOS
30	2017_10_x_s_conabio	2017	Manglar mixto	109.54	3.63	584068.58	2045726.52	DATOS PROPIOS
31	2017_11_h_s_conabio	2017	Humedales herbáceos de tule	15.03	2.44	584281.38	2046443.26	DATOS PROPIOS
32	2017_12_h_s_conabio	2017	Humedales herbáceos de tule	12.80	5.42	584808.98	2042945.03	DATOS PROPIOS
33	2017_13_m_s_conabio	2017	Mangle negro	58.47	3.55	578879.78	2064901.19	DATOS PROPIOS
34	2017_14_a_s_conabio	2017	Selva subperennifolia	5.38	0.80	578175.56	2063487.42	DATOS PROPIOS
35	2017_15_s_s_conabio	2017	Selva subperennifolia	61.92	3.97	661889.46	2080719.54	DATOS PROPIOS
36	2017_16_m_s_conabio	2017	Manglar mixto	8.91	0.34	661155.91	2079373.25	DATOS PROPIOS
37	2017_17_m_s_conabio	2017	Mangle negro	138.38	2.88	680880.15	2078795.33	DATOS PROPIOS
38	2017_18_m_s_conabio	2017	Mangle negro	69.75	1.68	678346.87	2078795.34	DATOS PROPIOS
39	2017_19_m_s_conabio	2017	Manglar mixto	139.82	23.00	671405.00	2081770.30	DATOS PROPIOS
40	2017_20_m_s_conabio	2017	Mangle negro	78.58	2.54	668491.45	2085469.37	DATOS PROPIOS
41	2017_21_m_x_conabio	2017	Manglar mixto	122.74	3.85	699901.95	2106862.90	DATOS PROPIOS
42	2017_23_h_s_conabio	2017	Humedales herbáceos de tule	1.32	0.43	707803.09	2103896.82	DATOS PROPIOS
43	2017_25_m_s_conabio	2017	Mangle botoncillo	47.42	0.53	701568.26	2095051.04	DATOS PROPIOS
44	2017_26_h_s_conabio	2017	Pastizales	0.85	0.21	699833.63	2094730.32	DATOS PROPIOS
45	2017_28_m_s_conabio	2017	Manglar mixto	75.93	34.13	679874.30	2091146.19	DATOS PROPIOS
46	2017_29_h_s_conabio	2017	Humedales herbáceos de tule	3.22	1.35	689563.32	2087218.40	DATOS PROPIOS
47	2017_30_m_s_conabio	2017	Mangle negro	173.67	50.78	677339.11	2083473.82	DATOS PROPIOS
48	2017_31_s_s_conabio	2017	Selva subperennifolia	97.71	1.48	680737.16	2082956.22	DATOS PROPIOS
49	2017_32_h_s_conabio	2017	Humedales herbáceos de tule	7.19	0.34	683040.01	2085651.76	DATOS PROPIOS
50	2017_33_s_s_conabio	2017	Selva subperennifolia	219.86	1.86	683686.57	2096667.97	DATOS PROPIOS
51	CONAFOR_59645	2005	Manglar mixto	35.29	ND	727322.11	2128397.54	CONAFOR, 2015a
52	CONAFOR_59645	2009	Manglar mixto	39.15	ND	727586.13	2128695.52	CONAFOR, 2015a
53	CONAFOR_59646	2010	Selva subperennifolia	121.69	ND	732194.64	2128052.53	CONAFOR, 2015a
54	CONAFOR_59898	2007	Selva subperennifolia	157.23	ND	732005.72	2123073.56	CONAFOR, 2015a
55	CONAFOR_60150	2007	Selva subperennifolia	23.91	ND	721683.72	2118732.06	CONAFOR, 2015a
56	CONAFOR_60151	2007	Selva subperennifolia	3.81	ND	726686.27	2118393.28	CONAFOR, 2015a
57	CONAFOR_60402	2007	Selva subperennifolia	14.25	ND	711328.50	2114365.78	CONAFOR, 2015a
58	CONAFOR_60402	2010	Selva subperennifolia	16.23	ND	711306.94	2114350.28	CONAFOR, 2015a
59	CONAFOR_60404	2005	Selva subperennifolia	75.65	ND	721237.03	2113751.75	CONAFOR, 2015a
60	CONAFOR_60655	2005	Manglar mixto	97.32	ND	706001.67	2109692.29	CONAFOR, 2015a
61	CONAFOR_60909	2005	Manglar mixto	101.09	ND	700672.17	2105020.63	CONAFOR, 2015a
62	CONAFOR_60909	2009	Manglar mixto	95.34	ND	700860.15	2105099.53	CONAFOR, 2015a
63	CONAFOR_61164	2005	Mangle negro	20.78	ND	695194.73	2100259.56	CONAFOR, 2015a
64	CONAFOR_61164	2011	Mangle negro	47.12	ND	695319.70	2100542.69	CONAFOR, 2015a
65	CONAFOR_61168	2007	Selva subperennifolia	58.20	ND	715366.17	2099034.91	CONAFOR, 2015a
66	CONAFOR_61168	2010	Selva subperennifolia	47.72	ND	715269.35	2098976.13	CONAFOR, 2015a
67	CONAFOR_61169	2011	Selva subperennifolia	54.60	ND	720464.34	2098759.04	CONAFOR, 2015a
68	CONAFOR_61419	2005	Manglar mixto	35.13	ND	690034.74	2095652.24	CONAFOR, 2015a
69	CONAFOR_61424	2006	Selva subperennifolia	36.19	ND	715043.88	2094018.11	CONAFOR, 2015a
70	CONAFOR_61678	2010	Selva subperennifolia	16.96	ND	709711.41	2089344.13	CONAFOR, 2015a

Datos de carbono aéreo obtenidos en campo, continuación...

71	CONAFOR_61924	2010	Mangle negro	51.47	ND	668920.40	2086840.18	CONAFOR, 2015a
72	CONAFOR_61925	2011	Pastizales	0.25	ND	674392.11	2086546.10	CONAFOR, 2015a
73	CONAFOR_61931	2005	Selva subperennifolia	158.34	ND	704376.29	2084671.95	CONAFOR, 2015a
74	CONAFOR_62178	2005	Mangle negro	14.55	ND	664054.07	2082275.88	CONAFOR, 2015a
75	CONAFOR_62185	2005	Mangle botoncillo	16.78	ND	699038.53	2080001.56	CONAFOR, 2015a
76	CONAFOR_62437	2009	Mangle negro	25.85	ND	683732.33	2076001.51	CONAFOR, 2015a
77	CONAFOR_62439	2006	Humedales herbáceos de tule	0.79	ND	693727.43	2075333.27	CONAFOR, 2015a
78	CONAFOR_62439	2011	Manglar mixto	15.65	ND	693495.61	2075330.88	CONAFOR, 2015a
79	CONAFOR_62440	2005	Humedales herbáceos de tule	0.24	ND	698710.63	2075016.34	CONAFOR, 2015a
80	CONAFOR_62692	2010	Selva subperennifolia	58.45	ND	698382.72	2070000.41	CONAFOR, 2015a
81	CONAFOR_62932	2005	Manglar mixto	18.08	ND	643079.91	2068576.58	CONAFOR, 2015a
82	CONAFOR_63176	2011	Mangle negro	16.18	ND	597774.34	2066473.36	CONAFOR, 2015a
83	CONAFOR_63177	2005	Mangle negro	54.14	ND	602784.78	2066270.72	CONAFOR, 2015a
84	CONAFOR_63178	2005	Mangle negro	45.63	ND	607767.35	2065851.56	CONAFOR, 2015a
85	CONAFOR_63180	2007	Mangle negro	63.93	ND	632769.37	2064227.96	CONAFOR, 2015a
86	CONAFOR_63181	2009	Manglar mixto	14.69	ND	637752.83	2063925.50	CONAFOR, 2015a
87	CONAFOR_63191	2009	Manglar mixto	32.08	ND	687795.04	2060577.35	CONAFOR, 2015a
88	CONAFOR_63192	2010	Selva subperennifolia	2.85	ND	692738.21	2060347.73	CONAFOR, 2015a
89	CONAFOR_63432	2011	Mangle negro	58.09	ND	607444.31	2060839.22	CONAFOR, 2015a
90	CONAFOR_63446	2011	Selva subperennifolia	38.07	ND	682402.54	2056002.00	CONAFOR, 2015a
91	CONAFOR_63448	2005	Selva subperennifolia	12.28	ND	692408.03	2055332.15	CONAFOR, 2015a
92	CONAFOR_63682	2009	Manglar mixto	94.40	ND	557167.95	2059052.89	CONAFOR, 2015a
93	CONAFOR_63683	2010	Manglar mixto	69.86	ND	561820.54	2058851.05	CONAFOR, 2015a
94	CONAFOR_63692	2009	Manglar mixto	85.00	ND	607120.84	2055857.66	CONAFOR, 2015a
95	CONAFOR_63706	2005	Mangle negro	27.45	ND	676335.29	2051327.40	CONAFOR, 2015a
96	CONAFOR_63709	2005	Selva subperennifolia	44.71	ND	691628.95	2049971.37	CONAFOR, 2015a
97	CONAFOR_63941	2005	Manglar mixto	58.73	ND	531856.50	2055643.29	CONAFOR, 2015a
98	CONAFOR_63953	2009	Manglar mixto	95.42	ND	591810.90	2051812.18	CONAFOR, 2015a
99	CONAFOR_63954	2005	Manglar mixto	71.10	ND	596825.62	2051498.96	CONAFOR, 2015a
100	CONAFOR_63955	2005	Manglar mixto	108.95	ND	601811.26	2051186.89	CONAFOR, 2015a
101	CONAFOR_63955	2011	Manglar mixto	71.04	ND	601133.11	2051199.07	CONAFOR, 2015a
102	CONAFOR_63957	2005	Manglar mixto	30.05	ND	611812.73	2050536.10	CONAFOR, 2015a
103	CONAFOR_63958	2005	Manglar mixto	33.08	ND	616799.27	2050197.20	CONAFOR, 2015a
104	CONAFOR_63958	2009	Manglar mixto	48.48	ND	616926.50	2050167.84	CONAFOR, 2015a
105	CONAFOR_63969	2005	Selva subperennifolia	35.98	ND	671755.91	2046647.89	CONAFOR, 2015a
106	CONAFOR_64223	2009	Manglar mixto	134.24	ND	576494.99	2047779.34	CONAFOR, 2015a
107	CONAFOR_64224	2010	Manglar mixto	92.92	ND	581510.34	2047462.05	CONAFOR, 2015a
108	CONAFOR_64226	2005	Manglar mixto	79.19	ND	591666.27	2046832.01	CONAFOR, 2015a
109	CONAFOR_64228	2005	Manglar mixto	83.61	ND	601486.16	2046174.81	CONAFOR, 2015a
110	CONAFOR_64232	2005	Manglar mixto	177.74	ND	621465.97	2044877.65	CONAFOR, 2015a
111	CONAFOR_64233	2009	Manglar mixto	78.65	ND	626483.44	2044572.12	CONAFOR, 2015a
112	CONAFOR_64501	2005	Selva subperennifolia	34.56	ND	606149.28	2040851.71	CONAFOR, 2015a
113	CONAFOR_64517	2005	Selva subperennifolia	15.99	ND	686168.07	2035702.32	CONAFOR, 2015a
114	CONAFOR_64783	2011	Selva subperennifolia	39.22	ND	655795.78	2032645.21	CONAFOR, 2015a
115	CONAFOR_65068	2010	Selva subperennifolia	59.68	ND	660478.15	2027303.54	CONAFOR, 2015a
116	CONAFOR_65070	2005	Selva subperennifolia	136.36	ND	670467.11	2026651.52	CONAFOR, 2015a
117	CONAFOR_65355	2005	Selva subperennifolia	14.92	ND	650147.48	2022977.69	CONAFOR, 2015a
118	CONAFOR_65357	2005	Selva subperennifolia	43.05	ND	659722.36	2022265.50	CONAFOR, 2015a
119	CONAFOR_65642	2009	Selva subperennifolia	62.57	ND	624856.56	2019600.50	CONAFOR, 2015a
120	CONAFOR_65947	2005	Selva subperennifolia	128.15	ND	684479.54	2010699.79	CONAFOR, 2015a
121	CONAFOR_66518	2005	Pastizales	0.69	ND	598934.69	2006202.76	CONAFOR, 2015a
122	Kauffman_Grijalva	2014	Manglar mixto	141.00	45.00	53327.88	2057220.05	KAUFFMAN et al, 2015
123	Kauffman_Boca Pedro Oeste	2014	Manglar mixto	149.00	11.00	557172.50	2062394.49	KAUFFMAN et al, 2016
124	Kauffman_Boca Pedro Este	2014	Manglar mixto	122.00	27.00	555410.49	2062013.03	KAUFFMAN et al, 2017
125	Kauffman_Sabalo	2014	Manglar mixto	174.00	13.00	556177.24	2055984.97	KAUFFMAN et al, 2018
126	Kauffman_Cometa	2014	Manglar mixto	63.00	9.00	560315.40	2044733.73	KAUFFMAN et al, 2019
127	Kauffman_Vidal	2014	Manglar mixto	236.00	36.00	559911.00	2053023.66	KAUFFMAN et al, 2020
128	Kauffman_Gallego	2014	Manglar mixto	78.00	7.00	558192.00	2056123.83	KAUFFMAN et al, 2021
129	Kauffman_Pastizal Cometa	2014	Pastizales	10.00	8.00	560896.62	2045102.56	KAUFFMAN et al, 2022
130	Kauffman_Pastizal Vidal	2014	Pastizales	6.00	41.00	559911.00	2053023.66	KAUFFMAN et al, 2023
131	Kauffman_Pastizal Gallego	2014	Pastizales	14.00	22.00	558280.40	2055967.35	KAUFFMAN et al, 2024

AGC=Above Ground Carbon (Mg C ha⁻¹)

STDV = Standart Desviation

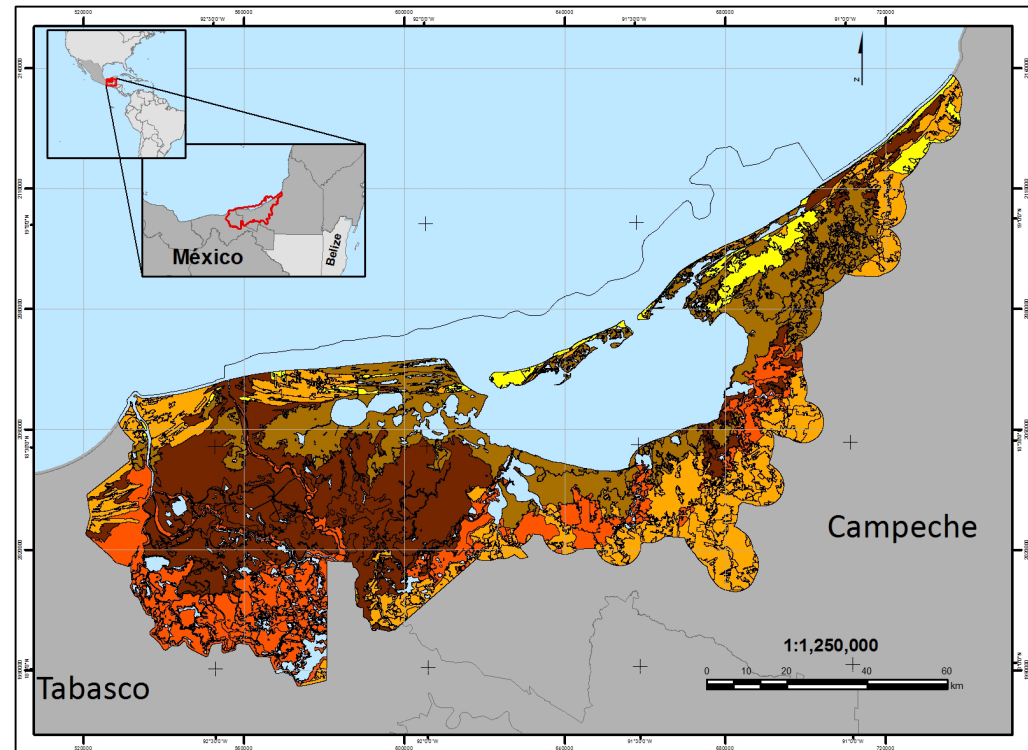
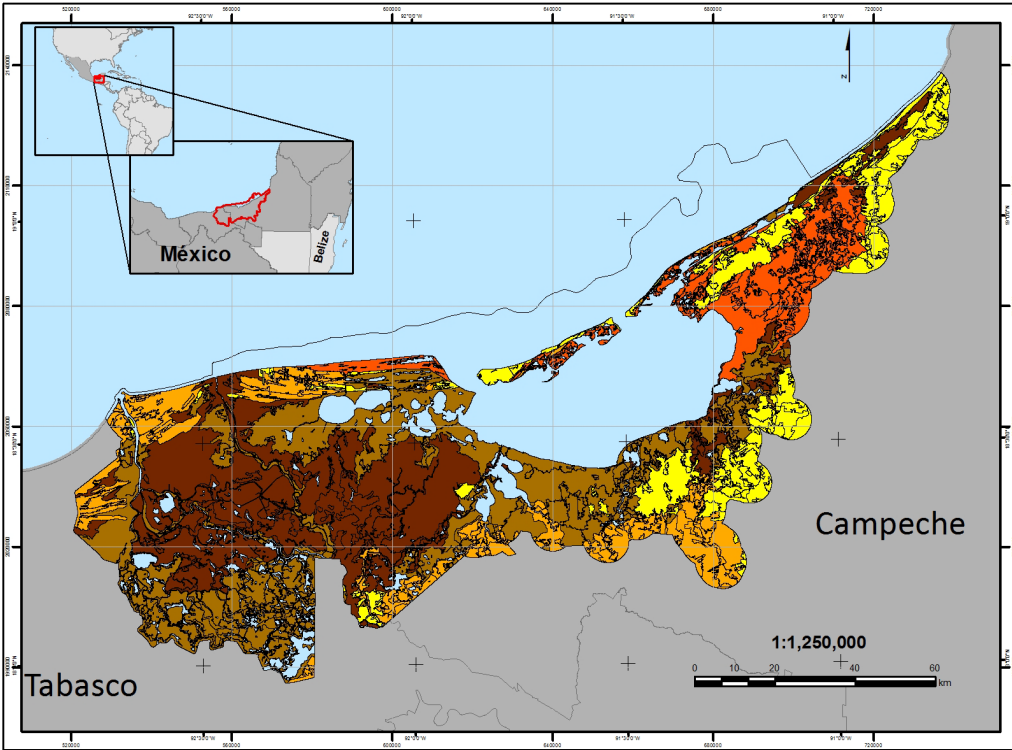
Anexo 5. Datos de carbono subterráneo obtenidos en campo.

# Punto	IDENTIFICADOR	AÑO COLECTA	Cobertura	BGC	STDV	x	y	REFERENCIA
1	2015_1_h_s_conabio	2015	Humedales herbáceos de tule	209.30	32.26	547145.7632	2011316.647	DATOS PROPIOS
2	2015_2_s_s_conabio	2015	Selva de galería	462.77	49.35	548776.9358	2015076.534	DATOS PROPIOS
3	2015_3_m_s_conabio	2015	Mangle botoncillo	267.55	101.78	540600.8784	2029544.685	DATOS PROPIOS
4	2015_4_s_s_conabio	2015	Selva subperennifolia	54.38	14.5	548874.7106	2046848.089	DATOS PROPIOS
5	2015_5_h_s_conabio	2015	Humedales herbáceos mixtos	84.83	31.66	571555.7755	2014637.401	DATOS PROPIOS
6	2015_6_h_s_conabio	2015	Humedales herbáceos de tule	309.77	112.11	573065.0393	2012903.815	DATOS PROPIOS
7	2015_7_h_s_conabio	2015	Humedales herbáceos mixtos	118.69	21.2	617513.6727	2019283.691	DATOS PROPIOS
8	2015_8_h_s_conabio	2015	Humedales herbáceos mixtos	177.15	56.33	617518.2066	2026414.578	DATOS PROPIOS
9	2015_9_m_s_conabio	2015	Manglar mixto	509.47	107.6	618074.0674	2033666.053	DATOS PROPIOS
10	2015_10_s_s_conabio	2015	Selva subperennifolia	99.68	16.47	647012.6271	2030102.677	DATOS PROPIOS
11	2015_11_s_s_conabio	2015	Selva subperennifolia	250.81	56.41	667029.2362	2026071.864	DATOS PROPIOS
12	2015_12_m_s_conabio	2015	Manglar mixto	283.59	103.2	690541.4793	2058831.604	DATOS PROPIOS
13	2015_13_s_s_conabio	2015	Selva subperennifolia	59.89	22.61	689645.5815	2038455.492	DATOS PROPIOS
14	2015_14_h_s_conabio	2015	Pastizales	18.01	4.32	705334.6209	2101148.592	DATOS PROPIOS
15	2015_15_m_s_conabio	2015	Mangle botoncillo	91.34	18.11	702796.2447	2100943.935	DATOS PROPIOS
16	2015_16_m_s_conabio	2015	Mangle negro	105.41	7.1	680526.8746	2090749.903	DATOS PROPIOS
17	2015_17_s_s_conabio	2015	Selva subperennifolia	125.41	32.78	728619.1077	2120662.131	DATOS PROPIOS
18	2015_18_m_s_conabio	2015	Mangle negro	165.11	55.74	591434.7566	2064361.59	DATOS PROPIOS
19	2015_19_x_s_conabio	2015	Mangle botoncillo	140.25	20.55	702986.2532	2092816.653	DATOS PROPIOS
20	2015_20_x_s_conabio	2015	Manglar mixto	170.43	8.05	701051.226	2104719.703	DATOS PROPIOS
21	2015_21_x_s_conabio	2015	Sin vegetación aparente	50.55	14.08	692143.6021	2036338.576	DATOS PROPIOS
22	2017_1_a_s_conabio	2017	Agrícola-pecuaria	78.28	14.65	570463.1066	2041034.899	DATOS PROPIOS
23	2017_2_h_s_conabio	2017	Humedales herbáceos de tule	606.70	145.36	569795.1712	2033648.339	DATOS PROPIOS
24	2017_3_a_s_conabio	2017	Agrícola-pecuaria	49.85	9.42	575258.2802	2036214.176	DATOS PROPIOS
25	2017_5_s_s_conabio	2017	Selva subperennifolia	583.87	75.45	578674.9932	2037212.216	DATOS PROPIOS
26	2017_6_h_s_conabio	2017	Humedales herbáceos de tule	728.48	287.1	586351.593	2034409.208	DATOS PROPIOS
27	2017_7_x_s_conabio	2017	Manglar mixto	618.33	160.84	579639.089	2049678.661	DATOS PROPIOS
28	2017_8_x_s_conabio	2017	Manglar mixto	690.84	120.22	583217.2742	2050082.899	DATOS PROPIOS
29	2017_9_x_s_conabio	2017	Manglar mixto	746.72	273.14	582696.186	2048241.394	DATOS PROPIOS
30	2017_10_x_s_conabio	2017	Manglar mixto	642.69	48.83	584068.5825	2045726.524	DATOS PROPIOS
31	2017_11_h_s_conabio	2017	Humedales herbáceos de tule	620.55	87.5	584281.3778	2046443.255	DATOS PROPIOS
32	2017_12_h_s_conabio	2017	Humedales herbáceos de tule	680.97	239.23	584808.9773	2042945.033	DATOS PROPIOS
33	2017_13_m_s_conabio	2017	Mangle negro	173.66	39.78	578879.7764	2064901.194	DATOS PROPIOS
34	2017_14_a_s_conabio	2017	Selva subperennifolia	159.62	32.41	578175.5555	2063487.421	DATOS PROPIOS
35	2017_15_s_s_conabio	2017	Selva subperennifolia	232.30	21.36	661889.4636	2080719.538	DATOS PROPIOS
36	2017_16_m_s_conabio	2017	Manglar mixto	290.15	34.34	661155.9119	2079373.251	DATOS PROPIOS
37	2017_17_m_s_conabio	2017	Mangle negro	253.42	43.56	680880.1521	2078795.33	DATOS PROPIOS
38	2017_18_m_s_conabio	2017	Mangle negro	67.81	12.5	678346.8738	2078795.34	DATOS PROPIOS
39	2017_19_m_s_conabio	2017	Manglar mixto	446.58	18.69	671405.0025	2081770.299	DATOS PROPIOS
40	2017_20_m_s_conabio	2017	Mangle negro	323.49	58.96	668491.4482	2085469.372	DATOS PROPIOS
41	2017_22_x_s_conabio	2017	Manglar mixto	242.48	47.63	702048.5254	2105381.251	DATOS PROPIOS
42	2017_23_h_s_conabio	2017	Humedales herbáceos de tule	748.03	200.02	707803.0852	2103896.817	DATOS PROPIOS
43	2017_24_x_s_conabio	2017	Selva subperennifolia	373.37	63.44	709609.3733	2102868.367	DATOS PROPIOS
44	2017_25_m_s_conabio	2017	Mangle botoncillo	269.92	85.6	701568.2594	2095051.04	DATOS PROPIOS
45	2017_26_h_s_conabio	2017	Pastizales	96.45	42.77	699833.6259	2094730.319	DATOS PROPIOS
46	2017_27_x_s_conabio	2017	Selva subperennifolia	212.81	78.64	690632.0895	2100378.019	DATOS PROPIOS
47	2017_28_m_s_conabio	2017	Manglar mixto	191.84	12.56	679874.2994	2091146.189	DATOS PROPIOS
48	2017_29_h_s_conabio	2017	Humedales herbáceos de tule	140.97	21.69	689563.3208	2087218.396	DATOS PROPIOS
49	2017_30_m_s_conabio	2017	Mangle negro	115.54	36.28	677339.1073	2083473.818	DATOS PROPIOS
50	2017_31_s_s_conabio	2017	Selva subperennifolia	74.23	17.06	680737.156	2082956.219	DATOS PROPIOS
51	2017_32_h_s_conabio	2017	Humedales herbáceos de tule	521.14	129.6	683040.0093	2085651.762	DATOS PROPIOS
52	2017_33_s_s_conabio	2017	Selva subperennifolia	326.22	108.3	685332.2809	2097879.762	DATOS PROPIOS
53	Kauffman_Grijalva	2014	Manglar mixto	101.2	46.25	533327.8798	2057220.046	KAUFFMAN et al, 2015
54	Kauffman_Boca Pedro Oeste	2014	Manglar mixto	491.22	79.81	557172.4973	2062394.486	KAUFFMAN et al, 2015
55	Kauffman_Boca Pedro Este	2014	Manglar mixto	377.49	74.67	555410.4852	2062013.032	KAUFFMAN et al, 2015
56	Kauffman_Sabalo	2014	Manglar mixto	413.03	81.26	556177.2352	2055984.974	KAUFFMAN et al, 2015
57	Kauffman_Cometa	2014	Manglar mixto	418.86	28.86	560315.4001	2044733.729	KAUFFMAN et al, 2015
58	Kauffman_Vidal	2014	Manglar mixto	345.56	87.14	559910.9994	2053023.655	KAUFFMAN et al, 2015
59	Kauffman_Gallego	2014	Manglar mixto	382.36	25.58	558191.9985	2056123.829	KAUFFMAN et al, 2015
60	Kauffman_Pastizal Cometa	2014	Pastizales	210.48	39.53	560896.6188	2045102.557	KAUFFMAN et al, 2015
61	Kauffman_Pastizal Vidal	2014	Pastizales	136.81	31.6	559910.9994	2053023.655	KAUFFMAN et al, 2015
62	Kauffman_Pastizal Gallego	2014	Pastizales	270.92	55.13	558280.4019	2055967.349	KAUFFMAN et al, 2015

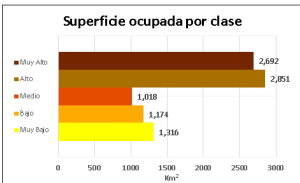
AGC=Above Ground Carbon (Mg C ha⁻¹)

STDV = Standart Desviation

Anexo 6. Mapas de Almacenes de carbono observados y esperados



CARBONO TOTAL ALMACENADO VALORES OBSERVADOS (Tg C)



CATEGORÍAS DE VALORES
Método de categorización: Rompimiento Natural

Muy alto (≥ 74.14)
Alto (35.18 - 74.14)
Medio (21.50 - 35.18)
Bajo (12.94 - 21.50)
Muy Bajo (≤ 12.94)

SÍMBOLOS CONVENCIONALES

Área de estudio

VÍAS TERRESTRES
Carretera federal
Carretera estatal
Otros caminos

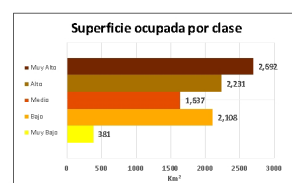
RASGOS HIDROGRÁFICOS
Lago o Laguna

PARAMETROS CARTOGRÁFICOS
Proyección: UTM
Elipsoide: WGS84
Datum: WGS84

POBLACIONES
Con más de 50,000 habitantes: Ciudad del Carmen
De 10,001 a 50,000 habitantes: Frontera
De 5,001 a 10,000 habitantes: Isla Aguada
De 1,001 a 5,000 habitantes: Pueblo
Zona Urbana

REFERENCIAS CARTOGRÁFICAS / DIGITAL CARTOGRAPHIC REFERENCE BASE
Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI). 2007. Rango hidrográfico. Conjunto de datos vectoriales de la Carta Topográfica Serie II, escala 1:250,000. Aguascalientes, México.
Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT). 2012. Red de vías de comunicación de la Secretaría de Comunicaciones y Transportes. 2012, escala 1:250,000, edición: 19. Secretaría de Comunicaciones y Transportes. Distrito Federal, México.
Comisión Nacional de Áreas Protegidas (CONANP). 2016. Colección de las Áreas Naturales Protegidas Federales de México. Reserva de la Biosfera Pantanos de Centauro. Área de Protección de Flora y Fauna Laguna de Términos, estado Yucatán. Disponible en: <http://sig.gob.mx/gob/mex/bsi/bsi/bsi/> (Fecha de acceso: 17 de octubre de 2016).
Comisión Nacional para el Desarrollo y los Recursos Naturales (CONADERO). 2009. Sistema de manglar con relevancia biológica y con necesidades de rehabilitación ecológica. COCABIO, México, D.F.

CARBONO TOTAL ALMACENADO VALORES ESPERADOS (Tg C)



CATEGORÍAS DE VALORES
Método de categorización: Rompimiento natural

Muy alto (> 60.08)
Alto (36.39 - 60.08)
Medio (19.90 - 36.39)
Bajo (7.24 - 19.90)
Muy Bajo (< 7.24)

SÍMBOLOS CONVENCIONALES

Área de estudio

VÍAS TERRESTRES
Carretera federal
Carretera estatal
Otros caminos

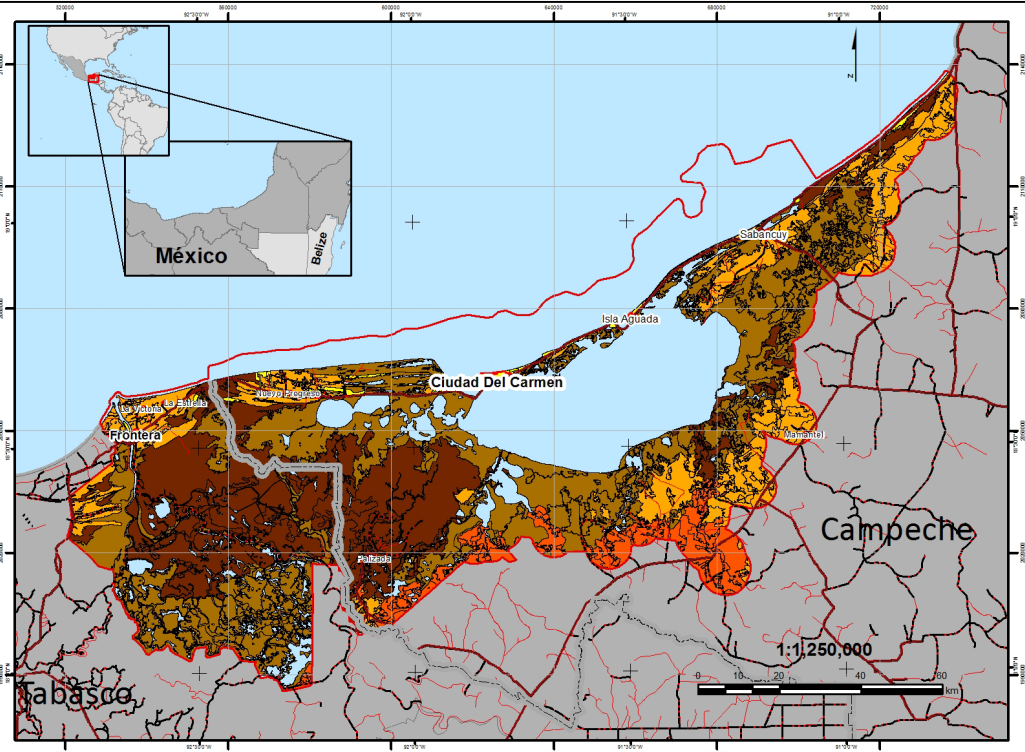
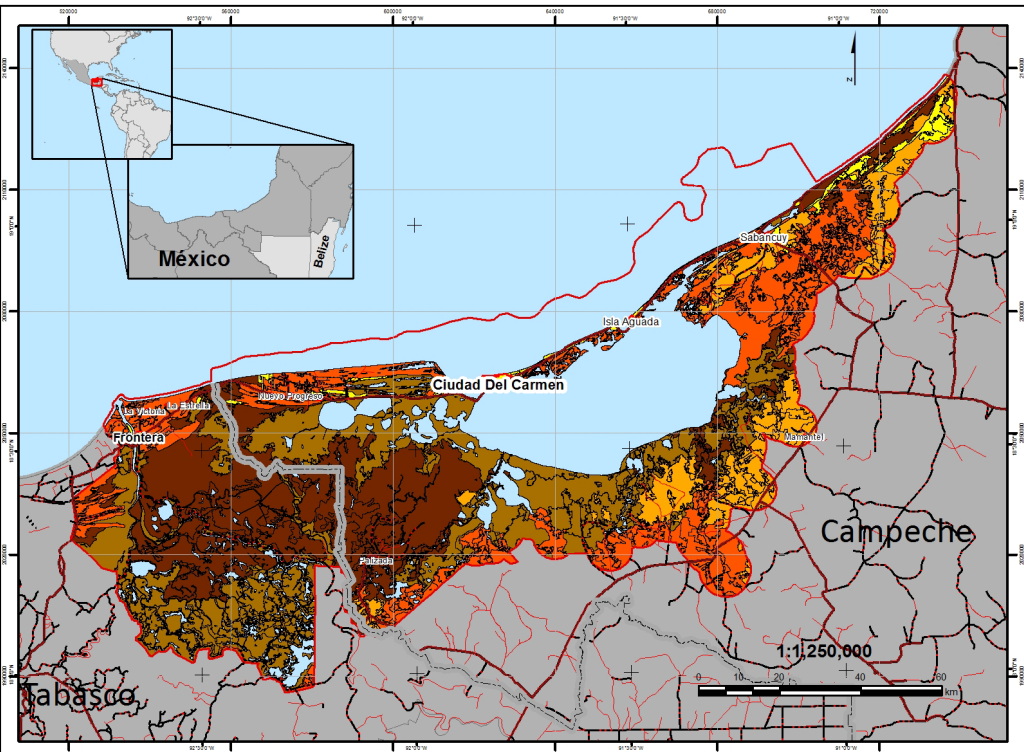
RASGOS HIDROGRÁFICOS
Lago o Laguna

PARAMETROS CARTOGRÁFICOS
Proyección: UTM
Elipsoide: WGS84
Datum: WGS84

POBLACIONES
Con más de 50,000 habitantes: Ciudad del Carmen
De 10,001 a 50,000 habitantes: Frontera
De 5,001 a 10,000 habitantes: Isla Aguada
De 1,001 a 5,000 habitantes: Pueblo
Zona Urbana

REFERENCIAS CARTOGRÁFICAS / DIGITAL CARTOGRAPHIC REFERENCE BASE
Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI). 2007. Rango hidrográfico. Conjunto de datos vectoriales de la Carta Topográfica Serie II, escala 1:250,000. Aguascalientes, México.
Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT). 2012. Red de vías de comunicación de la Secretaría de Comunicaciones y Transportes. 2012, escala 1:250,000, edición: 19. Secretaría de Comunicaciones y Transportes. Distrito Federal, México.
Comisión Nacional de Áreas Protegidas (CONANP). 2016. Colección de las Áreas Naturales Protegidas Federales de México. Reserva de la Biosfera Pantanos de Centauro. Área de Protección de Flora y Fauna Laguna de Términos, estado Yucatán. Disponible en: <http://sig.gob.mx/gob/mex/bsi/bsi/bsi/> (Fecha de acceso: 17 de octubre de 2016).
Comisión Nacional para el Desarrollo y los Recursos Naturales (CONADERO). 2009. Sistema de manglar con relevancia biológica y con necesidades de rehabilitación ecológica. COCABIO, México, D.F.

Anexo 6. Continuación...



CARBONO TOTAL ALMACENADO VALORES OBSERVADOS en Ln (Tg C)

SÍMBOLOS CONVENCIONALES

CATEGORÍAS DE VALORES
Método de categorización: Rompimiento natural

- Muy alto (>= 4.305916)
- Alto (3.560535 - 4.305915)
- Medio (2.560479 - 3.56534)
- Bajo (1.551174 - 2.560478)
- Muy Bajo (<= 1.551173)

POBLACIONES

- Con más de 50,000 habitantes: Ciudad del Carmen
- De 10,001 a 50,000 habitantes: Frontera
- De 5,001 a 10,000 habitantes: Isla Aguada
- De 1,001 a 5,000 habitantes: Pakalá
- Zona Urbana

REFERENCIAS CARTOGRÁFICAS / DIGITAL CARTOGRAPHIC REFERENCE BASE

PARAMETROS CARTOGRÁFICOS

Proyección: UTM
Elipsoide: WGS84
Datum: WGS84

Superficie ocupada por clase

Muy Alto	2,692
Alto	2,851
Medio	2,192
Bajo	1,057
Muy Bajo	232

CARBONO TOTAL ALMACENADO VALORES ESPERADOS en Ln (Tg C)

SÍMBOLOS CONVENCIONALES

CATEGORÍAS DE VALORES
Método de categorización: Rompimiento natural

- Muy alto (>= 4.095600)
- Alto (2.990448 - 4.095599)
- Medio (2.592172 - 2.990447)
- Bajo (1.233838 - 2.592171)
- Muy Bajo (<= 1.233837)

POBLACIONES

- Con más de 50,000 habitantes: Ciudad del Carmen
- De 10,001 a 50,000 habitantes: Frontera
- De 5,001 a 10,000 habitantes: Isla Aguada
- De 1,001 a 5,000 habitantes: Pakalá
- Zona Urbana

REFERENCIAS CARTOGRÁFICAS / DIGITAL CARTOGRAPHIC REFERENCE BASE

PARAMETROS CARTOGRÁFICOS

Proyección: UTM
Elipsoide: WGS84
Datum: WGS84

Superficie ocupada por clase

Muy Alto	2,692
Alto	3,869
Medio	465
Bajo	1,682
Muy Bajo	116