



UNIVERSIDAD JUÁREZ AUTÓNOMA DE TABASCO

DIVISIÓN ACADÉMICA DE CIENCIAS BIOLÓGICAS



**PROPUESTA DE MEJORA DEL SECUESTRO DE CARBONO EN
LA VILLA BENITO JUÁREZ, MACUSPANA, TABASCO**

TESIS PARA OBTENER EL TÍTULO DE:
LICENCIADO EN GESTIÓN AMBIENTAL

PRESENTA:

EDUARDO PALOMEQUE JIMÉNEZ

BAJO LA DIRECCIÓN DE:

DRA. EUNICE PÉREZ SÁNCHEZ

EN CODIRECCIÓN DE:

DR. HUMBERTO HERNÁNDEZ TREJO

VILLAHERMOSA, TABASCO. OCTUBRE DE 2025

Declaración de Autoría y Originalidad

En la Ciudad de Villahermosa, Tabasco, el día 23 del mes de septiembre del año 2025, los que suscriben **Eduardo Palomeque Jiménez** alumno del Programa de **Licenciatura en Gestión Ambiental** con número de matrícula **192G23001** adscritos a la **División Académica de Ciencias Biológicas** de la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco, como autor de la Tesis presentada para la obtención del título de **Licenciatura en Gestión Ambiental** y titulada "**Propuesta de mejora del secuestro de carbono en la Villa Benito Juárez, Macuspana, Tabasco**" dirigida por la **Dra. Eunice Pérez Sánchez** y el **Dr. Humberto Hernández Trejo**

DECLARO QUE:

La Tesis es una obra original que no infringe los derechos de propiedad intelectual ni los derechos de propiedad industrial u otros, de acuerdo con el ordenamiento jurídico vigente, en particular, la LEY FEDERAL DEL DERECHO DE AUTOR (Decreto por el que se reforman y adicionan diversas disposiciones de la Ley Federal del Derecho de Autor del 01 de Julio de 2020 regularizando y aclarando y armonizando las disposiciones legales vigentes sobre la materia), en particular, las disposiciones referidas al derecho de cita.

Del mismo modo, asumo frente a la Universidad cualquier responsabilidad que pudiera derivarse de la autoría o falta de originalidad o contenido de la Tesis presentada de conformidad con el ordenamiento jurídico vigente

Villahermosa, Tabasco a 23 de septiembre 2025.


Eduardo Palomeque Jiménez

Firma y nombre del tesista



**UNIVERSIDAD JUÁREZ
AUTÓNOMA DE TABASCO**

"ESTUDIO EN LA DUDA. ACCIÓN EN LA FE"



**DIVISIÓN ACADÉMICA DE CIENCIAS BIOLÓGICAS
DIRECCIÓN**



2025
AÑO DE LA
Mujer
Indígena

Villahermosa, Tab., a 24 de Septiembre de 2025


ASUNTO: Autorización de Modalidad de Titulación

**C. LIC. MARIBEL VALENCIA THOMPSON
JEFE DEL DEPTO. DE CERTIFICACIÓN Y TITULACION
DIRECCIÓN DE SERVICIOS ESCOLARES
P R E S E N T E**

Por este conducto y de acuerdo a la solicitud correspondiente por parte del interesado, informo a usted, que en base al reglamento de titulación vigente en esta Universidad, ésta Dirección a mi cargo, autoriza al **C. EDUARDO PALOMEQUE JIMÉNEZ** egresado de la Lic. en **GESTIÓN AMBIENTAL** de la División Académica de **CIENCIAS BIOLÓGICAS** la opción de titularse bajo la modalidad de Tesis denominado: **"PROPUESTA DE MEJORA DEL SECUESTRO DE CARBONO EN LA VILLA BENITO JUÁREZ, MACUSPANA, TABASCO"**.

Sin otro particular, aprovecho la ocasión para saludarle afectuosamente.

A T E N T A M E N T E


**DR. ARTURO GARRIDO MORA
DIRECTOR DE LA DIVISIÓN ACADÉMICA
DE CIENCIAS BIOLÓGICAS**

**U.J.A.T.
DIVISIÓN ACADÉMICA
DE CIENCIAS BIOLÓGICAS**



DIRECCIÓN

C.c.p.- Expediente Alumno de la División Académica
C.c.p.- Interesado



**UNIVERSIDAD JUÁREZ
AUTÓNOMA DE TABASCO**

"ESTUDIO EN LA DUDA. ACCIÓN EN LA FE"



2025
AÑO DE LA **Mujer**
Indígena

DIVISIÓN ACADÉMICA DE CIENCIAS BIOLÓGICAS
DIRECCIÓN

SEPTIEMBRE 24 DE 2025

C. EDUARDO PALOMEQUE JIMÉNEZ
PAS. DE LA LIC. EN GESTIÓN AMBIENTAL
P R E S E N T E

En virtud de haber cumplido con lo establecido en los Arts. 80 al 85 del Cap. III del Reglamento de titulación de esta Universidad, tengo a bien comunicarle que se le autoriza la impresión de su Trabajo Recepcional, en la Modalidad de Tesis denominado: **"PROPUESTA DE MEJORA DEL SECUESTRO DE CARBONO EN LA VILLA BENITO JUÁREZ, MACUSPANA, TABASCO"**, asesorado por la Dra. Eunice Pérez Sánchez y Humberto Hernández Trejo sobre el cual sustentará su Examen Profesional, cuyo jurado está integrado por la Dra. Ofelia Castillo Acosta, Dr. Carlos Manuel Burelo Ramos, Ing. Elda Peralta Fuentes y Dra. Georgina Vargas Simón.

A T E N T A M E N T E
ESTUDIO EN LA DUDA. ACCIÓN EN LA FE

DR. ARTURO GARRIDO MORA
DIRECTOR

U.J.A.T.
DIVISIÓN ACADÉMICA
DE CIENCIAS BIOLÓGICAS



DIRECCIÓN

C.c.p.- Expediente del Alumno.
Archivo.



**UNIVERSIDAD JUÁREZ
AUTÓNOMA DE TABASCO**

"ESTUDIO EN LA DUDA. ACCIÓN EN LA FE"



**DIVISIÓN ACADÉMICA DE CIENCIAS BIOLÓGICAS
DIRECCIÓN**



23 de septiembre de 2025

C. EDUARDO PALOMEQUE JIMÉNEZ
Egresado de la Lic. en Gestión Ambiental

En cumplimiento de los lineamientos de la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco, se implementó la revisión del trabajo recepcional (Tesis), a través de la plataforma Turnitin iThenticate para evitar el plagio e incrementar la calidad en los procesos académicos y de investigación en esta División Académica. Esta revisión se realizó en correspondencia con el Código de Ética de la Universidad y el Código Institucional de Ética para la Investigación.

Por este conducto, hago de su conocimiento las observaciones, el índice de similitud y el reporte de originalidad obtenido a través de la revisión en la plataforma iThenticate de su trabajo recepcional **PROPUESTA DE MEJORA DEL SECUESTRO DE CARBONO EN LA VILLA BENITO JUÁREZ, MACUSPANA, TABASCO.**

OBSERVACIONES:

Se incluyó citas, se excluyó bibliografía y se estableció el umbral de exclusión de coincidencias pequeñas a 16 palabras.

RESULTADO DE SIMILITUD	3 %
	95 páginas y 9140 palabras

Finalmente, se le solicita al **C. EDUARDO PALOMEQUE JIMÉNEZ**, integrar en la versión final del trabajo recepcional, este oficio y el informe de originalidad con el porcentaje de similitud de Turnitin iThenticate.

Sin otro particular al cual referirme, aprovecho la oportunidad para enviarle un cordial saludo.

ATENTAMENTE
"ESTUDIO EN LA DUDA, ACCIÓN EN LA FE" U.J.A.T. DIVISIÓN ACADÉMICA DE CIENCIAS BIOLÓGICAS

DR. ARTURO GARRIDO MORA
DIRECTOR



C.c.p. Dra. Eunice Pérez Sánchez. Directora de trabajo recepcional
C.c.p. Dr. Humberto Hernández Trejo. Codirector de trabajo recepcional
C.c.p. Archivo



KM. 0.5 CARR. VILLAHERMOSA-CÁRDENAS ENTRONQUE A BOSQUES DE SALOYA
Tel. (993) 358-1500 Ext. 6400 y 6401, e-mail: direccion.dacbiol@ujat.mx

Usar papel reciclado economiza energía, evita contaminación y despilfarro de agua y ayuda a conservar los bosques

www.ujat.mx

EDUARDO PALOMEQUE JIMÉNEZ

PROPUESTA DE MEJORA DEL SECUESTRO DE CARBONO EN LA VILLA BENITO JUÁREZ, MACUSPANA, TABASCO

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco

Detalles del documento

95 páginas

25.137 palabras

140.446 caracteres

3% Similitud general

El total combinado de todas las coincidencias, incluidas las fuentes superpuestas, para ca...




Filtrado desde el informe

- ▶ Bibliografía
- ▶ Coincidencias menores (menos de 16 palabras)
- ▶ Abstract
- ▶ Trabajos entregados

Exclusiones

- ▶ N.º de coincidencias excluidas

Fuentes principales

- 3%  Fuentes de Internet
- 1%  Publicaciones
- 0%  Trabajos entregados (trabajos del estudiante)

Marcas de integridad




N.º de alertas de integridad para revisión

No se han detectado manipulaciones de texto sospechosas.

Los algoritmos de nuestro sistema analizan un documento en profundidad para buscar inconsistencias que permitirían distinguirlo de una entrega normal. Si advertimos algo extraño, lo marcamos como una alerta para que pueda revisarlo.

Una marca de alerta no es necesariamente un indicador de problemas. Sin embargo, recomendamos que preste atención y la revise.

Fuentes principales

- 3%  Fuentes de Internet
- 1%  Publicaciones
- 0%  Trabajos entregados (trabajos del estudiante)

Fuentes principales

Las fuentes con el mayor número de coincidencias dentro de la entrega. Las fuentes superpuestas no se mostrarán.

1	Internet	www.ambi-agua.net	<1%
2	Internet	www.coursehero.com	<1%
3	Internet	www.junksciencearchive.com	<1%
4	Internet	www.scielo.org.mx	<1%
5	Internet	revistas.ujat.mx	<1%
6	Internet	s3.amazonaws.com	<1%
7	Internet	www.ipcc.ch	<1%
8	Internet	www.redalyc.org	<1%
9	Internet	backend.aprende.sep.gob.mx	<1%
10	Internet	biblioteca.utb.edu.co	<1%
11	Internet	repositorio.upn.edu.pe	<1%

12	Internet	docplayer.es	<1%
13	Internet	repositorio.tec.mx	<1%
14	Internet	basotec.com	<1%
15	Internet	repositorio.uroosevelt.edu.pe	<1%
16	Internet	www.scribd.com	<1%
17	Internet	1library.co	<1%


Universidad Juárez Autónoma de Tabasco
México

Carta de Cesión de Derechos

Villahermosa, Tabasco a 23 de septiembre 2025.

Por medio de la presente manifestamos haber colaborado como AUTOR(A) y/o AUTORES(RAS) en la producción, creación y/o realización de la obra denominada **“Propuesta de mejora del secuestro de carbono en la Villa Benito Juárez, Macuspana, Tabasco”** Con fundamento en el artículo 83 de la Ley Federal del Derecho de Autor y toda vez que, la creación y/o realización de la obra antes mencionada se realizó bajo la comisión de la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco; entendemos y aceptamos el alcance del artículo en mención, de que tenemos el derecho al reconocimiento como autores de la obra, y la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco mantendrá en un 100% la titularidad de los derechos patrimoniales por un período de 20 años sobre la obra en la que colaboramos, por lo anterior, cedemos el derecho patrimonial exclusivo en favor de la Universidad.

COLABORADORES



Eduardo Tatamez Jimenez

Nombre y firma del Tesista


Dra. Eunice Pérez Sánchez


Dr. Humberto Hernández Trejo

TESTIGOS


Dr. Eduardo Salvador López Hernández.


Dra. Ana Rosa Rodríguez Luna

AGRADECIMIENTOS

A los que no solo sueñan con un mundo mejor,
sino que se interesan en cómo construirlo. Gracias

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco.
México

ÍNDICE DE CONTENIDO

I. INTRODUCCIÓN	18
II. MARCO TEÓRICO	24
2.1. MÉTODOS NATURALES DE CAPTURA DE CARBONO	25
2.1.1. <i>Estrategias latinoamericanas</i>	25
2.1.2 <i>Estrategias nacionales</i>	26
2.1.3 <i>Estrategias estatales</i>	28
2.2 NUEVAS TECNOLOGÍAS DE CAPTURA Y ALMACENAMIENTO DE CARBONO (CCS POR SUS SIGLAS EN INGLÉS: CARBON CAPTURE AND STORAGE)	29
2.3 ASPECTOS ECONÓMICOS Y POLÍTICOS EN PROYECTOS DE CAPTURA DE CARBONO.....	31
III. JUSTIFICACIÓN.....	33
IV. PREGUNTA DE INVESTIGACIÓN.....	34
V. HIPÓTESIS.....	34
VI. OBJETIVOS	35
6.1 GENERAL	35
6.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	35
VII. METODOLOGÍA.....	36
7.1 ÁREA DE ESTUDIO.....	36
7.2 RECOPIACIÓN DE DATOS HISTÓRICOS DE USO DE SUELO, TIPOS DE VEGETACIÓN Y PRÁCTICAS DE MANEJO	37
7.2.1 <i>Históricos del uso de suelo</i>	37
7.2.2 <i>Tipo de vegetación y prácticas de manejo</i>	38
7.2.2.1 <i>Análisis de la vegetación</i>	38
7.2.2.2 <i>Prácticas de manejo en la zona</i>	38
7.3 RECOPIACIÓN DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA.....	41
7.3.1 <i>Análisis de índices de vegetación</i>	41
7.3.2 <i>Análisis Espectral con la Spectral Band Comparison Tool de la NASA</i>	42
7.4 ANÁLISIS ESPECTRAL CON LA HERRAMIENTA RANDOMFOREST DE QGIS.....	46
7.4.1 <i>Selección de Muestras</i>	47
7.4.2 <i>Preparación para el Modelo RandomForest</i>	47
7.4.3 <i>Clasificación</i>	48
7.4.4 <i>Validación del Modelo</i>	49

7.5 INTEGRACIÓN DEL MODELO DE CAMBIO DE USO DE SUELO, TIPOS DE VEGETACIÓN Y PRÁCTICAS DE MANEJO DURANTE EL PERIODO 1986 - 2024.....	50
VIII. RESULTADOS	51
8.1 RECOPIACIÓN DE DATOS HISTÓRICOS DE USO DE SUELO, TIPOS DE VEGETACIÓN Y PRÁCTICAS DE MANEJO	51
8.1.1 <i>Datos Históricos De Uso De Suelo</i>	51
8.1.2 <i>Tipo de vegetación y prácticas de manejo</i>	55
8.1.2.1 Tema 1. Antecedentes del uso del suelo	56
8.1.2.2 Tema 2. Fertilidad y erosión del suelo	58
8.1.2.3 Tema 3. Especies arbóreas	62
8.1.2.4 Tema 4: Conocimientos heredados por generación	66
8.2 RECOPIACIÓN DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA	71
8.3 ANÁLISIS ESPECTRAL CON LA HERRAMIENTA RANDOMFOREST DE QGIS.....	80
8.4 INTEGRACIÓN DEL MODELO DE CAMBIO DE USO DE SUELO ENTRE 1986 Y 2024.....	89
IX. DISCUSIÓN	96
9.1 DATOS HISTÓRICOS DEL VALOR Y VOLUMEN DE LA PRODUCCIÓN MADERABLE EN TABASCO	96
9.2 DATOS HISTÓRICOS DEL TIPO DE VEGETACIÓN Y MANEJO DE SUELO.....	97
9.2.1 <i>Bloques temáticos de las entrevistas</i>	97
9.3 <i>Análisis de los índices espectrales</i>	99
9.4 CLASIFICACIÓN DE LA COBERTURA TERRESTRE	100
9.5 TENDENCIAS DE CAMBIO ENTRE 1986 Y 2024.....	102
X. CONCLUSIÓN Y RECOMENDACIONES	102
10.1 CONCLUSIONES.....	102
10.2 RECOMENDACIONES	104
XI. REFERENCIAS CITADAS	105
XII. ANEXOS.....	116
12.1 FORMATO DE LA ENTREVISTA	116

ÍNDICE DE TABLAS

TABLA 1	43
TABLA 2	52
DESCRIPCIÓN DEL VOLUMEN DE LA PRODUCCIÓN MADERABLE EN TABASCO (1993–2018)	52
TABLA 3	53
DESCRIPCIÓN DEL VALOR ECONÓMICO DE LA PRODUCCIÓN MADERABLE EN TABASCO (1993–2018)	53
TABLA 4	57
CORRELACIONES NO PARAMÉTRICAS DE ANTECEDENTES DEL USO DE SUELO	57
TABLA 5	58
PORCENTAJE DE TIPOS DE CULTIVO SEGÚN LA GENERACIÓN	58
TABLA 6	59
PRUEBAS DE NORMALIDAD PARA EL CONJUNTO DE DATOS TOTAL_PRACTICAS	59
TABLA 7	60
PRUEBA DE HOMOGENEIDAD DE VARIANZAS DE LEVENE	60
TABLA 8	61
ANÁLISIS DE VARIANZA ANOVA	61
TABLA 9	61
PRUEBA POST HOC DE TUKEY COMPARACIONES MÚLTIPLES	61
TABLA 10	62
ESPECIES ARBÓREAS MENCIONADAS POR GENERACIÓN	62
TABLA 11	64
PRUEBA DE NORMALIDAD P9	64
TABLA 12	66
PRUEBA DE CHI-CUADRADO P9	66
TABLA 13	67
PRUEBA DE NORMALIDAD PARA CONOCIMIENTOS_HEREDADOS	67

TABLA 14	68
PRUEBA DE HOMOGENEIDAD DE LEVENE	68
TABLA 15	68
PRUEBA DE VARIANZA APLICADA A CONOCIMIENTOS_HEREDADOS.....	68
TABLA 16	69
PRUEBA POST HOC DE TUKEY PATA CONOCIMIENTOS_HEREDADOS	69
TABLA 17	70
PRUEBA DE CHI-CUADRADO P13*GENERACIÓN.....	70
TABLA 18	77
TABLA 19	81
FOTOGRAFÍAS CON DRON DJI MINI 2 PARA IDENTIFICAR VISUALMENTE LA COBERTURA TERRESTRE.....	81
TABLA 20	83
CORRESPONDENCIA ENTRE CLASES PROPUESTAS Y NOMENCLATURA SEMARNAT	83
TABLA 21	95
PROBABILIDAD DE CAMBIO.....	95

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 1	36
MAPA DEL ÁREA DE ESTUDIO	36
FIGURA 2	45
ISOLINEAS SAVI	45
FIGURA 3	51
VOLUMEN DE PRODUCCIÓN MADERABLE (M3) TABASCO 1993-2018	51
FIGURA 4	53
VALOR ECONÓMICO DE LA PRODUCCIÓN MADERABLE	53
FIGURA 5	54
RELACIÓN ENTRE VOLUMEN Y VALOR MADERABLE	54
FIGURA 6	56
MAPA DE USO DE SUELO Y VEGETACIÓN DEL MUNICIPIO DE MACUSPANA	56
FIGURA 7	65
CRITERIO DE ELECCIÓN DE ÁRBOLES SEGÚN CADA GENERACIÓN	65
FIGURA 8	72
DATOS PRINCIPALES DE LA IMAGEN LANDSAT 5 UTILIZADA EN EL ANÁLISIS (11 DE MARZO DE 1986).....	72
FIGURA 9	73
DATOS PRINCIPALES DE LA IMAGEN LANDSAT 9 UTILIZADA EN EL ANÁLISIS (08 DE FEBRERO DE 2024) ..	73
FIGURA 10	74
ESCENA PREPROCESADA LANDSAT TM 5 (1986).....	74
FIGURA 11	75
ESCENA PREPROCESADA LANDSAT TIRS 9 (2024).....	75
FIGURA 12	76
COMPARACIÓN DE LAS MISIONES SATELITALES LANDSAT 5 Y 9	76
FIGURA 13	78

NDVI PARA LA IMAGEN PREPROCESADA LANDSAT TIRS 9	78
FIGURA 14	79
SAVI PARA LA IMAGEN PREPROCESADA LANDSAT TIRS 9.....	79
FIGURA 15	80
MAPA DE PUNTOS ALEATORIOS PARA LA CLASIFICACIÓN.....	80
FIGURA 16	84
CLASIFICACIÓN DE LA COBERTURA TERRESTRE SEGÚN LAS MUESTRAS	84
FIGURA 17	85
FIRMAS ESPECTRALES DE LAS MUESTRAS ROI DE LAS FOTOGRAFÍAS CON DRON	85
FIGURA 18	86
DIAGRAMA DE FLUJO PARA LA CLASIFICACIÓN DE LA COBERTURA TERRESTRE	86
FIGURA 19	87
MODELO DE LAS CLASIFICACIONES DE LA COBERTURA TERRESTRE	87
FIGURA 20	89
CLASIFICACIÓN DEL POTENCIAL DE SECUESTRO DE CARBONO	89
FIGURA 21	90
GANANCIAS Y PÉRDIDAS DE LA VEGETACIÓN, PASTIZALES Y HUMEDALES ENTRE 1986 Y 2024.....	90
FIGURA 22	91
GANANCIAS Y PÉRDIDAS GENERALES ENTRE 1986 Y 2024	91
FIGURA 23	92
MAPA DE PERSISTENCIAS DE LA COBERTURA TERRESTRE ENTRE 1986 Y 2024	92
FIGURA 24	93
TENDENCIAS DE CAMBIO EN LA VILLA BENITO JUÁREZ ENTRE 1986 Y 2024.....	93

PROPUESTA DE MEJORA DEL SECUESTRO DE CARBONO DE LA VILLA BENITO JUÁREZ, MACUSPANA TABASCO.

Autor: Eduardo Palomeque Jiménez

Resumen

El estudio "Propuesta de mejora del secuestro de carbono en la Villa Benito Juárez, Macuspana, Tabasco" evalúa y busca optimizar la captura de carbono para mitigar el cambio climático local y aumentar la resiliencia del ecosistema, en respuesta a las significativas emisiones del municipio. La metodología integró Sistemas de Información Geográfica y teledetección, utilizando imágenes satelitales Landsat de 1986 y 2024. Se aplicó un modelo de clasificación supervisada (Random Forest) con una alta precisión global (87.26%) para analizar la cobertura terrestre. Este enfoque se complementó con 63 entrevistas semiestructuradas para documentar el conocimiento tradicional y un Modelo de Cambio de Márkov para analizar las dinámicas de uso del suelo. Los resultados revelan que el 61.7% del área (1,016.37 ha) aún conserva coberturas naturales (vegetación, pastizales y humedales) con potencial de secuestro. Sin embargo, el análisis temporal muestra una preocupante tendencia de expansión urbana y agrícola, resultando en una pérdida neta sustancial de humedales. Las proyecciones a 2054 indican una alta persistencia de las áreas construidas y la conversión continua de vegetación natural y humedales hacia usos agrícolas. A pesar de estos cambios, el conocimiento tradicional sobre manejo del suelo se mantiene constante entre generaciones. Se concluye que la implementación de prácticas sostenibles es fundamental para fortalecer la capacidad de secuestro de carbono. Por ello, se recomienda priorizar la protección de la vegetación remanente, la restauración ecológica de humedales y la promoción de sistemas agroforestales como estrategias clave.

Palabras Clave: Carbono, Vegetación, Suelo, SIG.

Abstract:

The study, "Proposal for the Improvement of Carbon Sequestration in Villa Benito Juárez, Macuspana, Tabasco," evaluates and seeks to optimize carbon sequestration to mitigate local climate change and enhance ecosystem resilience in response to the municipality's significant emissions. The methodology integrated Geographic Information Systems and remote sensing, using Landsat satellite imagery from 1986 and 2024. A supervised classification model (Random Forest) with a high overall accuracy (87.26%) was applied to analyze land cover. This approach was complemented by 63 semi-structured interviews to document traditional knowledge and a Markov Chain Model to analyze land-use dynamics. The results reveal that 61.7% of the area (1,016.37 ha) still retains natural cover (vegetation, grasslands and wetlands) with sequestration potential. However, the

temporal analysis shows a concerning trend of urban and agricultural expansion, resulting in a substantial net loss of wetlands. Projections to 2054 indicate a high persistence of built-up areas and the continued conversion of natural vegetation and wetlands to agricultural uses. Despite these changes, traditional knowledge regarding land management remains consistent across generations. It is concluded that the implementation of sustainable practices is fundamental to strengthening carbon sequestration capacity. Therefore, prioritizing the protection of remnant vegetation, the ecological restoration of wetlands, and the promotion of agroforestry systems are recommended as key strategies.

Keywords: Carbon, Vegetation, Soil, GIS.

México

I. INTRODUCCIÓN

El secuestro de carbono en suelos es un proceso esencial para mitigar el cambio climático, reduciendo los niveles de CO₂ atmosférico (Jiménez-Madrid, *et al.*, 2012). Los suelos forestales son los principales depósitos de carbono en la tierra, ya que se consideran ecosistemas complejos capaces de almacenar grandes cantidades de carbono en su materia orgánica. Por lo tanto, actúan como importantes sumideros de carbono y podrían ser uno de los recursos naturales más vulnerables frente al cambio climático (Jandl, 2005).

Diferentes sistemas de manejo de pasturas y bosques influyen en la capacidad de secuestro de carbono, siendo los potreros arbolados más efectivos que los convencionales (Torres-Rivera *et al.*, 2011). Los humedales altoandinos también son importantes sumideros de carbono, con aquellos en mejor estado de conservación mostrando mayor capacidad de almacenamiento (Duque *et al.*, 2016). Para optimizar el secuestro de carbono en suelos, es necesario comprender los procesos clave y su relación con factores como temperatura, humedad y nutrientes. El manejo forestal adecuado, incluyendo la selección de especies, ordenación de bosques y mejora de suelos, puede aumentar sosteniblemente la fijación de carbono en el suelo (Jandl, 2005).

Los bosques desempeñan un papel vital en la regulación del clima mediante el secuestro de carbono en su biomasa. La biomasa refleja las condiciones ambientales y de salud de un ecosistema forestal (Sinha *et al.*, 2015). Por otra parte, las tierras agrícolas y otros ecosistemas terrestres ofrecen muchas posibilidades de mitigación del carbono. La conservación y secuestro de carbono, aunque no necesariamente con carácter permanente, pueden dar tiempo para que se desarrollen y pongan en práctica otras medidas (IPCC, 2001).

A nivel internacional, se reconoce la importancia del secuestro de carbono como una estrategia clave para mitigar el cambio climático. Diversos ecosistemas juegan un papel crucial en este proceso, entre ellos, los humedales de gran altitud en las áreas protegidas de Ecuador y de la Puna peruana, que han mostrado un notable potencial de almacenamiento de carbono. Los humedales en buen estado de conservación son los que presentan los niveles más altos de contenido de carbono,

en algunos casos a pesar de cubrir una superficie reducida (Duque *et al.*, 2016; Medina *et al.*, 2020). Los sistemas agroforestales en la región amazónica del Perú son reconocidos como sumideros de carbono altamente efectivos, brindando tanto beneficios económicos como ecológicos, y contribuyendo a reducir la presión sobre la deforestación (Clemente-Arenas, 2021). No obstante, las emisiones globales de CO₂ vinculadas al consumo de energía aumentaron un 1,4 % en 2017, tras tres años de estabilidad (Valderrama-López *et al.*, 2019). Estos datos resaltan la importancia de continuar los esfuerzos de investigación y conservación para optimizar el secuestro de carbono en diversos ecosistemas, como parte de una estrategia para combatir el calentamiento global.

Por otra parte, el rápido crecimiento de la población humana a nivel global en las últimas décadas, junto con la creciente demanda de recursos naturales para cubrir sus necesidades de supervivencia, así como los métodos y mecanismos de apropiación de estos recursos, a menudo vinculados a fuerzas sociales, políticas y económicas, han tenido un impacto significativo en la estructura y funcionamiento de los ecosistemas (Mas *et al.*, 2009). Estas interacciones entre el ser humano y el ambiente, o entre el entorno y los procesos relacionados con la economía social, se expresan o concretan en cambios en la cobertura y el uso del suelo.

Estudios recientes en México se han enfocado en el secuestro de carbono en diversos ecosistemas. En suelos agrícolas y de pastizales, la investigación ha aumentado en la última década, con estudios que abordan el almacenamiento de carbono, la fertilidad y los impactos de las prácticas de conservación (Zamora-Morales *et al.*, 2019). Los ecosistemas forestales juegan un papel crucial en el calentamiento global, con un contenido de carbono en bosques templados y selvas estimado en 17.36 mg C ha⁻¹ y 8 mg C ha⁻¹, respectivamente (Flores-Garnica *et al.*, 2018). Los arrecifes de coral en el Pacífico contribuyen significativamente al secuestro de carbono, como en el caso de Cabo Pulmo (Aguilera *et al.*, 2017). Los ecosistemas de manglar en San Blas-Laguna Grande de Mexcaltitán, Nayarit, han mostrado cambios en el almacenamiento de carbono a lo largo de 35 años, con un aumento en la biomasa y el secuestro de carbono de sur a norte. El valor monetario

del almacenamiento de carbono en estos manglares se estimó en \$ 4'431,826 de dólares por tonelada CO₂/ha (Agraz-Hernández *et al.*, 2020).

La deforestación y el cambio en la cobertura y uso del suelo en México, es un problema que se ha presentado desde tiempos precolombinos, sin embargo, durante las últimas cinco décadas este proceso se ha incrementado dramáticamente, con un panorama poco alentador. Según la Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO), los 52 millones de hectáreas de bosques y selvas con que contaba el país en el año 2000, presentaron una tasa de deforestación promedio de 631 mil ha/año (Ibarra-Montoya *et al.*, 2011). La investigación sobre el secuestro de carbono en México ha aumentado en la última década, con estudios centrados en las reservas de carbono, la fertilidad del suelo y los impactos de las prácticas de conservación. Instituciones como el Colegio de Postgraduados se han destacado en este campo, siendo Tabasco una de las regiones más estudiadas (Zamora-Morales *et al.*, 2019).

En Tabasco, la presión ejercida por las actividades antrópicas entre 1965 y 1996 ocasionaron la pérdida de biodiversidad en ecosistemas tropicales, así como la disminución de la superficie boscosa (Vargas-Simón *et al.* 2019). Según el inventario de emisiones de carbono para el año 2016 se estimó que se liberan aproximadamente entre 7,724 y 9,810 toneladas por año en el municipio de Macuspana. Por esta situación la captura de carbono juega un papel indispensable en la mitigación del cambio climático y es importante contar con la vegetación forestal y tierras agrícolas para la captura y almacenamiento de carbono como resultado de los procesos fotosintéticos, de respiración y degradación de la materia seca (Gordillo *et al.* 2008).

La investigación sobre la captura de carbono en Tabasco se ha centrado en diversos ecosistemas y prácticas agrícolas. Los estudios han evaluado la captura de carbono en plantaciones de cacao, encontrando que las plantaciones de 15 años secuestraron más carbono (100.6 ± 110.5 t/C/ha) en comparación con las plantaciones de 20 años (49.9 ± 14 t/C/ha) (Trinidad *et al.*, 2016). En selvas tropicales remanentes, especies como *Rinorea guatemalensis* han mostrado un potencial significativo de captura de carbono (Montero-Gordillo *et al.*, 2015). Los

ecosistemas de manglar en Tabasco han demostrado una alta capacidad de almacenamiento de carbono, que oscila entre 47 y 82 kg C/m² en suelos de *Rhizophora mangle* y *Laguncularia racemosa* (Moreno Cáliz *et al.*, 2016).

En este sentido, los resultados de este estudio sirven como una base científica y técnica para identificar las áreas con mayor potencial de captura de carbono mediante sistemas de información geográfica (SIG) en la Villa Benito Juárez, Macuspana, y con ello orientar estrategias de conservación, restauración y manejo sostenible de los ecosistemas locales. La información generada permite no solo fortalecer la toma de decisiones en materia de políticas públicas y planeación ambiental, sino también impulsar futuros proyectos comunitarios que integren la conservación forestal con beneficios productivos, garantizando un equilibrio entre el desarrollo económico y la sostenibilidad ecológica. De esta manera, el presente trabajo se consolida como un insumo estratégico para enfrentar los desafíos del cambio climático en Tabasco y aportar soluciones replicables en otras regiones tropicales del país.

II. MARCO TEÓRICO

Las plantaciones forestales son una opción preferida de mitigación de gases de efecto invernadero (GEI) según las disposiciones del Artículo 3.3 del Protocolo de Kioto de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático referido a la Aforestación, Reforestación, Deforestación o ARD (Updegraff *et al.*, 2004).

Los principales sumideros de carbono terrestres son extremadamente vulnerables al cambio climático y al impacto del uso de la tierra. Actualmente, la biosfera terrestre actúa como un sumidero de carbono, cuya capacidad es variable pero generalmente creciente, en gran parte gracias a la fertilización por CO₂. No obstante, si las emisiones de gases de efecto invernadero se mantienen o superan los niveles actuales y no se mitigan los factores de cambio global, incluidos los cambios en el uso del suelo, especialmente la deforestación tropical, es probable que la capacidad de absorción de carbono alcance su punto máximo antes de mediados de siglo. A partir de entonces, la biosfera podría transformarse en una fuente neta de carbono, intensificando el cambio climático (IPCC, 2007).

Debido a esta situación, la captura de carbono desempeña un papel significativo en la mitigación del cambio climático global. Sin embargo, este proceso solo es posible con la colaboración de la biodiversidad vegetal, ya que las plantas almacenan carbono como resultado de sus procesos biogeoquímicos (Gordillo *et al.*, 2008).

La agricultura, la silvicultura y el uso de la tierra genera el 21% de las emisiones mundiales de las emisiones de gases de efecto invernadero (Lamb *et al.*, 2021). Estas emisiones provienen principalmente del CO₂ generado por la deforestación debido al uso del suelo para la producción de alimentos, del CH₄ emitido por la cría de ganado (producción de carne y productos lácteos) y del cultivo de arroz, así como de las emisiones de N₂O que resultan del uso de fertilizantes (Fazekas *et al.*, 2022). Para el año 2050, se proyecta que la demanda de alimentos en general aumente en más del 50 %, mientras que la de productos de origen animal lo hará en más del 70%. Este crecimiento estará impulsado principalmente por el aumento de la población y los ingresos a nivel global (Tilman & Clark, 2014). Como consecuencia, se prevé un aumento considerable en las emisiones directas, la deforestación y la

pérdida de biodiversidad, a menos que se adopten medidas transformadoras (Searchinger *et al.*, 2019).

La investigación sobre metodologías de secuestro de carbono en América Latina ha aumentado significativamente en los últimos años. Los estudios se han centrado en la estimación de las reservas de carbono, la fertilidad del suelo, la dinámica del carbono y los impactos de las prácticas de conservación en suelos agrícolas y de pastizales (Zamora-Morales *et al.*, 2019). Las plantaciones forestales han mostrado potencial para la fijación de carbono, con el Mecanismo de Desarrollo Limpio (MDL) mejorando potencialmente la rentabilidad de los proyectos forestales marginales en la Patagonia (Chidiak *et al.*, 2003).

La evolución de la materia orgánica del suelo tras el cambio de uso de la tierra se ha estudiado mediante análisis térmico, calorimetría y resonancia magnética nuclear, revelando cambios en la composición química y las tasas de degradación microbiana (Pena *et al.*, 2014).

Se observa que las investigaciones enfatizan que los ecosistemas forestales desempeñan un papel significativo en la emisión y el secuestro de carbono, así como examinan el potencial de las plantaciones forestales, las tierras de pastoreo y las prácticas agrícolas para la fijación de carbono. La fertilidad del suelo, la biomasa del suelo y la mineralización del carbono influyen en el secuestro de carbono, mientras que la biomasa puede servir como sustituto energético (Zambrano *et al.*, 2007).

2.1. Métodos naturales de captura de carbono

2.1.1. Estrategias latinoamericanas

Los métodos naturales de captura de carbono son procesos para mitigar el cambio climático realizados por la vegetación, que a través de la fotosíntesis incorporan carbono a su estructura (Fernández-Losada, 2017). Diversos procesos biológicos y no biológicos contribuyen a la fijación del dióxido de carbono atmosférico, incluyendo mecanismos oceánicos, geológicos y químicos, así como el secuestro de carbono en el suelo (Nogia *et al.*, 2016). Para estimar la captura de carbono en los bosques, se emplean métodos como ecuaciones alométricas y factores de

expansión (Fernández-Losada, 2017). En Perú, se han implementado políticas y mecanismos destinados a enfrentar el cambio climático, destacándose proyectos de MDL e iniciativas como la Reducción de Emisiones por Deforestación y Degradación Forestal (REDD+, por sus siglas en inglés) en áreas protegidas (Jiménez *et al.*, 2020).

En Argentina, los bosques nativos de la región del Espinal presentaron tasas de captura de carbono de entre 1.94 y 3.49 t CO₂/ha/año, lo que subraya su importancia en las estrategias de mitigación del cambio climático (Ledesma *et al.*, 2021). En el páramo de Rabanal, en Colombia, estudios revelaron que la vegetación autóctona almacenaba más carbono y mantenía mejores propiedades del suelo en comparación con las plantaciones de pino (Fernández-Pérez *et al.*, 2019). En Perú, los sistemas agroforestales han surgido como una alternativa sostenible a la agricultura tradicional, pues ofrecen secuestro de carbono a largo plazo a través de la integración de árboles y reducen la presión de la deforestación. Sin embargo, aún se necesitan metodologías estandarizadas para la estimación del carbono que faciliten las comparaciones a mayor escala (Clemente-Arenas, 2021).

2.1.2 Estrategias nacionales

En México, la investigación sobre bosques templados ha demostrado un potencial significativo de secuestro de carbono, con beneficios económicos para las comunidades indígenas (Díaz & Benjamín, 1999). Hasta 1994, México había perdido más de la mitad de sus bosques templados y selvas tropicales, principalmente por cambios en el uso del suelo, tala ilegal, infraestructura e incendios, y de los 55 millones de ha que aún existían, todavía hoy en día, la tasa de deforestación es por lo menos de 60 ha/hora en el país. Por otra parte, los suelos, 32 millones de ha estaban fuertemente erosionadas, 800 mil ha salinizadas y se pierden anualmente más de 500 millones de toneladas de tierra fértil (Palma López & Triano Sánchez, 2007).

Los estudios de casos regionales proveen de datos precisos sobre los flujos y almacenamiento de carbono en los bosques. Un ejemplo de ello es un estudio realizado en Michoacán que utilizó el modelo CO₂ FIX para estimar el potencial de

fijación de CO₂ en un bosque templado (Ordoñez Díaz, 1999; Ordoñez & De Jong, 2001).

Los sistemas agroforestales (SAF) en México se presentan como una alternativa sostenible para la captura de carbono en ecosistemas tropicales, contribuyendo tanto al aumento de la productividad como a la mitigación del calentamiento global (Casanova-Lugo *et al.*, 2011). En los últimos años, la investigación sobre el secuestro de carbono orgánico en suelos agrícolas y de pastoreo ha cobrado relevancia en el país, centrando sus estudios en la estimación de reservas, la fertilidad y la dinámica del carbono (Zamora-Morales *et al.*, 2019). El manejo forestal y la captura de carbono han adquirido mayor importancia debido a la creciente conciencia sobre el cambio climático y la valoración de los servicios ambientales que brindan los ecosistemas forestales (Díaz & Benjamín, 2008). El análisis de los anillos de crecimiento de los árboles ofrece una valiosa herramienta para estimar el potencial de captura de carbono en México, combinando enfoques dendroecológicos con técnicas alométricas. Esto abre la puerta a la realización de estudios más profundos sobre la dinámica del carbono almacenado en el país (Reyes-Basilio *et al.*, 2020).

Se han propuesto líneas de estudio futuras, incluyendo la estandarización de metodologías analíticas e indicadores de captura de carbono. Estas investigaciones son apoyadas por instituciones nacionales y responden a compromisos internacionales de México en materia de cambio climático (Zamora-Morales *et al.*, 2019), como la captura de carbono en sistemas agroforestales de regiones tropicales como alternativa sostenible (Casanova-Lugo *et al.*, 2011). Otro ejemplo son las empresas que cotizan en el Índice Sustentable de la Bolsa Mexicana de Valores que están adoptando estrategias de huella de carbono y participando en proyectos internacionales de presentación de informes de sostenibilidad (Mendoza-Cavazos *et al.*, 2021).

Estos enfoques contribuyen a los esfuerzos de México para mitigar el calentamiento global y cumplir con los compromisos internacionales en materia de cambio climático, aunque para alcanzar las metas de reducción de emisiones de gases de efecto invernadero es necesario realizar esfuerzos significativos por parte de las

empresas, los consumidores y las instituciones gubernamentales (Mendoza-Cavazos *et al.*, 2021; Zamora-Morales *et al.*, 2019).

2.1.3 Estrategias estatales

La investigación en Tabasco ha explorado varios métodos naturales de captura de carbono. Los estudios han examinado la captura de carbono en diferentes ecosistemas, incluidos los bosques altos perennifolios, las plantaciones de cacao, los pastizales y la vegetación arbórea periurbana. En un remanente de bosque alto perennifolio, *Rinorea guatemalensis* fue identificada como la especie más importante para la captura de carbono debido a su abundancia y biomasa (Gordillo, *et al.*, 2015). Un estudio de pastizales en Emiliano Zapata encontró una captura promedio de carbono de 0.188 t/C/ha de plantas herbáceas y pastos (Reyes, *et al.*, 2015).

Los datos históricos de Sánchez (2005) ejemplifican y confirman los datos de INEGI menciona que en las décadas de 1980-2000, el campo tabasqueño experimentó un aumento significativo en la introducción de cabezas de ganado, aumentando la tendencia de la desaparición de extensas zonas de amortiguamiento vegetal y cuerpos de agua, se puede visualizar como los efectos antropogénicos convierten en una zona cada vez más árida la planicie tabasqueña. Asimismo, Geissen *et al.* (2008) en su estudio sobre la erosión superficial y carstificación en Macuspana, menciona que se identificaron más de 1300 puntos de pérdida de suelo por los efectos del sobrepastoreo y mal manejo de pastizales probablemente causó primero erosión laminar y con el tiempo se generaron diferentes formas de erosión linear también en áreas menos inclinadas.

En las zonas periurbanas, la vegetación arbórea demostró una capacidad de almacenamiento de carbono que oscila entre 38.99 y 84.82 t/C/ha, lo que resalta la importancia ambiental de estas áreas (Tobías-Baeza, *et al.*, 2019). Otro estudio en plantaciones de cacao en Huimanguillo reveló que las plantaciones de 15 años secuestraron más carbono (100.6 ± 110.5 t/C/ha-1) en comparación con las de 20 años (49.9 ± 14 t/C/ha-1) (Trinidad *et al.*, 2016). Asimismo, en el mismo Municipio se registraron aumentos significativos en la extensión de humedales y vegetación

arbórea entre 2000 y 2010, mientras que las áreas dedicadas a la agricultura disminuyeron. Se prevé que estas tendencias continúen hasta 2030, con un crecimiento sostenido de los humedales, bosques y zonas urbanas (Ramos Reyes *et al.*, 2019). En Comalcalco, las tierras de pastoreo se redujeron, mientras que las áreas agrícolas y urbanas se expandieron durante el mismo periodo (Ramos Reyes *et al.*, 2016).

La sierra del estado de Tabasco ha cambiado su estructura selvática rápidamente en los últimos 50 años. De acuerdo con el censo agrícola de 1950 las selvas cubrían una superficie de 538 ha (27%) del territorio estatal, para 1990, las selvas cubrían una superficie de 41,079 ha (1.65%) de la extensión territorial del estado (Sanchez, 2005).

Por otra parte, Tabasco en el año 2000 tuvo una producción total de 3,241 metros cúbicos de producción forestal maderable y para el año 2017 producía un total de 521,546 metros cúbicos del recurso (INEGI, 2001), ejemplificando no solo las prácticas que se han tenido en estado en las últimas seis décadas, sino que se ha carecido de atención a la necesidad de prácticas agro-sustentables en las zonas ganaderas del estado.

Los estudios agrológicos y agronómicos más importantes realizados en Tabasco, se incluyen trabajos para establecer cultivos en áreas de riego, como el Plan Chontalpa (1973) y el proyecto de riego "Balancán-Tenosique" (1972). También destacan estudios de gran visión desarrollados por Cetenal en 1976, y diversos estudios agrológicos semidetallados en la región de la Chontalpa y Tacotalpa durante la década de 1980, publicados por la Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos (SARH). Estos estudios fueron fundamentales para el desarrollo agrícola de la región (Palma-López., *et al* 2007).

2.2 Nuevas tecnologías de captura y almacenamiento de carbono

Proyecciones indican que para el año 2100, la biosfera terrestre podría transformarse en una fuente neta de carbono. Este cambio amplificaría el calentamiento global debido a las continuas emisiones de gases de efecto

invernadero y otros cambios globales no mitigados, como las alteraciones en el uso del suelo (IPCC, 2007).

Recientes investigaciones destacan tecnologías emergentes para la CCS (por sus siglas en inglés: carbon capture and storage) como estrategias clave para mitigar el cambio climático. Los materiales a base de madera y los productos de madera de ingeniería muestran un gran potencial para el almacenamiento prolongado de carbono y la captura de CO₂ (Singh *et al.*, 2022). Además, se están desarrollando técnicas agrícolas avanzadas que permiten secuestrar carbono en reservorios bióticos, geológicos, pedológicos y marinos (Elavarasi *et al.*, 2024). En el ámbito industrial se exploran CCS, considerando factores como los costos, el transporte y las implicaciones socioeconómicas (Wilberforce *et al.*, 2020). El enfoque integrado CCS está ganando relevancia como una estrategia de mitigación prometedora, ya que el uso del CO₂ no solo podría ofrecer beneficios económicos, sino también alinearse con los principios de la economía circular (Nocito & Dibenedetto, 2020). Estos avances en tecnologías de captura y almacenamiento de carbono buscan abordar el creciente nivel de CO₂ atmosférico y su impacto en el clima global, ofreciendo soluciones viables para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero en diversos sectores.

El IPCC (2007) prevé que, durante este siglo, la absorción neta de carbono por los ecosistemas terrestres alcance su máximo antes de 2050, para luego debilitarse e incluso revertirse, contribuyendo así a la intensificación del cambio climático. La conservación de los bosques brinda muchos beneficios, entre los que se incluyen la moderación de la temperatura del microclima, la absorción de lluvia y el control de las inundaciones durante eventos climáticos significativos, y la prevención de la escorrentía irremplazable del suelo (Costanza *et al.*, 2014).

Para evaluar el potencial de un secuestro adicional de carbono mediante la gestión forestal, en el marco de las estrategias de mitigación del cambio climático, es fundamental comprender el almacenamiento de carbono en la biomasa forestal, el suelo, los productos de madera y las interacciones entre estos compartimentos ambientales, tal como describen Kaul *et al.* (2010). La ordenación forestal puede potenciar el almacenamiento de carbono a través de diversas prácticas, como la

elección de la duración de la rotación, la intensidad del raleo, la densidad y el espaciamiento de los rodales, así como técnicas silvícolas como el corte de árboles y la preparación del suelo. Estas acciones pueden resultar en aumentos o disminuciones en las reservas de carbono de la biomasa forestal (Kaul *et al.* 2010). Existen diversas estrategias que pueden potenciar aún más la captura de carbono, tales como la agricultura de conservación, la agrosilvicultura, la aplicación de biocarbón, la forestación y la restauración de humedales. Estos enfoques no solo mejoran las reservas de carbono orgánico del suelo, sino que también generan un balance positivo de carbono, especialmente en ecosistemas degradados (Nayak *et al.*, 2022). Por lo tanto, la mitigación biológica puede producirse mediante tres estrategias: a) la conservación de los sumideros de carbono ya existentes, b) el secuestro mediante un aumento de la capacidad de los sumideros de carbono y c) el uso de productos biológicos obtenidos de manera sostenible, por ejemplo, la madera como sustituto de productos en la industria de la construcción que precisan una gran cantidad de energía y la biomasa como sustituto de los combustibles fósiles (IPCC. 2001).

2.3 Aspectos económicos y políticos en proyectos de captura de carbono

Las tecnologías de CCS están adquiriendo cada vez más relevancia como una solución potencial para mitigar el cambio climático y reducir las emisiones de CO₂, mientras se continúa utilizando combustibles fósiles (Balat y Öz, 2007). Los modelos económicos indican que estas tecnologías podrían volverse competitivas en ciertos escenarios políticos, siendo los precios del carbono un factor significativo para su adopción (Biggs *et al.*, 2000). No obstante, el costo sigue siendo la principal barrera para su implementación a gran escala, lo que subraya la necesidad de establecer marcos políticos e incentivos que fomenten una difusión más acelerada (Gowd *et al.*, 2023). La introducción de impuestos al carbono y la creciente demanda de productos generados mediante CO₂ capturado podrían facilitar la adopción de tecnologías de CCS (Gowd *et al.*, 2023).

Si bien las CCS podría ayudar a México a cumplir los objetivos del Acuerdo de París, requiere una inversión considerable y tiene efectos negativos sobre el ambiente

(Banacloche, *et al.*, 2022). Los proyectos forestales en el mercado voluntario de carbono ofrecen un enfoque alternativo que implica a diversas partes interesadas y precios de mercado, pero se enfrentan a retos relacionados con la propiedad de la tierra y la cooperación comunitaria (Rontard, *et al.*, 2020). México se ha preparado para la implementación de REDD+ y ha lanzado su Iniciativa de Reducción de Emisiones, pero la coordinación entre las políticas forestales y climáticas es crucial (Ranero & Covaléda, 2018).

Los sistemas agroforestales suponen una opción sostenible para la retención de carbono en México, que ofrecen beneficios tanto ecológicos como productivos (Casanova-Lugo, *et al.*, 2011). De acuerdo con Ranero y Covaléda (2018), para lograr sus objetivos de reducción de emisiones, México debe utilizar de manera efectiva los nuevos mecanismos financieros emergentes y considerar la posibilidad de ampliar las opciones de créditos de carbono para incluir diferentes tipos de proyectos forestales.

Además, es importante considerar los aspectos socioeconómicos, así como la conciencia pública y las percepciones asociadas con la CCS, para asegurar una comunicación efectiva y promover la aceptación social de estas tecnologías (Wilberforce *et al.*, 2020). De esta manera, la captura y almacenamiento de carbono podría representar un enfoque prometedor para abordar las emisiones globales de carbono, pero su éxito depende de una cuidadosa consideración de los factores económicos, políticos y sociales involucrados a nivel local.

III. JUSTIFICACIÓN

La conservación de los bosques brinda muchos beneficios, entre los que se incluyen la moderación de la temperatura del microclima, la absorción de lluvia y el control de las inundaciones durante eventos climáticos significativos, y la prevención de la escorrentía irremplazable del suelo.

En este contexto, la Villa Benito Juárez, ubicada en Macuspana, Tabasco, presenta una oportunidad significativa para implementar estrategias efectivas de secuestro de carbono, dada su ubicación geográfica, sus características ambientales y el impacto potencial que tales iniciativas podrían tener en la región.

La importancia de este trabajo radica en la necesidad urgente de abordar el cambio climático a nivel local, mediante prácticas que no solo capturen carbono, sino que también promuevan la sostenibilidad ambiental, económica y social de la comunidad. El secuestro de carbono no solo contribuye a la mitigación del cambio climático, sino que también ofrece beneficios adicionales, como la mejora de la fertilidad del suelo, la conservación de la biodiversidad y la protección de los recursos hídricos.

En una región como Macuspana, que enfrenta desafíos ambientales significativos, incluyendo la deforestación, la degradación del suelo y la pérdida de biodiversidad, este proyecto tiene el potencial de generar un impacto positivo considerable. La contribución de este trabajo no se limita a los beneficios ambientales directos, sino que también incluye la creación de un modelo de desarrollo sostenible que pueda ser replicado en otras comunidades de la región. Al demostrar que es posible integrar la captura de carbono con el desarrollo económico y social, este proyecto ofrece una hoja de ruta para otros esfuerzos de mitigación del cambio climático en áreas rurales.

Por lo tanto, el presente trabajo contribuirá a la evaluación de áreas con potencial para el secuestro de carbono en ecosistemas tropicales, lo que es básico para la formulación de políticas públicas y la planificación ambiental en Tabasco y otras regiones con características similares en la generación de beneficios ambientales, económicos y sociales sustentables, contribuyendo de manera significativa al bienestar de la región y al esfuerzo global para mitigar el cambio climático.

IV. PREGUNTA DE INVESTIGACIÓN

La pregunta de investigación proporciona una dirección clara para el estudio y se puede responder a través de la metodología descrita en el documento, incluyendo el análisis de datos históricos, la identificación de áreas con potencial para el secuestro de carbono, y la integración de un modelo de análisis del cambio en el uso del suelo:

¿En qué medida la implementación de prácticas de manejo sostenible del suelo y la vegetación en la Villa Benito Juárez, Macuspana, Tabasco, puede aumentar la capacidad de secuestro de carbono y mejorar la resiliencia del ecosistema frente a las presiones antropogénicas y climáticas?

V. HIPÓTESIS

La adopción de prácticas sostenibles en el manejo del suelo y la vegetación en Villa Benito Juárez, Macuspana, Tabasco, fortalecerá la capacidad de secuestro de carbono en la región, ayudando a mitigar los efectos del cambio climático local y mejorando la resiliencia del ecosistema ante las presiones antropogénicas y climáticas.

VI. OBJETIVOS

6.1 General

Evaluar el potencial de la Villa Benito Juárez en la mejora del secuestro de carbono mediante prácticas sostenibles de uso del suelo y manejo de tierras.

6.2 Objetivos Específicos

- a. Recopilar y analizar datos históricos de uso de suelo, tipo de vegetación y prácticas de manejo para identificar tendencias y evaluar su impacto en el secuestro de carbono mediante un SIG para analizar patrones en el uso del suelo y la vegetación.
- b. Identificar las áreas agrícolas o de manejo de tierras con mayor potencial para el secuestro de carbono mediante el mapeo y clasificación de imágenes satelitales y datos de campo.
- c. Desarrollar un modelo que analice los cambios en el uso del suelo, los tipos de vegetación y las prácticas de manejo entre 1986 y 2024, utilizando modelos SIG para evaluar su efecto en el secuestro de carbono.

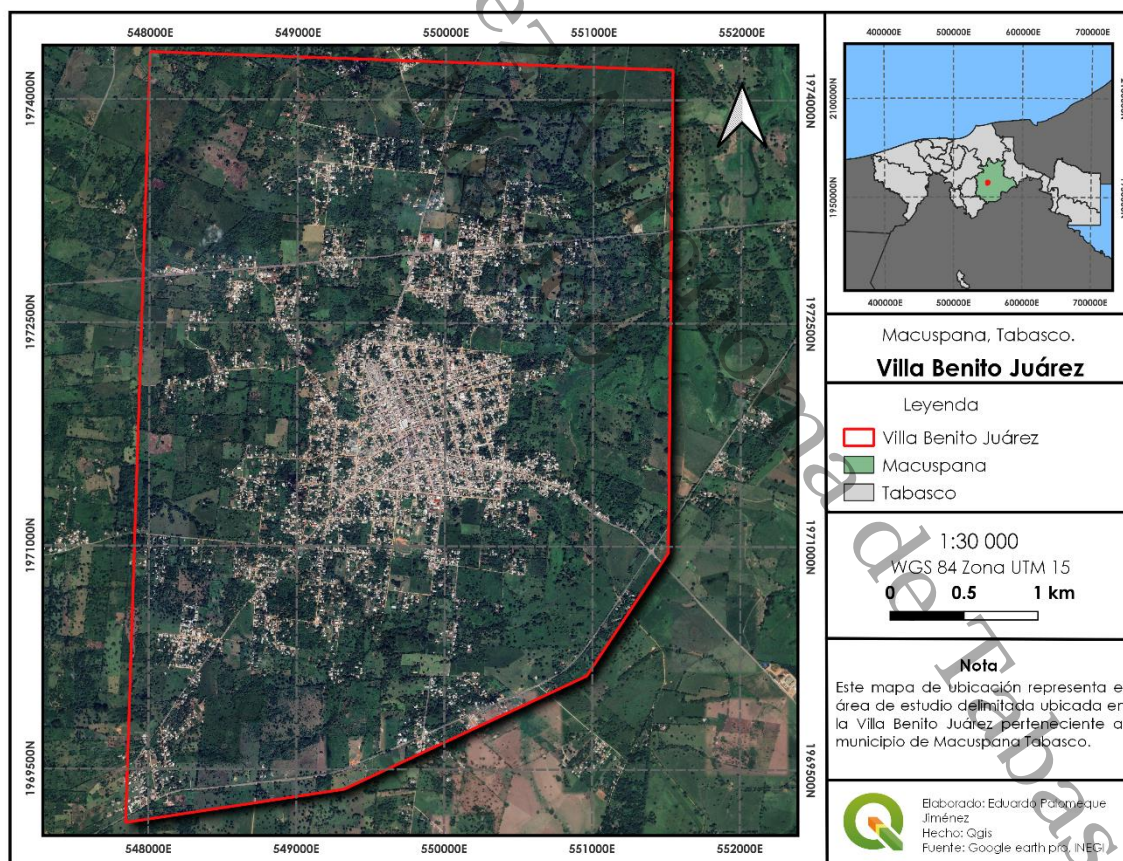
VII. METODOLOGÍA

7.1 Área De Estudio.

La Villa Benito Juárez, ubicada en el municipio de Macuspana, forma parte del estado de Tabasco. Esta región se sitúa en la llanura costera del Golfo sur, caracterizada por su geografía predominantemente plana y su riqueza hídrica, acorde al Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI, 2001). El área de estudio abarca una extensión total de 1,655 hectáreas y se encuentra delimitada entre las coordenadas 17°51'17.21" de latitud norte y 17°49'5.60" de latitud sur, así como entre 92°31'0.27" de longitud oeste al oriente y 92°32'43.43" de longitud oeste al occidente (fig. 1).

Figura 1

Mapa del área de estudio



Por su posición estratégica en la cuenca del Golfo de México, la zona combina elementos naturales y socioculturales que resultan clave para comprender su

dinámica local, destacando su potencial en términos de desarrollo sustentable y conservación ambiental.

7.2 Recopilación de Datos Históricos de Uso de Suelo, Tipos de Vegetación y Prácticas de Manejo

La recopilación de datos históricos sobre el uso de suelo, los tipos de vegetación y las prácticas de manejo permite analizar los cambios en la cobertura vegetal, las transformaciones agrícolas y las prácticas de manejo implementadas a lo largo del tiempo. Asimismo, facilitará la identificación de patrones y tendencias para la planificación sostenible del territorio y la toma de decisiones informadas, orientadas a la conservación de los ecosistemas (De Alba Rosano *et al.*, 2020; Pineda Jaimes *et al.*, 2009).

Se recurrió a la descarga de material de investigación como respaldo y justificación de los datos obtenidos a partir del análisis de imágenes satelitales (Sarmiento & Fonseca, 2023). Con la información histórica de la zona, será posible identificar tendencias en el uso del suelo y las prácticas llevadas a cabo. Asimismo, la identificación de la vegetación utilizada en proyectos de reforestación o investigación cercanos al área de estudio será clave para proponer las especies adecuadas.

7.2.1 Históricos del uso de suelo

El análisis de los cambios en el uso de suelo a lo largo del tiempo es fundamental para comprender la dinámica ambiental y territorial de la Villa Benito Juárez, Macuspana, Tabasco. A través de esta revisión, fue posible identificar tendencias en la transformación del paisaje, especialmente aquellas que han afectado la cobertura vegetal, y con ello, la capacidad de los ecosistemas locales para capturar y almacenar carbono (García, 2024). Para esta investigación se utilizaron datos provenientes de los Anuarios Estadístico Forestal de la Comisión Nacional Forestal (CONAFOR) correspondientes al periodo 1993–2018, los cuales se integraron en un sistema de información geográfica (SIG).

En el estudio de Mas *et al.* (2009), se subraya la importancia de llevar a cabo evaluaciones rigurosas de la exactitud en los estudios sobre el cambio de uso del suelo para garantizar la calidad y fiabilidad de los datos. Estas evaluaciones permitieron identificar errores y limitaciones en las clasificaciones de imágenes satelitales y otros datos espaciales y, en consecuencia, afectar la toma de decisiones en políticas de gestión territorial.

7.2.2 Tipo de vegetación y prácticas de manejo

7.2.2.1 Análisis de la vegetación

El estudio de la vegetación se llevó a cabo a través de diversos métodos que permiten entender su evolución a lo largo del tiempo. Entre los más utilizados se encuentra el análisis de cartas topográficas que permite observar cambios en la cobertura vegetal (Jaimes, 2010). Para este estudio se utilizó el Compendio de información geográfica del municipio de Macuspana 2010, que permitirá analizar el territorio previo al análisis.

7.2.2.2 Prácticas de manejo en la zona

Con el objetivo de documentar las prácticas tradicionales de manejo del suelo y los cultivos, así como comprender la evolución de las técnicas productivas a lo largo de generaciones en la Villa Benito Juárez, Macuspana, Tabasco, se llevaron a cabo entrevistas semiestructuradas a habitantes de distintas generaciones. Estas entrevistas están orientadas a recuperar conocimientos agroecológicos transmitidos oralmente, además de identificar especies vegetales predominantes y las estrategias implementadas para el uso sostenible del territorio.

La metodología se basa en el enfoque cualitativo y participativo propuesto por Rodríguez *et al.* (2020), en donde se reconoce el valor del saber local como complemento a las estrategias científicas de manejo y conservación ambiental. Las entrevistas se aplicarán a personas con experiencia directa o con conocimiento heredado sobre la producción maderable, agrícola o ganadera de la región.

El instrumento utilizado consistió en un cuestionario de 13 preguntas (Ver Anexo 1) aplicado a 63 individuos de la Villa de diferentes generaciones, diseñado para

indagar temas como: el uso histórico de la tierra, los cultivos predominantes en diferentes épocas, criterios de selección de especies, técnicas para el manejo de la fertilidad del suelo y la erosión, formas de riego, cambios observados en la salud del suelo, así como las transformaciones generacionales en las prácticas agrícolas. Los resultados fueron sistematizados y analizados mediante el software IBM SPSS Statistics, lo que permitió identificar patrones en las respuestas y establecer categorías relevantes para el análisis (Vega *et al.*, 2024). A partir de ello, se construyó un panorama integral sobre la forma en que las comunidades locales han interactuado con el territorio, así como las implicaciones ecológicas y culturales de dichas prácticas.

Para una mejor organización y comprensión de los hallazgos, el análisis de las entrevistas se presentó dividido en cuatro bloques temáticos:

1. Antecedentes del uso del suelo, que aborda el historial de prácticas agrícolas y ganaderas en la región, así como los cultivos tradicionales.

Este primer bloque (preguntas P1, P2 y P3 de la entrevista) tuvo como finalidad explorar la memoria colectiva sobre los usos históricos del suelo en la comunidad, así como identificar los cultivos que han predominado a lo largo del tiempo y los criterios utilizados para su selección. Con el fin de identificar posibles relaciones entre el tipo de manejo del suelo heredado (P1) y los criterios de selección de cultivos (P3), se realizó un análisis de correlación no paramétrica. Se emplearon las pruebas de Tau-b de Kendall y Rho de Spearman, adecuadas para variables ordinales.

2. Fertilidad y erosión del suelo, centrado en las técnicas utilizadas para conservar y mejorar la calidad del suelo, incluyendo métodos ancestrales y actuales.

Para obtener resultados claros y comparables sobre las técnicas de manejo de la fertilidad y el control de la erosión del suelo, se llevó a cabo un proceso de organización y validación de los datos correspondientes a las preguntas P4, P5, P6 y P7. Las variables fueron transformadas a formato numérico y categorizadas como nominales para asegurar consistencia en el análisis. Posteriormente, se aplicaron pruebas de normalidad con el fin de definir el enfoque estadístico más adecuado.

Una vez verificados los supuestos necesarios, se recurrió a métodos estadísticos paramétricos, incluyendo pruebas de homogeneidad de varianzas, análisis de varianza (ANOVA) y comparaciones múltiples mediante la prueba post hoc de Tukey. Este procedimiento permitió explorar posibles diferencias en las prácticas de manejo del suelo entre generaciones.

3. Especies arbóreas, donde se identifican las especies más comunes y mejor adaptadas, así como los factores ecológicos que favorecen su desarrollo.

Para el análisis del bloque 3, que aborda la relación entre generación y prácticas vinculadas al uso de árboles (preguntas P8, P9 y la variable Generación), se realizó una validación preliminar de los datos mediante pruebas de normalidad Kolmogorov-Smirnov y Shapiro-Wilk, aplicadas a las variables P9 y Generación. Esto permitió determinar el tipo de análisis estadístico más adecuado. A partir de ello, se aplicó una prueba de asociación a través de una tabla cruzada, con el objetivo de explorar si existe relación significativa entre la generación a la que pertenece el encuestado y la respuesta dada en P9. Finalmente, se agruparon y analizaron las especies arbóreas mencionadas en P8, identificando las más frecuentes y su posible conexión con el conocimiento tradicional o el contexto productivo actual.

4. Transmisión de conocimiento y valor cultural, enfocado en el traspaso intergeneracional de saberes y la vigencia de prácticas tradicionales en el contexto actual.

El análisis se centró en el conglomerado de Conocimientos_heredados, el cual agrupa las prácticas abordadas en las preguntas P10, P11 y P12. El objetivo fue identificar si existen diferencias significativas entre generaciones en cuanto a la transmisión y preservación de saberes tradicionales. Para ello, se realizó un análisis estadístico que comienza con la aplicación de pruebas de normalidad (Kolmogorov-Smirnov y Shapiro-Wilk) sobre el puntaje compuesto del conglomerado. Posteriormente, una prueba de homogeneidad de varianzas (Levene) para verificar si las condiciones serán adecuadas para ejecutar un análisis de varianza (ANOVA).

7.3 Recopilación De Información Geográfica

La información necesaria que se utilizó como insumo para identificar las áreas con mayor potencial de secuestro de carbono y sus características del uso de suelo fueron imágenes Landsat para contextualizar la Villa Benito Juárez. Asimismo, para poder diferenciar la densidad de la cobertura vegetal al comparar el resultado del análisis temporal. Para ello se utilizó un Dron DJI Mini 2 para la recolección de las muestras fotográficas y el software QGIS para manejar las imágenes satelitales y la herramienta Spectral Band Comparison Tool de la NASA (Mosquera & Rivera, 2021):

- Obtención de imágenes satelitales: La obtención y el procesamiento de la información geográfica empleada para el análisis espacio-temporal del área de estudio requirió dos escenas Landsat: una del satélite Landsat 5 TM (Ver figura 3) y otra del Landsat 9 TIRS (Ver figura 4), seleccionadas para comparar los cambios en el uso del suelo y cobertura vegetal. Se descargaron de la página <https://earthexplorer.usgs.gov/>. Las escenas tienen un porcentaje de nubosidad baja (menor del 10%), que permite una alta resolución de la cobertura vegetal (Palomo, 2012).
- Corrección y recorte de las imágenes satelitales: El preprocesamiento fue realizado mediante el complemento Semi-Automatic Classification Plugin (SCP) (Congedo, 2017) en el software QGIS. Se aplicó una corrección atmosférica DOS 1, destinada a reducir la interferencia atmosférica y un pansharpening mejorar la calidad radiométrica (de la escena Landsat 9 TIRS). Posteriormente, se ejecutó un recorte espacial ajustado al perímetro de la localidad de Villa Benito Juárez, en Macuspana, Tabasco.

7.3.1 Análisis de índices de vegetación

Una vez obtenidas las imágenes satelitales el siguiente paso fue la preparación de los datos que consiste en:

- Identificación de las bandas espectrales relevantes (como NIR, rojo, y azul) que están asociadas con el contenido de carbono en suelos y vegetación.

- Considerar variables como, cobertura vegetal, el índice NDVI (índice de vegetación de diferencia normalizada, por sus siglas en ingles) que detecta y cuantifica la presencia de vegetación verde viva y el índice SAVI (índice de vegetación ajustado al suelo, por sus siglas en ingles) que modifica al NDVI con un enfoque en la detección de vegetación estresada. Se utilizaron para diferenciar la vegetación de otros tipos de cubierta terrestre y para determinar su estado general y prácticas de manejo actuales (Bravo, 2017).

7.3.2 Análisis Espectral con la Spectral Band Comparison Tool de la NASA

La Spectral Band Comparison Tool permite a los usuarios analizar y comparar bandas espectrales (longitudes de onda específicas). Las imágenes satelitales están formadas por diferentes bandas espectrales que capturan la radiación reflejada en diferentes longitudes de onda, desde el espectro visible hasta el infrarrojo cercano (NASA, s.f.).

Una de las diferencias más relevantes entre los satélites Landsat 5 y Landsat 9 radica en la mejora tecnológica de sus sensores, especialmente en las bandas del espectro electromagnético utilizadas para analizar la vegetación. Landsat 5, que operó con el sensor Thematic Mapper (TM), capturaba datos en siete bandas, Por su parte, Landsat 9, equipado con los sensores OLI-2 (Operational Land Imager) y TIRS-2 (Thermal Infrared Sensor), mantiene compatibilidad con sus predecesores, pero mejora aspectos clave como la precisión radiométrica (de 8 bits en TM a 12 bits en OLI-2) y la delimitación espectral. De las cuales las más importantes para estudios de cobertura vegetal son:

Tabla 1

Comparación de bandas espectrales relevantes para análisis de vegetación entre Landsat 5 TM y Landsat 9 OLI-2

Satélite	Banda	Nombre común	Rango espectral (μm)	Resolución espacial (m)
Landsat 5 TM	4	Infrarrojo cercano (NIR)	0.76 – 0.90	30
	5	Infrarrojo de onda corta 1	1.55 – 1.75	30
	7	Infrarrojo de onda corta 2	2.08 – 2.35	30
Landsat 9 OLI	5	Infrarrojo cercano (NIR)	0.85 – 0.88	30
	6	Infrarrojo de onda corta 1	1.57 – 1.65	30
	7	Infrarrojo de onda corta 2	2.11 – 2.29	30

Elaboración propia. Adaptado de NASA Landsat Science (2024) y USGS (2024). Las bandas del infrarrojo cercano y del infrarrojo de onda corta son clave para calcular índices de vegetación como NDVI y SAVI, y para evaluar el contenido de humedad y vigor vegetal.

La herramienta facilita la creación y comparación de índices espectrales como el NDVI y SAVI al permitir combinar diferentes bandas, lo que es útil para realizar estudios de vegetación, monitoreo ambiental, y cambios en el uso de suelo.

b.1 NDVI (Normalized Difference Vegetation Index):

Para analizar la dinámica de la vegetación en el área de estudio, se utilizó el NDVI, el cual permite evaluar la densidad y el vigor de la cobertura vegetal a partir de la diferencia entre las bandas del rojo (RED) y del infrarrojo cercano (NIR) (Bravo, 2017). El NDVI se calculó utilizando la calculadora de bandas del complemento de SCP. Se aplicó este índice a la imagen Landsat preprocesada, correspondientes al

año 2024, con el propósito de identificar áreas relevantes en la cobertura vegetal de la zona. La fórmula del NDVI es:

$$NDVI = \frac{NIR - RED}{NIR + RED}$$

NIR (Near Infrared): Refleja la luz del infrarrojo cercano, que es fuertemente reflejada por la vegetación sana.

RED: Refleja la luz roja, que es absorbida en gran medida por la clorofila en las plantas.

En la Spectral Band Comparison Tool, se seleccionan las bandas correspondientes al infrarrojo cercano (NIR) y el rojo (RED) para calcular el NDVI y visualizar las diferencias en el estado de la vegetación en el área de estudio.

b.2 SAVI (Soil Adjusted Vegetation Index):

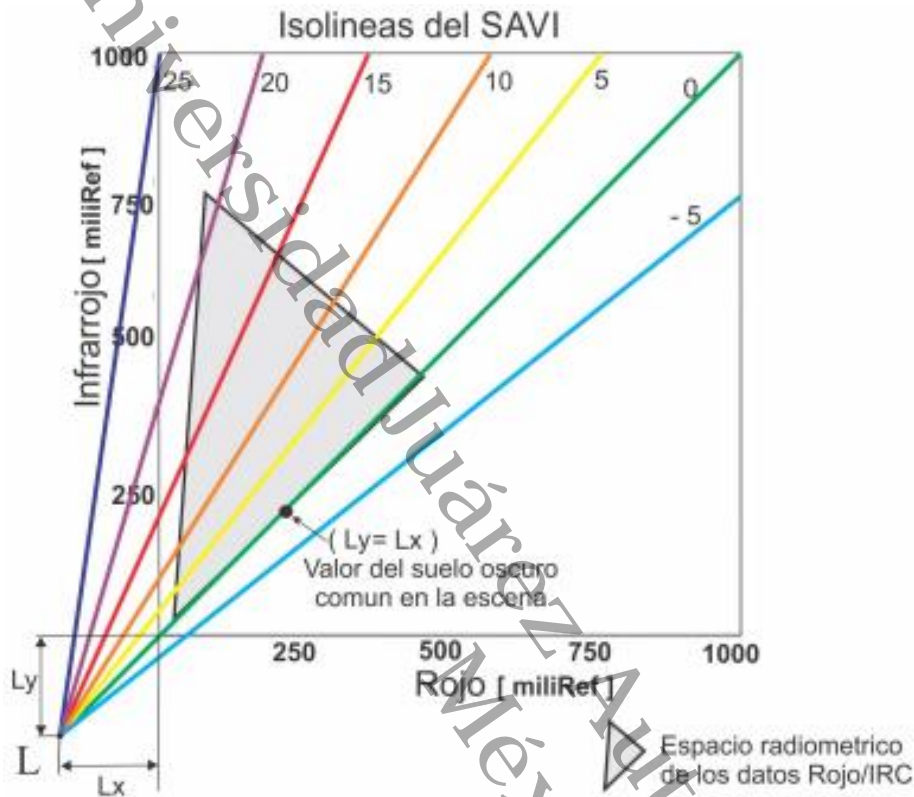
El Índice SAVI se utiliza para corregir NDVI, es especialmente útil en regiones donde la reflectancia del suelo puede alterar significativamente la interpretación de la vegetación (Bravo Morales, 2017). El SAVI derivado de la reflectancia superficial Landsat se calcula como la relación entre los valores R y NIR (fig. 2), con un factor de corrección del brillo del suelo (L) de 0,5 para adaptarse a la mayoría de los tipos de cobertura vegetal (Castellanos, *et al*, S. F). La fórmula del SAVI es:

$$SAVI = \frac{(NIR - RED)}{(NIR + RED + L)} * (1 + L)$$

L: Es un factor de ajuste que varía dependiendo de la densidad de vegetación. Un valor comúnmente usado es 0.5 para áreas de vegetación intermedia.

Figura 2

Isolneas SAVI



Fuente. Castellanos, *et al* (2016). Espacio radiométrico R-NIR, con las isólinas del SAVI y ejemplo de valores del SAVI y extracción de "L" directamente de la imagen, sobre la línea de los suelos, que para el NDVI y SAVI es igual a 0.

Se pueden seleccionar las mismas bandas espectrales que en el NDVI (NIR y RED), pero incluir el ajuste del suelo (L) para generar el índice SAVI.

b.3 Proceso con la Spectral Band Comparison Tool

Selección de bandas:

- Se eligieron las bandas correspondientes a NIR y RED de las imágenes satelitales disponibles en la plataforma.

Cálculo de NDVI o SAVI:

- Utilizando la fórmula del NDVI o SAVI, la herramienta combinó las bandas seleccionadas para calcular el índice de vegetación correspondiente.

Análisis de resultados:

- Los resultados se representaron como mapas clasificados, donde las áreas con vegetación más sana aparecen en tonos más claros (verde para NDVI alto) y las áreas con poca o sin vegetación en tonos más oscuros o marrones.
- En el caso de SAVI, se pueden observar resultados más precisos en áreas donde el suelo desnudo podría influir significativamente en los resultados de un simple NDVI.

Comparación temporal o espacial:

- La herramienta permitió comparar imágenes de diferentes fechas para evaluar cambios en la vegetación a lo largo del tiempo, o entre diferentes áreas geográficas.

A partir de los resultados obtenidos, se generó un mapeo temático que permitió visualizar espacialmente las áreas de interés, utilizando representaciones gráficas que destacan las diferencias en las firmas espectrales entre clases de cobertura. Estas gráficas temáticas facilitaron la interpretación de los patrones espaciales y el análisis comparativo entre las distintas unidades de paisaje identificadas mediante teledetección.

7.4 Análisis Espectral Con La Herramienta Randomforest De Qgis

QGIS es un software de Sistema de Información Geográfica (SIG) de código abierto que permite visualizar, gestionar y analizar datos geoespaciales. El RandomForest es un algoritmo de aprendizaje automático de clasificación y regresión que utiliza múltiples árboles de decisión para mejorar la precisión de las predicciones y se ejecuta dentro del ambiente de QGIS.

RandomForest se aplica principalmente para la clasificación de imágenes satelitales, ayudando a identificar tipos de cobertura del suelo, vegetación, cuerpos de agua, entre otros (Bravo, 2024). Este algoritmo es altamente eficaz para datos espaciales y proporciona una clasificación robusta y precisa debido a su capacidad para manejar datos complejos y variables múltiples.

7.4.1 Selección de Muestras

- Selección de puntos: se generaron 15 puntos aleatoriamente en QGIS mediante la herramienta de investigación de puntos aleatorios dentro de un polígono, para minimizar el efecto de borde, se aplicó el buffer interno de 100 m y la distancia mínima entre los puntos de muestreo se estableció en 600 m los cuales sirvieron como base para la recolección de datos en campo mediante imágenes captadas con dron.
- Recolección de muestras: a partir de los puntos generados aleatoriamente se procedió a salidas de campo con el dron DJI Mini 2, esta metodología permitió identificar visualmente el tipo de cobertura terrestre en cada punto, facilitando así su correcta asignación a cada una de las clases para la clasificación (Zárate, 2021).
- Definir clases de cobertura: Con la información obtenida mediante las salidas de campo, se definieron 5 clases principales: humedales, vegetación, agrícola, pastizales y construido, esto basado en el Informe de la Situación del Medio Ambiente en México de la SEMARNAT (2015), que fueron utilizados para entrenar el modelo de clasificación.

7.4.2 Preparación para el Modelo RandomForest

- Composición infrarroja: Para apoyar visualmente la identificación de coberturas con alta densidad vegetal, se empleó una composición en falso color RGB = bandas 5-4-3 (Quinn, 2001), esta combinación resalta la vegetación en tonos rojos, diferenciando así de manera efectiva entre comunidades vegetales, suelos desnudos, zonas urbanas y cuerpos hídricos. En este contexto, los tonos rojos intensos son indicativos de vegetación densa y saludable, mientras que los tonos más claros representan pastizales o vegetación dispersa.
- Entrenamiento del modelo mediante firmas espectrales: El entrenamiento mediante firmas espectrales es fundamental en análisis biofísicos, dado que las superficies con elevada actividad fotosintética (como la vegetación vigorosa) presentan una alta reflectancia en el NIR, atribuible a la dispersión de la

radiación en la estructura interna del mesófilo foliar (Pinilla, 2025). En contraste, valores bajos de reflectancia son indicativos de superficies ópticamente absorbentes en ese rango, como cuerpos de agua, suelos saturados o coberturas artificiales, donde la reflectancia tiende a aproximarse a cero (Quinn, 2001).

7.4.3 Clasificación

- Aplicación del modelo: El modelado de las clases fue realizado utilizando el algoritmo de distancia mínima (Minimum Distance), el cual asigna cada píxel a la clase espectralmente más próxima en el espacio multidimensional definido por las bandas espectrales. Este método es eficaz cuando las clases presentan firmas espectrales bien definidas y se distribuyen de forma separada en el espacio de características (Ávila-Pérez, *et al.* 2020).
- Selección de muestras de Región de Interés (ROI): A partir de las firmas espectrales obtenidas durante los recorridos de campo, se realizó la selección de muestras representativas ROI para cada clase de cobertura identificada (Chiarito & Méndez, 2018). Estas muestras constituyeron la base para el entrenamiento del modelo de clasificación supervisada, asegurando que cada ROI capture adecuadamente la variabilidad espectral de su respectiva clase. La selección se efectuó de manera estratégica, considerando tanto la homogeneidad interna como la separación espectral entre clases, a fin de optimizar la precisión del algoritmo de clasificación.
- Generación del mapa clasificado de cobertura terrestre: Se construyó un mapa ráster multiclase implementado mediante el complemento SCP en QGIS en el cual cada píxel se etiqueta automáticamente según su clase de cobertura terrestre (Sandoval, 2016). Cada categoría asignó a una paleta de colores distinta, permitiendo la visualización clara de las áreas correspondientes a humedales, vegetación, pastizales, áreas agrícolas y zonas construidas. A partir de este mapa raster se entrenó el modelo de clasificación RandomForest, cuyo desempeño se optimizó mediante la calibración de parámetros y la evaluación de métricas de precisión. Este enfoque integrado pudo garantizar tanto la

representación espacial de las coberturas como la robustez del algoritmo aplicado.

- Generación del modelo clasificado RandomForest: Con el objetivo de identificar las áreas con mayor potencial de secuestro de carbono en el área de estudio, se aplicó un modelo de clasificación supervisada mediante el algoritmo RandomForest, implementado desde el complemento SCP en QGIS. Este modelo se basa en un conjunto de múltiples árboles de decisión, construidos a partir de submuestras aleatorias de los datos disponibles (Benevides *et al*, 2021) En cada nodo, los predictores (bandas espectrales y otras variables derivadas) se muestrean aleatoriamente, y se selecciona la mejor división con base en una función de impureza (como Gini o entropía), lo que permite una generalización robusta y reduce el riesgo de sobreajuste (Kpienbaareh, D. 2021).

7.4.4 Validación del Modelo

- Evaluación de precisión: Para validar el desempeño del modelo, se empleó una matriz de confusión generada con el complemento SCP de QGIS. Esta matriz confronta las etiquetas asignadas por el clasificador con un conjunto de datos de validación independiente, permitiendo calcular métricas clave como la precisión global, la precisión de productor (producer's accuracy), la precisión del usuario (user's accuracy) y el coeficiente Kappa. Estos indicadores proporcionaron un diagnóstico detallado de la exactitud de cada clase de cobertura y del rendimiento general del modelo según los umbrales interpretativos de Landis & Koch (1977).

El producto final consistió en mapas de alta resolución en los que cada píxel fue clasificado en tres categorías de potencial de captura de carbono (alto, medio y bajo), lo que facilitó la identificación de áreas prioritarias para la conservación y el manejo sostenible de carbono.

7.5 Integración del Modelo de Cambio de Uso de Suelo, Tipos de Vegetación y Prácticas de Manejo Durante el Periodo 1986 - 2024

Para el cumplimiento del último objetivo se integraron los datos combinando los resultados espectrales para una evaluación más completa del potencial de secuestro de carbono mediante un análisis de tendencias de cambio con el software Idrisi (Mendoza, 2023). Este paso permitió identificar y cuantificar los cambios en la cobertura vegetal a lo largo del tiempo, comparando las clasificaciones de las imágenes Landsat.

Esta técnica proporcionó un enfoque completo para el análisis de cambios en la cobertura vegetal utilizando imágenes satelitales y técnicas de procesamiento avanzadas en QGIS (Figueroa Uribe & Rivera Moreno, 2024).

Para asegurar la fiabilidad en el modelo de análisis de cambio de Márkov, se tomaron las siguientes medidas:

- Validación y calibración del modelo: El modelo fue calibrado con datos históricos considerados en apartado 7.4 para el periodo de estudio 1986-2024, de esta manera se reflejaron adecuadamente las transiciones entre los diferentes criterios. Es decir, se normalizaron los datos en términos de escala, proyección y clasificación para evitar errores en la comparación.
- Homogeneidad del análisis: Se aplicó el análisis de Márkov para detectar cambios en un periodo de 38 años, así el modelo permitió identificar patrones y simular futuros escenarios de cambio.
- Matriz de transición: Es el núcleo del análisis de Márkov. La calibración de esta matriz fue obtenida para una representación precisa de la frecuencia con la que los criterios cambian de un estado a otro.

El resultado de este objetivo fue la creación de mapas integrados en los que se resaltaron las áreas prioritarias para intervenciones o conservación.

VIII. RESULTADOS

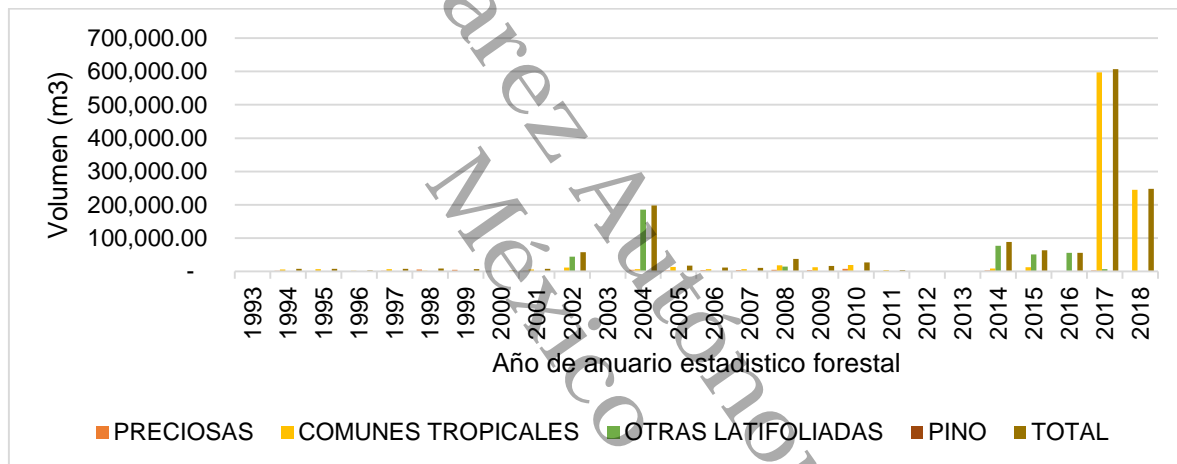
8.1 Recopilación De Datos Históricos De Uso De Suelo, Tipos De Vegetación Y Prácticas De Manejo

8.1.1 Datos Históricos De Uso De Suelo

De acuerdo con los datos del Anuario Estadístico Forestal de la Comisión Nacional Forestal (CONAFOR) se elaboraron tres gráficos (Figura 3, 4 y 5) que corresponden al periodo 1993–2018 que muestran la evolución de la superficie forestal registrada para el estado durante el periodo de estudio.

Figura 3

Volumen de producción maderable (m³) en Tabasco 1993-2018



Fuente: Elaboración propia con datos de los anuarios estadísticos forestales de la Comisión Nacional Forestal del periodo 1993-2018.

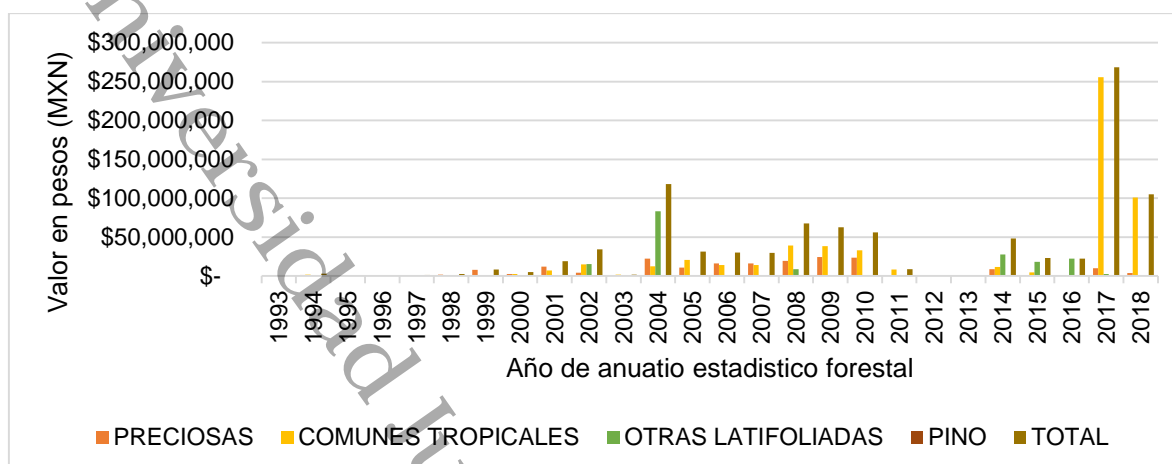
Tabla 2*Descripción del Volumen de la producción maderable en Tabasco (1993–2018)*

Año	Descripción
1993–2003	Producción maderable relativamente baja; volúmenes anuales en su mayoría no superan los 10,000 m ³ . Excepción en 2002 con un pico de 57,439 m ³ , debido a la inclusión por primera vez de otras latifoliadas (44,551 m ³).
2004	Producción total de 197,625 m ³ , impulsada por 185,229 m ³ en otras latifoliadas. Representa más del triple del promedio histórico hasta ese momento.
2008–2011	Ligera recuperación en los volúmenes. En 2010 se registran 27,134 m ³ , de los cuales 19,347 m ³ corresponden a comunes tropicales.
2012–2013	No se reportan datos. Posible discontinuidad en los registros oficiales o caída en la actividad de aprovechamiento forestal.
2017	Pico más alto del periodo con 606,928 m ³ , atribuible al incremento en comunes tropicales (596,896 m ³). Supera en más de 10 veces el promedio histórico.
2018	Producción disminuye a 247,539 m ³ . Comunes tropicales dominan con 245,176 m ³ . Se registra por primera vez la categoría de pino (95 m ³).

Fuente: Elaboración propia con base en datos del Anuario Estadístico Forestal de la CONAFOR (1993–2018).

Figura 4

Valor económico de la producción maderable en Tabasco 1993-2018



Fuente: Elaboración propia con datos de los anuarios estadísticos forestales de la Comisión Nacional Forestal del periodo 1993-2018.

A diferencia del volumen de producción, el valor económico no siguió una progresión constante, sino que experimentó picos abruptos que evidencian una dependencia sensible a factores externos.

Tabla 3

Descripción del valor económico de la producción maderable en Tabasco (1993–2018)

Año	Descripción
1993–2001	Valor de producción maderable en niveles modestos, inferiores a 20 millones de pesos; incrementos puntuales en 1999 y 2001 (más de 8 y 19 millones, respectivamente).
2004	Valor alcanzó \$118,355,450 pesos, impulsado por otras latifoliadas (> \$83 millones), seguido por maderas preciosas y comunes tropicales.
2005–2011	Valores relativamente altos, con varios años por encima de 30 millones; 2008: \$67.5 M, 2009: \$62.6 M, 2010: \$56.2 M; comunes tropicales como categoría de mayor valor.
2012–2013	Sin información registrada. Interrupción significativa en la serie histórica.

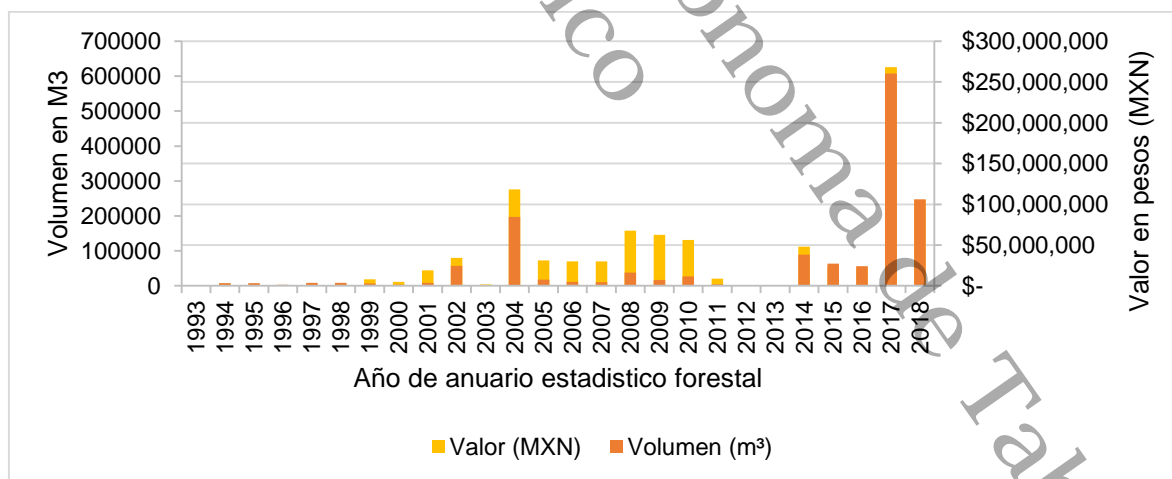
Año	Descripción
2014–2016	Recuperación sostenida, con otras latifoliadas aportando > \$27 M en 2014 y > \$22 M en 2016.
2017	Máximo histórico de \$268,207,095 pesos; > 95 % del valor por comunes tropicales (\$255 M).
2018	Disminución a \$105,157,822 pesos; comunes tropicales dominantes, pino con aporte simbólico de \$13,300 pesos.

Nota: Elaboración propia con base en datos del Anuario Estadístico Forestal de la CONAFOR (1993–2018).

El examen conjunto del volumen y el valor económico de la producción maderable en Tabasco entre 1993 y 2018 reveló que no existe una correlación lineal directa entre ambas variables. Este fenómeno se explica por la explotación intensiva de *comunes tropicales*, cuyo precio aparentemente aumentó de forma considerable ese año, ya sea por factores de mercado o políticas comerciales.

Figura 5

Relación entre volumen y valor maderable



Fuente: Elaboración propia con datos de los anuarios estadísticos forestales de la Comisión Nacional Forestal del periodo 1993-2018.

Un mayor volumen no siempre se traduce en un mayor valor económico, lo que pone de manifiesto la complejidad de los factores que inciden en la rentabilidad del

sector forestal. Por ejemplo, en 2004, aunque el volumen producido no fue el más alto del periodo, el valor alcanzó un punto de inflexión con más de \$118 millones de pesos, evidenciando que la presencia de *otras latifoliadas* de alto valor unitario — como las maderas finas tropicales— puede disparar el valor económico sin necesidad de grandes volúmenes. En cambio, otros años con volúmenes comparables o incluso mayores (como 2011 o 2015) mostraron valores económicos sustancialmente menores, reflejando el bajo precio unitario de ciertas especies explotadas o condiciones de mercado desfavorables.

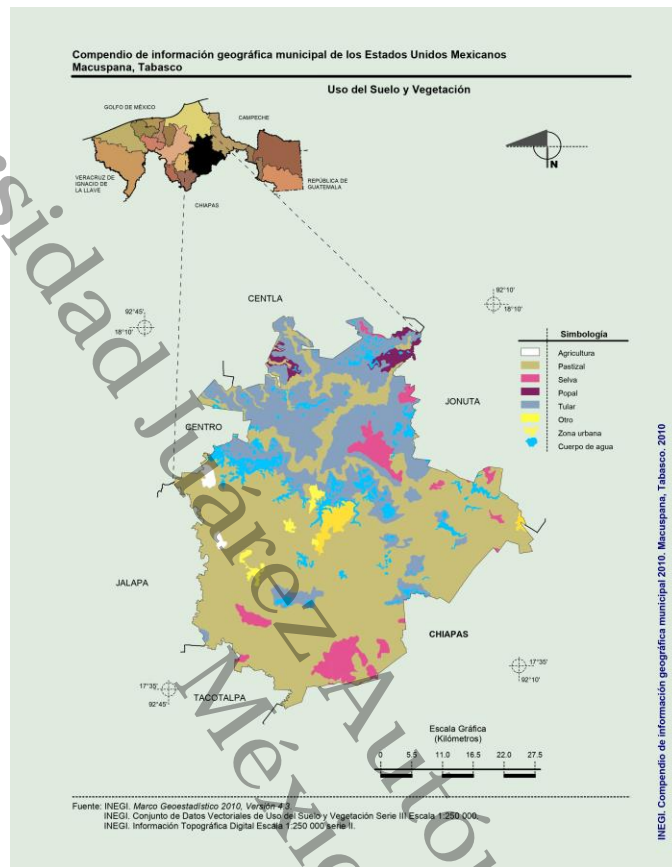
El caso de 2017 es particularmente ilustrativo: si bien se registró un volumen muy alto, lo más significativo fue que el valor económico alcanzó su máximo histórico, superando los \$268 millones de pesos.

8.1.2 Tipo de vegetación y prácticas de manejo

El Compendio de Información Geográfica del municipio de Macuspana ofrece una representación detallada de la cobertura superficial y los tipos de vegetación predominantes en la zona (fig. 6). Como se identificó, el uso predominante del suelo está enfocado en pastizales cultivados (62.34%), seguido por vegetación secundaria de tulares (23.37%) y popales (1.29%), selva (4.96%), sabana (1.29%) y cuerpos de agua (5.49%).

Figura 6

Mapa de uso de suelo y vegetación del municipio de Macuspana



Fuente: INEGI, Compendio de información geográfica municipal de los Estados Unidos Mexicanos, Macuspana, Tabasco. 2010.

8.1.2.1 Tema 1. Antecedentes del uso del suelo

A continuación, se presenta el resultado de los análisis de cada bloque de las entrevistas semiestructuradas a 63 habitantes de distintas generaciones enfatizando la importancia del conocimiento tradicional como herramienta clave en la mejora del secuestro de carbono y la conservación de los ecosistemas locales. Se analizaron las relaciones entre el tipo de manejo del suelo heredado (P1) y los criterios de selección de cultivos (P3), se realizó un análisis de correlación no paramétrica. Se emplearon las pruebas de Tau-b de Kendall y Rho de Spearman, adecuadas para variables ordinales. Ambas arrojaron coeficientes negativos muy bajos, sin significancia estadística ($p > 0.05$).

Tabla 4*Correlaciones no paramétricas de antecedentes del uso de suelo*

			P1_ManejoSuelo	P3_SelecciónCultivos
Tau_b de Kendall	P1_ManejoSuelo	Coeficiente de correlación	1,000	-,066
		Sig. (bilateral)	.	,572
		N	63	63
	P3_SelecciónCultivos	Coeficiente de correlación	-,066	1,000
		Sig. (bilateral)	,572	.
		N	63	63
Rho de Spearman	P1_ManejoSuelo	Coeficiente de correlación	1,000	-,069
		Sig. (bilateral)	.	,593
		N	63	63
	P3_SelecciónCultivos	Coeficiente de correlación	-,069	1,000
		Sig. (bilateral)	,593	.
		N	63	63

Fuente: Elaboración propia, mediante el software SPSS Statistics

En la Tabla 5 se muestra la distribución de cultivos mencionados por los entrevistados (P2), diferenciados por generación.

- Segunda generación (44,4 % del total) reportó la mayor diversidad de cultivos.
- Primera generación (36,5 %) destacó especies tradicionales como maíz, yuca, plátano, yaca y camote.
- Tercera generación (19,0 %) mencionó cultivos clave como maíz, sandía, melón y achiote.

Los resultados de la P2 evidencian una notable diversidad de cultivos tradicionales en la región, siendo el plátano, la yuca y el maíz los más mencionados por los encuestados.

Tabla 5*Porcentaje de tipos de cultivo según la generación de los encuestados en 2025*

Cultivos_c ^a	Generación			
	Primera	Segunda	Tercera	Total
P2_Sandía	5	13	3	21
P2_Melón	6	9	4	19
P2_Papaya	7	7	3	17
P2_Platano	8	15	6	29
P2_Macal	4	9	4	17
P2_Limón	5	2	0	7
P2_Yuca	13	9	4	26
P2_Maiz	9	11	6	26
P2_arroz	5	6	3	14
P2_frijol	7	5	3	15
P2_calabaza	3	6	2	11
P2_camote	7	7	3	17
P2_jamaica	3	6	4	13
P2_guaya	3	7	2	12
P2_ciruella	4	4	2	10
P2_yaca	8	3	4	15
P2_achiote	5	6	7	18
P2_cacao	4	2	5	11
P2_mandarina	4	7	0	11
Total	Total del 23 recuento	28	12	63
	% del total	36,5%	44,4%	19,0%
				100,0%

Los porcentajes y los totales se basan en los encuestados.

a. Grupo de dicotomía tabulado en el valor 1.

Fuente: Elaboración propia, mediante el software SPSS Statistics

8.1.2.2 Tema 2. Fertilidad y erosión del suelo

La tabla de pruebas de normalidad (Tabla 6) muestra los resultados del análisis aplicado a la variable *Total_Practicas* (correspondiente al número de prácticas

utilizadas para conservar o mejorar la fertilidad del suelo de las preguntas P4, P5, P6 y P7), segmentada por generación. Se emplearon dos pruebas: Kolmogorov-Smirnov (K-S) y Shapiro-Wilk (S-W), ambas comúnmente utilizadas para verificar si una distribución de datos se ajusta a una curva normal.

Tabla 6

Pruebas de normalidad para el conjunto de datos Total_Practicas

	Generación	Kolmogorov-Smirnov ^a			Shapiro-Wilk		
		Estadístico	gl	Sig.	Estadístico	gl	Sig.
Total_Practicas	Primera	,174	23	,070	,943	23	,213
	Segunda	,175	28	,028	,951	28	,212
	Tercera	,136	12	,200*	,968	12	,887

*. Esto es un límite inferior de la significación verdadera.

a. Corrección de significación de Lilliefors

Fuente: Elaboración propia, mediante el software SPSS Statistics

En la primera generación ambos valores son mayores a 0.05 (K-S: $p = 0.070$ S-W: $p = 0.213$), lo que indica que no se rechaza la normalidad para esta generación; es decir, sus respuestas siguen una distribución aproximadamente normal.

En la segunda generación hay una discrepancia: la prueba de Kolmogorov-Smirnov (K-S: $p = 0.028$) indica una posible desviación de la normalidad, mientras que Shapiro-Wilk (S-W: $p = 0.212$) indica que no. Dado que Shapiro-Wilk es más adecuada para tamaños de muestra pequeños o medianos, se le suele dar más peso, por lo tanto, no se rechaza la normalidad, pero con cautela. Para la tercera generación ambos resultados (K-S: $p = 0.200^*$ S-W: $p = 0.887$) confirman que la distribución es normal para este grupo.

En conjunto, los resultados no mostraron evidencia sólida para rechazar la normalidad en ninguno de los tres grupos generacionales. Esto permitió, en principio, aplicar métodos estadísticos paramétricos en los análisis posteriores.

Una vez comprobada la normalidad de los datos por generación, se procedió a aplicar métodos estadísticos paramétricos. En este caso, se utilizó un Análisis de

Varianza (ANOVA) de una vía para determinar si existen diferencias estadísticamente significativas entre las generaciones respecto al número de prácticas empleadas. Se aplicó la prueba de homogeneidad de varianzas de Levene previo al ANOVA (Tabla 7), para asegurar que se cumple uno de los supuestos fundamentales del análisis.

Tabla 7

Prueba de homogeneidad de varianzas de Levene

		Estadístico	de		
		Levene	gl1	gl2	Sig.
Total_Practicas	Se basa en la media	2,619	2	60	,081
	Se basa en la mediana	2,012	2	60	,143
	Se basa en la mediana y con gl ajustado	2,012	2	51,420	,144
	Se basa en la media recortada	2,633	2	60	,080

Fuente: Elaboración propia, mediante el software SPSS Statistics

En los resultados obtenidos, todas las versiones de la prueba (basada en la media, mediana y media recortada) muestran valores de significancia ($p > 0.05$), específicamente entre 0.080 y 0.144, lo que indica que no hay diferencias significativas en las varianzas entre generaciones. Por lo tanto, se cumple el supuesto de homogeneidad de varianzas, permitiendo continuar con el análisis.

Los resultados mostraron que no hay diferencias estadísticamente significativas entre los grupos generacionales ($F = 0.910$, $p = 0.408$), ya que el valor de significancia es mayor a 0.05 (Tabla 8). Esto sugiere que, en términos del promedio de prácticas empleadas, las generaciones no difieren significativamente entre sí, lo que podría indicar una continuidad o similitud en el uso de técnicas para el manejo de la fertilidad y la erosión del suelo.

Tabla 8*Análisis de Varianza ANOVA*

	Suma cuadrados	de gl	Media cuadrática	F	Sig.
Entre grupos	9,682	2	4,841	,910	,408
Dentro de grupos	319,302	60	5,322		
Total	328,984	62			

Fuente: Elaboración propia, mediante el software SPSS Statistics

La prueba Post Hoc (Tabla 9) mostró que no existen diferencias estadísticamente significativas entre ninguno de los pares generacionales analizados, ya que todos los valores de significancia son mayores a 0.05. Por ejemplo, la diferencia de medias entre la segunda y tercera generación fue de 1.060, pero con un valor p de 0.384, lo cual no es significativo. De igual manera, las comparaciones entre primera y segunda ($p = 0.956$) y primera y tercera generación ($p = 0.541$), tampoco mostraron diferencias significativas.

Tabla 9*Prueba Post Hoc de Tukey comparaciones múltiples*

(I) Generacion	(J) Generacion	Diferencia de medias (I-J)	Desv. Error	Sig.	Intervalo de confianza al 95%	
					Límite inferior	Límite superior
Primera	Segunda	-,186	,649	,956	-1,75	1,37
	Tercera	,873	,821	,541	-1,10	2,85
Segunda	Primera	,186	,649	,956	-1,37	1,75
	Tercera	1,060	,796	,384	-,85	2,97
Tercera	Primera	-,873	,821	,541	-2,85	1,10
	Segunda	-1,060	,796	,384	-2,97	,85

Fuente: Elaboración propia, mediante el software SPSS Statistics

Esto refuerza los resultados del ANOVA y sugiere que, a pesar de posibles variaciones individuales, las generaciones mantienen un número similar de

prácticas relacionadas con el manejo del suelo, lo que podría reflejar una transmisión de conocimientos relativamente constante o una adaptación colectiva a condiciones comunes.

8.1.2.3 Tema 3. Especies arbóreas

Con el objetivo de identificar las especies de árboles más frecuentemente mencionadas por los encuestados en la pregunta 8 (P8), se organizó una tabla de frecuencias (Tabla 10) por generación. Esta información permitió vincular la elección de especies con el conocimiento tradicional, así como con las necesidades productivas o ecológicas actuales.

Tabla 10

Especies arbóreas mencionadas por generación

	Generación_R			Subtotal % de N tablas
	Primera % de N tablas	Segunda % de N tablas	Tercera % de N tablas	
P8_cedro <i>Cedrela odorata L</i>	27,8%	44,4%	27,8%	100,0%
P8_caoba <i>Swietenia macrophylla</i>	33,3%	46,7%	20,0%	100,0%
P8_macuilis <i>Tabebuia rosea</i>	32,3%	48,4%	19,4%	100,0%
P8_teca <i>Tectona grandis L.f.</i>	32,1%	39,3%	28,6%	100,0%
P8_macayo <i>Andira galeottiana</i>	36,4%	36,4%	27,3%	100,0%
P8_tinto <i>Haematoxylum campechianum</i>	34,2%	44,7%	21,1%	100,0%
P8_mango <i>Mangifera indica</i>	40,6%	50,0%	9,4%	100,0%
P8_tamarindo <i>Tamarindus indica</i>	27,8%	50,0%	22,2%	100,0%
P8_aguacate <i>Persea americana</i>	33,3%	44,4%	22,2%	100,0%
P8_naranja <i>Citrus sinensis</i>	32,3%	41,9%	25,8%	100,0%
P8_pimienta <i>Pimenta dioica</i>	50,0%	38,9%	11,1%	100,0%
P8_cenizo <i>Chenopodium album</i>	35,7%	28,6%	35,7%	100,0%
P8_palomulato <i>Bursera simaruba</i>	40,0%	40,0%	20,0%	100,0%
P8_cocoite <i>Gliricidia sepium</i>	26,7%	53,3%	20,0%	100,0%
P8_nance <i>Byrsonima crassifolia</i>	33,3%	33,3%	33,3%	100,0%
P8_pich <i>Enterolobium cyclocarpum</i>	46,7%	40,0%	13,3%	100,0%

	Generación_R			Subtotal % de N tablas
	Primera % de N tablas	Segunda % de N tablas	Tercera % de N tablas	
P8_popiste	50,0%	50,0%	0,0%	100,0%
<i>Blepharidium mexicanum</i> Standl				
P8_caracolillo	30,0%	50,0%	20,0%	100,0%
<i>Sideroxylon foetidissimum</i>				
P8_guasimo	38,9%	44,4%	16,7%	100,0%
<i>Guazuma ulmifolia</i>				
P8_zapote	36,7%	36,7%	26,7%	100,0%
<i>Pouteria sapota</i>				
P8_corozo	33,3%	53,3%	13,3%	100,0%
<i>Acrocomia aculeata</i>				
P8_framboyán	27,6%	48,3%	24,1%	100,0%
<i>Delonix regia</i>				
P8_ceiba	45,0%	40,0%	15,0%	100,0%
<i>Erythrina crista-galli</i>				
P8_guapaque	45,0%	55,0%	0,0%	100,0%
<i>Dialium guianense</i>				
P8_castarica	36,8%	47,4%	15,8%	100,0%
<i>Enterolobium cyclocarpum</i>				
P8_coladelagarto	36,8%	36,8%	26,3%	100,0%
<i>Zanthoxylum fagara</i>				
P8_marañon	33,3%	44,4%	22,2%	100,0%
<i>Anacardium occidentale</i>				
P8_acacia	34,5%	41,4%	24,1%	100,0%
<i>Acacia sp</i>				
P8_cirote	40,0%	33,3%	26,7%	100,0%
<i>Cordia alliodora</i>				

Fuente: Elaboración propia, mediante el software SPSS Statistics

Entre todas las especies reportadas, destacan las siguientes cinco por su alta frecuencia relativa y distribución entre generaciones:

- Macuilís (*Tabebuia rosea*): Con un 48.4% de menciones en la segunda generación y más del 32% en las demás, el macuilís es altamente valorado. Es una especie nativa de crecimiento medio a rápido, con madera útil y follaje denso, lo que le permite capturar una buena cantidad de dióxido de carbono. Además, su adaptabilidad al clima local la hace eficaz para la restauración ecológica y conservación del suelo.
- Tinto (*Haematoxylum campechianum*): También ampliamente mencionado (44.7% en la segunda generación), el tinto es conocido por su dureza y longevidad. Esta especie no solo es útil en términos de aprovechamiento forestal, sino que por su ciclo de vida largo y su biomasa densa, puede almacenar carbono durante décadas, contribuyendo significativamente a los sumideros de carbono a largo plazo.

- Mango (*Mangifera indica*): Con el 50% de menciones en la segunda generación y 40.6% en la primera, el mango combina valor económico y ecológico. Aunque es una especie introducida, su tamaño y densidad foliar la hacen útil en el secuestro de carbono, especialmente en sistemas agroforestales diversificados
- Cedro (*Cedrela odorata*): El 44.4% de menciones en la segunda generación resalta su importancia. Es una de las especies maderables más valiosas de la región y posee un crecimiento rápido en su etapa inicial. Su uso en reforestación contribuye tanto a la captura de carbono como al valor económico de los sistemas productivos.
- Caoba (*Swietenia macrophylla*): Especie nativa de alto valor maderable, con 46.7% de menciones en la segunda generación y 33.3% en la primera. Su crecimiento relativamente lento se compensa con la longevidad y densidad de la madera, lo que la convierte en una excelente opción para el almacenamiento de carbono a largo plazo.

En las pruebas de normalidad aplicadas a la variable P9 (Tabla 11), desglosados por generación, se utilizó tanto la prueba de Kolmogorov-Smirnov como la de Shapiro-Wilk. En ambos casos, los valores de significancia ($p < 0.05$) indican que la distribución de las respuestas no se ajusta a una distribución normal en ninguno de los grupos generacionales.

Tabla 11

Prueba de normalidad P9

	Generación	Kolmogorov-Smirnov ^a			Shapiro-Wilk		
		Estadístico	gl	Sig.	Estadístico	gl	Sig.
P9_ArbolJustificación	Primera	,255	23	,000	,818	23	,001
	Segunda	,272	28	,000	,776	28	,000
	Tercera	,257	12	,028	,807	12	,011

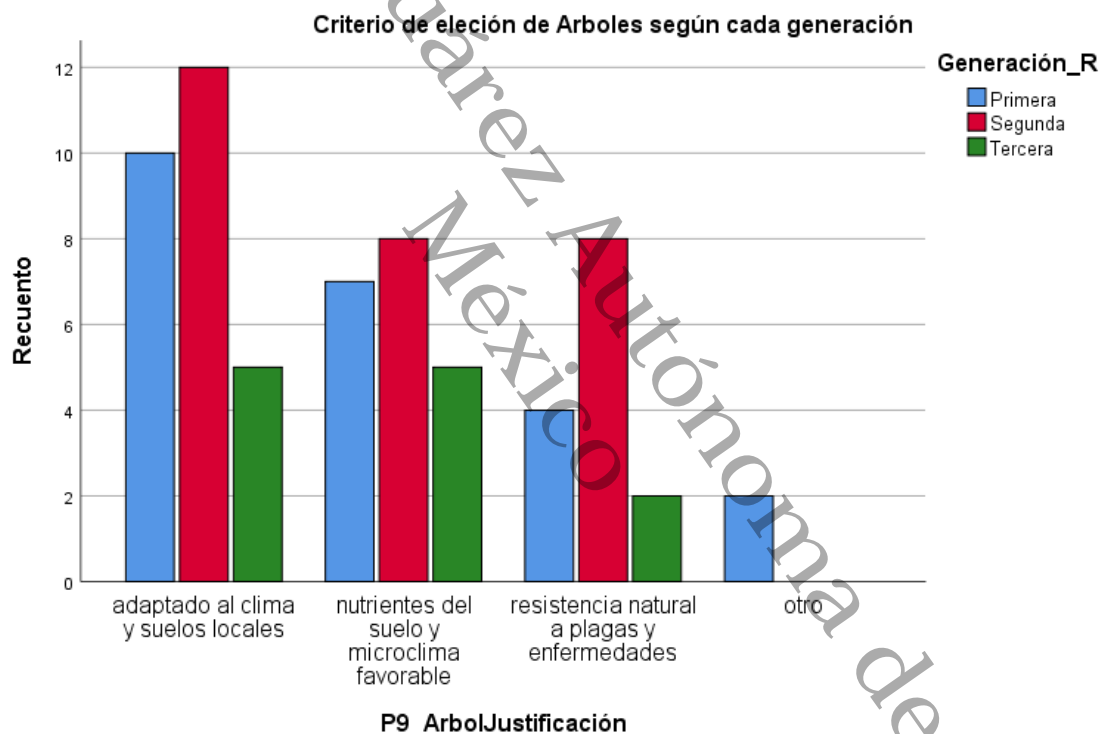
a. Corrección de significación de Lilliefors

Fuente: Elaboración propia, mediante el software SPSS Statistics

Esta falta de normalidad justificó el uso de métodos estadísticos no paramétricos para el análisis posterior, como las tablas cruzadas y análisis de frecuencias. Para explorar cómo varían los criterios de justificación en la selección de árboles entre generaciones, se elaboró una tabla cruzada entre la variable P9 y la generación de los entrevistados. Esta comparación permitió elaborar la siguiente gráfica (fig. 7) para identificar posibles patrones generacionales en la percepción y valoración de los árboles según sus beneficios ecológicos o adaptativos.

Figura 7

Criterio de elección de árboles según cada generación de encuestados de 2025



Fuente: Elaboración propia, mediante el software SPSS Statistics

El criterio de adaptación ecológica es ampliamente compartido, mientras que otros factores como la resistencia a plagas o el microclima tienden a concentrarse en generaciones específicas. La segunda generación destaca con una mayor diversidad de criterios utilizados, lo que sugiere una postura intermedia entre conocimiento tradicional y adaptación a nuevas condiciones.

Para determinar si existe una relación estadísticamente significativa entre la generación a la que pertenece una persona encuestada y el criterio utilizado para justificar su elección de especies arbóreas (*P9*), se aplicó la prueba de chi-cuadrado de Pearson (Tabla 12).

Tabla 12

Prueba de Chi-cuadrado P9

	Valor	df	Significación asintótica (bilateral)
Chi-cuadrado de Pearson	4,874 ^a	6	,560
Razón de verosimilitud	5,389	6	,495
Asociación lineal por lineal	,260	1	,610
N de casos válidos	63		

a. 5 casillas (41,7%) han esperado un recuento menor que 5. El recuento mínimo esperado es ,38.

Fuente: Elaboración propia, mediante el software SPSS Statistics

Este valor de *p* es considerablemente mayor al umbral comúnmente aceptado de 0.05, por lo tanto, No se rechaza la hipótesis nula, lo que indica que no hay una asociación estadísticamente significativa entre la generación y el criterio de elección de árboles.

Aunque visualmente el gráfico sugiere ciertas diferencias en las prioridades entre generaciones (con la segunda generación destacando en variedad de criterio), el análisis estadístico indicó que estas variaciones no son estadísticamente significativas. En términos generales, se puede afirmar que las tres generaciones tienden a compartir criterios similares al momento de justificar la selección de especies arbóreas, siendo la adaptación al clima y al suelo locales el criterio dominante en todas ellas.

8.1.2.4 Tema 4: Conocimientos heredados por generación

En la prueba de Kolmogorov-Smirnov (K-S), las tres generaciones presentan valores de significación superiores al umbral típico de 0.05, excepto la primera generación, que se aproxima al límite con un valor de 0.131. Las generaciones

segunda (0.056) y tercera (0.200) también mostraron valores aceptables, aunque la segunda está muy cerca del umbral.

En la prueba de Shapiro-Wilk (Tabla 13), la primera generación presentó un valor de significación de 0.045, lo que indica una leve desviación de la normalidad, ya que está por debajo del umbral de 0.05, La segunda generación (0.307) y la tercera generación (0.454) no presentan problemas de normalidad, ya que sus valores están por encima del umbral.

Tabla 13

Prueba de normalidad para Conocimientos_heredados

	Generación	Kolmogorov-Smirnov ^a			Shapiro-Wilk		
		Estadístico	gl	Sig.	Estadístico	gl	Sig.
Conocimientos_heredados	Primera	,160	23	,131	,912	23	,045
	Segunda	,163	28	,056	,958	28	,307
	Tercera	,177	12	,200*	,937	12	,454

*. Esto es un límite inferior de la significación verdadera.

a. Corrección de significación de Lilliefors

Nota: Elaboración propia

Aunque la primera generación mostró una ligera desviación de la normalidad según Shapiro-Wilk, las demás generaciones cumplen con los supuestos de normalidad en ambas pruebas. Esto permite continuar con los análisis paramétricos posteriores.

Los resultados de la prueba de homogeneidad de varianzas de Levene para la variable *Conocimientos_heredados* mostraron valores de significación superiores a 0.05 en todas sus variantes (Tabla 14).

Tabla 14*Prueba de homogeneidad de Levene*

		Estadístico de Levene	gl1	gl2	Sig.
Conocimientos heredados	Se basa en la media	2,828	2	60	,067
	Se basa en la mediana	2,840	2	60	,066
	Se basa en la mediana y con gl ajustado	2,840	2	51,210	,068
	Se basa en la media recortada	2,940	2	60	,061

Nota: Elaboración propia.

Aunque los valores se acercan al umbral de significancia del 0.05, en ninguno de los casos se alcanza un nivel estadísticamente significativo. Esto indica que se cumple el supuesto de homogeneidad de varianzas, por lo que fue apropiado continuar con un análisis de varianza (ANOVA) para comparar los promedios de conocimiento heredado entre las distintas generaciones.

El ANOVA aplicado a la variable *Conocimientos heredados* (Tabla 15) permitió evaluar si existían diferencias estadísticamente significativas entre las generaciones en cuanto al número o tipo de prácticas tradicionales que aún conservan.

Tabla 15*Prueba de varianza aplicada a Conocimientos heredados*

	Suma de cuadrados	de GI	Media cuadrática F	Sig.	
Entre grupos	12,615	2	6,307	1,626	,205
Dentro de grupos	232,814	60	3,880		
Total	245,429	62			

Fuente: Elaboración propia.

Los resultados mostraron que la varianza explicada por las diferencias entre generaciones (suma de cuadrados entre grupos = 12.615) es relativamente baja en comparación con la varianza dentro de los grupos (suma de cuadrados dentro de grupos = 232.814). El valor de $F = 1.626$ y su significancia asociada ($p = 0.205$) indican que no se alcanzó un nivel estadísticamente significativo.

Esto sugiere que, aunque existen diferencias en los promedios del conocimiento heredado entre generaciones, estas diferencias no fueron lo suficientemente consistentes como para considerarse significativas desde un punto de vista estadístico. Por tanto, no se puede afirmar con evidencia suficiente que la generación a la que pertenece una persona influya de forma determinante en la cantidad de prácticas tradicionales que ha heredado o conserva.

La prueba post hoc de Tukey (Tabla 16), aplicada tras el ANOVA, permitió examinar con mayor detalle las diferencias entre generaciones respecto al índice de *Conocimientos_heredados*. Aunque el análisis ANOVA no arrojó diferencias estadísticamente significativas, la prueba de Tukey permite observar tendencias en los promedios de cada grupo.

Tabla 16

Prueba post hoc de Tukey para Conocimientos_heredados

		Subconjunto para alfa = 0.05
Generación	N	1
Segunda	28	7,0714
Primera	23	7,9565
Tercera	12	8,0000

Tukey B^{a,b}. Se visualizan las medias para los grupos en los subconjuntos homogéneos.

a. Utiliza el tamaño de la muestra de la media armónica = 18,459.

b. Los tamaños de grupo no son iguales. Se utiliza la media armónica de los tamaños de grupo.

Los niveles de error de tipo I no están garantizados.

Nota: Elaboración propia.

Los resultados muestran que los participantes de la segunda generación presentaron en promedio un menor número de prácticas heredadas (media = 7.07)

en comparación con la primera (media = 7.96) y tercera generación (media = 8.00). Sin embargo, al formar un único subconjunto homogéneo con un nivel de significancia de 0.05, se confirma que estas diferencias no son estadísticamente significativas.

Esto indica que, si bien se observan ligeras variaciones entre generaciones, especialmente una menor presencia de conocimientos heredados en la segunda, no existieron diferencias suficientemente marcadas como para concluir que la generación influye de manera significativa en la transmisión de prácticas tradicionales. Estas observaciones podrían, no obstante, orientar futuras investigaciones sobre posibles factores intergeneracionales o contextuales que incidan en la continuidad del conocimiento tradicional.

Para concluir con este bloque, se aplicó una prueba de Chi-cuadrado de Pearson (Tabla 17) con el objetivo de explorar si existía una asociación estadísticamente significativa entre la generación de los participantes y el tipo de práctica tradicional que consideran más importante (P13).

Tabla 17

*Prueba de Chi-cuadrado p13*generación*

	Valor	df	Significación asintótica (bilateral)
Chi-cuadrado de Pearson	8,724 ^a	6	,190
Razón de verosimilitud	8,981	6	,175
Asociación lineal por lineal	,511	1	,475
N de casos válidos	63		

a. 6 casillas (50,0%) han esperado un recuento menor que 5. El recuento mínimo esperado es 2,10.

Nota: Elaboración propia.

Los resultados obtenidos indicaron que no existe una relación significativa entre ambas variables. El valor de Chi-cuadrado fue de 8.724 con 6 grados de libertad y una significación asintótica bilateral de 0.190, lo cual está muy por encima del umbral convencional de 0.05. Asimismo, la razón de verosimilitud (8.981) y la prueba de asociación lineal por lineal (0.511) reforzaron esta conclusión.

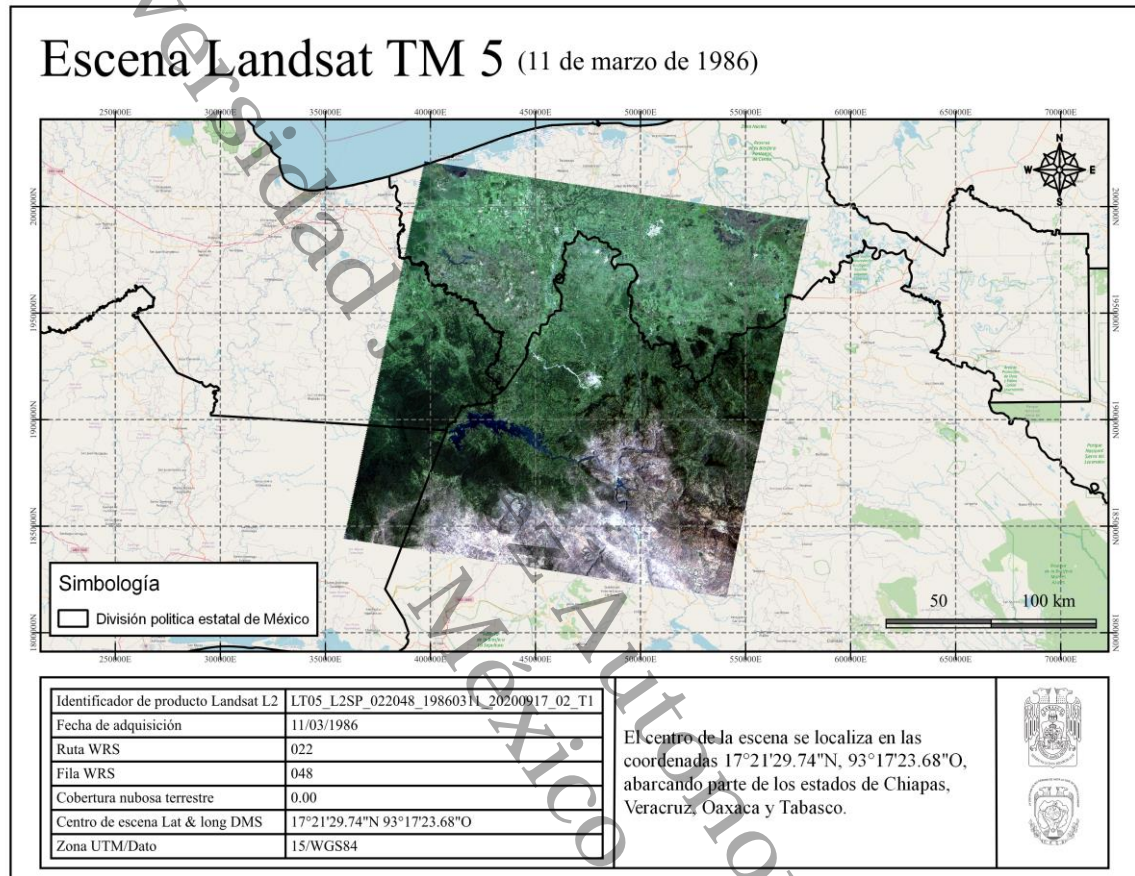
Cabe señalar que el 50% de las celdas de la tabla cruzada tuvieron recuentos esperados menores a 5, lo cual puede disminuir la robustez del análisis y sugiere tomar estos resultados con cautela. Aun así, en términos generales, no se identificó una tendencia clara que vincule de manera significativa la generación con la preferencia por un tipo específico de práctica tradicional, lo que podría indicar una cierta homogeneidad intergeneracional en la valoración de estas prácticas o la necesidad de aplicar métodos complementarios para profundizar en esta relación.

8.2 Recopilación de información geográfica

Las imágenes satelitales utilizadas en este estudio fueron obtenidas desde la plataforma EarthExplorer del *U.S. Geological Survey (USGS)*. Se seleccionaron dos escenas correspondientes a los satélites Landsat 5 TM (11 de marzo de 1986) y Landsat 9 TIRS (2 de febrero de 2024), elegidas por su baja cobertura nubosa, resolución espacial adecuada (30 m), y por disponer de bandas espectrales comparables, esenciales para la aplicación de índices de vegetación (fig. 8 y 9). La distancia temporal entre ambas fechas permite observar transformaciones en la cobertura vegetal a lo largo de casi cuatro décadas, en un contexto de interés para el análisis del potencial de secuestro de carbono.

Figura 8

Datos principales de la imagen Landsat 5 TM utilizada en el análisis (11 de marzo de 1986).

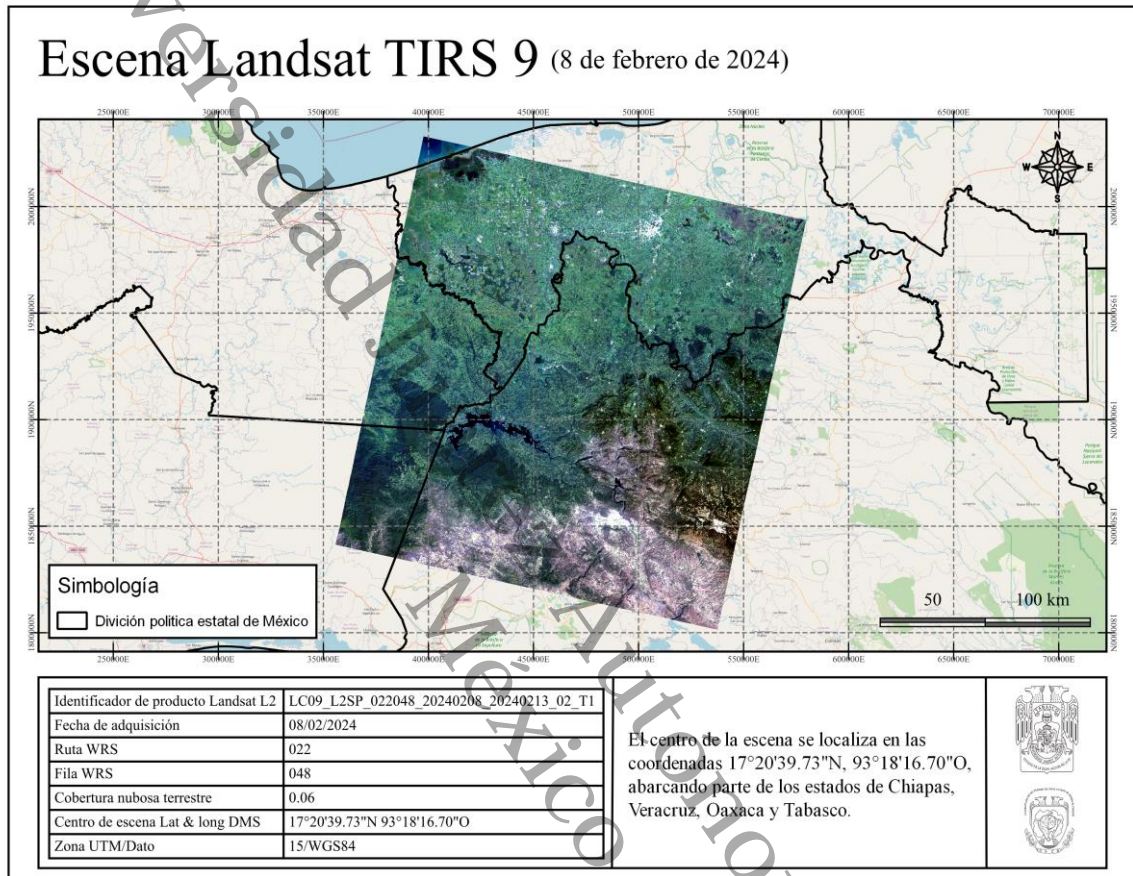


Elaboración propia con el software QGIS

La escena pertenece a la ruta 022 y fila 048 del sistema de referencia WRS (Worldwide Reference System), y presenta una cobertura nubosa del 0%, condición óptima para el análisis retrospectivo del paisaje. El centro de la escena se ubica en las coordenadas 17°21'29.74"N, 93°17'23.68"O, abarcando no solo el área de estudio (Villa Benito Juárez, Macuspana, Tabasco), sino también porciones de los estados de Chiapas y Oaxaca. La imagen está proyectada en la zona UTM 15N con datum WGS84, garantizando compatibilidad con los sistemas geográficos empleados en el estudio.

Figura 9

Datos principales de la imagen Landsat 9 TIRS utilizada en el análisis (08 de febrero de 2024).



Elaboración propia con el software QGIS

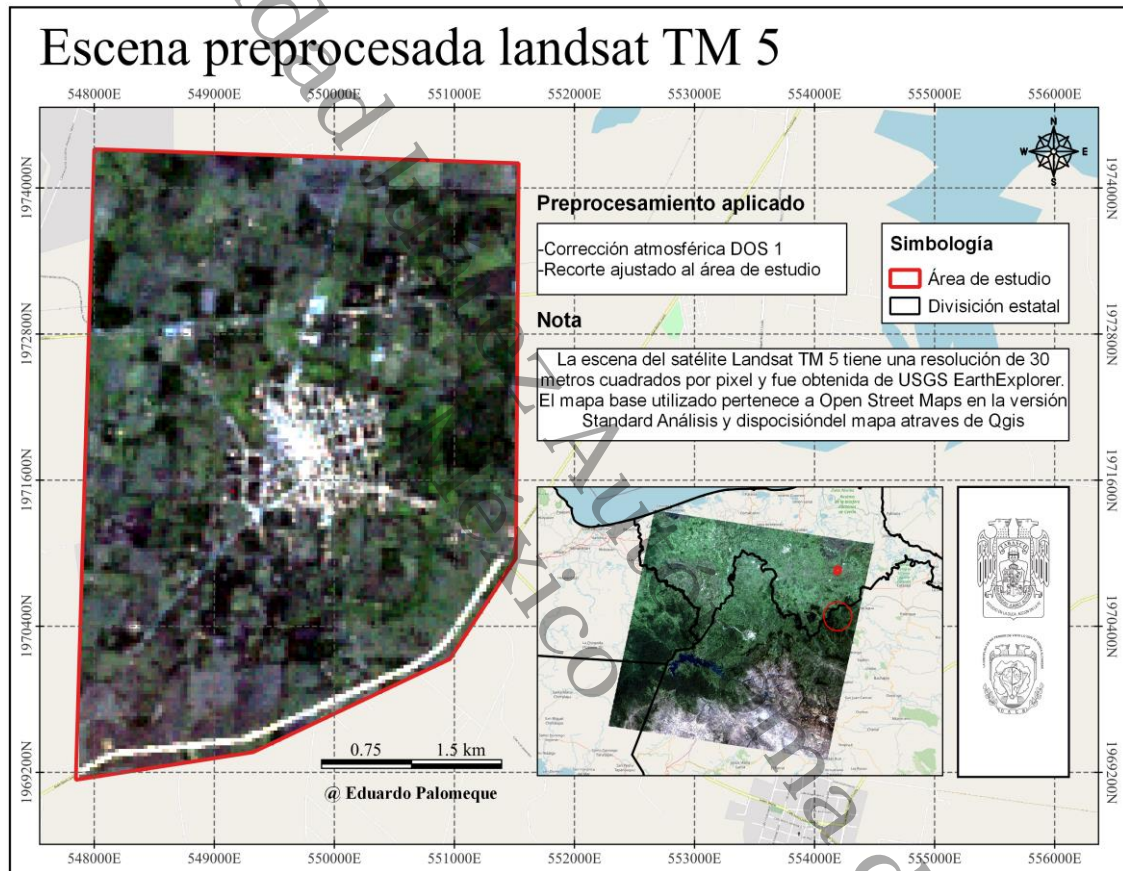
La imagen Landsat 9 TIRS se encuentra proyectada en la zona UTM 15N, con datum WGS84, lo cual la hace plenamente compatible con los sistemas de coordenadas empleados en el resto del estudio. Para facilitar la interpretación espacial y la ubicación de elementos clave del territorio, se le integró una capa de etiquetas geográficas (Google Labels), permitiendo identificar fácilmente localidades, caminos y otros puntos de referencia dentro del área de estudio.

En una segunda etapa, ambas imágenes fueron sometidas a un pre-procesamiento, que incluyó correcciones geométricas y radiométricas básicas, así como el recorte de cada escena al área de estudio, definida previamente mediante la delimitación

geográfica de la localidad de Villa Benito Juárez, municipio de Macuspana, Tabasco (fig. 10 y 11). Este recorte garantiza que el análisis posterior se enfoque únicamente en los elementos relevantes para los objetivos del estudio.

Figura 10

Escena preprocesada Landsat TM 5 (1986)

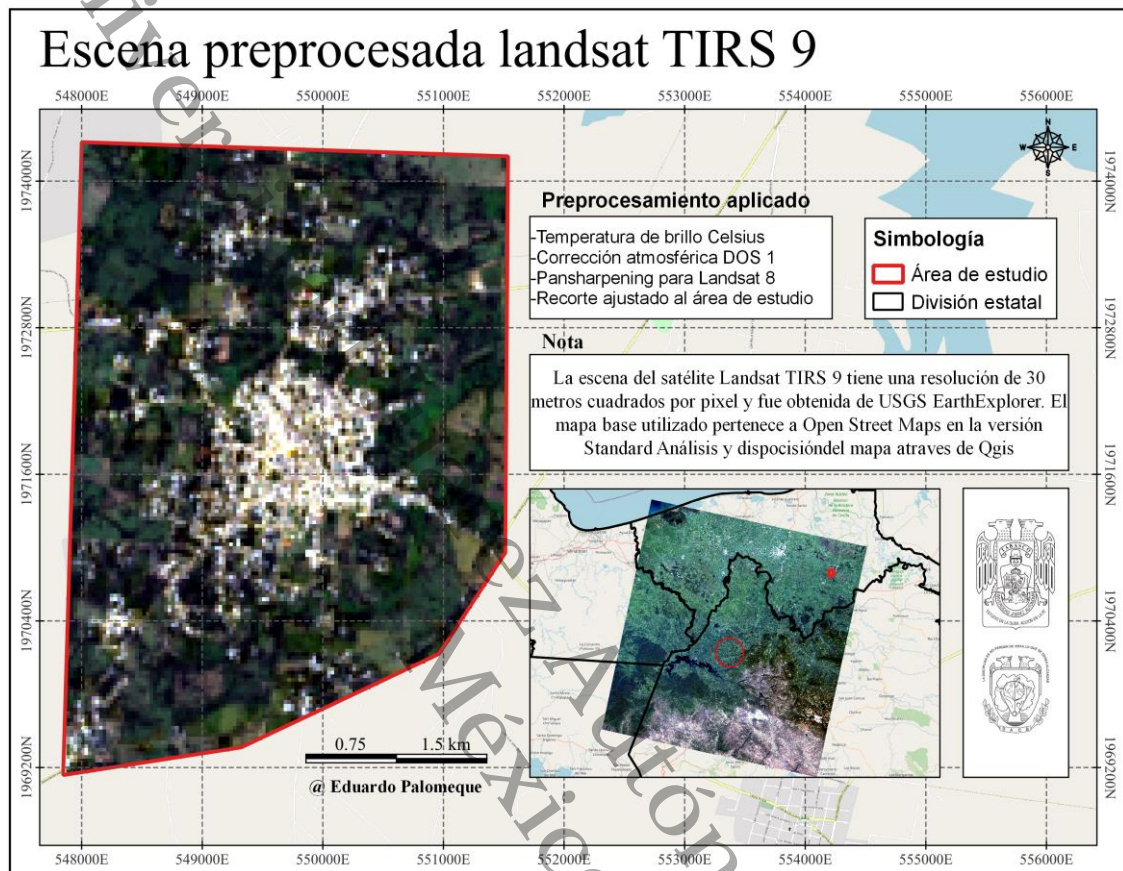


Elaboración propia con el software QGIs

Al igual que la escena anterior se presenta la imagen satelital más reciente, correspondiente al 8 de febrero de 2024, capturada por el sensor Landsat TIRS 9, y descargada también desde EarthExplorer. Esta escena refleja las condiciones actuales del territorio y será clave para el análisis espectral vinculado al potencial de captura de carbono.

Figura 11

Escena preprocesada Landsat TIRS 9 (2024)



Elaboración propia con el software QGIS

Aunque inicialmente se contempló aplicar un pansharpening para mejorar la resolución espacial, este procedimiento fue descartado debido a problemas de compatibilidad con la versión del complemento SCP, por lo que se utilizó la imagen en su versión original (30m). Esta imagen fue utilizada en el análisis de vegetación mediante los índices NDVI y SAVI, como paso previo para identificar áreas con alto potencial de secuestro de carbono.

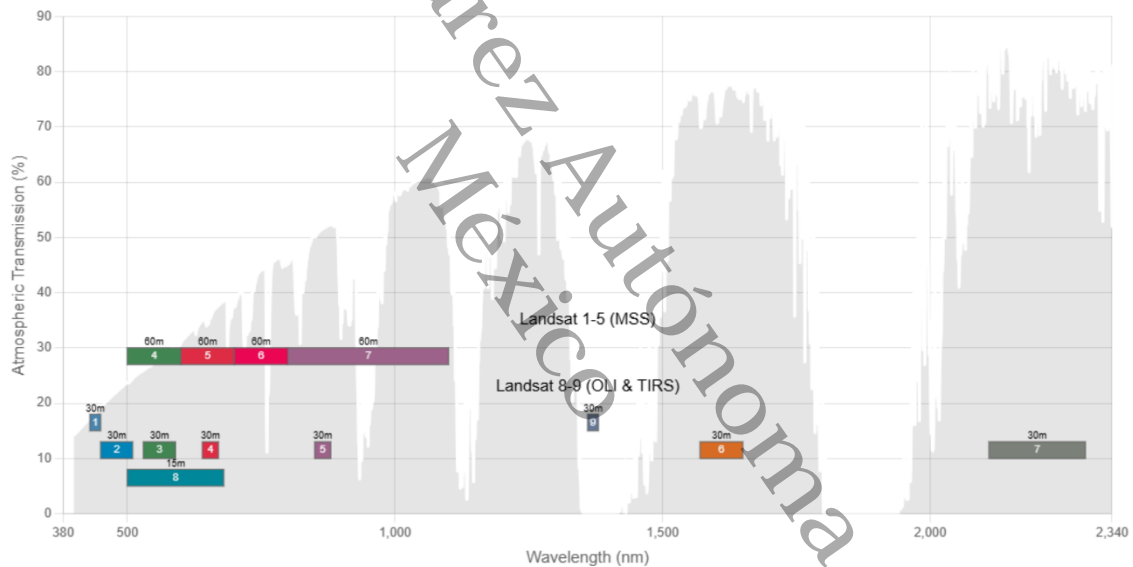
En la imagen del 2024 se observó un aumento considerable en la densidad y extensión del área construida respecto a la escena de 1986, donde el núcleo urbano era más reducido y rodeado en mayor medida por superficies agrícolas y vegetación.

secundaria. Este cambio refleja una clara expansión del asentamiento humano, con probable impacto sobre la cobertura vegetal original.

Posteriormente, se empleó la herramienta Spectral Band Comparison Tool de la NASA, con el propósito de identificar las principales diferencias entre las bandas espectrales utilizadas en ambas imágenes satelitales. Esta herramienta permitió evaluar el comportamiento de los distintos rangos del espectro electromagnético captados por cada sensor, facilitando la interpretación de los cambios en la cobertura vegetal y el uso del suelo.

Figura 12

Comparación de las misiones satelitales Landsat 5 y 9



Elaboración propia con el software Spectral Band Comparison tool NASA

La diferencia en la ubicación y anchura espectral de las bandas NIR y SWIR implica que Landsat 9 puede captar con mayor sensibilidad los contrastes en la reflectancia de la vegetación sana, especialmente en cultivos o áreas de selva secundaria.

Además, el sensor OLI-2 está mejor calibrado para capturar variaciones sutiles en la salud de la vegetación y permite una comparación más robusta entre clases de cobertura a lo largo del tiempo. Estas ventajas son críticas en el contexto de esta

investigación, que busca identificar áreas con alto potencial de secuestro de carbono en un entorno tropical húmedo.

Finalmente, sobre la imagen más reciente, correspondiente al año 2024, se aplicaron los índices de vegetación NDVI y SAVI (Tabla 18). Estos índices fueron calculados como una etapa preliminar para identificar aquellas áreas con mayor cobertura vegetal, las cuales representan un mayor potencial de secuestro de carbono y, por tanto, son clave para el análisis del presente estudio.

Tabla 18

Descripción de los valores del NDVI/SAVI

Valor NDVI/SAVI	Descripción
<0	El material inanimado/muerto, por ejemplo: carreteras, edificios, el suelo o las plantas muertas
0 -> 0.33	Material vegetativo no saludable/Suelo desnudo
0.33 -> 0.66	Material vegetativo sano
->0.66	Material vegetativo muy saludable

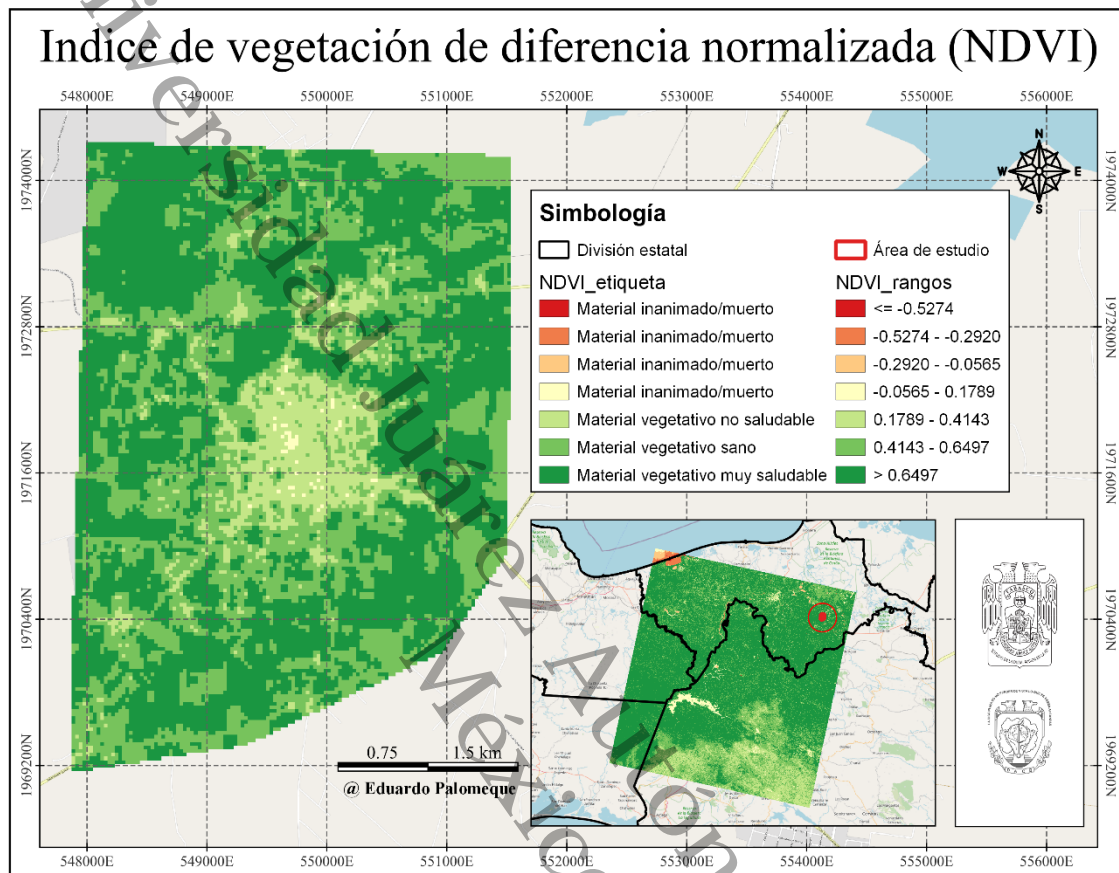


Fuente: adaptado de Bravo-Morales (2017)

La capa presenta la distribución espacial del NDVI obtenida a partir de la escena Landsat 9 (fig. 13). Los valores del NDVI se clasificaron en siete rangos, desde material inanimado o muerto (valores ≤ -0.5274) hasta vegetación muy saludable (valores > 0.6497). Esta representación cartográfica permite identificar las zonas con mayor vigor vegetal, las cuales representan un mayor potencial para el secuestro de carbono atmosférico.

Figura 13

NDVI para la imagen preprocesada Landsat TIRS 9



Elaboración propia con el software QGIS

En la capa se observó que una porción importante del área de estudio presenta valores de NDVI mayores a 0.33 distribuidos en el territorio analizado. Estas zonas evidencian una vegetación densa, activa y saludable, con alta capacidad fotosintética, lo cual las convierte en áreas con alto potencial para la captura de carbono.

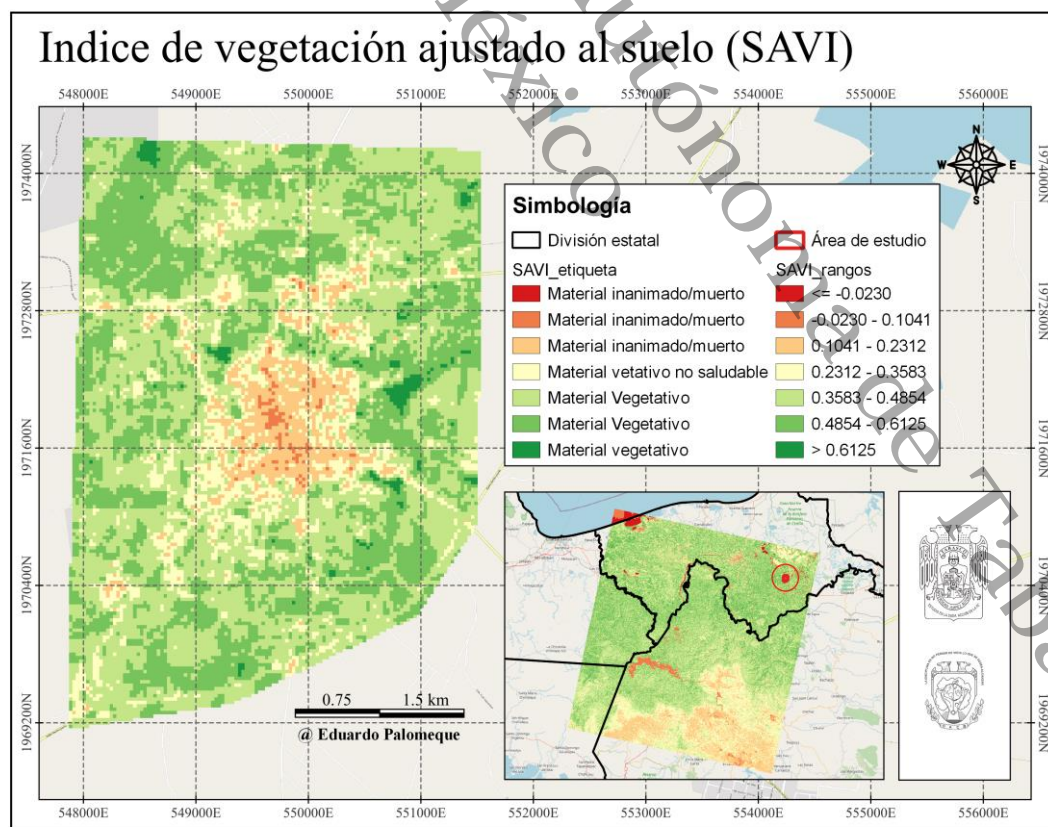
Por otro lado, las áreas con valores de NDVI inferiores a 0.33 se concentran en el centro, asociadas con zonas urbanizadas, suelos expuestos o vegetación degradada, por lo que su potencial como sumideros de carbono es limitado.

En contraste al NDVI, en el SAVI (fig. 14) las áreas en tonos verde evidenciaron regiones con mayor cobertura vegetal saludable, lo cual puede corresponder a zonas de conservación o cultivos perennes con buen vigor. Estas áreas se caracterizaron por valores SAVI superiores a 0.3583, destacando su estabilidad en términos de cobertura vegetal.

A partir de la interpretación visual, se observó una alta concentración de tonalidades rojizas y anaranjadas en el centro del mapa, lo cual indicó la presencia significativa de material inanimado y suelos desnudos o áreas con vegetación no saludable (valores entre -0.0230 y 0.3583). Estas zonas requieren atención especial en el proceso de clasificación del uso del suelo, ya que pueden introducir sesgos al confundir áreas degradadas con otras coberturas si no se consideran adecuadamente.

Figura 14

SAVI para la imagen preprocesada Landsat TIRS 9



Elaboración propia con el software QGIs

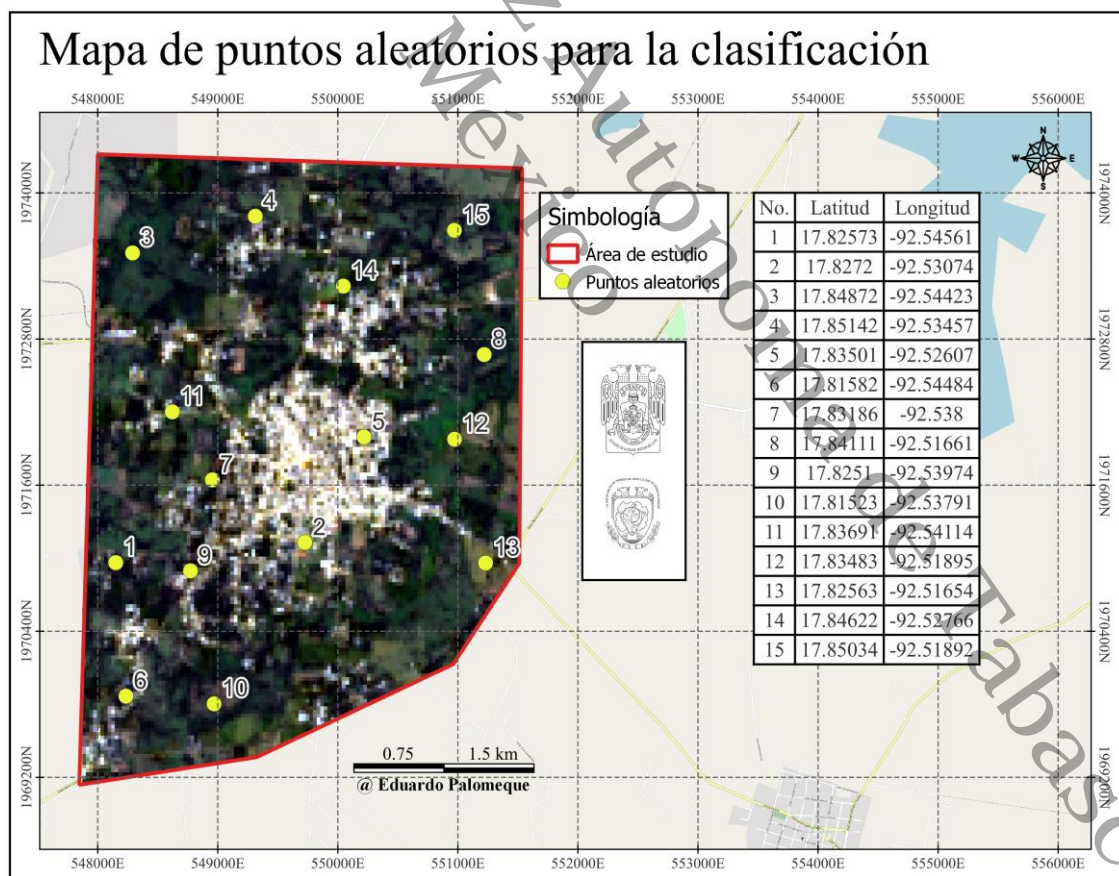
La interpretación conjunta de ambos índices fortaleció el proceso de clasificación del uso del suelo. Por un lado, el NDVI aportó criterios para diferenciar áreas con vegetación vigorosa, mientras que el SAVI sirvió como filtro para evitar clasificaciones erróneas en sitios con baja cobertura vegetal, especialmente donde predomina el suelo desnudo o material no fotosintético.

8.3 Análisis espectral con la herramienta RandomForest de QGIS

La Figura 15 muestra la distribución espacial de los 15 puntos aleatorios generados dentro del polígono de estudio, con el propósito de obtener muestras de referencia que permitieran entrenar el modelo RandomForest.

Figura 15

Mapa de puntos aleatorios para la clasificación



Elaboración propia. Cada punto fue georreferenciado para facilitar su localización durante la

recolección de datos mediante dron. Elaboración propia con base en imágenes de fondo de Google Satélite, procesadas en QGIS.

Las coordenadas geográficas de cada punto fueron extraídas y sistematizadas, lo que permitió su localización precisa durante las jornadas de trabajo en campo (Tabla 19), utilizando sistemas GPS y registros fotográficos a través de vuelos con el dron DJI Mini 2 (Ver anexo X).

Tabla 19

Fotografías con dron DJI Mini 2 para identificar visualmente la cobertura terrestre

Fotografía con Dron	Descripción visual de la fotografía
 <p data-bbox="256 1073 410 1102">2025.06.21 17.53°11'N 92°32'38"W 24vix 12.8 1:520x 150°100</p> <p data-bbox="711 1073 792 1102">DJI MINI 2 SE</p>	<p>Humedal: Durante la prospección en campo se identificó que esta área presenta características de un humedal estacional, ya que en época de lluvias intensas se inunda de manera recurrente. Se observó la existencia de ductos de drenaje que permiten el paso del excedente hídrico de un predio a otro, lo cual confirma su función como zona de retención temporal de agua. En la imagen se aprecia que las zonas de menor altitud presentan una vegetación notablemente más densa y de tonalidad verde más intensa, lo que sugiere una mayor disponibilidad de humedad edáfica en estos sectores.</p>
 <p data-bbox="256 1493 410 1522">2025.06.20 17.48°56'N 92°32'43"W 24vix 12.8 1:520x 150°100</p> <p data-bbox="711 1493 792 1522">DJI MINI 2 SE</p>	<p>Vegetación: Esta zona, al igual que otras áreas circundantes a la Villa Benito Juárez, exhibe una cobertura arbórea densa en las inmediaciones de las viviendas. Esta vegetación peridoméstica, al ser analizada mediante imágenes satelitales, puede ser clasificada como vegetación saludable debido a su alta reflectancia en bandas asociadas con la actividad fotosintética, lo cual indica una abundante presencia de biomasa y buen estado fitosanitario.</p>
 <p data-bbox="256 1871 410 1900">2025.06.20 17.49°55'N 92°32'18"W 24vix 12.8 1:520x 150°100</p> <p data-bbox="711 1871 792 1900">DJI MINI 2 SE</p>	<p>Pastizales: Durante los recorridos de campo se identificaron múltiples sitios con características similares, donde los terrenos han sido desbrozados para su uso en actividades de ganadería extensiva. Estas áreas presentan vegetación herbácea con signos evidentes de estrés hídrico, especialmente durante la temporada de sequía. En las imágenes satelitales, estas zonas pueden ser erróneamente clasificadas como suelo desnudo debido a la baja reflectancia en bandas asociadas con la</p>

Fotografía con Dron

Descripción visual de la fotografía

actividad fotosintética, cuando en realidad corresponden a pastizales degradados con una cobertura vegetal rala y afectada por condiciones climáticas adversas.



2025.06.21 | 17:49:34"N 92:31:2"W
24m | 12.5 1:1800s ISO160

dji MINI 2 SC

Áreas agrícolas: En la Villa Benito Juárez, es una práctica común preparar los terrenos para el ciclo agrícola mediante la quema controlada previa a la llegada de las lluvias estacionales. Esta técnica tradicional facilita la limpieza del terreno y la incorporación de materia orgánica al suelo, marcando el inicio del periodo de cultivo. Mediante observación de campo y análisis de imágenes satelitales, es posible identificar con claridad las parcelas sometidas regularmente a esta práctica, ya que presentan firmas espectrales características de áreas recientemente quemadas y despejadas, lo que permite diferenciarlas de otros usos del suelo en la región.



2025.06.21 | 17:50:7"N 92:31:34"W
24m | 12.5 1:1800s ISO160

dji MINI 2 SC

Construido: La identificación de zonas urbanizadas, infraestructura vial y edificaciones en general resulta relativamente sencilla mediante el análisis de imágenes satelitales, debido a que estos elementos presentan firmas espectrales claramente diferenciadas de las asociadas a la cobertura vegetal o suelos expuestos. Las superficies construidas tienden a reflejar en mayor medida en bandas del espectro visible e infrarrojo cercano, lo cual permite su detección con alta confiabilidad, incluso mediante métodos de clasificación automática.

Las nomenclaturas utilizadas para el mapeo de la cobertura terrestre corresponden a las definiciones de cobertura terrestre del Informe de la Situación del Medio Ambiente en México de la SEMARNAT (2015). Las definiciones de las clases de cobertura terrestre exhibidas en este estudio, con referencias a datos nacionales se muestran en la Tabla 20.

Tabla 20

Correspondencia entre clases propuestas y nomenclatura SEMARNAT

Clase propuesta	Definición	Nombre SEMARNAT	Definición SEMARNAT
Vegetación	Área cubierta por vegetación natural o secundaria (arbórea, Vegetación arbustiva o herbácea), sin uso natural agrícola ni ganadero.		Terrenos con vegetación natural — selva, bosque, matorral, vegetación hidrófila— no transformados significativamente por actividad humana.
Áreas agrícolas	Zonas destinadas al cultivo de especies vegetales de forma Agricultura intensiva o extensiva.		Suelo dedicado a actividades agrícolas (riego, temporal o agricultura mixta), con o sin infraestructura.
Pastizales	Terrenos dominados por vegetación herbácea natural o inducida, principalmente gramíneas, usados para pastoreo.	Pastizal	Áreas con vegetación herbácea predominante, natural o inducida, aprovechadas para ganadería.
Humedales	Ecosistemas temporal o permanentemente inundados con vegetación hidrófila y suelos saturados.	Vegetación hidrófila	Zonas con vegetación adaptada a condiciones húmedas (tular, popal, manglar, pantano), de alto valor ecológico.
Construido	Superficie cubierta por infraestructura urbana — caminos, edificios o estructuras y construidas artificiales.	Zonas urbanas	Áreas cubiertas por edificaciones, infraestructura urbana o industrial, incluyendo asentamientos y superficies artificiales.

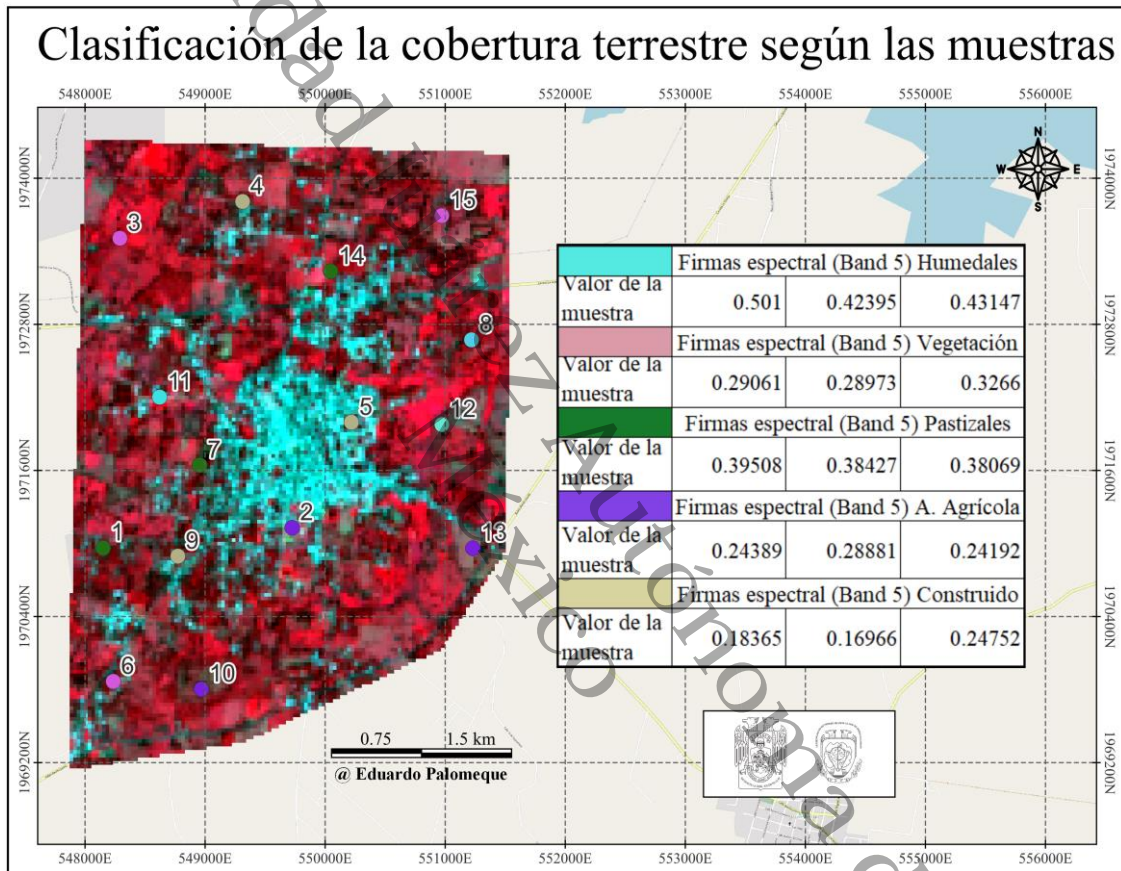
Nota: La correspondencia está basada en la *Clasificación de Cobertura del Suelo, Serie VI* del INEGI (2020) y el *Sistema de Información Ambiental y de Recursos Naturales* de la SEMARNAT (2018), adaptado del cuadro de clases de Waśniewski, *et al* (2023) a las categorías definidas para este estudio.

El análisis se centró en la composición infrarroja del sensor TIRS de Landsat 9, correspondiente al rango del infrarrojo cercano (NIR, ~0.85–0.88 μm), debido a su alta capacidad para discriminar variaciones en el contenido de biomasa, esta banda es particularmente sensible a la estructura interna de la vegetación, lo que permitió

detectar diferencias sutiles en el vigor vegetal y delimitar con precisión áreas vegetadas (fig. 16), dada la alta reflectancia de la vegetación activa en este rango espectral y la casi total absorción por parte del agua.

Figura 16

Clasificación de la cobertura terrestre según las muestras



Elaboración propia con el software QGIS. Los puntos representativos se dividieron en 5 clases para los fines de este estudio.

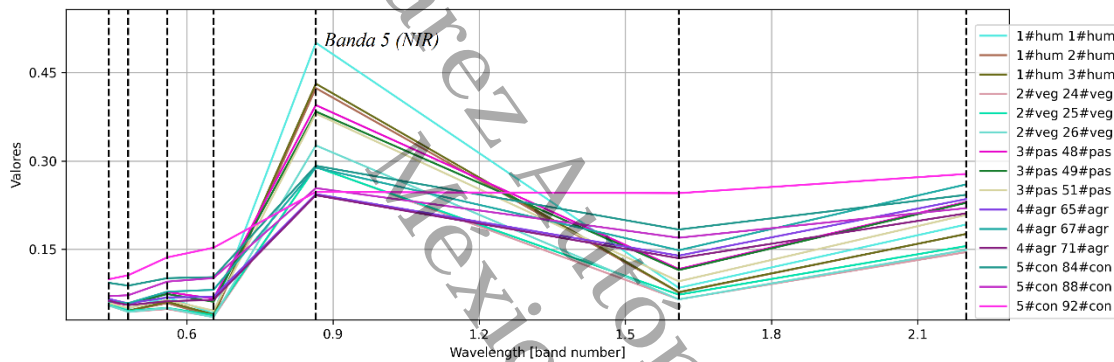
Durante los recorridos de campo se identificó una alta diversidad en los tipos de cobertura vegetal presentes en el área de estudio. Ante esta heterogeneidad, se procedió a una clasificación balanceada, asignando tres firmas espectrales representativas a cada clase principal, con el objetivo de garantizar una distribución equitativa y una adecuada representatividad en las muestras utilizadas como

Regiones de Interés (ROI). Esta estrategia permitió capturar un rango espectral consistente dentro de cada categoría, mejorando la precisión del modelo de clasificación supervisada.

Las curvas espectrales (fig. 7) permitieron identificar que la banda 5 (NIR) exhibe un pico de reflectancia significativamente diferenciado entre las clases analizadas, lo que la posiciona como un eje espectral prioritario para la discriminación temática y la selección de las Regiones de Interés (ROI). Esta variabilidad espectral refuerza su idoneidad como criterio discriminante en el proceso de clasificación supervisada.

Figura 17

Firmas espectrales de las muestras ROI de las fotografías con Dron



Elaboración propia con el software QGIs

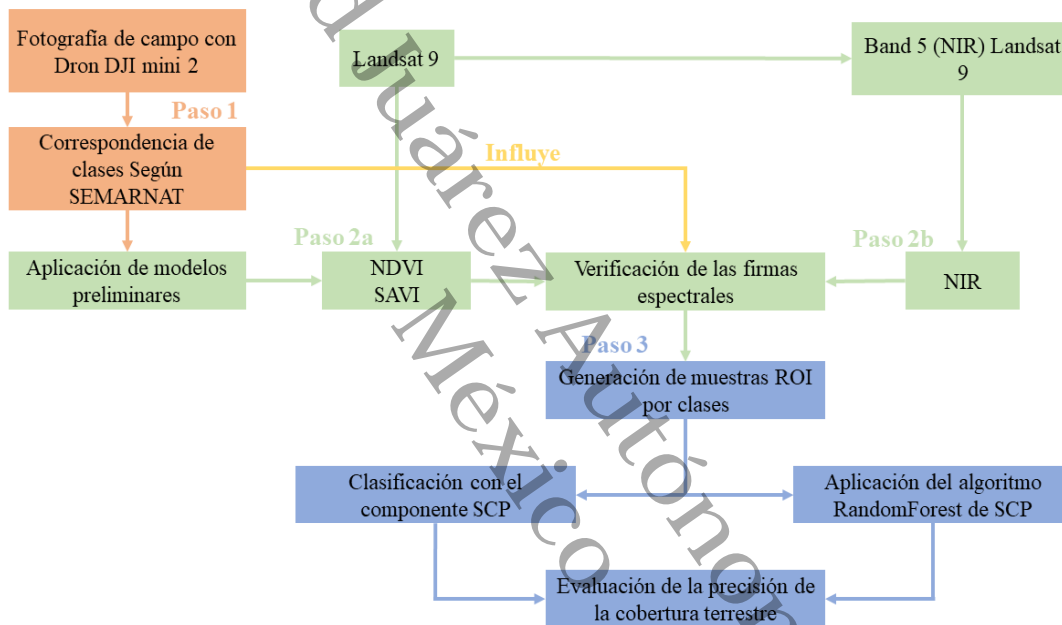
Los valores obtenidos correspondieron a coeficientes de reflectancia hemisférica direccional en el dominio del infrarrojo cercano (~0.85–0.88 μm), los cuales cuantifican la fracción de radiación solar incidente que es reflejada por las cubiertas superficiales.

El proceso de clasificación se dividió en tres pasos. Paso 1: se obtuvieron las muestras de cobertura terrestre mediante fotografías con dron, se les asignó una correspondencia a cada clase según los parámetros establecidos por la SEMARNAT. Paso 2: a) Se aplicaron modelos preliminares NDVI, SAVI, b) Infrarrojo (NIR) para verificar que las correspondencias de las clasificaciones coincidieran con los parámetros de SEMARNAT según los criterios de las firmas espectrales. Los pasos 2a y 2b se realizaron utilizando la pila de datos de Landsat 9. Paso 3 se

realizó la generación de las muestras ROI que se aplicaron a las clasificaciones del modelado de clases y el modelo de RandomForest y finalmente se aplicó la verificación de precisión Kappa en ambos modelos. La figura 18 presenta el diagrama de flujo que se utilizó en la metodología aplicada para la verificación de las muestras y la clasificación de la cobertura terrestre.

Figura 18

Diagrama de flujo para la clasificación de la cobertura terrestre

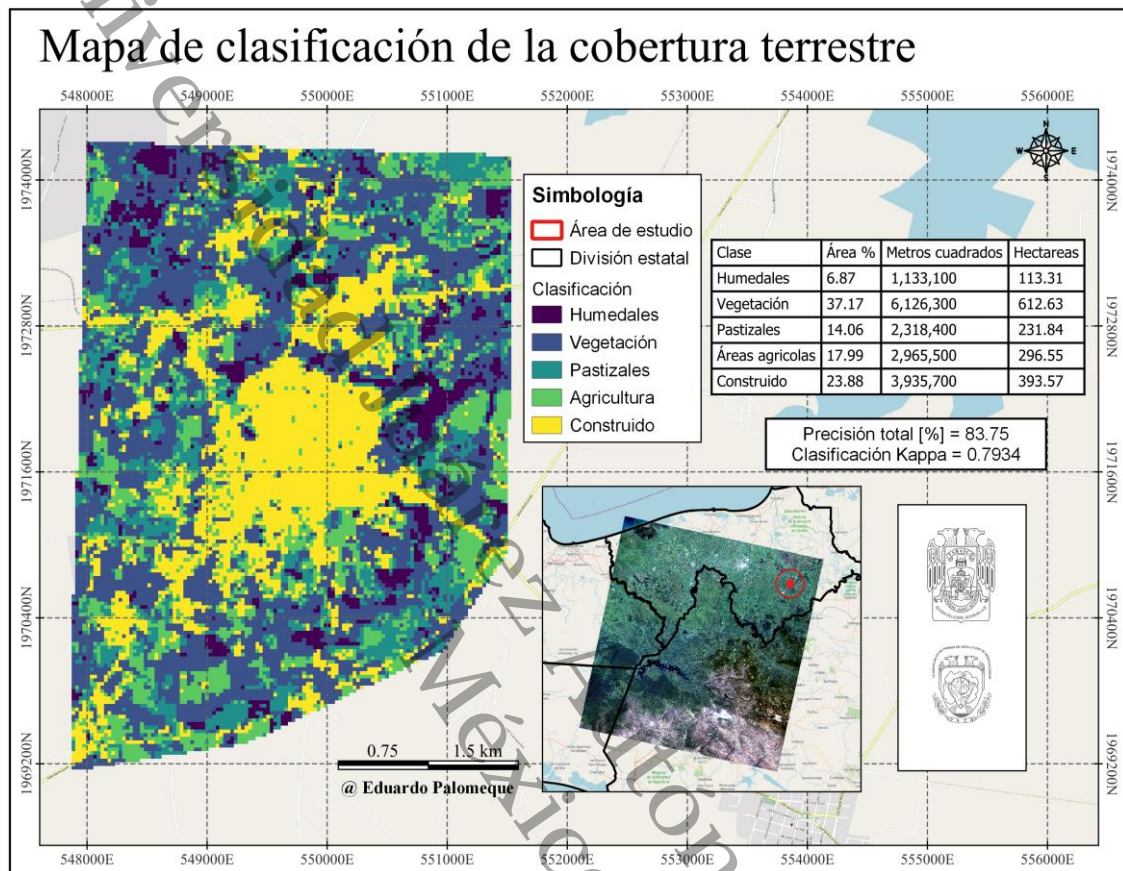


Elaboración propia

Se seleccionaron 106 Regiones de Interés (ROI) representativas para cinco clases temáticas (fig. 19): humedales (20), vegetación (20), pastizales (20), áreas agrícolas (20) y zonas construidas (26). En términos de superficie clasificada, la clase con mayor representación espacial fue la vegetación, con un 37.18 % del área total (612.63 ha), seguida de zonas construidas (23.88 %, 393.57 ha) y áreas agrícolas (17.99 %, 296.55 ha). Los pastizales representaron el 14.07 % del área (231.84 ha), mientras que los humedales ocuparon la menor proporción con un 6.88 % (113.31 ha).

Figura 19

Modelo de las clasificaciones de la cobertura terrestre



Elaboración propia con el software QGIS

Una vez generado el modelo de clasificación, se aplicó una verificación de precisión a través de la herramienta de validación del complemento de SCP, con base en las muestras de validación y el raster de la clasificación. La precisión total obtenida fue de 83.75 %, lo que indica un buen nivel de concordancia entre la clasificación y los datos de referencia. Además, el índice Kappa de Cohen fue de 0.7934, lo que reflejó un grado de acuerdo sustancial al corregir la clasificación por la probabilidad de coincidencia aleatoria.

La parametrización del modelo consideró la generación de 5000 muestras de entrenamiento (Number of training samples = 5000) y la construcción de 100 árboles de decisión (Number of trees = 100). Para asegurar la consistencia metodológica y

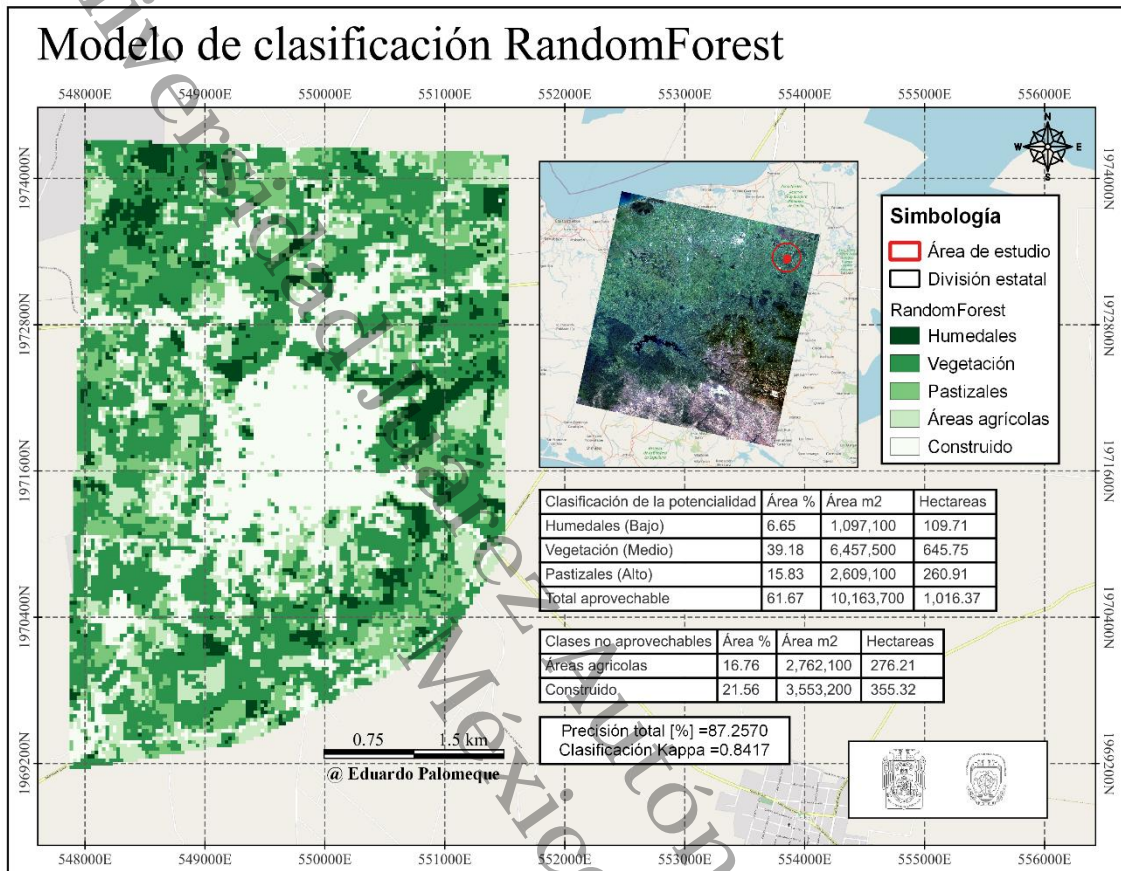
la comparabilidad entre clasificaciones, se utilizaron los mismos ROI empleados en la clasificación de cobertura terrestre para el entrenamiento del modelo RandomForest.

El resultado final se presenta en la Figura 20, donde se muestra el mapa de potencial de secuestro de carbono, clasificado en tres niveles: alto, medio y bajo, además de las clases no aprovechables (áreas agrícolas y zonas construidas).

Las superficies clasificadas como aprovechables para el secuestro de carbono; humedales, vegetación arbórea y pastizales, sumaron un 61.68 % del área total, lo que equivale a 1,016.37 hectáreas. Dentro de este grupo, la vegetación con potencial medio constituyó la mayor proporción, con un 39.19 % del área total (645.75 ha), seguida por los pastizales (potencial alto) con 260.91 ha, y los humedales (potencial bajo) con 109.71 ha. Por otro lado, las clases no aprovechables comprendieron áreas agrícolas (276.21 ha) y zonas construidas (355.32 ha), las cuales suman el 38.32 % restante de la superficie. La precisión global del modelo fue de 87.26 %, con un coeficiente de Kappa de 0.8417, lo que indica un alto grado de concordancia entre la clasificación obtenida y los datos de validación.

Figura 20

Clasificación del potencial de secuestro de carbono



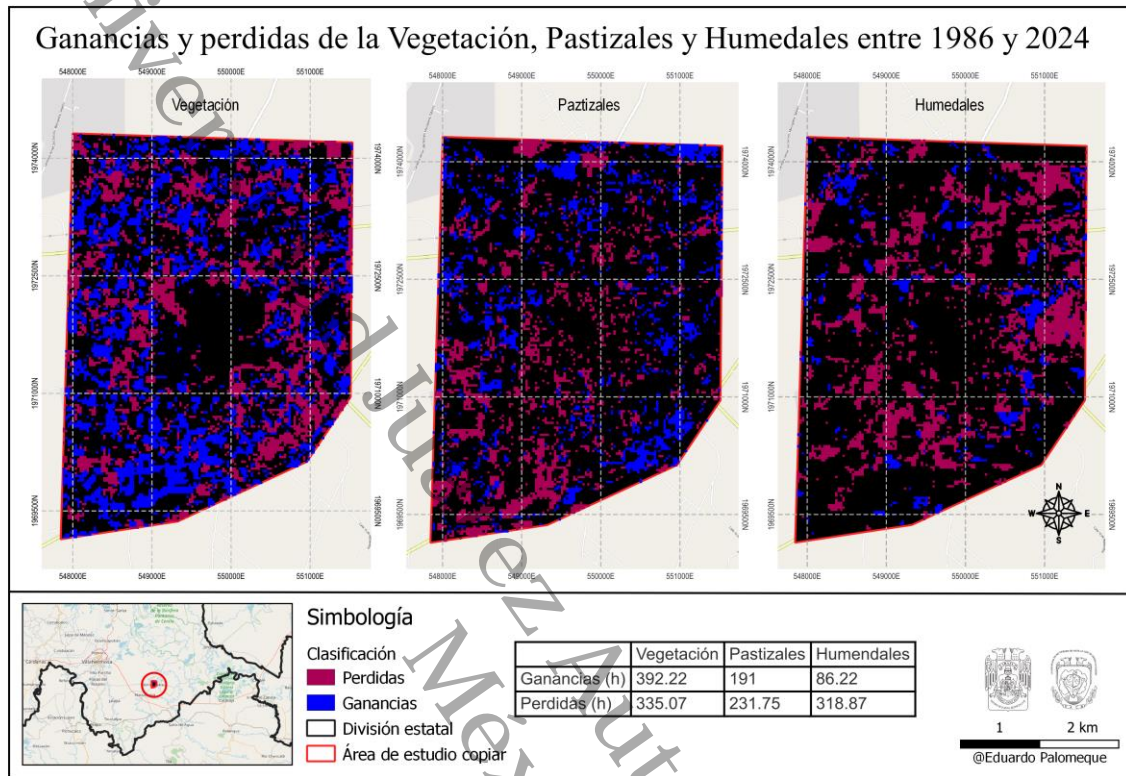
Elaboración propia con el software QGIS

8.4 Integración Del Modelo De Cambio De Uso De Suelo entre 1986 y 2024

Utilizando los mapas clasificados previamente mediante el algoritmo RandomForest y procesados en la herramienta Land Change Modeler de IDRISI Selva, se cuantificaron las ganancias y pérdidas netas de cada cobertura (fig. 21).

Figura 21

Ganancias y pérdidas de la vegetación, pastizales y humedales entre 1986 y 2024

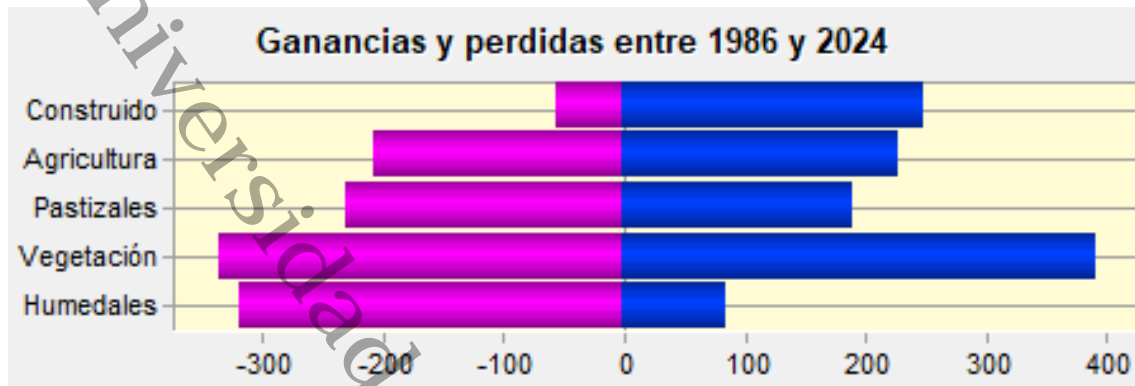


Elaboración propia con el software QGIS

Los resultados indicaron que la vegetación presenta una ganancia neta de 392 ha frente a una pérdida de 335 ha, lo cual sugiere un proceso de recuperación parcial, posiblemente vinculado a procesos de sucesión secundaria o abandono de tierras agrícolas. Por otro lado, los pastizales experimentaron una ganancia de 191 ha, aunque se registró una pérdida superior de 231.75 ha, reflejando una dinámica de sustitución hacia usos más intensivos o regresión hacia vegetación más densa (fig. 22).

Figura 22

Ganancias y pérdidas generales entre 1986 y 2024



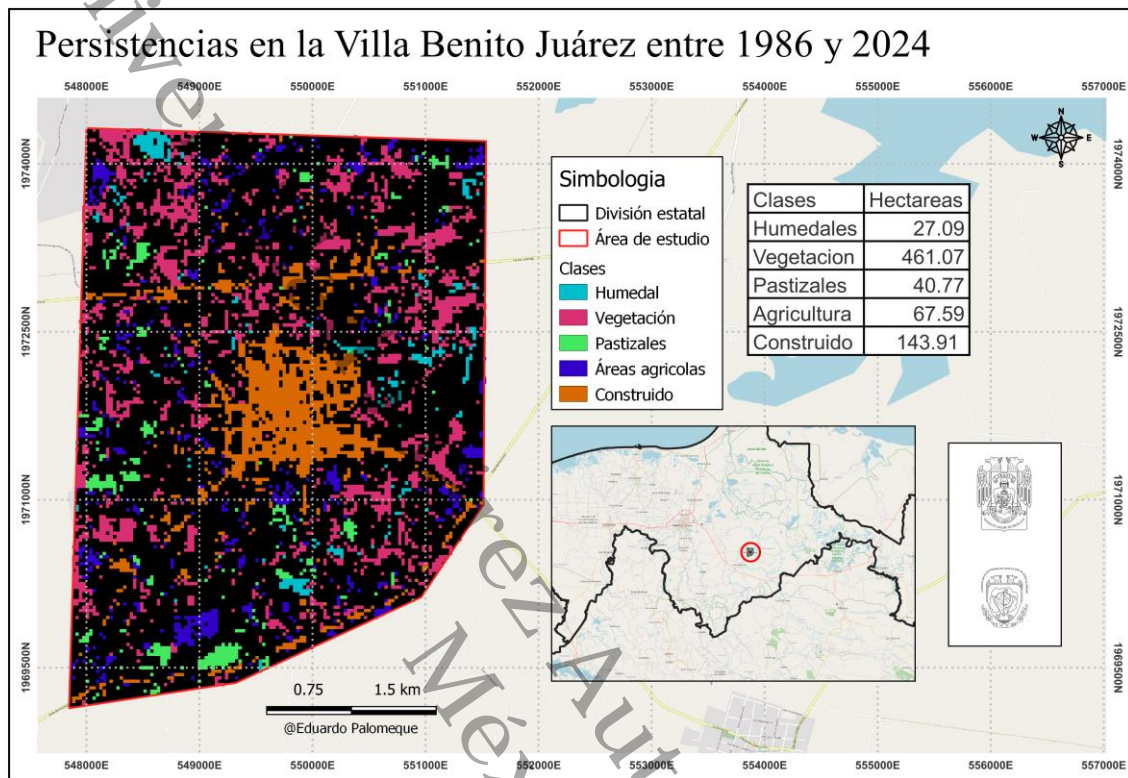
Elaboración propia con el software IDRISI

La clase de humedales fue la más críticamente afectada: aunque se observa una ganancia de 86 ha, la pérdida acumulada asciende a 318 ha, lo que representa una disminución neta sustancial de esta cobertura, debido a actividades antrópicas como la expansión urbana, el drenaje de zonas inundables y cambios de uso de suelo.

Con base en el análisis de persistencias de cobertura terrestre, se identificaron las áreas que mantuvieron su tipo de cobertura original entre 1986 y 2024 en Villa Benito Juárez, Macuspana, Tabasco (fig. 23). De acuerdo con el mapa, se registró que la clase con mayor persistencia fue la vegetación con 461 hectáreas, lo cual representa aproximadamente el 27 % del área total de estudio. Este hallazgo es relevante ya que refleja la permanencia de una cobertura con alta capacidad fotosintética, asociada a procesos de regeneración natural, conservación forestal o prácticas agroforestales estables.

Figura 23

Mapa de persistencias de la cobertura terrestre entre 1986 y 2024



Elaboración propia con el software QGIS

La cobertura construida también mostró una notable estabilidad con 143 ha, lo cual refleja un patrón de urbanización consolidado en el núcleo poblacional y zonas aledañas. Esta cifra indica que, a pesar del crecimiento urbano, ciertas áreas han mantenido usos artificiales de forma continua, lo que puede estar relacionado con infraestructura ya establecida desde 1986.

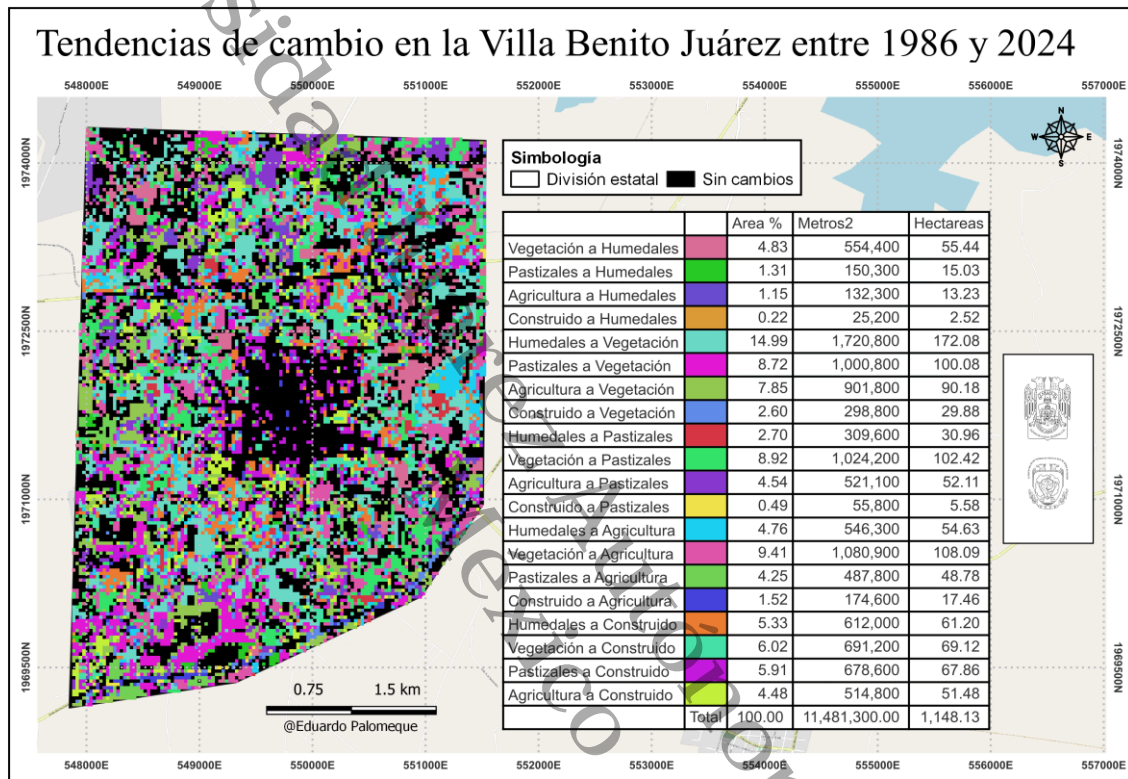
En cuanto a las áreas agrícolas, se observó una persistencia de 67 ha. Esta relativa estabilidad sugiere que ciertas parcelas han mantenido un uso agrícola intensivo durante el periodo analizado, posiblemente vinculado a prácticas tradicionales amigables.

El análisis de las tendencias de cambio de cobertura terrestre en Villa Benito Juárez entre 1986 y 2024 (fig. 24) mostró la dinámica de transición entre clases de uso del

suelo a lo largo de 38 años, proporcionando información clave sobre los procesos de transformación ecológica y antrópica en el territorio.

Figura 24

Tendencias de cambio en la Villa Benito Juárez entre 1986 y 2024



Elaboración propia con el software QGIs

Durante el periodo evaluado, se identificaron múltiples transiciones significativas entre tipos de cobertura, siendo las más representativas aquellas que implicaron transformaciones entre vegetación, agricultura y áreas construidas, lo que evidencia una fuerte presión sobre los ecosistemas naturales.

Las transiciones hacia la vegetación fueron predominantes, destacando:

- Humedales a vegetación con 172 ha (14.99 % del total de cambios), lo cual podría estar vinculado a procesos de revegetación en zonas previamente inundables, probablemente debido a la desecación o alteración hidrológica del terreno.

- Pastizales a vegetación con 100 ha (8.72 %), indicando posiblemente una regeneración secundaria en zonas de pastoreo abandonadas.
- Agricultura a vegetación (90 ha; 7.85 %) refuerza esta tendencia de recuperación ecológica, aunque puede implicar vegetación secundaria o en etapas tempranas de sucesión.

Estos procesos de “renaturalización” pueden representar oportunidades importantes para estrategias de captura de carbono y conservación, si se logra mantener su continuidad y protección.

En contraste, también se observaron transiciones regresivas hacia usos con menor valor ecológico o mayor impacto antrópico:

- De vegetación a agricultura (108.09 ha; 9.41 %) y de vegetación a construido (69.12 ha; 6.02 %) reflejan los procesos de deforestación y urbanización, que constituyen amenazas directas a la captura de carbono y la biodiversidad.
- Asimismo, los cambios de pastizales a construido (67.86 ha; 5.91 %) y agricultura a construido (51.48 ha; 4.48 %) indican la consolidación de un proceso de expansión urbana, posiblemente asociado al crecimiento de la mancha urbana de Villa Benito Juárez.

Otro grupo importante de transiciones se dio entre clases naturales, como:

- De vegetación a pastizales (102.42 ha; 8.92 %) y humedales a pastizales (30.96 ha; 2.70 %), lo que puede interpretarse como un indicio de degradación progresiva del ecosistema original.
- Los cambios de humedales a construido (61.20 ha; 5.33 %) constituyen una transformación ambiental crítica, ya que los humedales son ecosistemas estratégicos para la regulación hídrica, el hábitat faunístico y el secuestro natural de carbono.

Finalmente, aunque de menor magnitud individual, las transiciones de agricultura a pastizales (52 ha), pastizales a agricultura (48 ha) y otros cambios recíprocos muestran un grado elevado de periodicidad en el uso del suelo, lo que puede estar relacionado con rotación de cultivos, abandono temporal o prácticas extensivas sin planificación a largo plazo.

A partir de la matriz de transición de Markov proyectada al año 2054, se obtuvieron los siguientes resultados, mostrados en la Tabla 21, sobre la dinámica esperada de la cobertura terrestre en Villa Benito Juárez:

Tabla 21

Probabilidad de cambio

Origen → Destino	Humedales	Vegetación	Pastizales	Agrícola	Construido
Humedales	0.0796	0.5451	0.0683	0.1496	0.1574
Vegetación	0.1094	0.4063	0.1942	0.1965	0.0935
Pastizales	0.0526	0.3802	0.1531	0.1803	0.2339
Agrícola	0.0434	0.3249	0.2030	0.2660	0.1626
Construido	0.0077	0.1333	0.1066	0.0785	0.7639

Nota: Elaboración propia

Las áreas construidas mostraron la mayor persistencia, con un 76.39 % de la superficie actualmente edificada que tenderá a mantenerse como tal hasta 2054, mientras que los humedales y la vegetación presentaron una baja persistencia (7.96 % y 40.63 %, respectivamente), lo que implica que gran parte de estas coberturas se transformará en otras categorías. Entre las principales tendencias de conversión, se proyecta que más de la mitad de los humedales (54.51 %) pasarán a vegetación, indicando procesos de desecación o sustitución por cobertura arbórea y secundaria; además, una porción significativa de humedales (15.74 %) y pastizales (23.39 %) se anticipa que se convertirán en áreas construidas, reflejando la expansión urbana sobre ecosistemas vulnerables.

La vegetación natural, a su vez, tenderá a transformarse en pastizales (19.42 %) y en uso agrícola (19.65 %), lo que sugiere presiones de ganadería y agricultura extensiva sobre bosques y selvas. En cuanto a la movilidad entre clases productivas, tanto el uso agrícola como los pastizales mostraron tasas moderadas de regresión a vegetación (32.49 % y 38.02 %, respectivamente), lo que podría interpretarse como abandonos de parcelas que regresan a una fase de sucesión secundaria; sin embargo, esas mismas categorías mantuvieron salidas a usos

productivos, ya que los agrícolas conservan un 26.60 % de persistencia, mientras que los pastizales mantienen un 15.31 %.

IX. DISCUSIÓN

9.1 Datos Históricos Del Valor Y Volumen De La Producción Maderable En Tabasco

Los hallazgos sugieren que los cambios abruptos en el aprovechamiento forestal, especialmente en bosques tropicales y latifoliadas del estado de Tabasco, inducen una fuerte pérdida de cobertura vegetal, comprometiendo la capacidad de los ecosistemas para funcionar como sumideros de carbono. Esto refuerza la necesidad de adoptar estrategias de manejo sostenible que reconcilien la producción forestal con la conservación y restauración de la cobertura boscosa (Gerez-Fernández & Pineda-López, 2011).

De forma complementaria, experiencias como la del municipio El Castillo, en Nicaragua, muestran cómo el uso actual del suelo (centrado en ganadería y cultivos) contrasta con su alta vocación forestal, lo que ha generado procesos de degradación. Ante ello, la zonificación basada en el potencial ecológico y productivo del territorio ha permitido proponer estrategias de conservación, restauración y transición hacia sistemas agroforestales sostenibles. Estas medidas, integradas a marcos legales y con apoyo interinstitucional, refuerzan la importancia de ordenar el territorio para asegurar el aprovechamiento sustentable de los recursos naturales (Mairena Arias & Rivas López, 2021).

En términos generales, el análisis del valor económico revela una estructura de mercado en constante transformación, con una creciente importancia de las comunes tropicales en detrimento de las preciosas. Esta tendencia, sumada a los picos inusuales en algunos años, sugiere que el sector forestal tabasqueño ha estado expuesto a dinámicas comerciales volátiles y, probablemente, a decisiones políticas que incentivaron o restringieron determinados tipos de aprovechamiento forestal, como sugieren Aguirre Pérez *et al.* (2020). La disparidad entre el valor y el volumen también advierte sobre la necesidad de realizar un análisis conjunto que permita comprender con mayor profundidad la eficiencia económica y la

sostenibilidad del modelo de producción maderable en la entidad hacia la eficiencia económica, diversificación de especies y calidad de los productos maderables. (Landívar Velásquez, 2017). La integración de estas recomendaciones con metodologías específicas de captura de carbono no solo promueve un aprovechamiento responsable y sostenible de los recursos forestales, sino que también contribuye a mejorar la calidad de vida de las comunidades rurales al generar esquemas de incentivos y capacitación continua.

9.2 Datos Históricos Del Tipo De Vegetación Y Manejo De Suelo

Al correlacionar datos del mapa de uso de suelo y vegetación de Macuspana 2010, con la evolución del valor económico de la producción maderable, se observa que los picos de producción coinciden con momentos donde probablemente se intensificaron las extracciones en zonas remanentes de selva y otras latifoliadas. La baja extensión actual de estos ecosistemas sugiere que los bosques han sido severamente reducidos, comprometiendo tanto su capacidad de regeneración como su función como sumideros naturales de carbono (Ramírez, 2025). Asimismo, la presencia dominante de pastizales cultivados indica una vocación ganadera intensiva que ejerce presión directa sobre los ecosistemas forestales (Ruiz, 2024). Por otro lado, aunque los tulares y popales cumplen funciones ecológicas valiosas, no presentan el mismo potencial de almacenamiento de carbono que los bosques de selva madura o mesófila (Vázquez-González., *et al*, 2023). Finalmente, los cuerpos de agua, si bien no secuestran carbono de forma directa, resultan esenciales para la regulación hídrica, el microclima y la biodiversidad acuática, lo que incide indirectamente en los ciclos de carbono, de acuerdo con lo que discuten Maldonado & Moreno-Sánchez (2023).

9.2.1 Bloques temáticos de las entrevistas

El análisis de los antecedentes de uso del suelo revela que, aunque las prácticas tradicionales de manejo son reconocidas, no determinan directamente la selección de cultivos en la actualidad de acuerdo con Jiménez & Jara (2024). Esto refleja un cambio en la dinámica agrícola local, donde factores externos como el mercado o

la rentabilidad pesan más que las tradiciones, aunque coexisten con ellas (Landeró, 2021). La presencia de una segunda generación como puente entre saberes ancestrales y nuevas estrategias refuerza la idea de un proceso de transición agroecológica (Moreno, 2024), mientras que la persistencia de ciertos cultivos tradicionales refleja una especialización adaptativa basada en la subsistencia y la adaptabilidad local (Origel, 2020).

En cuanto a la fertilidad y erosión del suelo, los resultados muestran uniformidad entre generaciones en el número de prácticas aplicadas. Ello confirma que las técnicas tradicionales han sido transmitidas y adaptadas eficientemente (Leguizamón, 2024), consolidando un capital social y ecológico estable (López, 2022). Este patrón coincide con experiencias latinoamericanas donde los saberes locales garantizan una gestión resiliente del suelo, como lo describe Nosedá (2018). Desde la perspectiva del secuestro de carbono, la continuidad de prácticas como la rotación de cultivos o el uso de cobertura orgánica resulta fundamental para proyectos de largo plazo (Caiza López, 2024; Ranero & Covaleda, 2018). Sin embargo, se requiere evaluar no solo cuántas prácticas se aplican, sino su eficacia frente a los desafíos climáticos actuales.

La elección de especies arbóreas refleja un consenso intergeneracional en torno a criterios de adaptación y sostenibilidad, destacando la importancia de los árboles nativos para la restauración y el secuestro de carbono (Chavarría, 2024). Este patrón coincide con estudios que señalan la combinación de parámetros ecológicos y factores culturales o económicos en la selección de especies (Morgado *et al.*, 2020). Si bien las diferencias estadísticas son mínimas, se recomienda complementar estos enfoques con métodos cualitativos que permitan captar narrativas y valores comunitarios asociados (Rebollo & Ávalos, 2022). Así, cualquier estrategia de restauración o captura de carbono debería partir de este capital cultural compartido y, al mismo tiempo, incorporar innovaciones agroforestales que respondan al cambio climático.

Finalmente, la estabilidad en los conocimientos heredados entre generaciones indica la persistencia de un núcleo de saberes tradicionales, a pesar de las presiones externas. Esto coincide con hallazgos globales sobre la resiliencia del

conocimiento ecológico local, donde se forman sistemas híbridos de manejo que combinan técnicas ancestrales y modernas (Gómez-Baggethun et al., 2013). Experiencias comparables en la Amazonia brasileña evidencian que, aunque parte del conocimiento etnobotánico se erosiona entre jóvenes, ciertos segmentos mantienen prácticas tradicionales a través de mecanismos de transmisión diversos (Mota et al., 2023). En Villa Benito Juárez, la ausencia de variaciones marcadas sugiere que las redes comunitarias facilitan la continuidad del saber local, lo que constituye un fundamento clave para diseñar estrategias de conservación cultural y de captura de carbono basadas en la transmisión intergeneracional.

9.3 Análisis de los índices espectrales

La aplicación de índices de vegetación como NDVI y SAVI, junto con el uso de dos escenas Landsat separadas por casi cuatro décadas, permitió identificar dinámicas claras en la cobertura vegetal y la expansión urbana en Villa Benito Juárez. En particular, el incremento de áreas con valores altos de NDVI (> 0.33) sugiere fragmentos con cobertura vegetal densa y buen vigor en 2024, mientras que las zonas con valores bajos se localizan en áreas urbanizadas y suelos expuestos. Estas observaciones encuentran respaldo en análisis previos realizados en Tabasco, donde Palomeque *et al.* (2021) documentaron una pérdida significativa de vegetación arbórea y humedales entre 2000 y 2017 en Nacajuca, asociada a la expansión urbana y ganadera. Similarmente, estudios sobre Los Tuxtlas evidenciaron una deforestación anual cercana al 0.8%, principalmente en franjas ribereñas, poniendo de relieve la necesidad de proteger zonas remanentes de vegetación (Von Thaden, *et al.*, 2020).

El uso combinado de NDVI y SAVI refuerza la robustez de la clasificación. Según Huete (1988), el SAVI corrige la influencia del suelo en áreas de escasa vegetación y mejora la precisión en entornos con cobertura variable. En concordancia, los resultados muestran que el SAVI fue indispensable para discriminar suelo desnudo de vegetación saludable, especialmente en los márgenes urbanos, aun cuando el NDVI por sí solo podría sobreestimar la vegetación en mosaicos con suelos expuestos.

En términos metodológicos, la integración de sensores Landsat 5 TM y 9 TIRS sigue esquemas de monitoreo temporal que vinculan mejoras en la calidad radiométrica con la capacidad de detección de cambios sutiles. Puliti *et al.* (2020) demostraron que, aun con diferencias entre misiones Landsat y Sentinel, la estimación de biomasa aérea puede mejorar hasta 3 veces utilizando sensores modernos y cobertura temporal extensa. Estos hallazgos muestran una mejor discriminación espectral entre coberturas vegetales en la imagen de 2024, que son coherentes con estos avances técnicos.

Por otra parte, comparando con otros sitios de Tabasco, Ramos *et al.* (2019) observaron que entre 2000 y 2010 los humedales aumentaron parcialmente debido a regeneración de vegetación arbórea en Huimanguillo, aunque posteriormente regresaron a pérdidas significativas. Esto sugiere que los patrones observados en Villa Benito Juárez pueden reflejar tanto tendencias regionales como atisbos de recuperación local, aunque se requiere monitoreo para confirmar si estas áreas de vegetación densificada se mantienen estables.

Al comparar visualmente las escenas satelitales de 1986 (Landsat TM 5) y 2024 (Landsat TIRS 9), se aprecian transformaciones significativas en el territorio de Villa Benito Juárez, particularmente en cuanto al crecimiento demográfico. En la imagen de 2024 se observa un aumento considerable en la densidad y extensión del área construida respecto a la escena de 1986, donde el núcleo urbano era más reducido y rodeado en mayor medida por superficies agrícolas y vegetación secundaria. Este cambio refleja una clara expansión del asentamiento humano, con probable impacto sobre la cobertura vegetal original. Asimismo, se distinguen variaciones en los patrones de uso de suelo, con una posible disminución de zonas de vegetación abundante que antes ocupaban espacios actualmente transformados.

9.4 Clasificación de la cobertura terrestre

La clasificación supervisada mediante RandomForest, con una precisión global del 87.3 % y un coeficiente Kappa de 0.84, confirma la robustez del enfoque para delimitar áreas con distinto potencial de secuestro de carbono. Este desempeño supera ligeramente los 82 % de precisión y Kappa = 0.82 obtenidos en un estudio

similar que integró variables multisensoriales y aleatorias mediante RandomForest regression para estimar stocks de carbono en bosques densos (nRMSE = 17 %, nMAE = 14 %) (Suárez-Fernández, *et al*, 2025), y se ubica en el rango alto reportado para teledetección de cobertura terrestre en áreas tropicales, donde precisiones de 85–90 % con Kappa de 0.73–0.8 son comunes al combinar Landsat y Sentinel-2 (Chazdon, *et al*, 2016).

La proporción de 61.7 % del territorio clasificado como cobertura natural con potencial de secuestro (humedales, vegetación arbórea y pastizales) coincide con hallazgos en la Amazonia tropical, donde la regeneración natural de bosques secundarios (28 % de la superficie en 2008) puede almacenar hasta 8.48 Pg C en cuatro décadas, equivalente a 31.09 Pg CO₂ secuestrados en la región (~28 % de área con bosque secundario) (Chazdon, *et al*, 2016). Aunque la escala difiere, ambos estudios resaltan que los remanentes vegetales y la regeneración ofrecen oportunidades sustanciales de captura de carbono a mediano y largo plazo.

En México, la delimitación de áreas elegibles para créditos de carbono en un área protegida del norte obtuvo un 0.95 de precisión global y Kappa = 0.735 usando k-NN sobre Landsat 5 y 8, estimando 68.807 Mg C de potencial de captura en 2,136 ha de bosque (Orta-Salazar, *et al*, 2021). El enfoque RandomForest que se aplicó en el estudio no solo mejora la precisión (87.3 % vs. 95 % global, pero Kappa superior 0.84 vs. 0.735), sino que, al integrar datos de dron para entrenamiento, ofrece un mapeo más detallado de zonas con potencial de secuestro de carbono alto (pastizales), medio (vegetación arbórea) y bajo (humedales), facilitando la priorización espacial de proyectos de restauración y créditos de carbono.

Metodologías como la de Orta-Salazar *et al*. (2021) utilizan polígonos de Thiessen para asignar densidades de carbono en función de la vegetación vecina; el modelo supera esta aproximación al generar directamente una clasificación temática que identifica áreas aprovechables (1 016 ha) y no aprovechables (615 ha), con precisión cuantitativa de superficie (61.7 % vs. 38.3 %).

9.5 Tendencias de Cambio entre 1986 y 2024

Los patrones de cambio observados en Villa Benito Juárez reflejan dinámicas semejantes a las documentadas en estudios de deforestación y regeneración en Latinoamérica. Por ejemplo, Lambin, *et al* (2023) estimaron una tasa neta de cambio forestal de -0.33% anual en bosques húmedos de América Latina, debido a un balance entre deforestación y regeneración secundaria. La elevada persistencia de infraestructura corresponde a los hallazgos de Carr, *et al* (2005), quienes identificaron la expansión urbana y la agricultura comercial como los mayores impulsores de la conversión de coberturas naturales.

Asimismo, las transiciones proyectadas por el modelo de Markov (como la conversión de más del 54 % de humedales a vegetación y la transferencia sustancial de vegetación a usos agrícolas (19.7 %) y construidos (6.0 %)) coinciden con la afirmación de que la expansión agrícola y urbana es responsable del 73 % de la deforestación tropical (Hosonuma, *et al*, 2012). Esto pone de manifiesto que, aunque existe regeneración espontánea en zonas abandonadas, la presión antrópica continúa dominando el paisaje, especialmente en ecosistemas vulnerables como humedales y selvas secundarias.

En conjunto, estos resultados subrayan la urgencia de integrar estrategias de conservación activa, priorizando la restauración de humedales y el refuerzo de corredores de vegetación persistente, con políticas de ordenamiento territorial que controlen la expansión urbana y agrícola. De este modo, se puede maximizar el secuestro de carbono a largo plazo y mantener los servicios ecosistémicos críticos que sustentan la resiliencia del territorio.

X. CONCLUSIÓN Y RECOMENDACIONES

10.1 Conclusiones

La evidencia respalda la hipótesis planteada: el manejo sostenible de suelos y vegetación en Villa Benito Juárez potenciará significativamente el secuestro de carbono, mitigará el cambio climático local y aumentará la resiliencia ecosistémica. Los resultados muestran que un elevado porcentaje del territorio (61.7%) mantiene coberturas naturales (humedales, bosques secundarios, pastizales) con alto

potencial de captura de carbono. Esto indica que impulsar la regeneración forestal y proteger la vegetación remanente reforzaría de manera drástica la capacidad de sumidero de la región.

Simultáneamente, el análisis temporal revela tendencias preocupantes de pérdida vegetacional ante la expansión urbana y agrícola. La comparación 1986–2024 muestra una notable densificación de áreas construidas a costa de vegetación secundaria. Las proyecciones del modelo de Markov estiman, por ejemplo, que más del 54 % de los humedales podría convertirse en vegetación arbórea o usos antrópicos en las próximas décadas, y cerca del 20 % de la vegetación actual pasaría a uso agrícola. Estas dinámicas confirman que, sin prácticas sostenibles, la presión humana seguirá dominando el paisaje. Sin embargo, los indicadores de vegetación (NDVI/SAVI) observan fragmentos de vegetación con vigor creciente en 2024, lo que sugiere que las áreas en regeneración pueden consolidarse si se protege su estado actual. Esto refuerza la idea de que, junto con políticas que eviten la degradación continua, la restauración espontánea y asistida resulta una estrategia de bajo costo y alto impacto para la captura de CO₂.

En conjunto, los hallazgos de este estudio confirman que adoptar prácticas sostenibles de manejo del suelo y la vegetación incrementará el secuestro de carbono y fortalecerá la resiliencia ecosistémica. La proporción de cobertura natural remanente, sumada al potencial de regeneración observado, crea una oportunidad para mitigar emisiones a través de la conservación. Se debe subrayar que la literatura recomienda acompañar estas acciones con medidas de respaldo político y legal. Por ejemplo, implementar mecanismos de protección y expansión de bosques secundarios ha sido identificado como clave para alcanzar objetivos de mitigación basados en la naturaleza.

De este modo, se reafirma que la implementación de prácticas sostenibles (como la protección de remanentes de vegetación, la restauración ecológica de humedales y la promoción de sistemas agroforestales) es fundamental para maximizar la capacidad de secuestro de carbono. Estas acciones no solo contribuirían a mitigar los efectos del cambio climático local, sino que también fortalecerían la resiliencia del ecosistema ante presiones antropogénicas y climáticas, garantizando la

provisión de servicios ecosistémicos vitales para la comunidad. Por tanto, Villa Benito Juárez posee un potencial significativo para constituirse en un modelo de intervención territorial con enfoque climático, siempre que se logre una articulación efectiva entre las políticas públicas, la gestión comunitaria del territorio y la adopción de tecnologías de monitoreo como las utilizadas en este estudio.

10.2 Recomendaciones

Los resultados se integran con evidencia científica y enfoques de gestión adaptativa, y están encaminados a maximizar el potencial de secuestro de carbono en Villa Benito Juárez. Por lo tanto, su implementación podría representar un aporte significativo para la mitigación del cambio climático local con la conservación de la biodiversidad y la mejora de servicios ecosistémicos críticos para la población.

1. Conservar y restaurar coberturas vegetales naturales: Proteger humedales y bosques secundarios mediante reforestación, rehidratación de suelos y conectividad de parches. Estudios muestran que aprovechar estos remanentes y áreas regeneradas incrementa enormemente el sumidero de carbono.
2. Regularización y protección legal: Incluir estas áreas en planes de ordenamiento y designarlas como reservas o corredores verdes. La implementación de mecanismos legales de protección para bosques secundarios es clave para potenciar la captura de carbono.
3. Prácticas agrícolas sostenibles: Promover agroforestería, manejo integrado de cultivos y abonos orgánicos en las tierras de cultivo y pastoreo. Estas prácticas mejoran la estructura del suelo y aumentan el carbono orgánico edáfico, reduciendo la erosión y la quema de residuos.
4. Incentivos económicos: Establecer esquemas de pagos por servicios ambientales o créditos de carbono locales para recompensar a productores que conserven o restauren vegetación nativa. Esto alinearía beneficios económicos con la conservación y generaría financiamiento para proyectos sostenibles.

5. Monitoreo continuo: Mantener el seguimiento mediante teledetección (satélites, drones) de la cobertura vegetal y del uso del suelo. Esto permitirá evaluar la efectividad de las medidas adoptadas y ajustar las estrategias de conservación en tiempo real.
6. Educación y participación comunitaria: Capacitar a agricultores y habitantes en la importancia del secuestro de carbono y en prácticas sostenibles. Fomentar la participación comunitaria en proyectos de restauración aumenta la adopción de medidas ecológicas y la resiliencia social.

XI. REFERENCIAS CITADAS

- Agraz-Hernández, C. M., Chan-Keb, C. A., Chávez-Barrera, J., Osti-Sáenz, J., Expósito-Díaz, G., Alonso-Campos, V. A., ... & Rivera-Arriaga, E. (2020). Reserva de carbono en un ecosistema de manglar al norte de México: cambios ambientales durante 35 años. *Revista mexicana de biodiversidad*, 91.
- Aguilera, L. E. C., Bonilla, H. R., López, C. O. N., & Pérez, R. A. L. (2017). Los arrecifes coralinos de México: servicios ambientales y secuestro de carbono. *Elementos para políticas públicas*, 1(1), 53-62.
- Aguirre Pérez, L., Jiménez Soto, D., & Solano Ruiz, J. (2020). Efecto comercial de los tratados de libre comercio de Canadá y Chile con Costa Rica mediante indicadores comerciales: el caso del sector agrícola e industrial costarricense.
- Andrés Anaya, P. D. (2024). Multplatform remote sensing in the radiative characterization of the terrain: Land Surface Temperature and Albedo.
- Ávila-Pérez, I. D., Ortiz-Malavassi, E., Soto-Montoya, C., Vargas-Solano, Y., Aguilar-Arias, H., & Miller-Granados, C. (2020). Evaluación de cuatro algoritmos de clasificación de imágenes satelitales Landsat-8 y Sentinel-2 para la identificación de cobertura boscosa en paisajes altamente fragmentados en Costa Rica. *Revista de teledetección*, (57), 37-49.
- Balat, H., y Öz, C. (2007). Aspectos técnicos y económicos de la captura y almacenamiento de carbono: una revisión. *Energy Exploration & Exploitation*, 25, 357-392. <https://doi.org/10.1260/014459807783528883>
- Banacloche, S., Lechón, Y., & Rodríguez-Martínez, A. (2022). Penetración de la captura de carbono en el horizonte 2050 de México: una evaluación de la sostenibilidad de la política mexicana de CCS. *Revista Internacional de Control de Gases de Efecto Invernadero*. <https://doi.org/10.1016/j.ijggc.2022.103603>
- Benevides, P., Silva, N., Costa, H., Moreira, FD, Moraes, D., Castelli, M. y Caetano, M. (septiembre de 2021). Mapeo de la cobertura terrestre a escala nacional con Sentinel-2 y LUCAS: un

- estudio de caso en Portugal. En Teledetección para la Agricultura, los Ecosistemas y la Hidrología XXIII (Vol. 11856, págs. 14-22). SPIE.
- Biggs, S., Herzog, H., Reilly, JM, y Jacoby, HD (2000). MODELIZACIÓN ECONÓMICA DE LA CAPTURA Y SECUESTRO DE CO₂.
- Bravo Collado, P. (2024). Desarrollo de algoritmos de aprendizaje de máquinas para la clasificación automática de coberturas de suelo, con el uso de imágenes satelitales. Disponible en <https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/199937>
- Bravo Morales, N. F. (2017). Teledetección espacial: LANDSAT, SENTINEL-2, ASTER L1T y MODIS: Teoría. GEOMÁTICA AMBIENTAL S.R.L.; Universidad Nacional Agraria de la Selva.
- Caiza López, Danny Fabricio. (2024). Evaluación del contenido de carbono y descomposición de la materia orgánica en suelos de agroecosistemas de la comunidad Cacha-Chimborazo y la parroquia la Merced-Pichincha. Escuela Superior Politécnica de Chimborazo. Riobamba. <https://dspace.espoch.edu.ec/handle/123456789/23437>
- Carr, DL, Suter, L., y Barbieri, A. (2005). Dinámica poblacional y deforestación tropical: estado del debate y desafíos conceptuales. *Población y medio ambiente*, 27, 89-113.
- Casanova-Lugo, F., Petit-Aldana, J. y Solorio-Sánchez, J. (2011). Los sistemas agroforestales como alternativa a la captura de carbono en el trópico mexicano. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales Y Del Ambiente*, 17, 133-143.
- Casanova-Lugo, F., Petit-Aldana, J., & Solorio-Sánchez, J. (2011). Los sistemas agroforestales como alternativa a la captura de carbono en el trópico mexicano. *Revista Chapingo. Serie ciencias forestales y del ambiente*, 17(1), 133-143.
- Castellanos, G., Moreno, M., & FD, M (2016). OBTENCIÓN DE IMÁGENES ÍNDICE DE VEGETACIÓN SAVI A PARTIR DE IMÁGENES MILIRREFLECTANCIA TOA.
- Chavarría, Ó. C. (2024). De la siembra a la restauración: protocolo para la plantación de árboles nativos y la mejora de los servicios ecosistémicos en el contexto de la adaptación climática. *Biocenosis*, 35(2), 89-111.
- Chazdon, RL, Broadbent, EN, Rozendaal, DM, Bongers, F., Zambrano, AMA, Aide, TM, ... y Poorter, L. (2016). Potencial de secuestro de carbono en la regeneración de bosques secundarios en los trópicos latinoamericanos. *Science Advances*, 2 (5), e1501639.
- Chiarito, E., Zimmermann, E., & Méndez Zacarías, S. (2018). Metodologías para la estimación del coeficiente de escorrentía en áreas urbanizadas mediante teledetección. *Cuadernos Del CURIHAM*, 24, 25–36. <https://doi.org/10.35305/curiham.v24i0.126>
- Chidiak, M., Chudnovsky, D., Greco, C., & Moreyra, A. (2003). Captura de carbono y desarrollo forestal sustentable en la Patagonia Argentina: Sinergias y Desafíos.
- Clemente-Arenas, E. R. (2021). Captura de carbono en sistemas agroforestales en el Perú. *Revista Forestal del Perú*, 36(2), 180-196.
- Clemente-Arenas, E. R. (2021). Captura de carbono en sistemas agroforestales en el Perú. *Revista Forestal del Perú*, 36(2), 180-196.

- Congedo, L., (2021). Plugin de clasificación semiautomática: Una herramienta de Python para la descarga y el procesamiento de imágenes de teledetección en QGIS. *Journal of Open Source Software*, 6(64), 3172, <https://doi.org/10.21105/joss.03172>
- Costanza, R., De Groot, R., Sutton, P., Van der Ploeg, S., Anderson, S.J., Kubiszewski, I., ... & Turner, R.K. (2014). Cambios en el valor global de los servicios ecosistémicos. *Cambio ambiental global*, 26, 152-158.
- David Jesús Palma López & Arnulfo Triano Sánchez. (2007). Plan de uso sustentable de los suelos de Tabasco Vol. II. ISBN: 968-839-362-2
- De Alba-Rosano, C. F., Ceccon, E., Romero-Calcerrada, R., & Rosete-Vergés, F. (2020). Revisión sistemática de cuarenta años de análisis de cambio de uso del suelo en México mediante sistemas de información geográfica. *Revista De Geografía Espacios*, 10(20), 139-162.
- Díaz, J. A. B. O. (2008). Cómo entender el manejo forestal, la captura de carbono y el pago de servicios ambientales. *Ciencias*, (090).
- Elavarasi, P., Doruk, K., Bose, K.S., Ramamoorthy, P., Manojkumar y Venu, N. (2024). Técnicas agrícolas modernas para el secuestro de carbono con el fin de mitigar el cambio climático. *Revista internacional de medio ambiente y cambio climático*. <https://doi.org/10.9734/ijecc/2024/v14i34083>
- Etcheagaray, D. M., & Flores, A. S. (2023). Las áreas protegidas ¿Estrategia clave para la mitigación y la adaptación al cambio climático? Posición. *Revista del Instituto de Investigaciones Geográficas*, (9), 1-15.
- FAO. 2022. The State of Food and Agriculture 2022. Leveraging automation in agriculture for transforming agrifood systems. Rome, FAO. <https://doi.org/10.4060/cb9479en>
- Fazekas, A., Bataille, C., & Vogt-Schilb, A. (2022). Prosperidad libre de carbono Cómo los gobiernos pueden habilitar 15 transformaciones esenciales.
- Fernández Losada, M. Y. (2017). Revisión de métodos para la estimación de captura de carbono almacenadas en bosques naturales [Proyecto de especialización, Universidad Militar Nueva Granada] <http://hdl.handle.net/10654/16394>
- Fernández Pérez, C. J., Cely Reyes, G. E., & Serrano, P. A. (2019). Cuantificación de la captura de carbono y análisis de las propiedades del suelo en coberturas naturales y una plantación de pino en el páramo de Rabanal, Colombia. *Cuadernos de Geografía: Revista Colombiana de Geografía*, 28(1), 121-133.
- Figuroa Uribe, G. G., & Rivera Moreno, M. A. (2024). Análisis Multitemporal Del Cambio De Cobertura Vegetal En El Recinto Sarapullo Cantón Mejía. *Geoespacial*, 21(1), 19-35.
- Flores-Garnica, J., Wong-González, J. C., & Paz-Pellat, F. (2018). Forest fuel beds and carbon in Mexico. *Madera y bosques*, 24(spe).
- García Cano, V. (2024). Cambios en el régimen de caudales debido a los cambios climáticos y de coberturas vegetales en la cuenca del Río Claro departamento de Caldas. Universidad EIA.

- Gerez-Fernández, P., & Pineda-López, M. D. R. (2011). Los bosques de Veracruz en el contexto de una estrategia estatal REDD+. *Madera y bosques*, 17(3), 7-27.
- Ghasemi A, Zahediasl S. Normality tests for statistical analysis: a guide for non-statisticians. *Int J Endocrinol Metab*. 2012 Spring;10(2):486-9. doi: 10.5812/ijem.3505. Epub 2012 Apr 20. PMID: 23843808; PMCID: PMC3693611.
- Gómez-Baggethun, Erik, Corbera, Esteve & Reyes-García, Victoria. (2013). Traditional Ecological Knowledge and Global Environmental Change: Research findings and policy implications. *Ecology and Society*. 18. 10.5751/ES-06288-180472.
- Gordillo, N. M., Acosta, O. C., & Sánchez, J. L. M. (2008) (2). Captura de carbono en un remanente de Selva Alta Perennifolia en el Ejido Niños Héroes, Tenosique, Tabasco. *Kuxulkab'*, 14(26).
- Gordillo, N. M., Acosta, O. C., & Sánchez, J. L. M. (2008). Captura de carbono en un remanente de Selva Alta Perennifolia en el Ejido Niños Héroes, Tenosique, Tabasco. *Kuxulkab'*, 14(26).
- Gordillo, N. M., Acosta, O. C., & Sánchez, J. L. M. (2008). Captura de carbono en un remanente de Selva Alta Perennifolia en el Ejido Niños Héroes, Tenosique, Tabasco. *Kuxulkab'*, 14(26).
- Gowd, SC, Ganeshan, P., Vigneswaran, V., Hossain, MS, Kumar, D., Rajendran, K., Ngo, HH y Pugazhendhi, A. (2023). Perspectivas económicas y perspectivas políticas sobre captura, almacenamiento y utilización de carbono para el desarrollo sostenible. *La ciencia del medio ambiente total*, 163656.
- Hernández, M. E., & Moreno-Casasola Barceló, P. (2018). Carbon fluxes and stocks in freshwater wetlands in Mexico. *Madera y bosques*, 24(spe).
- Hosonuma, N., Herold, M., De Sy, V., De Fries, RS, Brockhaus, M., Verchot, L., ... y Romijn, E. (2012). Una evaluación de los factores que impulsan la deforestación y la degradación forestal en países en desarrollo. *Environmental research letters*, 7(4), 044009. DOI 10.1088/1748-9326/7/4/044009
- Huete A.R. A soil-adjusted vegetation index (SAVI). *Remote sensing of environment*, 1988. No 25 (3). P. 295-309.
- Ibarra-Montoya, J. L., Román, R., Gutiérrez, K., Gaxiola, J., Arias, V. y Bautista, M. (2011): Cambio en la cobertura y uso de suelo en el norte de Jalisco, México: Un análisis del futuro, en un contexto de cambio climático. *Ambiente & Agua- An Interdisciplinary Journal of Applied Science*, 6(2), 111-128. <http://dx.doi.org/10.4136/ambi-agua.189>
- INEGI. (2011). Síntesis de información geográfica del estado de Tabasco. https://www.inegi.org.mx/contenidos/productos/prod_serv/contenidos/espanol/bvinegi/productos/historicos/2104/702825223939/702825223939_2.pdf
- IPCC (2001). Cambio climático 2001. Informe de síntesis. Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático. 118-134.
- IPCC (2007). Cambio climático 2007. Informe de síntesis. Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático. 6-38.

- Jaimes, N. B. P. (2010). Descripción, análisis y simulación de procesos forestales en el Estado de México mediante tecnologías de la información geográfica (Doctoral dissertation, Universidad de Alcalá).
<https://portalcientifico.uah.es/documentos/6142af2e27af2147d1443abb>
- Jandl, R. (2005). Secuestro de carbono en bosques-El papel del suelo.
- Jiménez Cisneros, A. C., & Jara Guña, A. M. (2024). *Evaluación de la rentabilidad económica de granjas agroecológicas campesinas del cantón Pedro Moncayo-Ecuador* (Bachelor's thesis).
<http://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/28573>
- Jiménez, J. O. D., Llanos, R. O., & Ticllasuca, A. A. (2020). Captura de Carbono: Un enfoque sobre el cambio climático y los servicios ecosistémicos en el Perú. *Revista de Investigación Científica y Tecnológica Alpha Centauri*, 1(2), 2-14.
- Kaul, M., Mohren, G. M. J., & Dadhwal, V. K. (2010). Carbon storage and sequestration potential of selected tree species in India. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, 15, 489-510.
- Kpienbaareh, D., Sun, X., Wang, J., Luginaah, I., Bezner Kerr, R., Lupafya, E. y Dakishoni, L. (2021). Mapeo de tipos de cultivos y cobertura del suelo en el norte de Malawi mediante la integración de datos satelitales Sentinel-1, Sentinel-2 y PlanetScope. *Teledetección*, 13 (4), 700.
- Lamb, WF, Wiedmann, T., Pongratz, J., Andrew, R., Crippa, M., Olivier, JG, ... y Minx, J. (2021). Una revisión de las tendencias y los impulsores de las emisiones de gases de efecto invernadero por sector de 1990 a 2018. *Environmental research letters*, 16 (7), 073005.
- Lambin, EF, Geist, HJ y Lepers, E. (2003). Dinámica del cambio en el uso y la cobertura del suelo en regiones tropicales. *Revista Anual de Medio Ambiente y Recursos*, 28 (1), 205-241.
- Landeros, W. J. B. (2021). ENTRE LA CONSTRUCCIÓN DISCURSIVA Y LAS PRÁCTICAS PRODUCTIVAS: LAS DISPUTAS EN TORNO A LOS CULTIVOS TRANSGÉNICOS, EL GLIFOSATO Y LA POLÍTICA DE DESARROLLO RURAL EN EL GOBIERNO DE LA 4T.
<http://ciesas.repositorioinstitucional.mx/jspui/handle/1015/1441>
- Landívar Velásquez, M. D. (2017). Análisis de la eficiencia económica del manejo de bosque latifoliado siempre-verde como uso competitivo de la tierra en los principales territorios forestales en Mesoamérica.
- Ledesma, S. G., Sione, S. M. J., Ozsust, J. D., & Rosenberger, L. J. (2021). Estimación del contenido y captura potencial de carbono en la biomasa arbórea de bosques nativos del Espinal (Entre Ríos, Argentina). *Fave. Sección ciencias agrarias*, 20(1), 331-345.
- LEGUIZAMÓN, G. L. S. (2024). Los bajíos frailesicanos en Chiapas, México: un estudio socioagronómico del agroecosistema.
<https://repositorio.unach.mx/jspui/handle/123456789/4257>
- Li, Y., y He, C. (2008). Simulación de escenarios y pronóstico del uso y la cobertura del suelo en el norte de China. *Boletín Científico Chino*, 53 (9), 1401-1412.

- López Pedroso, I. (2022). *Sistema de acciones de educación ambiental para elevar el nivel de percepción de riesgo ambiental de la comunidad km 21 de la carretera a La Coloma* (Doctoral dissertation, Universidad de Pinar del Río " Hermanos Saíz Montes de Oca". Centro de Medio Ambiente y Recursos Naturales (CEMARNA)). <https://rc.upr.edu.cu/jspui/handle/DICT/4071>
- Madrid, A. M. J., Sandoval, J. T. R., & Silveira, M. L. (2012). Secuestro y Distribución de Carbono Orgánico del Suelo Bajo Diferentes Sistemas de Manejo de Pasturas: SL363/SS564, 1/2012. *EDIS*, 2012(3).
- Mairena Arias, G. A., & Rivas López, M. S. (2021). *Propuesta de estrategias de ordenamiento forestal sostenible en el Municipio El Castillo, Río San Juan* (Doctoral dissertation, Universidad Nacional Agraria).
- Maldonado, J. H., & Moreno-Sánchez, R. del P. (2023). Servicios ecosistémicos y biodiversidad en América Latina y el Caribe. Políticas para la respuesta al cambio climático y la preservación de la biodiversidad; Caracas: CAF-Banco de Desarrollo de América Latina y el Caribe. Retrieved from <https://scioteca.caf.com/handle/123456789/2051>
- Mas, J. F., Velázquez, A., & Couturier, S. (2009). La evaluación de los cambios de cobertura/uso del suelo en la República Mexicana. *Investigación ambiental Ciencia y política pública*, 1(1).
- Medina, C. E., Medina, Y. K., & Bocardo, E. F. (2020). Valoración económica del secuestro y almacenamiento de carbono en la puna seca del suroeste del Perú. *Bosque (Valdivia)*, 41(2), 165-172.
- Mendoza Sifuentes, A. (2023). Análisis temporal de Áreas Agrícolas y Urbanas mediante Google Earth Engine (GEE) e IDRISI en las Comunidades Campesinas del Maino y Levanto, Chachapoyas.
- Molano Pinilla, W. F. (2025). Análisis de imágenes hiperespectrales capturadas por aeronaves remotamente pilotadas para la clasificación y caracterización de la vegetación en un ecosistema de páramo: estudio de caso parque ecológico Matarredonda (noviembre 2018).
- Moreno, S. J. (2024). *Entre la paz territorial y la paz desde los territorios : experiencias y propuestas de la Escuela Agroecológica y Territorial Manuel Quintín Lame*. Recuperado de: <http://hdl.handle.net/20.500.12209/20190>.
- Morgado, R. L., García, J. G. S., & Mayoral, L. E. G. IX. (2020). Crecimiento de árboles de sombreado y producción de café en un sistema agroforestal: resultados experimentales. *DIAGNÓSTICO, PRODUCTIVIDAD Y AMBIENTE EN CAFETALES: estudios regionales y de caso*, 200.
- Mosquera Fonseca, Y. M., & Rivera Beltrán, M. A. Estimación del potencial de captura de dióxido de carbono en la Reserva Forestal Regional Productora del Norte de Bogotá DC Thomas Van Der Hammen (RTVdH) mediante el uso de la herramienta Ex-Act, como aporte a la mitigación del cambio climático (Doctoral dissertation, Universidad Santo Tomás).

- Mota, Markos & Lauer-Leite, Iani & Novais, Jaílson. (2023). Intergenerational transmission of traditional ecological knowledge about medicinal plants in a riverine community of the Brazilian Amazon. *Polibotánica*. 10.18387/polibotanica.56.16.
- Munguía, A. S. (2005). *Uso del suelo agropecuario y deforestación en Tabasco 1950-2000*. Univ. J. Autónoma de Tabasco.
- Murillo Pérez, L. M. (2022). *El emprendimiento social como motor de desarrollo sostenible: propuesta de un modelo para fortalecer la gestión del impacto social en los grupos de interés* (Doctoral dissertation, Universitat Politècnica de València).
- NASA. (s.f.). *Spectral band comparison tool*. NASA Landsat Science. <https://landsat.gsfc.nasa.gov/spectral-band-comparison-tool/>
- Nayak, N., Mehrotra, R., & Mehrotra, S. (2022). Carbon biosequestration strategies: A review. *Carbon Capture Science & Technology*, 4.
- Nocito, F., y Dibenedetto, A. (2020). Tecnologías de mitigación del CO2 atmosférico: captura, utilización y almacenamiento de carbono. *Química verde y sostenible*, 21, 34-43. <https://doi.org/10.1016/j.cogsc.2019.10.002>
- Nogia, P., Sidhu, G. K., Mehrotra, R., & Mehrotra, S. (2016). Capturing atmospheric carbon: biological and nonbiological methods. *International Journal of Low-Carbon Technologies*, 11(2), 266-274.
- Noseda, C. N. (2018). *Lógica y saberes campesinos en la zona Norte del Alto Paraná, Misiones y su aporte a una propuesta de Desarrollo Rural Sostenible* (Doctoral dissertation, Universidad Nacional de La Plata).
- Ordoñez Díaz, J. A. B. (1999). *Captura de carbono en un bosque templado: el caso de San Juan Nuevo, Michoacán*. Instituto Nacional de Ecología. SEMARNAP. México D.F. Junio. 72 p.
- Ordóñez, J. A., & De Jong, B. H. (2001). Almacenamiento de carbono en un bosque de *Pinus pseudostrobus* en Nuevo San Juan, Michoacán. *Madera y bosques*, 7(2), 27-47.
- Origel Rodríguez, I. E. (2020). *Saberes, semillas y sabores. Memoria biocultural en el Valle de Toluca* (Master's thesis, Universidad Internacional de Andalucía). <http://hdl.handle.net/10334/5895>
- Orta-Salazar C, Aguirre-Salado CA, Reyes-Hernández H, Reyes-Agüero JA, Muñoz-Robles CA (2021). Mapeo de áreas potenciales de conservación con elegibilidad para créditos de carbono forestal en un área natural protegida del norte de México. *Tropical Conservation Science*. 2021;14. doi: [10.1177/19400829211029448](https://doi.org/10.1177/19400829211029448)
- Palma-López, D. J., Cisneros, D. J., Moreno, C. E., & Rincón-Ramírez, J. A. (2007). Suelos de Tabasco: su uso y manejo sustentable. *Colegio de Postgraduados-ISPROTAB-FUPROTAB. Villahermosa, Tabasco, México*, 195.
- Palma-López, D. J., Vázquez, N. C. J., Mata, Z. E. E., López, C. A., Morales, G. M. A., Chable, P. R., ... & Palma-Cancino, D. Y. (2011). Zonificación de ecosistemas y agroecosistemas susceptibles de recibir pagos por servicios ambientales en la Chontalpa, Tabasco. *Colegio*

- de Postgraduados Campus Tabasco, Secretaría de Recursos Naturales y Protección Ambiental. Villahermosa, Tabasco, México.
- Palomeque de la Cruz, M. Á., Ruiz Acosta, S. D. C., Ramos Reyes, R., Magaña Alejandro, M. A., & Galindo Alcántara, A. (2021). Modelación de cambios de coberturas y uso de suelo en Nacajuca, Tabasco. *Revista mexicana de ciencias agrícolas*, 12(4), 655-669.
- Palomo Arroyo, Marcos (2012). Modelización del cálculo de Indicadores Ambientales, a partir de sensores ópticos de alta resolución temporal a bordo de satélite. Tesis (Doctoral), E.T.S.I. en Topografía, Geodesia y Cartografía (UPM). <https://doi.org/10.20868/UPM.thesis.14736>.
- Pena, N. R., Pastor, M. M., Hansen, L., García, A. M., & Cruzado, C. P. (2014). Cambios de la materia orgánica del suelo en una cronosecuencia forestal monitorizada mediante análisis térmico y calorimetría. *Spanish Journal of Soil Science*, 4(3).
- Pineda Jaimes, N. B., Bosque Sendra, J., Gómez Delgado, M., & Plata Rocha, W. (2009). Análisis de cambio del uso del suelo en el Estado de México mediante sistemas de información geográfica y técnicas de regresión multivariantes: Una aproximación a los procesos de deforestación. *Investigaciones geográficas*, (69), 33-52.
- Puliti, S., Breidenbach, J., Schumacher, J., Hauglin, M., Klingenberg, T. F., & Astrup, R. (2021). Above-ground biomass change estimation using national forest inventory data with Sentinel-2 and Landsat. *Remote sensing of environment*, 265, 112644.
- Quinn, J. W. (2001). Landsat 5 & 7 Band Combinations. <http://web.pdx.edu/~emch/ip1/bandcombinations.html>
- Ramírez Acevedo, A. (2025). Contribución de almacenamiento de carbono en agave potatorum: estrategia de desarrollo sostenible para comunidades mezcaleras del municipio de Tecali de Herrera, Puebla.
- Ramos Reyes, R., de la Cruz, M. Á. P., Vera, H. J. M., & Benítez, P. L. (2019). Modelación del cambio de uso del suelo en la Zona Costera: Cuauhtemotzin-El Pailebot, Tabasco, México. *Revista de Urbanismo*, (41).
- Ramos-Reyes, R., Palomeque-De la Cruz, M. Á., Megía-Vera, H. J., & Landeros-Pascual, D. (2021). Modelo del cambio de uso de suelo en el sistema lagunar Carmen-Pajonal-Machona, México. *Terra Latinoamericana*, 39.
- Ramos-Reyes, R., Sánchez-Hernández, R., & Gama-Campillo, L. M. (2016). Análisis de cambios de uso del suelo en el municipio costero de Comalcalco, Tabasco, México. *Ecosistemas y recursos agropecuarios*, 3(8), 151-160.
- Ranero, A. y Covalada, S. (2018). El financiamiento de los proyectos de carbono forestal: Experiencias existentes y oportunidades en México. *Madera y Bosques*. <https://doi.org/10.21829/myb.2018.2401913>
- Ranero, Alejandro, & Covalada, Sara. (2018). El financiamiento de los proyectos de carbono forestal: Experiencias existentes y oportunidades en México. *Madera y bosques*, 24 (spe), e2401913. <https://doi.org/10.21829/myb.2018.2401913>

- Rebollo, P. A., & Ábalos, E. M. (2022). *Metodología de la investigación/recopilación*. Editorial Autores de Argentina.
- Reyes, G. C., Trejo, H. H., & Sánchez, J. L. M. (2008). Captura de carbono en un pastizal de la ranchería Emiliano Zapata, centro, Tabasco. *Emerging Trends in Education*, 14(26), 9.
- Reyes-Basilio, I. B., Acosta-Hernández, A. C., González-Cásares, M., & Pompa-García, M. (2020). Perspectivas de los anillos de crecimiento para estimación potencial de carbono en México. *Madera y bosques*, 26(3).
- Rodríguez-Moreno, O. G., Nahed-Toral, J., Guevara-Hernández, F., Alayón-Gamboa, J. A., & Grande-Cano, J. D. (2020). Historia y caracterización técnica y socioeconómica de la ganadería bovina en la costa de Chiapas, México. *Tropical and Subtropical Agroecosystems*, 23(55), 1-13.
- Rontard, B., Reyes Hernández, H., & Aguilar Robledo, M. (2020). Pagos por captura de carbono en el mercado voluntario en México: diversidad y complejidad de su aplicación en Chiapas y Oaxaca. <https://doi.org/10.31840/sya.vi22.2106>
- ROUSE, J. W., HAAS, R. W., SCHELL, J. A., DEERING, D. H. y HARÍAN, J. C. 1974. Monitoring the vernal advancement andretrogadation (Greenwave effect) of natural vegetation. Greenbelt, MD. USA, NASA/GSFCT.
- Ruiz, M. B. J. (2024). Análisis de la Concordancia Entre los Tipos de uso de Suelo Respecto al Plan de Ordenamiento Territorial para el Periodo 2002, 2012 y 2022 de la Cuenca del Rio Canalete, Córdoba. Universidad de la costa.
- Sánchez-Pérez, B. R., Castillo-Acosta, O. & Cámara-Cabrales, L. C. (2011). Regeneración natural de la selva alta perennifolia en el parque estatal Agua Blanca, Macuspana, Tabasco, México. *Polibotánica*, (32), 63-88.
- Sandoval, M., Johnston, M. P., Drozd, A. A., & Derguy, M. R. (2016). Estimación de la superficie forestada en los departamentos de Colón, Concordia y Federación, Entre Ríos, en el período 1985-2015 con imágenes Landsat 5 y 8. In *XXX Jornadas Forestales de Entre Ríos (Concordia, Entre Ríos, 2016)*.
- Sarmiento, E. N. & Fonseca, O. D. (2023). *Observaciones de la tierra aplicadas al análisis del balance hídrico de cuencas hidrográficas mediante el uso de imágenes satelitales MODIS, IMERG, GRACE y GLDAS en la región de la Guajira, Colombia*. Recuperado de: <http://hdl.handle.net/11349/40581>
- Searchinger, T., Waite, R., Hanson, C., Ranganathan, J., Dumas, P., Matthews, E., y Klirs, C. (2019). Creación de un futuro alimentario sostenible: un menú de soluciones para alimentar a casi 10 mil millones de personas en 2050. Informe final.
- Semarnat. Informe de la Situación del Medio Ambiente en México. Compendio de Estadísticas Ambientales. Indicadores Clave, de Desempeño Ambiental y de Crecimiento Verde. Edición 2015. Semarnat. México. 2016.

- Sinha, S., Jeganathan, C., Sharma, L. K., & Nathawat, M. S. (2015). A review of radar remote sensing for biomass estimation. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 12(5), 1779-1792.
- Suárez Duque, D., Acurio, C., Chimbolema, S., & Aguirre, X. (2016). Análisis del carbono secuestrado en humedales Altoandinos de dos áreas protegidas del Ecuador. *Ecología Aplicada*, 15(2), 171-177.
- Suárez-Fernández, GE, Martínez-Sánchez, J., y Arias, P. (2025). Mejora de la estimación de reservas de carbono en bosques: Integración de predictores multidatos con el método de bosque aleatorio. *Ecological Informatics*, 86, 102997.
- Tilman, D., & Clark, M. (2014). Global diets link environmental sustainability and human health. *Nature*, 515(7528), 518-522.
- Tobías-Baeza, A., Salvador-Morales, P., Sánchez-Hernández, R., Ruiz-Acosta, S. D. C., & Andrade-Prado, H. (2019). Composición florística y carbono en la vegetación arbórea de un área periurbana en Tabasco, México. *Ecosistemas y recursos agropecuarios*, 6(17), 369-376.
- Torres-Rivera, J. A., Espinoza-Domínguez, W., Reddiar-Krishnamurthy, L., & Vázquez-Alarcón, A. (2011). Secuestro de carbono en potreros arbolados, potreros sin árboles y bosque caducifolio de Huatusco, Veracruz. *Tropical and Subtropical Agroecosystems*, 13(3), 543-549.
- Trinidad, F. W., Sol-Sánchez, Á., & Galindo-Alcántara, A. (2016). Evaluación de la rentabilidad económica y captura de carbono en plantaciones de cacao en el plan Chontalpa, Tabasco. *Rev. iberoam. bioecon. cambio clim.*, 2(1), 53-71.
- Tripti Singh, Ayyoob Arpanaei, Diego Elustondo, Yue Wang, Andrea Stocchero, Thales AP Oeste, Qiliang Fu. (2022). Tecnologías emergentes para el desarrollo de productos de madera con vistas a un almacenamiento extendido de carbono y captura de CO₂. Ciencia y tecnología de captura de carbono. 4. 100057. <https://doi.org/10.1016/j.ccst.2022.100057>
- U.S. Geological Survey. (n.d.). Landsat soil adjusted vegetation index (SAVI). U.S. Department of the Interior. <https://www.usgs.gov/landsat-missions/landsat-soil-adjusted-vegetation-index>
- Updegraff, K., Baughman, M. J., & Taff, S. J. (2004). Environmental benefits of cropland conversion to hybrid poplar: economic and policy considerations. *Biomass and bioenergy*, 27(5), 411-428.
- Valderrama López, C. F., Castillo Vargas, J. A., Torres Romero, J. C., Guzmán Lenís, A. R., Forero Ausique, V. F., Duque Chaves, C. M., ... & Montenegro Gómez, S. P. Capítulo 6 Secuestro y almacenamiento de carbono.
- Vargas-Simón G (2019) Resumen ejecutivo. Factores de presión. En: La biodiversidad en Tabasco. Estudio de Estado. Vol. III. CONABIO, México. pp: 17-19.
- Vázquez-González, C., Moreno-Casasola, P., Martínez-Vargas, J.A, López Ramírez, M.A., Hernández, M.E., Peralta, L.A. 2023. Economía azul y soluciones basadas en la naturaleza en los gradientes costeros. p. 375-404. En; Rivera-Arriaga E., Azuz-Adeath, I. (eds). La

- Década del Océano en México 2021-2030: La Ciencia que Necesitamos. RICOMAR, Universidad Autónoma de Campeche. 472 p. ISBN 978-607-8907-12-0. doi 10.26359/EPOMEX01202313
- Vega Ortega, M., Gallardo Yobal, S., Rebolledo Morales, A., & Contreras Hernández, C. (2024). ETNOBOTANÍA DE ÁRBOLES ÚTILES EN SISTEMAS AGROFORESTALES EN LA SIERRA DE ZONGOLICA, VERACRUZ, MÉXICO. *Agroecosistemas tropicales y subtropicales*, 27 (3). doi: <http://dx.doi.org/10.56369/tsaes.5592>
- Violette Geissen, José G. López de Llergo-Juárez, Adalberto Galindo-Alcántara y Rodimiro Ramos-Reyes (2008). EROSIÓN SUPERFICIAL Y CARSTIFICACIÓN EN MACUSPANA, TABASCO, SURESTE DE MÉXICO. *AGROCIENCIA*. 42 (6). 605-614.
- Von Thaden, J. J., Laborde, J., Guevara, S., & Mokondoko-Delgadillo, P. (2020). Dinámica de los cambios en el uso del suelo y cobertura vegetal en la Reserva de la Biosfera Los Tuxtlas (2006-2016). *Revista mexicana de biodiversidad*, 91.
- Waśniewski, A., Hościło, A. y Aune-Lundberg, L. (2023). El impacto de la selección de muestras de referencia y el DEM en la precisión de la clasificación de la cobertura terrestre basada en datos de Sentinel-2. *Aplicaciones de la teledetección: Sociedad y medio ambiente*, 32, 101035.
- Wilberforce, T., Olabi, AG, Sayed, ET, Elsaid, K. y Abdelkareem, MA (2020). Avances en las tecnologías de captura de carbono. *La ciencia del medio ambiente total*, 143203. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.143203>
- Wilberforce, T., Olabi, AG, Sayed, ET, Elsaid, K. y Abdelkareem, MA (2020). Avances en las tecnologías de captura de carbono. *La ciencia del medio ambiente total*, 143203.
- Zambrano, A., Franquis, F., & Infante, A. (2004). Emisión y captura de carbono en los suelos en ecosistemas forestales. *Revista Forestal Latinoamericana*, 35, 11-20.
- Zamora-Morales, B. P., Mendoza-Cariño, M., Sangerman-Jarquín, D. M., Quevedo Nolasco, A., & Navarro Bravo, A. (2019). La investigación científica en México: secuestro de carbono orgánico en suelos agrícolas y de agostadero. *Revista mexicana de ciencias agrícolas*, 10(1), 155-164.
- Zamora-Morales, B. P., Mendoza-Cariño, M., Sangerman-Jarquín, D. M., Quevedo Nolasco, A., & Navarro Bravo, A. (2019) (2). La investigación científica en México: secuestro de carbono orgánico en suelos agrícolas y de agostadero. *Revista mexicana de ciencias agrícolas*, 10(1), 155-164.
- Zárate, H. D. (2021). Metodología para la Integración de los componentes de las amenazas ambientales obtenidas por medio de RPAS (Sistema de Aeronave Pilotada Remotamente). Recuperado de: <http://hdl.handle.net/11349/29415>
- Zarco-Espinosa, V., Valdez-Hernández, J., Ángeles-Pérez, G., & Castillo-Acosta, O. (2010). ESTRUCTURA Y DIVERSIDAD DE LA VEGETACIÓN ARBÓREA DEL PARQUE ESTATAL AGUA BLANCA, MACUSPANA, TABASCO. *Universidad y Ciencia*, 26 (1), 1-17.

Zhu, X., Cai, F., Tian, J. y Williams, TKA (2018). Fusión espaciotemporal de datos de teledetección multifuente: Estudio bibliográfico, taxonomía, principios, aplicaciones y futuras orientaciones. *Teledetección*, 10 (4), 527.

XII. ANEXOS

12.1 Formato de la entrevista

Entrevista sobre el Manejo de Tierras y Recursos en Villa Benito Juárez, Macuspana, Tabasco.

Propósito de la Entrevista: El propósito de esta entrevista es documentar conocimientos tradicionales sobre el manejo del suelo y la selección de cultivos, así como recopilar historias orales que relaten la evolución de técnicas productivas a lo largo de diferentes generaciones. Esto contribuirá a la tesis titulada "Propuesta de Mejora del Secuestro de Carbono en la Villa Benito Juárez, Macuspana, Tabasco."

Nombre: _____ Generación: _____ Colonia: _____

1. ¿Sabe usted cual es el uso que se le ha dado a la tierra en esta región a lo largo del tiempo?
 - a) Sí, prácticas agrícolas heredadas de mis ancestros
 - b) Sí, prácticas ganaderas heredadas de mis ancestros
 - c) No estoy seguro(a) de los detalles específicos
 - d) No, se dedicaban a otra cosa.
2. ¿Qué cultivos eran los más comunes en el pasado en esta zona?
3. ¿Cómo se seleccionaban esos cultivos?
 - a) Por su resistencia a plagas y adaptación al clima
 - b) Por su rendimiento y valor nutricional
 - c) Por su demanda comercial
 - d) Otros criterios (especifique): _____
4. ¿Qué técnicas se utilizaban para mejorar la fertilidad del suelo?
 - a) Uso de abonos orgánicos elaborados con residuos de ganado
 - b) Quema de pastura y cultivos
 - c) Cultivos de cobertura para mantener la estructura del suelo
 - d) Aplicación de fertilizantes químicos adquiridos en la comunidad
5. ¿Qué técnicas se utilizaban para protegerlo de la erosión?
 - a) Rotación de ganado
 - b) Cercas vivas de plantas autóctonas para estabilizar el suelo
 - c) Uso de barreras mecánicas como zanjas y canales
 - d) No se utilizaban técnicas específicas anteriormente
6. ¿Cómo se realizaba riego en épocas anteriores y en la actualidad? ¿Conoce a alguien que tenga sistemas de riego?
 - a) Riego por inundación en el pasado, actualmente combinado con riego por goteo
 - b) Riego manual con baldes, actualmente automático por aspersión
 - c) Siempre se usó riego por surcos ajustado a nuevas tecnologías
 - d) No se realizaba riego anteriormente, actualmente con sistemas de riego tecnificados
7. ¿Qué cambios ha observado en la salud del suelo a lo largo de los años?
 - a) Mejora significativa debido a prácticas más amigables
 - b) No ha cambiado mucho, el suelo se mantiene estable
 - c) Deterioro moderado por cambios en el cultivo y uso intensivo
 - d) Deterioro severo debido a la falta de manejo adecuado
8. ¿Qué especies de árboles se desarrollan mejor en esta región?
9. ¿Por qué cree que es así?
 - a) adaptado al clima y suelos locales
 - b) nutrientes del suelo y microclima favorable
 - c) resistencia natural a plagas y enfermedades
 - d) otro: _____
10. ¿Cómo han cambiado las técnicas de cultivo desde la generación de sus abuelos hasta hoy?
 - a) Cambios significativos con la adopción de maquinaria agrícola
 - b) Cambios moderados con incorporación de técnicas mixtas
 - c) Pocas mejoras, predominan técnicas tradicionales
 - d) No han cambiado, continúan las mismas prácticas ancestrales
11. ¿Ha habido algún cambio significativo que haya impactado las prácticas agrícolas en la región?
 - a) Introducción de nuevas tecnologías agrícolas
 - b) Cambios en el clima que afectan los cultivos
 - c) Implementación de nuevas políticas gubernamentales
 - d) No ha habido cambios significativos en las prácticas
12. ¿Qué conocimientos y habilidades sobre el manejo del suelo y cultivos se han transmitido de generación en generación?
 - a) Técnicas de cultivo tradicional aprendidas de los ancestros
 - b) Conocimientos sobre abonos naturales y manejo de ganado
 - c) Estrategias de manejo de plagas y enfermedades comunes
 - d) Poco o ningún conocimiento ha sido transmitido
13. ¿Hay alguna práctica tradicional que considere particularmente valiosa y que todavía se utilice hoy en día?

Alojamiento de la Tesis en el Repositorio Institucional	
Título de Tesis:	Propuesta de mejora del secuestro de carbono de la Villa Benito Juárez, Macuspana, Tabasco.
Autor(a) o autores(ras) de la Tesis:	Eduardo Palomeque Jiménez
ORCID:	https://orcid.org/0009-0007-3023-1829
Resumen de la Tesis:	<p>El estudio "Propuesta de mejora del secuestro de carbono en la Villa Benito Juárez, Macuspana, Tabasco" evalúa y busca optimizar la captura de carbono para mitigar el cambio climático local y aumentar la resiliencia del ecosistema, en respuesta a las significativas emisiones del municipio. La metodología integró Sistemas de Información Geográfica (SIG) y teledetección, utilizando imágenes satelitales Landsat de 1986 y 2024. Se aplicó un modelo de clasificación supervisada (RandomForest) con una alta precisión global (87.26%) para analizar la cobertura terrestre. Este enfoque se complementó con 63 entrevistas semiestructuradas para documentar el conocimiento tradicional y un Modelo de Cambio de Márkov para analizar las dinámicas de uso del suelo. Los resultados revelan que el 61.7% del área (1,016.37 ha) aún conserva coberturas naturales —vegetación, pastizales y humedales— con potencial de secuestro. Sin embargo, el análisis temporal muestra una preocupante tendencia de expansión urbana y agrícola, resultando en una pérdida neta sustancial de humedales. Las proyecciones a 2054 indican una alta persistencia de las áreas construidas y la conversión continua de vegetación natural y humedales hacia usos</p>

	<p>agrícolas. A pesar de estos cambios, el conocimiento tradicional sobre manejo del suelo se mantiene constante entre generaciones. Se concluye que la implementación de prácticas sostenibles es fundamental para fortalecer la capacidad de secuestro de carbono. Por ello, se recomienda priorizar la protección de la vegetación remanente, la restauración ecológica de humedales y la promoción de sistemas agroforestales como estrategias clave.</p>
<p>Palabras claves de la Tesis:</p>	<p>Carbono, Vegetación, Suelo, SIG</p>
<p>Referencias citadas:</p>	<p>Bravo Morales, N. F. (2017). Teledetección espacial: LANDSAT, SENTINEL-2, ASTER L1T y MODIS: Teoría. GEOMÁTICA AMBIENTAL S.R.L.; Universidad Nacional Agraria de la Selva.</p> <p>Congedo, L., (2021). Plugin de clasificación semiautomática: Una herramienta de Python para la descarga y el procesamiento de imágenes de teledetección en QGIS. Journal of Open Source Software, 6(64), 3172, https://doi.org/10.21105/joss.03172</p> <p>Munguía, A. S. (2005). <i>Uso del suelo agropecuario y deforestación en Tabasco 1950-2000</i>. Univ. J. Autónoma de Tabasco.</p> <p>Palomeque de la Cruz, M. Á., Ruiz Acosta, S. D. C., Ramos Reyes, R., Magaña Alejandro, M. A., & Galindo Alcántara, A. (2021). Modelación de cambios de coberturas y uso de suelo en Nacajuca, Tabasco. <i>Revista mexicana de ciencias agrícolas</i>, 12(4), 655-669.</p> <p>Ramos Reyes, R., de la Cruz, M. Á. P., Vera, H. J. M., & Benítez, P. L. (2019). Modelación del cambio de uso del suelo en la Zona Costera: Cuauhtemotzin-El Pailebot, Tabasco, México. <i>Revista de Urbanismo</i>, (41).</p> <p>U.S. Geological Survey. (n.d.). Landsat soil adjusted vegetation index (SAVI). U.S. Department of the Interior. https://www.usgs.gov/landsat-missions/landsat-soil-adjusted-vegetation-index</p> <p>Vargas-Simón G (2019) Resumen ejecutivo. Factores de presión. En: La biodiversidad en Tabasco. Estudio de Estado. Vol. III. CONABIO, México. pp: 17-19.</p>